

Download artikel

**2.314**

Samlet antal visninger

**486**

Downloads



Se artiklens effekt

Del på



## ANMELD artikel

Foran. Environ. Sci. 28. februar 2024

Sec. Atmosfære og klima

Bind 12 - 2024 | <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1307840>

Denne artikel er en del af forskningsemnet  
Klima-miljøinteraktioner under global opvarmning - bind II

Se alle 10 artikler

# Paulownia-træer som en bæredygtig løsning til CO<sub>2</sub>-reduktion: vurdering af fremskridt mod 2050 klimamål



Hesham S. Ghazzawy<sup>1,2</sup> \*



Ahmed Bakr<sup>3</sup>



Abdallah Tageldein Mansour<sup>4,5</sup>



Mohamed Ashour<sup>6</sup> \*

<sup>1</sup> Date Palm Research Center of Excellence, King Faisal University, Al-Hasa, Saudi-Arabien

<sup>2</sup> Central Laboratory for Dadelpalmeforskning og -udvikling, Agriculture Research Center, Giza, Egypten

<sup>3</sup> Miljø- og biolandbrugsafdelingen, Fakultet for Landbrug, Al-Azhar Universitet, Kairo, Egypten

<sup>4</sup>

5 Animal and Fish Production Department, College of Agricultural and Food Sciences, King Faisal University, Al-Hasa, Saudi-Arabien

6 Fiske- og husdyrproduktionsafdelingen, Fakultet for Landbrug (Saba Basha), Alexandria University, Alexandria, Egypten

National Institute of Oceanography and Fisheries (NIOF), Cairo, Egypten

På grund af de progressive klimaændringer på vores planet er forskere interesserede i at løse dette problem, da det truer ikke kun visse regioner eller lande, men også verdens økosystemer og økonomier. Derfor er minimering af kuldioxid (CO<sub>2</sub>)-emissioner og reduktion af atmosfæriske niveauer globale prioriteter. Det er derfor nødvendigt på nuværende tidspunkt at udvikle en passende tilgang til at reducere eller stabilisere CO<sub>2</sub>-niveauer i atmosfæren. CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter er dog langsigtede, lavrentable og højrisiko miljøprojekter. Det er derfor nødvendigt at finde en passende og bæredygtig CO<sub>2</sub>-opsamlingstilgang, der er effektiv til at reducere atmosfæriske CO<sub>2</sub>-niveauer og samtidig have en sikker indvirkning på miljøet. Selvom kulstof (C) er den vigtigste grundlæggende komponent, der bruges til at producere biologiske forbindelser af fotosyntetiske organismer i landplanter, er C-vejen en nøglefaktor, der påvirker opfangningen af CO<sub>2</sub> af fotosyntetiske organismer. Blandt fotosyntetiske organismer er *Paulownia*, et multifunktionstræ, populært over hele verden på grund af dets tømmer og dets potentielle rolle i CO<sub>2</sub>-binding. *Paulownia spp.* tilhører familien Paulowniaceae og omfatter en gruppe træer. Disse træer findes primært i det sydøstlige Asien, især i Kina, og er blevet dyrket med vilje i mere end to årtusinder på grund af deres dekorative, kulturelle og medicinske værdi. Antallet af *Paulownia*-arter varierer afhængigt af taksonomisk klassificering, der spænder fra 6 til 17. Blandt dem er *Paulownia tomentosa*, *Paulownia elongata*, *Paulownia fortunei* og *Paulownia catalpifolia* de mest anerkendte og foretrukne arter. Nærværende gennemgang giver et omfattende teknisk-økonomisk scenarie for fangst af en million tons CO<sub>2</sub> af *Paulownia*-træer (som en terrestrisk plantemodell, dyrket på 2.400 ha). *P. tomentosa* kan bruges i agroforestry-systemer til at mindske drivhusgasemissioner (GHG) i byer og understrege kulstoflagringspotentialet i agroforestry. Som konklusion viste *Paulownia*-træer som et miljømæssigt masseprojekt stor opmuntring til investorer og regeringer til at udvide disse typer af projekter for at nå globale klimamål inden 2050.

## 1. Introduktion

Klimaændringsudfordringen er et globalt problem, der påvirker mange arter af planter og dyr, såvel som den menneskelige civilisation og jordens sundhed. Den fortsatte stigning i drivhusgasemissioner (GHG), såsom CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O og fluorholdige gasser, har kun været med til at forværre denne situation (Adams og Engel, 2021). Blandt drivhusgasser er kuldioxid (CO<sub>2</sub>) den vigtigste og essentielle for fotosyntesen, som opretholder planternes liv. Koncentrationen af CO<sub>2</sub> kan dog variere, idet naturgaskraftværker udleder CO<sub>2</sub> med en hastighed på 3%-4%, mens kulkraftværker frigiver det med en hastighed på 10%-13%. Omvendt kan bioraffinaderier have en CO<sub>2</sub>-koncentration på op til 80%. Generelt er mængden af atmosfærisk CO<sub>2</sub> globalt steget betydeligt, fra 313 ppm i 1960 til 411 ppm i 2020, og forventes at nå 450 ppm i 2035 (Santori et al., 2018). Dette kan resultere i en stigning på 2°C i den globale opvarmning og have stor indflydelse på den globale økonomi, med en 99% chance for dette resultat (Santori et al., 2018; Bushing, 2021). Øget atmosfærisk CO<sub>2</sub> anses dog for at være den overvejende årsag til globale klimaændringer (Shreyash et al., 2021).

Reduktionen af CO<sub>2</sub>-emissioner er et presserende globalt problem, og der skal lægges en strategi for at sænke eller opretholde CO<sub>2</sub>-niveauet i atmosfæren. På trods af omfattende forskning i reduktion af CO<sub>2</sub>-udledning ved fysiske og kemiske metoder er der flere miljømæssige, tekniske og økonomiske udfordringer. Derfor er det afgørende at finde en bæredygtig, rentabel og effektiv tilgang til at opfange CO<sub>2</sub>, der reducerer atmosfæriske CO<sub>2</sub>-niveauer bedre end fysiske og kemiske metoder (Kadlec et al., 2021). En undersøgelse udført af Prasad et al. (2021) fandt, at der er to afgørende tilgange til at reducere CO<sub>2</sub>-emissioner: 1) reduktion af afhængigheden af fossile brændstoffer og øget brug af vedvarende energikilder og 2) opsamling og lagring af CO<sub>2</sub> gennem biologiske, kemiske eller fysiske metoder (Shreyash et al., 2021). Osman et al. (2021) har identificeret tre primære metoder til CO<sub>2</sub>-opsamling, -lagring og -

udnyttelse: præ-forbrænding, post-forbrænding og oxyfuel forbrænding.

Blandt CO<sub>2</sub>-opsamlings- og -lagringsteknologier (CCS) er biologisk CCS den mest omkostningseffektive og miljøvenlige mulighed, idet den primært er afhængig af fotosyntetiske organismer såsom land- og vandplanter (Chu og Majumdar, 2012; Benedetti et al., 2018). Gennem fotosyntese kan fotoautotrofe organismer, herunder land- og vandplanter, omdanne CO<sub>2</sub> til kulstofbaserede produkter som sukkerarter, proteiner og lipider. Globalt kan disse organismer lagre solenergi med en hastighed på 120 TW y<sub>-1</sub> (Zhu et al., 2010). Det betyder, at fotoautotrofe organismer kan dække det globale energibehov med 800%. Derfor er den udbredte dyrkning af disse organismer en lovende løsning til at dække en betydelig del af verdens energibehov (Stephenson et al., 2011).

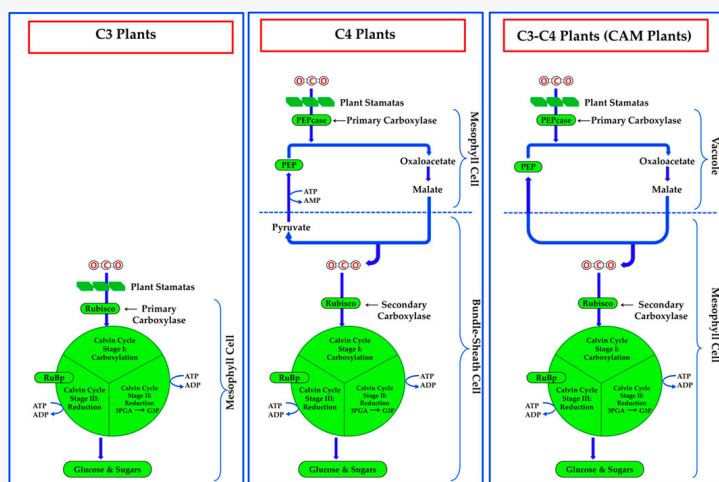
Adskillige offentliggjorte undersøgelser har rapporteret, at grønne byområder kan spille en afgørende rolle for at reducere byernes CO<sub>2</sub>-fodaftryk. Disse områder omfatter træer, parker, haver og kanaler og giver adskillige fordele, såsom forbedret luftkvalitet, reduceret støj, bevarelse af biodiversitet, afbødning af byvarmehøder, styring af mikroklima, jordstabilitet, genopfyldning af grundvand, undgåelse af jorderosion, og CO<sub>2</sub>-opsamling (Strohbach et al., 2012; Singh et al., 2018). Sådanne urbane grønne områder har sammen med vegetation, grønne områder og jordbund potentialet til at sænke atmosfæriske CO<sub>2</sub>-niveauer og påvirke CO<sub>2</sub>-kredsløbet (Chang et al., 2017; Roeland et al., 2019). I et andet værk har Chia et al. (2016) rapporterede, at skove ses som en måde at afbøde virkningerne af klimaændringer, da det er et globalt problem.

Skove spiller en afgørende rolle i kulstofbinding og lagrer kulstof i træer og jord. De leverer også adskillige andre økosystemtjenester, der er afgørende for menneskers velvære og planetens funktion. Skove giver et levested for utallige arter af planter og dyr, hvoraf mange er afgørende for bestøvning, skadedyrsbekæmpelse og næringsstofkredsløb. De spiller også en kritisk rolle i reguleringen af vandets kredsløb, hjælper med at forhindre erosion og oversvømmelser og giver rent drikkevand til nedstrøms samfund (Martínez Pastur et al., 2018; Chaudhry et al., 2021). I lang tid blev skov-CO<sub>2</sub>-fangstprojekter betragtet som højrisikoinvesteringer på grund af de lange tidsrammer, der var involveret. De er således blevet vedtaget relativt langsomt eller udelukket fra internationale kulstofmarkeder, såsom dem, der er etableret ved Kyoto-protokollen og EU's emissionshandelsordning (ETS). For nylig har over 25 offentlige fonde givet incitamenter til skovdrift relateret til kulstof i stedet for at stole på kulstofmarkeder. Dette hjælper regeringer med at styre deres skove bedre (van der Gaast et al., 2018). Resultaterne af Chia et al. (2016) stemmer overens med Osman et al. (2021), som udtalte, at kulstofprissætning er en effektiv tilgang til at fremme investeringer i kulstofbindings- og lagringsindustrien. Med hensyn til dette punkt har landplanter et attraktivt CO<sub>2</sub>-opsamlingspotentiale og høj biomasseproduktivitet. Træer har et gennemsnitligt CO<sub>2</sub> fangspotentiale på 1,78 tons CO<sub>2</sub> tons biomasse y<sub>-1</sub> og en gennemsnitlig biomasseproduktivitet på 2,6-3,9 tons ha<sub>-1</sub> y<sub>-1</sub> (Fuhrer og Molnar, 2003; Khan og Ansari, 2005).

At undersøge C-vejene i landplanter er afgørende for at vurdere deres evne til at absorbere atmosfærisk CO<sub>2</sub> og producere ilt (O<sub>2</sub>) gennem fotosyntese, samt deres bidrag til økosystemet. Fotosyntetiske cellers udveksling af CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> gennem deres cellevægge spiller en afgørende rolle i denne proces. Forståelse af de unikke kulstofveje i landplanter kan dog give værdifuld information om deres potentiale som et værktøj til CO<sub>2</sub>-opsamling (Kheyrodin og Kheyrodin, 2017). Når en plantes stomata er åbne, kommer CO<sub>2</sub> ind og udnyttes i fotosynteseprocessen. Samtidig kan O<sub>2</sub>, et biprodukt af fotosyntesen, undslippe. Men under varme og tørre forhold forstærkes dette problem, fordi mens stomataerne er åbne, mister planten også vand gennem transpiration. Som følge heraf kan effektiviteten af et anlægs CO<sub>2</sub>-fiksering variere. Planter fikserer CO<sub>2</sub> i atmosfæren gennem en af tre veje: C3, C4 og Crassulacean acid metabolisme (CAM) veje (Winter og Holtum, 2017).

C3-planter, som udgør mere end 85% af planter på Jorden (Kheyrodin og Kheyrodin, 2017), omtales som "C3-vejen", fordi det første molekyle, der skabes i cyklussen, er et 3-carbon-molekyle kaldet 3-phosphoglycerinsyre. Selvom C3-planter er de mest almindelige på planeten, vurderes C4-planter at være dobbelt så effektive til at fotosyntetisere som C3-planter, selvom denne forskel bliver mindre mærkbar i miljøer med højt CO<sub>2</sub> (Mondal et al., 2017). Denne øgede effektivitet skyldes, at C4-anlæg koncentrerer kulstof og reducerer kulstofftab under fikseringsprocessen. I modsætning hertil fikserer C3-planter CO<sub>2</sub> gennem Calvin-cyklussen, hvor RuBisCO-enzymet forårsager en oxidationsreaktion, der står for, at en del af den energi, der bruges i fotosyntesen, går tabt gennem fotorespiration. Som følge heraf er mængden af

kulstof, som planten fikserer og frigiver tilbage til miljøet som CO<sub>2</sub>, faldet med cirka 25 %. I C<sub>3</sub>-anlæg er hovedcarboxylasen RuBisCO, og hovedproduktet af RuBPs carboxylering er et sukker med tre kulstofatomer. Derudover katalyseres RuBPs iltning, som er første fase af fotorespiration, af RuBisCO i C<sub>3</sub>-planter (Zhu et al., 2010). Figur 1 viser kulstofvejene i planteceller. C<sub>4</sub>-vejen var ukendt indtil 1960'erne, hvor videnskabsmænd opdagede C<sub>4</sub>-vejen i sukkerrør. C<sub>4</sub>-vejen, også kendt som Hatch-Slack-cyklussen, er opkaldt efter de 4-carbon-mellemmolekyler, der blev genereret (æblesyre eller asparaginsyre).



FIGUR 1 . Kulstofveje (C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> og CAM) i planter.

I C<sub>4</sub>-planter er PEPCase-enzymet den vigtigste carboxylase, et 4-carbon-molekyle er det vigtigste carboxyleringsprodukt i lys, og en sekundær carboxylase er RuBisCO, som arbejder under høje CO<sub>2</sub>-forhold for at begrænse oxygenering og fotorespiration. C<sub>4</sub>-planter har et yderligere trin i deres vej, før de starter Calvin-cyklussen, hvilket reducerer mængden af kulstof, der går tabt i CO<sub>2</sub>-fikseringsprocessen (Santos et al., 2022; Silva Araújo et al., 2022). I C<sub>4</sub>-anlæg reagerer CO<sub>2</sub> med phosphoenolpyruvat for at producere 4-carbonsyrer (malat), som transporteres til bundtskedeceller, hvor CO<sub>2</sub> frigives og bruges i Calvin-cyklussen. Den typiske kulstofisotopsammensætning i C<sub>4</sub>-planter varierer fra 10% til 14%. I CAM-planter, som findes i ørken og lavvandede vandmasser, lukker stomata om dagen for at spare på vandet og åbner sig om natten for at absorbere CO<sub>2</sub>, der lagres som malat. I dagslys starter fotosyntesen gennem Calvin-cyklussen. Tabel 1 opsummerer forskellene mellem de tre veje, som beskrevet i forskellige undersøgelser (Hatfield et al., 2009; Carvajal, 2010; Kheyrodin og Kheyrodin, 2017; Guidi et al., 2019).

Item	C3	C4	CAM
Plant distributions on Earth	85% (approximately 250,000 species)	3% (approximately 7,600 species)	8% (approximately 16,000 species)
Optimum temperature	15–25 °C	30–40 °C	More than 40 °C
Habitat	Ample and luxurious areas (all photosynthetic plants)	Warm and grassland areas (tropical plants)	Humid and tropics areas (semi-arid conditions)
Photorespiration rate	High	Not seen	Seen in the noon time
Photosynthetic efficiency	Low	High	High
Photosynthetic performance	Only when the stomatal condition is open	Even stomatal condition is open or closed	Even stomatal condition is open or closed
Movement of stomata	Open during the daytime and close at night	Open during the daytime and close at night	Inverted (open at night and close at daytime)
Number of stomata	2000–3000	10,000–160,000	100–800
Involved cells	Mesophyll cells (C3)	Mesophyll cells (C3), followed by bundle sheath cells (C4)	Both C3 and C4 (mesophyll cells)
Secondary CO <sub>2</sub> fixation carboxylase enzyme	–	RuBisCO	RuBisCO
Carbon pathway (cycle)	C3 cycle (Calvin cycle)	Hatch-Slack cycle (C4) assists the Calvin cycle (C3)	Hatch-Slack cycle (C4) assists the Calvin cycle (C3) using the Crassulacean acid metabolism
First product from CO <sub>2</sub> fixation	PGA	Malate (day and night)	Malate (night only)
CO <sub>2</sub> assimilation efficiency	Low	High	High
CO <sub>2</sub> assimilation rate	Low	High	High
(NADPH: ATP, respectively) required number to produce glucose molecule	12: 18	12: 30	12: 39
Ratio of (CO <sub>2</sub> : ATP: NADPH), respectively	1: 3: 2	1: 5: 2	1: 6: 5
Plant types	Hydrophytic, mesophytic, and xerophytic plants	Mesophytic plants	Xerophytic plants
Species examples of terrestrial plants	Most grasses and trees, spinach, peanuts, cotton, wheat, rice etc.	Paulownia, corn, sugarcane, maize, sorghum, millet, sorghum, pineapple, daisies, cabbage etc.	Cacti, orchids, jade, sedum, agave etc.

**TABEL 1 .** Vigtigste forskelle mellem C3-, C4- og CAM-veje.

Paulownia-træer, også kendt som "prinsessestræet", er en del af Paulowniaceae-familien og har tiltrukket sig opmærksomhed for deres potentiale til at opfange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Disse træer har en hurtig væksthastighed og er kendt for deres enestående kulstofbindingsevner. Når de dyrkes i store mængder, kan de absorbere betydelige mængder CO<sub>2</sub>, hvilket gør dem til en lovende løsning til at bekæmpe virkningerne af klimaændringer ( Janjić og Janjić, 2019 ).

Flere undersøgelser har vist, at Paulownia-træer kan optage op til dobbelt så meget CO<sub>2</sub> sammenlignet med andre træarter. CO<sub>2</sub> absorberet af Paulownia træer lagres i deres træ og jord, hvilket gør dem til effektive langtids kulstofdræn. Derudover er disse træer modstandsdygtige over for skadedyr og kræver minimal tilførsel af vand, gødning og pesticider ( Magar et al., 2018 ; Jakubowski, 2022 ; Testa et al., 2022 ). Paulownia-træernes popularitet er steget i vejret på grund af deres bemærkelsesværdige CO<sub>2</sub>-opsamlings- og lagringsevne ( Icka et al., 2016b ; Magar et al., 2018 ). De er kendt for deres høje produktivitet og kulstofbindingspotentiale og betragtes bredt som værdifulde aktiver i kampen mod klimaændringer ( Dong et al., 2014 ). Desuden er de alsidige og kan bruges til en række formål, såsom tømmer, byggematerialer og musikinstrumenter. Med deres evne til at absorbere og opbevare betydelige mængder CO<sub>2</sub> er Paulownia-træer blevet et populært valg til genplantning af skov og kulstofkompensationsprojekter. Effektiviteten af disse træer til at opfange CO<sub>2</sub> er betinget af forskellige faktorer, såsom placering, vækstbetingelser og forvaltningspraksis ( Jakubowski, 2022 ).

En omfattende evaluering af hele livscyklussen for Paulownia-træer, inklusive deres høst og forarbejdning, er afgørende for at bestemme deres faktiske CO<sub>2</sub>-fodaftryk. Paulownia-træernes potentiale til at opfange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren er betydeligt, men der kræves mere forskning og analyse for at forstå dets effektivitet og begrænsninger med hensyn til C-bindingsevne og information om *P. tomentosa* og dens implementering til CO<sub>2</sub>-reduktion. Dette arbejde tilbyder en gennemgang af kulstofveje i terrestriske fotosyntetiske planter samt en dybdegående vurdering af terrestriske planters, især Paulownia-slægtens, evne til at fange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Undersøgelsen indeholder også et detaljeret tekno-økonomisk scenarie, der sigter mod at fange en million tons CO<sub>2</sub> ved hjælp af Paulownia-arten. De forventede resultater ved brug af Paulownia evalueres og diskuteres nøje. Endelig giver arbejdet et samlet overblik over igangværende CO<sub>2</sub>-kreditprojekter og vurderer udsigterne til at nå de globale klimamål inden 2050.

## 2 Terrestriske planters rolle i CO<sub>2</sub>-opsamling til biomasseproduktion

Under biofysiske processer optager træer og frigiver CO<sub>2</sub> til atmosfæren. I processen med fotosyntese optager blade CO<sub>2</sub> gennem deres stomata og udnytter energien fra solen til at omdanne den til O<sub>2</sub>, kulhydrater og vand. Disse stoffer bruges derefter til at skabe træets strukturer, såvel som de vitaminer, harpikser og hormoner, der kræves for træets udvikling, vækst og sundhed. Træer får deres energi fra de kulhydrater, der produceres under fotosyntesen. Træets nettooplagering af CO<sub>2</sub> er resultatet af samspillet mellem fotosyntese og respiration (Aguaron og McPherson, 2012). Byernes grønne områder, især dem med træer, har nemlig et stort potentiale til at opfange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren og reducere virkningerne af klimænderinger i byområder. Flere undersøgelser har dog rapporteret, at grønne områder i byerne kan være afgørende for at reducere CO<sub>2</sub>-fodspor (Strohbach et al., 2012; Nouri et al., 2019; Sharma et al., 2020). Som tidligere rapporteret af Sharma et al. (2020) er der tre måder at reducere CO<sub>2</sub>-niveauer naturligt i atmosfæren på: (I) øge atmosfærisk CO<sub>2</sub>-opsamlingshastighed gennem træplantning; (II) reducere energiefterspørgslen; og (III) øge efterspørgslen efter bioenergi og udnyttelsen af bioenergi. Udtrykket "atmosfærisk CO<sub>2</sub> lagring" beskriver akkumulering af træagtig biomasse, der ophobes over tid, efterhånden som planter vokser. Den årlige hastighed for CO<sub>2</sub>-optagelse i biomasse i en vækstsæson kaldes "atmosfærisk CO<sub>2</sub>-binding." Sekvestrering er afhængig af trævækst og -død, som er stærkt afhængig af artsdiversitet og demografiske faktorer såsom byskovens alder. Kulstof, der er lagret et sted på et bestemt tidspunkt, kaldes "kulstoflager". Kulstoflagre i skove omfatter levende og stående døde planter, træaffald og affald, organisk materiale til stede i jorden og høstede lagre som tømmer til træprodukter og brændsel (Robards, 2008). Ifølge Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) rapport (Pedersen et al., 2022) involverer planteøkosystemet fem store kulstofpuljer, nemlig 1) overjordisk biomasse (AGB), 2) underjordisk biomasse (BGB), 3) dødt ved, 4) detritus og 5) organisk stof i jorden. Når træer dør, bliver biomassen en del af fødekæden eller bliver til kulstof i jorden (Suryawanshi et al., 2014). Den gennemsnitlige hastighed for CO<sub>2</sub>-binding i træer er dog hovedsageligt påvirket af faktorer som træets størrelse ved modenhed, levetiden og væksthastigheden (Novak og Crane, 2002). For at bestemme mængden af CO<sub>2</sub> lagret i træer brugte Aguaron og McPherson (2012) allometriske formler, der tager højde for flere egenskaber, herunder diameter ved brysthøjde (DBH), stedindeks, højde, fugtindhold, trææthed og overordnede træforhold. Disse karakteristika kan variere mellem arter og endda inden for individuelle træer, hvilket gør det vanskeligt at bestemme et nøjagtigt gennemsnit. De allometriske biomasseligninger, der bruges til denne beregning, kommer i to former: volumetrisk og direkte. Den volumetriske ligning beregner et træs overjordiske volumen ved hjælp af DBH og højde, mens den direkte ligning bestemmer tørvægten over jorden ved hjælp af de samme variable (Domec og Gartner, 2002). Undersøgelsen udført af MacDicken (1997) konkluderede, at træbiomasse, herunder AGB, BGB, total biomasse (TB), kulstofindhold (CC) og ækvivalent CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-Ækv), kan estimeres ved at måle diameteren ved træets brysthøjde (DBH, cm) ved hjælp af morfometriske ligninger. Disse ligninger blev designet specifikt til et tørt klima med en gennemsnitlig sæsonbestemt nedbør på op til 1.500 mm.

$$AGB \text{ (kg)} = 34,4703 - (8,0671 \times DTBH) + (0,6589 \times DTBH^2),$$

$$BGB \text{ (kg)} = AGB \times (15/100),$$

$$TB \text{ (kg)} = AGB + BGB,$$

$$CC \text{ (kg)} = 0,5 \times TB,$$

$$\text{CO}_2\text{-lign. (kg)} = (\text{CC} \times 44)/12.$$

Som beskrevet i undersøgelsen af Sharma et al. (2020), AGB, BGB, TB, CC og CO<sub>2</sub>-Eq blev beregnet for flere træer, der almindeligvis anvendes til konstruktion af landskaber og grønne bæltter. Tabel 2 viser middelværdierne (baseret på 10 træer) for AGB, BGB, TB, CC og CO<sub>2</sub>-Eq fundet i Godavari Botaniske Have i Nepal (Magar et al., 2018) og på Amity University Campus i Indien (Sharma et al., 2020).

Common name	Scientific name	AGB (kg)	BGB (kg)	TB (kg)	CC (kg)	CO <sub>2</sub> -Eq. (kg)
Paulownia tree*	<i>Paulownia tomentosa</i>	6.92	1.38	8.3	4.15	15.21
Paulownia tree**	<i>Paulownia tomentosa</i>	361.47	72.29	433.76	203.86	747.48
Paulownia tree***	<i>Paulownia tomentosa</i>	472.20	115.43	587.63	293.81	1,077.32
Weeping fig	<i>Ficus benjamina</i>	332.1	49.8	382.0	191.0	700.3
Indian laburnum	<i>Cassia fistula</i>	335.3	50.3	385.6	192.8	706.9
White Frangipani	<i>Plumeria obtusa</i>	334.3	50.1	384.4	192.2	704.8
Flame tree	<i>Delonix regia</i>	326.2	48.9	375.2	187.6	687.8
Kadam	<i>Nolamarcia cadamba</i>	327.5	49.1	376.6	188.3	690.4
Laurel fig	<i>Ficus microcarpa</i>	331.3	49.7	381.0	190.5	698.6
Indian mahogany	<i>Chukrasia tabularis</i>	330.5	49.6	380.1	190.0	696.8
Drumstick tree	<i>Moringa oleifera</i>	326.3	48.9	375.2	187.6	687.9
Silver oak	<i>Grevillea robusta</i>	328.4	49.3	377.7	188.9	692.5
Royal palm	<i>Roystonea regia</i>	329.4	49.4	378.8	189.4	694.5
Bottlebrush tree	<i>Callistemon viminalis</i>	334.3	50.2	384.5	192.3	704.9
Eucalyptus	<i>Eucalyptus sp.</i>	321.1	48.2	369.3	184.6	677.0
Banana	<i>Musa sp.</i>	334.2	50.1	384.4	192.2	704.7
Spanish cherry	<i>Mimusops elengi</i>	329.9	49.5	379.4	189.7	695.6
Neem	<i>Azadirachta indica</i>	327.0	49.1	376.0	188.0	689.4
Pride of India	<i>Lagerstroemia speciosa</i>	332.2	49.8	382.1	191.0	700.4
Dwarf white orchid	<i>Bauhinia acuminata</i>	332.0	49.8	381.8	190.9	699.9
Indian rosewood	<i>Dalbergia sissoo</i>	329.0	49.4	378.4	189.2	693.7
White fig	<i>Ficus virens</i>	327.4	49.1	376.5	188.2	690.2
Indian gooseberry	<i>Phyllanthus emblica</i>	324.0	48.6	372.5	186.3	683.0
White mulberry	<i>Morus alba</i>	326.1	48.9	375.0	187.5	687.4
Date palm	<i>Phoenix dactylifera</i>	318.4	47.8	366.2	183.1	671.3
Sacred fig	<i>Ficus religiosa</i>	310.9	46.6	357.5	178.8	655.5
Bamboo	<i>Bambusa vulgaris</i>	255.0	38.2	293.2	146.6	537.5
Scholar's tree	<i>Astonia scholaris</i>	252.2	37.8	290.1	145.0	531.8
Copper pod	<i>Pectophorum pterocarpum</i>	201.6	30.2	231.9	115.9	425.1

(\*), (\*\*), and (\*\*\*) average values of 100, 30, and 30 trees of Paulownia (*Paulownia tomentosa*), cultured at Godavari Botanical Garden, Nepal, under the age of 4 months (\*), 4 years (\*\*), and 5 years (\*\*\*), respectively (Magar et al., 2018).

**TABEL 2 . CO<sub>2</sub>-ækvivalentindhold i nogle træarter, der anvendes til konstruktion af CO<sub>2</sub>-opsamling, landskab og grønne bæltter.**

IPCC-rapporten påviste, at grønne byområder (grønne bæltter) kan reducere atmosfærisk kulstof på tre primære måder (Pörtner et al., 2022). Først absorberes atmosfærisk CO<sub>2</sub> af bladene, og en del af denne adsorbere CO<sub>2</sub> frigives derefter til atmosfæren. Den resterende del opbevares i plantevævet, både AGB og BGB (total biomasse), hvilket fører til plantevækst i form af biomasse. For det andet betragtes jord som en af de største bidragsydere til kulstoflagre, fordi de kun udgør en lille del af de samlede kulstoflagre; affald og dødt ved er ikke væsentlige kilder til kulstof. For det tredje minimerer byområder behovet for opvarmning ved at sænke vindhastigheden og behovet for at afkøle infrastruktur ved at tilbyde skygge og fordampning. Dette mindsker væsentligt behovet for at bruge fossile brændstoffer til at generere energi, hvilket udligner kulstofemissioner (Jo, 2002).

De fleste offentliggjorte undersøgelser af kulstof har fokuseret på AGB, fordi BGB-vurderinger i sagens natur er dyrere og tidskrævende. Der er stadig efterspørgsel efter pålidelige BGB-ligninger, selvom meget få

undersøgelser har koncentreret sig om at skabe ligninger til at forudsige BGB baseret på ligetil trævariable ( Hertel et al., 2009 ; Ziegler et al., 2012 ; Yuen et al., 2013 ; Kralicek . et al., 2017 ). Mængden af CO<sub>2</sub> fanget pr. hektar ved hjælp af formlen baseret på plantefotosyntese og trækemiske sammensætning kan estimeres ved at beregne den gennemsnitlige årlige stigning af træerne, og denne værdi blev estimeret til at være 981 kg m<sup>-3</sup> ( Fuhrer og Molnar, 2003 ).

Intelligent udvælgelse af effektive og egnede arter, samt deres korrekte forvaltning i byrum, er afgørende for at øge potentialet og succesen for disse områder ( Bhalla og Bhattacharya, 2015 ; Ram et al., 2015 ). For at garantere ethvert grønt bælteprojekts succes skal de specifikke træarter derfor identificeres, før projektplanlægningen påbegyndes. Undersøgelsen af Alotaibi et al. (2020) undersøgte, hvilke specifikke, effektive og tolerante træarter der skal plantes og bruges inden for rammerne af "Green Riyadh Project", et af de begrænsede grønne-bælte-projekter. Denne undersøgelse havde til formål at vurdere luftforureningstoleranceindekset (APTI) forbundet med det forventede præstationsindeks (API) for fem træarter ( *Ficus altissima* , *Eucalyptus camaldulensis* , *Ziziphus spina-christi* , *Albizia lebbek* og *Prosopis juliflora* ), som normalt plantes og bruges langs vejkanter og omkring industri- og boligområder. Fire forskellige Riyadh-steder blev brugt til at indsamle bladprøver: et boligområde, et travlt kryds, et industriområde og et referencested, der var cirka 20 km uden for byen. Baseret på APTI- og API-ydelsesdataene konkluderede de, at planlægningen af det grønne bælte i "Green Riyadh Project" skal omfatte dyrkning af *Ficus altissima* i vejkanter og tunge industriområder, efterfulgt af *Z. spina-christi* og *A. lebbek*.

### 3 Nuværende kulstofkreditindustrier og -projekter

For at nå målet om at reducere den globale CO<sub>2</sub>-udledning inden 2050 er der et stigende behov for projekter, der opfanger CO<sub>2</sub>. Forskellige strategier er blevet foreslået og implementeret i hele verden, herunder forbedring af energieffektiviteten, implementering af en kulstofafgift, øget produktion af vedvarende energi, plantning af træer og opsamling af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren i kraftværker ( Nunez, 2019 ). Kulstoffangst og -lagring (CCS) og kulstoffangst, -anvendelse og -lagring (CCUS) betragtes som effektive løsninger til at håndtere klimaændringer. Efterhånden som klimakrisen forstærkes, bliver CCS/CCUS-projekter mere og mere almindelige. I en omfattende undersøgelse af CCUS-systemer gennemgik Hong (2022) teknologier til CO<sub>2</sub>-opsamling, -separering, -transport, -udnyttelse og -lagring. Undersøgelsen indikerede forskellige metoder til CO<sub>2</sub>-opsamling, såsom industriel separation, for- og efterforbrænding, oxyfuel-forbrænding, kemisk looping-forbrænding og direkte luftindfangning (DAC). Derfor fokuserer den aktuelle undersøgelse specifikt på DAC-teknologi ved hjælp af biologisk adsorption gennem træer og mikroalger. Undersøgelser af Deutz og Bardow (2021) , Keith et al. (2018) , og Abanades et al. (2020) har vist, at effektiviteten af CO<sub>2</sub>-fjernelse, energiforbrug og omkostninger for DAC-teknologien er 85 %–93 % vol, 5,25 GJ tons<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> og USD 140–USD 340 tons<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>, henholdsvis. Carbon credit-prissætning er et afgørende aspekt i at fremme udviklingen og væksten af CO<sub>2</sub>-opsamlingsteknologier ( Lefvert et al., 2022 ). For at gøre disse teknologier kommercielt levedygtige er det vigtigt at have attraktive kulstofprismekanismer, såsom kulstofafgifter eller kvoter. Værdien af kulstofafgifter varierer fra land til land, fra nogle få US\$ til 100 US\$ pr. ton CO<sub>2</sub>. I 2017 blev kulstofkvotækvivalenten vurderet til 5,17 dollars pr. ton CO<sub>2</sub>, og den forventes at stige til 47,25 USD pr. ton CO<sub>2</sub> i 2023 ( Chen et al., 2020 ; Osman et al., 2021 ). I 2020 var der 22 demo-CO<sub>2</sub>-fangstprojekter rundt om i verden, hvor USA og Kina var hovedbidragsyderne med henholdsvis syv og fem projekter ( Vega et al., 2020 ). Antallet af kommercielle CO<sub>2</sub>-fangstprojekter har været støt stigende, med en rapporteret stigning fra 51 projekter i 2019 til 135 projekter i 2021 ( Turan et al., 2021 ). I september 2021 blev den globale CO<sub>2</sub>-opsamlingskapacitet anslået til 49,4 millioner tons om året.

Nord- og Sydamerika havde den højeste CO<sub>2</sub>-opsamlingskapacitet og bidrog med 58,5 % af alle globale projekter. Europa blev nummer to med i alt 38 projekter og 28,1 % af globale projekter ( E Silva og Costa, 2021 ), mens Asien-Stillehavsregionen blev nummer tre med 14 projekter ( Steyn og Havercroft, 2021 ). Mellemøsten har det laveste antal kommercielle CCS/CCUS-projekter, der kun repræsenterer 10 % af den globale CO<sub>2</sub>-fangede ( Turan et al., 2021 ), med en samlet CO<sub>2</sub>-opsamlingskapacitet nået i september 2021 på 3,8 millioner tons CO<sub>2</sub> y<sup>-1</sup>. I Mellemøsten-regionen var det samlede antal CCS/CCUS



kommercielle projekter fire, der kom fra tre lande (et i Qatar, et i Saudi-Arabien og to i De Forenede Arabiske Emirater) ( Steyn og Havercroft, 2021 ). Den Europæiske Union sigter mod at opnå netto-nul CO<sub>2</sub>-emissioner i 2050, hvilket fører til en stigning i CCS/CCUS-projekter og -faciliteter i regionen. Den britiske regering har investeret 1 milliard GBP i CCS/CCUS-faciliteter for at etablere fire industrielle klynger, der vil være i stand til at opfange 10 millioner metriske tons CO<sub>2</sub> om året i 2030 ( Turner et al., 2021 ). Denne investering har bidraget til væksten af CCS/CCUS-projekter og -faciliteter i EU, hvilket har ført til en stigning på 32 % i den maksimale CO<sub>2</sub>-opsamlingskapacitet. Denne kapacitet steg til 37,4 millioner tons CO<sub>2</sub> om året i september 2021, op fra 28,4 millioner tons CO<sub>2</sub> i 2020 ( Turan et al., 2021 ; E Silva og Costa, 2021 ). Som reaktion på den globale stigning i kulstofemissioner og faldet i kulstofbudgettet er brugen af CCS-teknologi blevet mere og mere kritisk i forhold til at håndtere klimaændringer. Derfor er brugen af CCS-teknologi blevet mere og mere afgørende for at afbøde virkningen af stigende globale kulstofemissioner. IEA har skitseret et bæredygtigt udviklingsscenarie (IEA-SDS), der kræver, at CCS skal reducere de globale emissioner med 9 %. IEA-SDS sigter mod at reducere verdens årlige CO<sub>2</sub>-emissioner fra 33 til 10 gigaton i 2050, hvilket kræver udvikling af 2.000 kommercielle CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter. Det betyder, at der skal bygges anslået 70 til 100 nye projekter hvert år, hvilket kræver en samlet kapitalinvestering på mellem 655 og 1.280 milliarder USD ( Rassool, 2021 ; Yan et al., 2021 ). På den anden side inkorporerer forskere CCS i deres scenariemodeller som et middel til effektivt at opfange og lagre CO<sub>2</sub> i geologiske formationer. Dette stemmer overens med målene skitseret i Paris-aftalen og afspejles i Sustainable Development Scenario (IEA-SDS) ( Newell et al., 2021 ; Berrada et al., 2022 ).

På grund af de høje omkostninger ved implementering er investeringer i den private sektor afgørende for finansieringen af CCS-projekter. Størstedelen af finansieringen forventes at komme fra gæld, finansmarkeder og statslige formuefonde, da regeringer muligvis ikke er i stand til at stille den nødvendige kapital til rådighed inden for den krævede tidsramme. Ifølge Global CCS Institute Report 2021 ( Rassool, 2021 ) forventes priserne på CCS-systemer at falde, efterhånden som flere projekter implementeres, men faldet afhænger af flere variabler, såsom geografi og industri. CCS-indlæringsraten forudsiger en omkostningsreduktion på 10%-25% for hver fordobling af installeret kapacitet, hvilket fører til et anslået samlet kapitalbehov på 655-1.280 milliarder US \$.

Udviklingslande mangler stadig tilstrækkelige regeringsledede programmer, der anerkender værdien af CO<sub>2</sub>. Imidlertid er programmer, der tilskynder til investeringer i CO<sub>2</sub>-fangst, blevet implementeret med succes i udviklede lande i form af kulstofkreditter. Disse kreditter bruges til at kompensere for emissioner og finansiere modvirkningsprojekter i mindre udviklede lande. Det mest kendte eksempel på et krediteringssystem er Clean Development Mechanism (CDM) under Kyoto-protokollen ( Bajaj, 2022 ). Rapporten af Doda et al. (2021) fandt, at det frivillige kulstofmarked (VCM) vokser hurtigt i kulstofkreditindustrien, men de bemærkede også, at disse kreditter alene ikke vil være nok til at imødegå alle klimarisici. De konkluderede, at investeringer i CO<sub>2</sub>-opsamling gennem både naturlige og tekniske midler, herunder CCS, er nødvendig. Derudover kan investeringer i CO<sub>2</sub>-opsamling foretages gennem VCM'er, da behovet for compensation bliver stadig vigtigere. Mere end 612 millioner USD i CO<sub>2</sub>-kreditter blev ydet gennem VCM-programmer mellem 2007 og 2019, herunder 142 millioner USD i 2019 ( Doda et al., 2021 ).

## 4 Taksonomi, karakteristika og dyrkning af Paulownia

### 4.1 Paulownia-klassifikation og botanisk beskrivelse

Tidligere blev Paulownia klassificeret som medlem af Scrophulariaceae-familien før dens nuværende klassificering som medlem af Paulowniaceae-familien ( Schneiderová og Šmejkal, 2015 ). Der er mangel på konsensus om det nøjagtige antal Paulownia-arter, da taksonomiske klassifikationer varierer. Afhængig af klassificeringen varierer antallet af arter fra 6 til 17 ( Kadlec et al., 2021 ). I undersøgelsen udført af Li et al. (2020) er otte arter af Paulownia blevet defineret, nemlig *P. catalpifolia*, *P. tomentosa*, *P. australis*, *P. kawakamii*, *P. coreana*, *P. fortune*, *P. fargesii* og *P. elongata*. Den kinesiske flora-redaktionskomité adskiller sig dog i sin klassificering, da den ikke genkender *P. coreana*, men i stedet indeholder to yderligere variationer af *P. tomentosa*: *P. tomentosa* var. *tomentosa* og *P. tomentosa* var. *tsinlingensis* ( Cheng et al., 2019 ). Derudover har andre undersøgelser anerkendt *P. albiflora*, *P. taiwaniana* og *P. glabrata* ( Yadav et al., 2013 ; He et al., 2016 ).

Typisk når et modent Paulownia-træ en højde på mellem 20 og 30 m; det højeste registrerede eksemplar var 50 m ( Icka et al., 2016a ; Yi et al., 2020 ). Stammen er typisk ca. 1 m tyk, men kan blive 2 m under passende miljøforhold. Under normale miljøforhold har stammen på et modent Paulownia-træ generelt en diameter på cirka 1 m. Men under gunstige miljøforhold kan stammen blive endnu tykkere og nå op til 2 m i diameter ( Kadlec et al., 2021 ). Paulownia træer har omfattende og veludviklede rodsystemer, der kan strække sig op til en dybde på 8 m i jorden. Den øverste del af rødderne er tæt pakket og udviser forgrening og dikotome vækstmønstre. Træets bark er typisk brun eller sort. Hos unge Paulownia-træer begynder linser at dannes, og efterhånden som træet modnes, udvider disse linser sig og udvikler sig til sidst til lodrette revner på barkens overflade ( Jakubowski et al., 2018 ).

Modne Paulownia-træer har paraplyformede blade, der måler cirka 10-12 cm i bredden og 15-30 cm i længden. Bladene har glatte, bølgede kanter. Det er værd at bemærke, at yngre træer har endnu større blade, med en bredde, der kan nå op til 80 cm ( Woods, 2008b ). Blomstringsperioden for Paulownia forekommer i maj og juni, med blomster, der viser fem kronblade, der varierer i farve fra hvid til lys lilla. Frugterne af Paulownia-træet er cirka 4 cm lange og 2,5 cm brede. De modnes i efterårssæsonen, og hver frugt kan frigive op til 2.000 vingede frø ( Šmejkal et al., 2007 ). Mange forskellige stoffer udskilles af kirteltrichomer, der dækker overfladerne af blade, frugter og blomster ( Asai et al., 2008 ; Kobayashi et al., 2008 ).

#### 4.2 Dyrkning og vækstbetingelser i Paulownia

Paulownia-træer har evnen til at reproducere både generativt og vegetativt, selvom vegetativ reproduktion overvejende anvendes i industrielle omgivelser. Traditionelle metoder til reproduktion, såsom rodspaltning, som også bruges til naturlige arter, er historisk blevet anvendt ( Yi et al., 2020 ). Derudover er teknikker som ministiklinger på et tidligt udviklingsstadium ( Stuepp et al., 2015 ) eller stimulerende rodfæste i grønne stiklinger ( Temirov et al., 2021 ) blevet brugt. Imidlertid tjener *in vitro*-formering som det primære middel til formering for mange kloner ( Gyuleva, 2010 ; Magar et al., 2016 ). Produktionen af et robust og veludviklet rodsystem er et kritisk aspekt af reproduktionsfasen, hvilket fører til omfattende forskning fokuseret på at adressere denne sag ( Pożoga et al., 2019 ; Mohamad et al., 2022 ).

Blandt de mest almindeligt dyrkede arter af paulownias er *P. tomentosa* , *P. catalpifolia* , *P. elongata* , *P. taiwaniana* , *P. fortunei* , *P. glabrata* og *P. fargesii* ( Woods, 2008b ). Under den indledende globale introduktion af paulownias blev rene botaniske arter overvejende brugt. USA var en af de tidlige adoptanter, der importerede Paulownias (specifikt *P. tomentosa* ) omkring 1840. På grund af sin hurtige vækst fik den tilnavnet "fremtidens træ". I løbet af de sidste 150 år har det spredt sig på tværs af forskellige stater, hvilket har forårsaget betydelige problemer og udløst ophedede debatter om alle arter af Paulownia . *P. tomentosa* er officielt blevet anerkendt som en invasiv art, hvilket fører til dens udryddelse i mange stater. I USA har Paulownia høstet både modstandere og tilhængere, og diskussioner omkring slægten er omstridte på grund af det betydelige overskud, der genereres af eksisterende afgrøder ( Snow, 2015 ).

Nyere forskning peger på, at *P. tomentosa* har evnen til at sprede sig i forskellige områder, hvor skove er blevet beskadiget af flere forstyrrelser ( Chongpinitchai og Williams, 2021 ). I visse lande er specifikke Paulownia-arter som *P. tomentosa* blevet identificeret som farlige og anerkendt som invasive, som det ses i Østrig ( Franz, 2007 ). Selvom naturlige Paulownia-arter stadig dyrkes i Asien, inklusive Tyrkiet, er der et voksende skift mod hybridsorter. I Bulgarien har hybrider for eksempel fået betydning efter mislykkede forsøg på at dyrke rene arter ( Gyuleva, 2010 ).

#### 4.3 Paulownia som en bæredygtig model for CO<sub>2</sub>-reduktion

Undersøgelsen af Sage og Sultmanis (2016) fremhævede et vigtigt spørgsmål at overveje: hvorfor er C3-træer mere egnede til skove og kulstofbinding end C4-træer? De fleste C4-arter er forbundet med barske levesteder, såsom ørkener og salte områder, hvor arborescens ikke er mulig. De fleste C4-arter er græsser og kværne, der mangler de meristemer, der kræves til trævækst. Kun syv arter af Hawaiian Euphorbia og nogle få ørkenplanter, der bliver arborescerende med alderen, udviser C4-fotosyntese. Uanset hvor C3-træer kan vokse, har de derfor en konkurrencefordel i forhold til C4-planter på grund af deres højde ( Sage og Sultmanis, 2016 ). For nylig er publiceret forskning inden for reduktion af klimaændringer steget hurtigt, især inden for biomasseproduktion som en vedvarende energiressource ( Jamil et al., 2021 ; Sikkema et al., 2021 ; Kirikkaleli et al., 2022 ). Talrige rapporter forudsiger, at efterspørgslen efter træ og træbaserede produkter vil fortsætte med at stige indtil mindst 2050 ( Haldar og Sethi, 2021 ; Kircher, 2022 ). Produktionen

af træer og tømmerarter til biomassebrug er også stigende på verdensplan ( Ols og Bontemps, 2021 ; Hamdan og Hourri, 2022 ). De betragtes også som et af de mest lovende C4-træer, kendt for deres luftrensende egenskaber ( Magar et al., 2018 ; Jakubowski, 2022 ; Testa et al., 2022 ). Et bemærkelsesværdigt kendetegn ved Paulownia er dens bemærkelsesværdige evne til at vokse til enorme størrelser inden for en bemærkelsesværdig kort periode. I Kina siger man ofte, at Paulownia "skyder op som en stang på 1 år, forvandles til en paraply på 3 år og kan høstes til brædder på 5 år" ( Zhu et al., 1986 ). Kina har været vidne til eksistensen af ekstraordinære eksemplarer, såsom et 80 år gammelt *P. fortunei*- træ i Kweichow-provinsen, der steg til en tårnhøj højde på 49,5 m, havde en DBH på 202 cm og gav et trævolumen på 34 m<sup>3</sup>. Et andet slående eksempel var en 90 år gammel Paulownia med en DBH på 224 cm og et trævolumen på 44 m<sup>3</sup>. Selv yngre træer udviste imponerende dimensioner, såsom et 11 år gammelt *P. fortunei*- træ i den autonome region Guangxi Zhuang i det sydlige Kina, som var 22 m højt, havde en DBH på 75,1 cm og producerede et trævolumen på 3,69 m<sup>3</sup>. *P. elongata* opnåede også lignende størrelser. I deres oprindelige levesteder i Kina opnår Paulownia typisk en DBH på 30-40 cm inden for et årti og producerer cirka 0,3-0,5 m<sup>3</sup> træ. Men under ideelle forhold kan værdifuldt træ opnås på kun 5-6 år ( Zhu et al., 1986 ; Yi et al., 2020 ).

Som rapporteret i undersøgelsen udført af Kozakiewicz et al. (2020) varierer miljø- og vækstbetingelserne for Paulownia mellem forskellige arter, såsom *P. tomentosa*, *P. fortunei* og *P. elongata*, som følgelig bidrager til variationen i tætheden af Paulownia-træ. Massefylden af Paulownia-træ varierer fra 220 til 400 kg m<sup>-3</sup>, med et gennemsnit på cirka 270 kg m<sup>-3</sup> ( Akyildiz og Kol Sahin, 2010 ; Madhoushi og Boskabadi, 2019 ; Lachowicz og Giedrowicz, 2020a ). Paulownia-træer har en høj væksthastighed og lav trætæthed, men de producerer ikke effektivt biobrændstof ( Jakubowski, 2022 ). For nylig har brugen af Paulownia til produktion af biomasse vundet popularitet, især som en måde at afbøde de skadelige virkninger af CO<sub>2</sub> ( Magar et al., 2018 ). Disse træer kan producere mere biomasse om året, end andre træer kan producere på flere sæsoner. Regionen, hvor der dyrkes træer, kan dog begrænse biomasseproduktionen ( Zuazo et al., 2013 ). I en undersøgelse af Magar et al. (2018) blev *P. tomentosa* træer plantet i Godavari Botaniske Have i Nepal med en tæthed på 2000 planter ha<sup>-1</sup>. Forskerne vurderede kulstofindholdet i den samlede biomasse af 5-årige, 1-årige og nyplantede 4 måneder gamle *P. tomentosa* -træer. De fandt, at de 5 år gamle træer havde et kulstofindhold på 4,52 kg C y<sup>-1</sup> træ<sup>-1</sup>, hvilket gav 9 tons C ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. De 1 år gamle træer havde et kulstofindhold på 18,21 kg C y<sup>-1</sup> træ<sup>-1</sup>, hvilket resulterede i 0,36 tons C y<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. De nyplantede 4 måneder gamle *P. tomentosa*- træer i en fjerntliggende landsby i Nepal havde et kulstofindhold på 6,07 kg C-træ<sup>-1</sup>.

I en undersøgelse udført af Gyuleva et al. (2021) estimerede de produktiviteten (indhold af tørret biomasse) af to dyrkede Paulownia-arter ( *P. tomentosa* og hybridarten *P. elongata* × *P. fortunei* ) efter 2 og 4 års plantning i det sydvestlige Bulgarien. De fandt, at efter 2 eller 4 år viste *P. tomentosa* højere produktivitet (henholdsvis 3,47 og 36,99 tons ha<sup>-1</sup> ) end hybridarten (henholdsvis 2,73 og 19,96 tons ha<sup>-1</sup> ). Kulstofindholdet i *P. tomentosa* var også højere efter 2 eller 4 år (henholdsvis 1,73 og 18,49 tons ha<sup>-1</sup> ) end for hybridarten ( henholdsvis 1,15 og 9,98 tons ha<sup>-1</sup> ). Tilsvarende var den ækvivalente fangst af CO<sub>2</sub> (CO<sub>2-Eq</sub>) af *P. tomentosa* også højere efter 2 eller 4 år (henholdsvis 6,34 og 67,79 tons ha<sup>-1</sup> ) end hybridarten (4,21 og 36,59 tons ha<sup>-1</sup> ).

I en anden undersøgelse rapporterede Joshi (2015), at et 16 år gammelt forsøg med *P. tomentosa* i Asien gav 38,8 tons C y<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, mens et 21 år gammelt forsøg gav mere end 105 tons C y<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Paulownia kan have reducerede vækstrater, når de dyrkes under dårlige jordbundsforhold. I en undersøgelse af Madejón et al. (2016) var biomassen af *P. fortunei* dyrket i Spanien i 3 år 3,34 tons ha<sup>-1</sup> ( Madejón et al., 2016 ), sammenlignet med de symmetrisk dyrkede Eucalyptus-kugler, som havde en biomasse på 40,4 tons ha<sup>-1</sup>. I en relateret undersøgelse, Stankova et al. (2019) brugte en model til at demonstrere, hvordan afgrødearterne havde indflydelse på forskellene i biomasseproduktion, som varierede fra 0,3 til 4,5 tons ha<sup>-1</sup> tørstof. Selvom modellering løbende forbedres, har den stadig flere problemer på grund af hvor komplicerede de faktorer, der kan påvirke forudsigelsen, er, såsom forskellige områder og deres lokale forhold. Dette gælder især for forudsigelsen af trækaraktistika og biomasseproduktion (

Abbasi et al., 2020 ; Lachowicz og Giedrowicz, 2020b ; Palma et al., 2021 ). Derfor kræver det globalt at bruge Paulownia som en væsentlig komponent i biomasseproduktionen særlig opmærksomhed i nationer, hvor væksten af hybrider, der kunne konkurrere med hjemmehørende arter, tilskyndes. I nyere rapporter har Iran på grund af sin felterfaring rapporteret sin evne til at plante Paulownia i et område på cirka 16 × 10 km<sup>2</sup> ( Galán-Martín et al., 2015 ; Abbasi et al., 2020 ). Endnu vigtigere er det, at flere nationer begynder at rykke frem på dette område, såsom Portugal ( Abreu et al., 2020 ), Iran ( Abbasi et al., 2020 ), Spanien ( Parra-Lopez et al., 2015 ; Pleguezuelo et al. , 2015 ), Rumænien ( BUZAN et al., 2018 ), Italien ( Testa et al., 2022 ), Serbien ( Janjić og Janjić, 2019 ), Ukraine ( Morozova et al., 2020 ; Kaletnik et al., 2021 ), Nordirland ( Woods, 2008a ; Olave et al., 2015 ) og Kirgisistan ( Thevs et al., 2021 ).

Sammenlignet med produktion og udnyttelse af fossile brændstoffer anses produktion og udnyttelse af bioenergi for at være mere miljøvenlig ( Pieratti, 2020 ). Globalt forstås berørte parter i stigende grad, at implementering af strategier til at bekæmpe klimaændringer reducerer miljørisici, øger produktionseffektiviteten og øger profitten ( Hiloidhari et al., 2019 ; Secinaro et al., 2020 ). Ifølge litteraturen har talrige undersøgelser vist, at landmænd, især i EU, er motiveret af deres holdning til at indføre renere produktionsmetoder, der kan reducere de skadelige virkninger af klimaændringer ( Sacchelli et al., 2017 ; Boyer og Touzard, 2021 ). . Globalt er Paulownia-kulturen en tendens, der har været gennemgående i de senere år, udover deres miljøopgaver, såsom bekæmpelse af klimaforandringer. Som en primær nøgle til bæredygtig produktion af biomasseafgrøder opnår Paulownia-farme på en kraftfuld måde økonomisk bæredygtighed for landmænd ( Magar et al., 2018 ).

En nylig undersøgelse udført af Testa et al. (2022) evaluerede den økonomiske rentabilitet af Paulownia-landbruget, der erstattede en vingård. Undersøgelsen blev udført på en gård beliggende i det sydlige Italien. De rapporterede, at Paulownia-drift til træ- og flisproduktion genererede en årlig samlet margin på ca. 357,91 € ha<sup>-1</sup> sammenlignet med den årlige samlede margen for vindruer på ca. Paulownia-landbrug til biomasseproduktion har kun nogenlunde nul rentabilitet (4,22 € ha<sup>-1</sup>). Endelig konkluderede de, at rentabiliteten ikke kun afhænger af produkttypen, men også på fremtidige prisvariationer, offentlig finansiering, belønninger og de passende beslutninger truffet af iværksættere for bæredygtig udvikling af forsyningskæder fra et miljømæssigt og socialt perspektiv.

## 5 Investeringsmuligheder og risici i Paulownia og andre kulstofbindingsbaserede projekter

Skovbrugsbaserede projekter har kæmpet for at komme i gang på compliance- og frivillige kulstofmarkeder på grund af forskellige årsager, herunder investeringsrisici relateret til ikke-permanens og lækage ( Verma og Ghosh, 2023 ). Ikke-permanens henviser til risikoen for, at kulstof, der er lagret i skovene, frigives tilbage til atmosfæren inden udløbet af projektets krediteringsperiode, mens lækage henviser til risikoen for, at emissionsreduktioner opnået i et område opvejes af øgede emissioner i et andet område. Disse risici har ført til usikkerhed på kulstofmarkedet og manglende investortillid til skovbrugsbaserede projekter ( Henry, 2023 ; Wang et al., 2023 ). Derudover har der været udfordringer med nøjagtigt at måle kulstofbinding i skove og sikre varigheden af kulstoflagring over tid. Som følge heraf har der været relativt få skovbrugsbaserede projekter på compliance-markedet, hvor de fleste fokuserede på skovrejsning og genplantning. På det frivillige marked har skovbrugsprojekter også stået over for udfordringer med at tiltrække købere på grund af opfattelsen af, at de er mindre troværdige end andre typer af CO<sub>2</sub>-kreditter ( Chen et al., 2023 ).

Disse udfordringer er blevet forværret af den begrænsede tilgængelighed af finansiering til skovprojekter og mangel på standardiserede metoder til måling og verifikation af kulstofbinding. Den seneste udvikling inden for måle- og verifikationsteknologier samt fremkomsten af nye frivillige kulstofmarkeder og standarder kan dog give muligheder for skovbrugsbaserede projekter for at overvinde disse udfordringer og spille en mere væsentlig rolle i den globale indsats for at afbøde klimaændringer ( Ince , 2022 ).

På den anden side er Paulownia, også kendt som "kejserindetræt", en hurtigtvoksende hårdtræsart, der er blevet mere og mere populær som en investeringsmulighed i de senere år. Træets evne til at vokse hurtigt, selv på dårlig jord, gør det til en attraktiv mulighed for træproduktion såvel som for kulstofbinding og økosystemgenopretningsprojekter. Men som med enhver investeringsmulighed er der både potentielle belønninger og risici forbundet med at investere i Paulownia-projekter ( Yadav et al., 2013 ). En af de primære fordele ved at investere i Paulownia-projekter er den hurtige vækstrate, som giver mulighed for relativt hurtige investeringsafkast. Derudover er træets høj kvalitetstræ efterspurgt til en række anvendelser,

herunder møbler, gulve og musikinstrumenter, hvilket yderligere øger potentialet for rentabilitet ( Fos et al., 2023 ).

En anden potentiel fordel ved Paulownia-projekter er deres evne til at binde kulstof. Efterhånden som træer vokser, absorberer de CO<sub>2</sub> fra atmosfæren og hjælper med at afbøde klimaændringer. Derudover kan Paulownia plantes på forringet eller marginal jord, hvilket hjælper med at genoprette økosystemer og giver en række yderligere fordele, såsom forbedret jordsundhed og øget biodiversitet ( Marana, 2018 ). Ud over betydningen af Paulownia-kulturen inden for CO<sub>2</sub>-reduktion, biomasse og træproduktion, har dette træ et stort kommercielt potentiale på grund af de bioprodukter, det kunne producere. Paulownia-træ kan bruges til produktion af træplast og deres kompositter ( Khanjanzadeh et al., 2012 ; Ebrahimi et al., 2021 ), tavler ( Nelis et al., 2019 ), lavdensitetstræ ( Li et al., 2018 ; Yu et al., 2018 ), letvægtsspånplader ( Nelis et al., 2018 ; Nelis og Mai, 2021 ), biopolymerer ( Rodríguez-Seoane et al., 2020 ) samt energikilder ( Zhang et al., 2017 ) såsom bioethanol ( Zhang et al., 2017 ; Kirikkaleli et al., 2022 ), biomethan ( Janjić og Janjić, 2019 ) og biobrint ( Zhang et al., 2022 ). Ud over anvendelserne af Paulownia-træ kan Paulownia-blomsterne, bladene og deres rester bruges til medicinske formål ( Yang et al., 2019 ; Adach et al., 2021 ; Džugan et al., 2021 ; Huang et al., 2021 ; Nowak et al., 2022 ), dyrefoder ( Al-Sagheer et al., 2019 ; Ganchev et al., 2019 ; Alagawany et al., 2022 ) og bioremedieringsapplikationer ( Tzvetkova et al., 2015- ; Miladinova Georgieva et al., 2018a ; Miladinova-Georgieva et al., 2018b ). På trods af disse potentielle fordele er der også flere risici forbundet med at investere i Paulownia-projekter ( Ferguson et al., 2010 ).

En af de største risici er potentialet for afgrødesvigt. Selvom Paulownia er kendt for sin hurtige vækst, er den også modtagelig for sygdomme, skadedyr og andre miljøfaktorer, der kan påvirke vækstrater og udbytte. Derudover kan træets hurtige vækst gøre det mere sårbart over for vindskader, hvilket kan resultere i betydelige tab. Ud over disse risici er der også flere regulatoriske og juridiske overvejelser, som investorer i Paulownia-projekter bør være opmærksomme på. Afhængigt af placeringen af plantagen kan der være specifikke regler vedrørende skovforvaltningspraksis, arealanvendelse og miljøpåvirkninger, som skal overholdes. Manglende overholdelse af disse regler kan resultere i bøder eller retssager, som kan have en væsentlig indvirkning på projektets rentabilitet ( de Deus Ribeiro et al., 2021 ). På trods af disse risici kan der anvendes adskillige strategier for at minimere potentielle tab og maksimere investeringsafkastet i Paulownia-projekter. En tilgang er at diversificere investeringerne på tværs af flere projekter eller regioner, hvilket reducerer virkningen af ethvert individuelt afgrødesvigt eller markedsnedgang. Derudover kan investorer arbejde med erfarne plantageledelsesteams, der har dokumenteret succes i Paulownia-projekter. Dette kan være med til at sikre, at bedste praksis følges, og at risici minimeres ( Zhao et al., 2019 ; Oliveira et al., 2020 ).

## 6 Teknoøkonomisk scenario for Paulownia CO<sub>2</sub>-opsamling

For at nå de globale klimamål inden 2050 vil der være større efterspørgsel efter cirka 2000 kommercielle CO<sub>2</sub>-fangstprojekter og en hastighed på 70-100 kommercielle CO<sub>2</sub>-fangstprojekter y, med en samlet kapitalinvestering på mellem 655 og 1.280 milliarder USD. Dette tal viser tydeligt, at disse projekter krævede store investeringer, som regeringer ( Alprol et al., 2021 ; Ashour og Omran, 2022 ) ikke har været parate til at foretage i den nødvendige tid ( Bajaj, 2022 ). Biologisk CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter er den mest bæredygtige, sikre og attraktive løsning, der kan overvinde og afbøde høje niveauer af atmosfærisk CO<sub>2</sub>. Selvom Paulownia-træet, en terrestrisk C4-plante, adskiller sig i sin natur og levesteder, er de begge fotosyntetiske organismer og har et større potentiale for biologisk CO<sub>2</sub>-fiksering end andre land- og vandplanter ( Mansour et al., 2022 ). Selvom biologiske CO<sub>2</sub>-fangstprojekter ses som langsigtede, lavrentabilitets- og højrisikomiljøprojekter, har nyere mikroalgebaserede CO<sub>2</sub>-fangstprojekter bevist det modsatte. De er kommercielle, kortsigtede, yderst profitable og lavrisiko. Derudover har disse typer af projekter en betydelig miljøpåvirkning ved at reducere høje niveauer af atmosfærisk CO<sub>2</sub>. Men for at fange 1 million tons atmosfærisk CO<sub>2</sub> over 10 år som en del af et megaprojekt, præsenteres et teknisk og økonomisk scenario for Paulownia-træer nedenfor. Udgiften til den brugte grund er ikke inkluderet.

Til træproduktion plantes Paulownia hybridtræer ( Wu et al., 2014 ; Huseinovic et al., 2017 ) hovedsageligt primært i en afstand på 4 m × 4 m ( Zhao et al., 2019 ), med cirka 625 træer ha<sup>-1</sup> ( Icka et al., 2016b ; Berdón Berdón et al., 2017 ). Som rapporteret af flere undersøgelser ( Newman et al., 1997 ; Popescu og Sabau, 2016 ; Zhao et al., 2019 ), er standardcyklusvarigheden for Paulownia-træers rundtræ 10 år. Baseret

på dette faktum har den nuværende undersøgelse valgt 10 år som den ideelle cyklusvarighed for Paulownia-træer. Undersøgelsen udført af Jakubowski ( Zhao et al., 2019 ) rapporterede, at der er ideelle vækstbetingelser for Paulownia-træer til træproduktion i Sydeuropa og Mellemøsten. Men afgrødeudbyttet af Paulownia-træer varierer baseret på flere parametre, såsom klimaændringer, jordtype, kulturforhold, alder, arter og dyrkningsområder. I Asien giver *P. tomentosa* i en alder af 16 og 21 år henholdsvis cirka 382,6 og 223 tons y ha ( Joshi, 2015 ). I Bulgarien udviste *P. tomentosa* efter 2 og 4 år højere produktivitet (henholdsvis 3,47 og 36,99 tons ha ) end hybridarten ( *P. elongata* × *P. fortunei* ), ( henholdsvis 2,73 og 19,96 tons ha . ) ( Gyuleva et al., 2021 ). I Kina nåede Paulownia-træerne i en alder af 80 og 90 år et trævolumen på henholdsvis 34 m og 44 m . I Spanien var den samlede biomasse af *P. formue* efter 3 år 3,34 tons ha ( Madejón et al., 2016 ). I Nepal var den gennemsnitlige samlede biomasse af *P. tomentosa* efter 5 år 19,50 tons ha y ( Magar et al., 2018 ).

Baseret på litteraturen, den foreslåede model og beregninger, i det bedste scenario for at fange 1 million tons CO<sub>2</sub> over 10 år ved hjælp af Paulownia-træer, vil der blive plantet 1,5 millioner træer i cirka 2.400 ha med en plantetæthed på 625 træer ha (den nødvendige afstand for hvert træ er ca. 4 m × 4 m ). Baseret på litteraturen, foreslået model, beregninger og det bedste scenario vil hvert Paulownia-træ gradvist fange CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-ækv.) i 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8. 9. og 10. år som følger: henholdsvis 6,25, 12,50, 25,00, 27,50, 33,00, 42,90, 60,06, 93,09, 144,29 og 250 kg CO<sub>2</sub> træ . For 1,5 millioner træer på 10 år vil det blive beregnet, at alle 1,5 M træer gradvist vil opfange CO<sub>2</sub> som følger: 9.375; 18.750; 37.500; 41.250; 49.500; 64.350; 90.090; 139.635; 216.435; og 375.000 tons CO<sub>2</sub> 1,5 mio. træer på 2.400 ha .

Efter 10 år er CO<sub>2</sub> fanget af 1,5 millioner træer på 2.400 ha cirka 1,04 millioner tons CO<sub>2</sub> . Ifølge ligning 6 og 5, for at omdanne CO<sub>2</sub> til CC (lign. 6) og derefter til TB (lign. 5), skal de konstante faktorer henholdsvis 0,27273 og 0,5<sup>2-Eq.</sup> anvendes. Derfor blev den samlede biomasse af Paulownia-træer årligt beregnet som følger: 5.114; 10.227; 20.455; 22.500; 27.000; 35.100; 49.140; 76.165; 118.055; og 204.545 tons hhv. Som følge heraf er den samlede afgrødebiomasse (træ) på 1,5 millioner træer efter 10 år cirka 568.301 tons ( Sharma et al., 2020 ).

For at etablere et masseprojekt over 10 år for at fange 1,04 millioner tons atmosfærisk CO<sub>2</sub> ved hjælp af Paulownia-træer, vil 1,5 millioner træer blive plantet på 2.400 ha for at producere 568.301 tons afgrødebiomasse (træ). De samlede omkostninger (kapital- og driftsomkostninger) til den investering, der kræves til plantning af 1,5 millioner tons i 2.400 ha over 10 år, er cirka 1.128 milliarder USD. Den samlede markedsføringsværdi af Paulownias træ (568.301 tons) er anslået til 1.136,6 milliarder USD (baseret på 2.000 USD ton træ).

Vores foreslåede scenario er baseret på undersøgelsen af Testa et al. (2022) , som vurderede Paulownias økonomiske rentabilitet og konkluderede, at Paulownias højeste profit er ca. USD 358 ha y , mens den laveste profit er ca. USD 5 ha y . Ydermere, som tidligere beskrevet ( Chen et al., 2020 ; Osman et al., 2021 ), svarer kulstofkvoten i 2023 til ca. USD 47,25 tons CO<sub>2</sub> , hvilket betyder, at den tilsvarende kulstofkvote på 1,04 millioner tons CO<sub>2</sub> (fanget af 1,5 millioner træer på 2.400 ha 10-årig ) er cirka 49,7 milliarder USD (baseret på den laveste estimerede værdi rapporteret for 2023). Afslutningsvis viser tabel 3 en teknisk og økonomisk sammenligning mellem Paulownia-træer med hensyn til opsamling af 1 million tons atmosfærisk CO<sub>2</sub> over 10 år.

Tabel 3

Technical comparison	Paulownia trees
Land use	Very high (4200 ha <sup>-1</sup> 10-year <sup>-1</sup> )
Produced biomass (tons)	568,301
CO <sub>2</sub> capture (million tons)	1.04
Biomass production	Fixed
Climate change impact	Impacted
Culture conditions	Natural
CO <sub>2</sub> sources	Atmospheric CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> capture capacity	Little
CO <sub>2</sub> removal/fixation ability	Limited
Chemical hazards	Fertilizers remain in the soil
Diseases potential	Moderate
Sensitive to contaminants	Moderate
Risk	Moderate
CO <sub>2</sub> final-converted forms	Mainly wood and leaves
Commercial applications (final products and coproducts)	Wood, leaves, medicinal, animal feed, and bioremediation applications
Time of return on investment (ROI)	Long (not less than 5 years)
Economical comparison	Million USD
Total cost of the investment	1,121
Total marketing values (return)	1,136
Net profit	8.56
Carbon credit	49.7

**TABEL 3** . Teknisk og økonomisk sammenligning af Paulownia-træer vedrørende opsamling af 1 million tons CO<sub>2</sub> over 10 år.

## 7 Konklusion og fremtidsperspektiver

Reduktion af CO<sub>2</sub>-emissioner er en global prioritet. Det er således nødvendigt at udvikle en passende tilgang til at reducere eller stabilisere CO<sub>2</sub>-niveauer i atmosfæren. For det første er CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter langsigtede, lavrentable og højrisiko miljøprojekter. For at nå globale klimamål inden 2050 er der en større efterspørgsel efter ca. 2000 kommercielle CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter med et gennemsnit på 70-100 kommercielle CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter om året med en samlet kapitalinvestering på mellem 655 og 1.280 milliarder USD (Rassool, 2021). Denne figur viser tydeligt, at størstedelen af finansieringen af CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter vil komme fra gæld, finansielle markeder og statslige formuefonde. Derfor er det nødvendigt at yde direkte støtte til CO<sub>2</sub>-fangstprojekter i stor skala, især i udviklingslande. Derudover viser dette tal tydeligt, at disse projekter kræver store investeringer, som regeringerne ikke var villige til at bruge i den nødvendige tid. Derfor bør den private sektor tilskyndes til at deltage i denne type investeringer. Carbon credit-prissætning er den mest effektive måde at tilskynde investorer til at udvide og udvikle CO<sub>2</sub>-opsamlingsteknologier. Det er vigtigt at have nok attraktive kulstofpriser til, at CO<sub>2</sub>-opsamlingsteknologi bliver kommercielt levedygtig, såsom en kulstofafgift eller kulstofkvoter, især for investorer. Tilskyndelse fra den private sektor kan omfatte skattefritagelse og levering af teknologier med lave facilitetspriser. På den anden side øger det at kræve, at røggas- og kraftværker deltager i finansieringen af sådanne projekter, kulstofafgiften på de virksomheder og fabrikker, der udleder høje CO<sub>2</sub>-niveauer til atmosfæren, samt på transport-, skibsfarts- og luftfartsselskaber (Rassool, 2021). Disse udfordringer gør, at investorer, såvel som regeringer, ikke foretrækker denne type projekter. Derfor er det nødvendigt at finde passende, bæredygtige og rentable CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekter, der er effektive til at reducere atmosfæriske CO<sub>2</sub>-niveauer. Tidligere fokuserede mange forskere på at opfange atmosfærisk CO<sub>2</sub>.

I dag foreslår forskere over hele verden en helt anden ny strategi. Forskere forsøger ikke kun at fange atmosfærisk CO<sub>2</sub>, men også at bruge den med det samme til energiproduktion sammen med andre vitale kommercielle applikationer ved at omdanne atmosfærisk CO<sub>2</sub> til flere biologisk bioaktive kulstofforbindelser såsom proteiner, kulhydrater og lipider. Derfor er regenerering af bioenergi sideløbende med opsamling af atmosfærisk CO<sub>2</sub>, ud over fordelene ved andre kulstyre bioaktive forbindelser, et vidunderligt koncept og en sandsynlig løsning på problemet med global opvarmning (Doda et al., 2021).

Baseret på litteraturen, anbefalede beregninger og ligninger præsenterer denne gennemgang den seneste

udvikling i brugen af Paulownia-træer som en biologisk løsning til at opfange CO<sub>2</sub> med fokus på tekniske og økonomiske aspekter. Undersøgelsen giver et scenarie for implementering af et million tons CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekt ved hjælp af C4 Paulownia træer dyrket på 2.400 ha. Resultaterne viser rentabiliteten og gennemførligheden af Paulownia-træer som et storstilet CO<sub>2</sub>-opsamlingsprojekt og giver indsigt i potentialet for investeringer og statsstøtte til at nå globale klimamål inden 2050.

## Forfatterbidrag

HG: konceptualisering, anskaffelse af finansiering, undersøgelse, metodologi, skrivning – originalt udkast og skrivning – gennemgang og redigering. AB: undersøgelse, skrivning – originalt udkast og skrivning – gennemgang og redigering. ATM: undersøgelse og skrivning – originalt udkast. MA: undersøgelse, skrivning – originalt udkast, konceptualisering, metodologi og skrivning – gennemgang og redigering.

## Finansiering

Forfatteren/forfatterne erklærer, at der er modtaget økonomisk støtte til forskning, forfatterskab og/eller udgivelse af denne artikel. Forfatterne takker Deputyship for Research and Innovation, Undervisningsministeriet i Saudi-Arabien for at finansiere dette forskningsarbejde gennem projektnummeret INSTV007.

## Anerkendelser

Forfatterne vil gerne anerkende dekanatet for videnskabelig forskning, vicepræsidentskabet for kandidatstudier og videnskabelig forskning, King Faisal University, Saudi-Arabien.

## Interessekonflikt

Forfatterne erklærer, at undersøgelsen blev udført i fravær af nogen kommercielle eller finansielle relationer, der kunne opfattes som en potentiel interessekonflikt.

Forfatteren/forfatterne erklærede, at de var et redaktionsmedlem af Frontiers på tidspunktet for indsendelsen. Dette havde ingen indflydelse på peer review-processen og den endelige beslutning.

## Forlagets notat

Alle påstande udtrykt i denne artikel er udelukkende forfatternes og repræsenterer ikke nødvendigvis påstandene fra deres tilknyttede organisationer eller udgiverens, redaktørerne og anmelderne. Ethvert produkt, der kan vurderes i denne artikel, eller krav, der kan fremsættes af dets producent, er ikke garanteret eller godkendt af udgiveren.

## Referencer

Abanades, JC, Criado, YA og Fernández, JR (2020). Et luft CO<sub>2</sub>-opsamlingsystem baseret på passiv karbonatisering af store Ca(OH)<sub>2</sub>-strukturer. *Oprethold. Energy and Fuels* 4, 3409–3417. doi:10.1039/d0se00094a

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Abbasi, M., Pishvae, MS, og Bairamzadeh, S. (2020). Landets egnethedsvurdering for Paulownia-dyrkning ved hjælp af kombineret GIS og Z-nummer DEA: et casestudie. *Comput. Elektron. Agric.* 176, 105666. doi:10.1016/j.compag.2020.105666

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Abreu, M., Reis, A., Moura, P., Fernando, AL, Luís, A., Quental, L., et al. (2020). Evaluering af potentialet af biomasse til energi i Portugal — konklusioner fra CONVERTE-projektet. *Energies* 13, 937. doi:10.3390/en13040937

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Adach, W., Żuchowski, J., Moniuszko-Szajwaj, B., Szumacher-Strabel, M., Stochmal, A., Olas, B., et al. (2021). *In vitro* antiblodpladeaktivitet af ekstrakt og dets fraktioner af Paulownia Clone *in vitro* 112 blade. *Biomed. Pharmacother.* 137, 111301. doi:10.1016/j.biopha.2021.111301



[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Adams, JC, og Engel, J. (2021). "Menneskeskabte risici og klimaændringer med global opvarmning," i *Livet og dets fremtid* ( Springer ).

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Aguaron, E. og Mcpherson, EG (2012). "Sammenligning af metoder til estimering af kuldioxidlagring ved Sacramentos byskov," i *Carbon-sekvestring i urbane økosystemer* ( Springer ).

[Google Scholar](#)

Akyildiz, MH, og Kol Sahin, H. (2010). *Nogle teknologiske egenskaber og anvendelser af paulownia* . træ: Paulownia tomentosa Steud .

[Google Scholar](#)

Alagawany, M., Farag, MR, Sahfi, ME, Elnesr, SS, Alqaisi, O., El-Kassas, S., et al. (2022). Fytokemiske egenskaber ved affald fra Paulownia-træer og dets anvendelse som ukonventionelt foder i dyrefoder. *Anim. Biotechnol.* 33, 586-593. doi:10.1080/10495398.2020.1806074

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Alotaibi, MD, Alharbi, BH, Al-Shamsi, MA, Alshahrani, TS, Al-Namazi, AA, Alharbi, SF, et al. (2020). Vurdering af fem træarters reaktion på luftforurening i Riyadh City, Saudi-Arabien, med henblik på potentiel anvendelse af det grønne bælte. *Environ. Sci. Forurene. Res.* 27, 29156-29170. doi:10.1007/s11356-020-09226-w

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Alprol, AE, Ashour, M., Mansour, AT, Alzahrani, OM, Mahmoud, SF og Gharib, SM (2021). Vurdering af vandkvalitet og planteplanktonstruktur af otte alexandria-strande, det sydøstlige Middelhav, Egypten. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 1328. doi:10.3390/jmse9121328

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Al-Sagheer, AA, Abd El-Hack, ME, Alagawany, M., Naiel, MA, Mahgoub, SA, Badr, MM, et al. (2019). Paulownia forlader som en ny foderressource: kemisk sammensætning og virkninger på vækst, slagtekroppe, fordøjelighed, blodbiokemi og tarmbakteriepopulationer hos voksende kaniner. *Dyr* 9, 95. doi:10.3390/ani9030095

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Asai, T., Hara, N., Kobayashi, S., Kohshima, S. og Fujimoto, Y. (2008). Geranylerede flavanoner fra sekretet på overfladen af de umodne frugter af Paulownia tomentosa. *Phytochemistry* 69, 1234-1241. doi:10.1016/j.phytochem.2007.11.011

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Ashour, M. og Omran, AM (2022). Nylige fremskridt inden for produktion af marine mikroalger: fremhævelse af sundhedsprodukter fra mikroalger i lyset af coronavirus-pandemien (COVID-19). *Fermentation* 8, 466. doi:10.3390/fermentation8090466

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Bajaj, JS (2022). *Kulstofkredit og klimaforandringer. Klima forandring* . Springer .

[Google Scholar](#)

Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S. og Dall'osto, L. (2018). Biomasse fra mikroalger: potentialet ved domesticering mod bæredygtige biofabrikker. *Microb. Cellefabrikker* 17, 173–218. doi:10.1186/s12934-018-1019-3

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Berdón Berdón, J., Montero Calvo, A., Royano Barroso, L., Parralejo Alcobendas, A., og González Cortés, J. (2017). Undersøgelse af Paulownias biomasseproduktion i mérida (badajoz), det sydvestlige Spanien. *Environ. Ecol. Res.* 5, 521-527. doi:10.13189/eer.2017.050709

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Berrada, T., Engelhardt, L., Gibson, R. og Krueger, P. (2022). *Økonomien ved bæredygtighedsforbundne obligationer*. Swiss Finance Institute Research Paper .

[Google Scholar](#)

Bhalla, P. og Bhattacharya, P. (2015). Urban biodiversitet og grønne områder i Delhi: et casestudie af ny bosættelse og lutyens' Delhi. *J. Hum. Ecol.* 52, 83-96. doi:10.1080/09709274.2015.11906933

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Boyer, J. og Touzard, J.-M. (2021). I hvilket omfang påvirker et innovationssystem og et renere teknologisk regime beslutningsprocessen for tilpasning til klimaændringer? Beviser fra vinproducenter i tre vinklaser i Frankrig. *J. Clean. Prod.* 315, 128218. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128218

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Bushing, LH (2021). Det australske paradoks: politik for en energiomstilling.

[Google Scholar](#)

Buzan, RL, Maxim, A., Odagiu, A., Balint, C., og Hartagan, RM (2018). Paulownia sp. bruges som en energisk plante, til phytoremediering af jord og i agroforestry-systemer. *ProEnvironment Promediu* 11.

[Google Scholar](#)

Carvajal, M. (2010). *Undersøgelse af CO2-optagelse af de mest repræsentative landbrugsafgrøder i regionen Murcia*. Madrid: CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas .

[Google Scholar](#)

Chang, J., Qu, Z., Xu, R., Pan, K., Xu, B., Min, Y., et al. (2017). Vurdering af de økosystemtjenester, der leveres af urbane grønne områder langs urbane centerkant-gradienten. *Sci. Rep.* 7, 11226-11229. doi:10.1038/s41598-017-11559-5

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chaudhry, S., Sidhu, GPS og Paliwal, R. (2021). Genoprettelse af økosystemtjenester i forringede skove i et foranderligt klima. *Håndb. Ecol. Ecosyst. Eng.* 353-375. doi:10.1002/9781119678595.ch19

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chen, D., Cheng, Y., Zhou, N., Chen, P., Wang, Y., Li, K., et al. (2020). Fotokatalytisk nedbrydning af organiske forurenende stoffer ved hjælp af TiO2-baserede fotokatalysatorer: en gennemgang. *J. Clean. Prod.* 268, 121725. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121725

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chen, J., Hu, S., Chen, L., Gu, J., Ge, F., og Wang, S. (2023). Optimal skovrotation ud fra et synspunkt om kulstofbindingseffektivitet baseret på gilpin-ayala-modellen. *IAENG Int. J. Appl. Matematik.* 53.

[Google Scholar](#)

Cheng, C.-l., Jia, X.-h., Xiao, C.-m. og Tang, W.-z. (2019). Paulownia C-geranylerede flavonoider: deres strukturelle variation, biologiske aktivitet og anvendelsesmuligheder. *Phytochem. Åb.* 18, 549-570. doi:10.1007/s11101-019-09614-2

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chia, EL, Fobissie, K. og Kanninen, M. (2016). Udforskning af muligheder for at fremme synergier mellem tilpasning til klimaændringer og afbødning af kulstofinitiativer i skovene. *Forests* 7, 24. doi:10.3390/f7010024

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chongpinitchai, AR, og Williams, RA (2021). Det invasive prinsessestræs (*Paulownia tomentosa*) reaktion på vildmarksbrand og andre

forstyrrelser i en appalachisk løvtræskov. *Glob. Ecol. Fredning* 29, e01734. doi:10.1016/j.gecco.2021.e01734

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Chu, S. og Majumdar, A. (2012). Muligheder og udfordringer for en bæredygtig energifremtid. *natur* 488, 294–303. doi:10.1038/nature11475

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

De Deus Ribeiro, GB, Batista, FRS, De Magalhães, MA, Valverde, SR, Carneiro, A. d. CO og Amaral, DH (2021). Teknoøkonomisk gennemførlighedsanalyse af et eukalyptusbaseret kraftværk ved brug af træflis. *Biomasse Bioenergi* 153, 106218.

doi:10.1016/j.biombioe.2021.106218

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Deutz, S. og Bardow, A. (2021). Livscyklusvurdering af en industriel direkte luftindfangningsproces baseret på temperatur-vakuumsvingadsorption. *Nat. Energi* 6, 203-213. doi:10.1038/s41560-020-00771-9

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Doda, B., Theuer, SLH, Cames, M., Healy, S., og Schneider, L. (2021). Frivillig modregning: kreditter og godtgørelser. *Clim. Ændring* 4, 2021.

[Google Scholar](#)

Domec, JC og Gartner, BL (2002). Hvordan adskiller vandtransport og vandopbevaring sig i tidligt nåletræ og sentræ? *J. Exp. Bot.* 53, 2369-2379. doi:10.1093/jxb/erf100

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Dong, Y., Fan, G., Zhao, Z., og Deng, M. (2014). Kompatibel opløst stof, transportørprotein, transkriptionsfaktor og hormonrelateret genekspression giver en indikator for tørkestress i Paulownia fortunei. *Funktion. Integr. genomics* 14, 479-491. doi:10.1007/s10142-014-0373-4

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Dżugan, M., Miłek, M., Grabek-Lejko, D., Hęclik, J., Jacek, B., og Litwińczuk, W. (2021). Antioxidantaktivitet, polyphenoliske profiler og antibakterielle egenskaber af bladekstrakt af forskellige paulownia spp. kloner. *Agronomy* 11, 2001. doi:10.3390/agronomy11102001

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Ebrahimi, H., Vaziri, V., Faraji, F., Aminian, H. og Jamalirad, L. (2021). Effekten af at bruge PET til Paulownia-strenger på fysiske og mekaniske egenskaber af OSB. *Til. Træ Prod.* 74, 371-382.

[Google Scholar](#)

E Silva, IMM og Costa, HKM (2021). Det Forenede Kongeriges erfaring med kulstoffangst- og lagringsprojekter: de nuværende lovgivningsmæssige rammer og relaterede udfordringer. *Carbon Capture Storage Int. Energipolitisk lov*, 141–153. doi:10.1016/B978-0-323-85250-0.00001-3

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Ferguson, I., Bull, L. og Gorrie, G. (2010). Forbedring af investeringsklimaet for australske skovindustrier. Voksende grønne aktiver: Fjernelse af begrænsninger for den private sektors investeringer i skovbrug i Asien og Stillehavet, 27.

[Google Scholar](#)

Fos, M., Oliver-Villanueva, J.-V. og Vazquez, M. (2023). Radial variation i anatomiske trækaraktéristika og fysiske egenskaber af Paulownia elongata x Paulownia fortunei hybrid Cotevisa 2 fra hurtigtvoksende plantager. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 81, 819-831. doi:10.1007/s00107-023-01941-8

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Franz, E. (2007). Fra dekorativ til skadelig? Paulownia tomentosas begyndende invasion af Centraleuropa. *Preslia* 79, 377-389.

[Google Scholar](#)

Fuhrer, E. og Molnar, S. (2003). *Mængden af kulstof lagret i det levende stof i ungarske skove*. Faipar (Ungarn) .

[Google Scholar](#)

Galán-Martín, Á., Pozo, C., Guillén-Gosalbez, G., Vallejo, AA, og Esteller, LJ (2015). Flertrins lineær programmeringsmodel til optimering af afgrødeplansbeslutninger under den nye fælles landbrugspolitik. *Landbrugspolitik* 48, 515–524. doi:10.1016/j.landusepol.2015.06.022

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Ganchev, G., Ilchev, A. og Koleva, A. (2019). Fordøjelighed og energiindhold af Paulownia (*Paulownia elongata* SY Hu) blade. *Agric. Sci. Teknol.* (1313-8820), 11.

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Guidi, L., Lo Piccolo, E. og Landi, M. (2019). Klorofylfluorescens, fotoinhibering og abiotisk stress: gør det nogen forskel at være en C3- eller C4-art? *Foran. plante Sci.* 10, 174. doi:10.3389/fpls.2019.00174

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Gyuleva, V. (2010). Mikroformering af hybrid paulownia fra langtidsbevarede frø. *Silva Balcan* 11, 45–58.

[Google Scholar](#)

Gyuleva, V., Stankova, T., Zhiyanski, M. og Andonova, E. (2021). Fem års vækst af paulownia på to steder i Bulgarien. *Til. Sci* 1, 11-22.

[Google Scholar](#)

Haldar, A. og Sethi, N. (2021). Effekt af institutionel kvalitet og vedvarende energiforbrug på CO2-udledning - en empirisk undersøgelse for udviklingslande. *Environ. Sci. Forurene. Res.* 28, 15485-15503. doi:10.1007/s11356-020-11532-2

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Hamdan, HZ og Hourri, AF (2022). CO2-binding ved formering af den hurtigt voksende *Azolla* spp. *Environ. Sci. Forurene. Res.* 29, 16912-16924. doi:10.1007/s11356-021-16986-6

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Hatfield, RD, Marita, JM, Frost, K., Grabber, J., Ralph, J., Lu, F., et al. (2009). Græsligninacylering: p-coumaroyltransferaseaktivitet og cellevægskarakteristika for C3- og C4-græsser. *Planta* 229, 1253-1267. doi:10.1007/s00425-009-0900-z

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

He, T., Vaidya, B., Perry, Z., Parajuli, P. og Joshee, N. (2016). Paulownia som et lægetræ: traditionelle anvendelser og nuværende fremskridt. *Eur. J. Med. planter* 14, 1–15. doi:10.9734/ejmp/2016/25170

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Henry, B. (2023). Potentiale for jordkulstofbinding i det nordlige australske græsningsområder: en gennemgang af beviserne.

[Google Scholar](#)

Hertel, D., Moser, G., Culmsee, H., Erasmi, S., Horna, V., Schuldt, B., et al. (2009). Under- og overjordisk biomasse og netto primærproduktion i en palæotropisk naturskov (Sulawesi, Indonesien) sammenlignet med neotropiske skove. *Til. Ecol. Manag.* 258, 1904–1912. doi:10.1016/j.foreco.2009.07.019

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Hiloidhari, M., Baruah, D., Kumari, M., Kumari, S. og Thakur, I. (2019). Udsigten og potentialet for biomassekraft til at afbøde klimaændringer: et casestudie i Indien. *J. Clean. Prod.* 220, 931-944. doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.194

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Hong, WY (2022). En teknoøkonomisk gennemgang af CO2-opsamling, -udnyttelse og -lagringssystemer for at opnå en fremtid med netto-nul CO2-emissioner. *Carbon Capture Sci. Teknol.* 3, 100044. doi:10.1016/j.ccst.2022.100044

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Huang, H., Szumacher-Strabel, M., Patra, AK, Ślusarczyk, S., Lechniak, D., Vazirigozar, M., et al. (2021). Kemisk og fytochemisk sammensætning, *in vitro* ruminal fermentering, metanproduktion og næringsstofnedbrydelighed af friske og ensilerede Paulownia hybridblade. *Dyrfoder Sci. Teknol.* 279, 115038. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115038

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Huseinovic, S., Osmanović, Z., Bektić, S. og Ahmetbegović, S. (2017). Paulownia elongata sy hu i funktion af at forbedre kvaliteten af miljøet. *Tidsskrifter Eng. Nat. Sci. (PEN)* 5. doi:10.21533/pen.v5i2.83

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Icka, P., Damo, R., og Icka, E. (2016a). Paulownia tomentosa, et hurtigt voksende træ. *Ann. Valahia Univ. Targoviste Agric.* 10, 14-19. doi:10.1515/agr-2016-0003

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Icka, P., Damo, R. og Icka, E. (2016b). Paulownia tomentosa, et hurtigt voksende træ. *Ann. Valahia Univ. Targoviste, Agric.* 10, 14-19. doi:10.1515/agr-2016-0003

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Ince, OF (2022). *Økonomiske og miljømæssige virkninger af forbedret skovforvaltning og genotyper af loblollyfir på kulstofbinding i det sydøstlige USA*. University of Georgia .

[Google Scholar](#)

Jakubowski, M. (2022). Dyrkningspotentiale og anvendelser af Paulownia-træ: en gennemgang. *Forests* 13, 668. doi:10.3390/f13050668

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Jakubowski, M., Tomczak, A., Jelonek, T. og Grzywiński, W. (2018). Wykorzystanie drewna i możliwości uprawy drzew z rodzaju paulownia. *Acta Sci. Polonorum Silvorum Colendarum Ratio Industria Lignaria* 17.

[Google Scholar](#)

Jamil, K., Liu, D., Gul, RF, Hussain, Z., Mohsin, M., Qin, G., et al. (2021). Påvirker remittering og vedvarende energi CO2-udledningen? Et empirisk bevis fra udvalgte G-20 lande. *Energi og miljø* . , 0958305X211029636.

[Google Scholar](#)

Janjić, Z., og Janjić, M. (2019). Paulownia, karakteristika og perspektiver af dens udnyttelse. *Innovation Træværk. Industri Eng. Des.* , 34-41.

[Google Scholar](#)

Jo, H.-K. (2002). Virkningerne af grønne områder i byerne på at udligne kulstofemissioner for Midt-Korea. *J. Environ. Manag.* 64, 115-126. doi:10.1006/jema.2001.0491

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Joshi, NR (2015). Udvikling af allometriske ligninger for Paulownia tomentosa (Thunb.) til at estimere biomasse og kulstoflagre: en vurdering fra ICIMOD Knowledge Park, Godavari, Nepal. *Int. Center Integr. Mt. Dev* .

[Google Scholar](#)

Kadlec, J., Novosadová, K. og Pokorný, R. (2021). Foreløbige resultater fra en plantage af semi-arid hybrid af Paulownia Clone *in vitro* 112® under forhold i Tjekkiet fra de første to år. *Balt.* 27, 18-25. doi:10.46490/bf477

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kaletnik, G., Pryshliak, N. og Tokarchuk, D. (2021). Potentiale for produktion af energiafgrøder i Ukraine og deres forarbejdning på fast biobrændsel. *Ecol. Engeneering Environ. Teknol.* 22. 3, 59-70. doi:10.12912/27197050/135447

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Keith, DW, Holmes, G., Angelo, DS og Heidel, K. (2018). En proces til at opfange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. *Joule* 2, 1573-1594. doi:10.1016/j.joule.2018.05.006

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Khan, FA og Ansari, AA (2005). Eutrofiering: en økologisk vision. *botaniske Åb.* 71, 449–482. doi:10.1663/0006-8101(2005)071[0449:eae]2.0.co;2

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Khanjanzadeh, H., Bahmani, AA, Rafighi, A. og Tabarsa, T. (2012). Udnyttelse af bioaffaldsbomuld (*Gossypium hirsutum* L.) stilke og underudnyttet paulownia (*paulownia fortunei*) i træbaserede kompositspånplader. *Afr. J. Biotechnol.* 11, 8045-8050. doi:10.5897/ajb12.288

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kheyrodin, H. og Kheyrodin, S. (2017). CO<sub>2</sub>-gasudveksling i Crassulaceansyremetabolisme og C<sub>3</sub>- og C<sub>4</sub>-planter. *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 4, 36-43.

[Google Scholar](#)

Kircher, M. (2022). Økonomiske tendenser i overgangen til en cirkulær bioøkonomi. *J. Risk Financial Manag.* 15, 44. doi:10.3390/jrfm15020044

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kirikaleli, D., Güngör, H. og Adebayo, TS (2022). Forbrugsbaserede kulstofemissioner, vedvarende energiforbrug, finansiel udvikling og økonomisk vækst i Chile. *Bus. Strategi miljø.* 31, 1123-1137. doi:10.1002/bse.2945

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kobayashi, S., Asai, T., Fujimoto, Y., og Kohshima, S. (2008). Anti-planteædende strukturer af Paulownia tomentosa: morfologi, fordeling, kemiske bestanddele og ændringer under udvikling af skud og blade. *Ann. Bot.* 101, 1035-1047. doi:10.1093/aob/mcn033

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kozakiewicz, P., Laskowka, A. og Ciolek, S. (2020). En undersøgelse af udvalgte træk ved Shan Tong-variationen af plantage paulownia og dens træegenskaber. *Ann. Krige. Univ. Life Sci. SGGW For. Træteknik* 111, 116-123. doi:10.5604/01.3001.0014.6904

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Kralicek, K., Huy, B., Poudel, KP, Temesgen, H., og Salas, C. (2017). Samtidig estimering af over- og underjordisk biomasse i tropiske skove i Vietnam. *Til. Ecol. Manag.* 390, 147-156. doi:10.1016/j.foreco.2017.01.030

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Lachowicz, H. og Giedrowicz, A. (2020a). Karakteristika for de tekniske egenskaber af Paulownia COTE-2 træ. *Sylwan* 164, 414–423.

[Google Scholar](#)

Lachowicz, H. og Giedrowicz, A. (2020b). Charakterystyka jakości technicznej drewna paulowni COTE- 2. *Sylwan* 164, 414–423.

[Google Scholar](#)

Lefvert, A., Rodriguez, E., Fridahl, M., Grönkvist, S., Haikola, S. og Hansson, A. (2022). Hvad er de potentielle veje til kulstoffangst og -lagring i Sverige? En vurdering på flere niveauer af historiske og aktuelle udviklinger. *Energi Res. Soc. Sci.* 87, 102452. doi:10.1016/j.erss.2021.102452

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Li, H., Jiang, X., Ramaswamy, HS, Zhu, S., og Yu, Y. (2018). Højtryksbehandling påvirker tæthedsprofil, overfladeruhed, hårdhed og slidstyrke af paulownia træplader. *Trans. ASABE* 61, 1181-1188. doi:10.13031/trans.12718

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Li, P., Lou, G., Cai, X., Zhang, B., Cheng, Y. og Wang, H. (2020). Sammenligning af de komplette plastomer og den fylogenetiske analyse af Paulownia-arter. *Sci. Rep.* 10, 2225. doi:10.1038/s41598-020-59204-y

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Macdicken, KG (1997). En guide til overvågning af kulstofflagring i skovbrugs- og agroskovbrugsprojekter.

[Google Scholar](#)

Madejón, P., Alaejos, J., García-Álbala, J., Fernández, M., og Madejón, E. (2016). Tre-årig undersøgelse af hurtigtvoksende træer i nedbrudt jord ændret med kompost: effekter på jordens frugtbarhed og produktivitet. *J. Environ. Manag.* 169, 18-26. doi:10.1016/j.jenvman.2015.11.050

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Madhoushi, M. og Boskabadi, Z. (2019). Forholdet mellem det dynamiske og statiske elasticitetsmodul i stående træer og savet tømmer af Paulownia-formue plantet i Iran. *Maderas. Cienc. Teknol.* 21, 35-44.

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Magar, LB, Khadka, S., Joshi, JRR, Pokharel, U., Rana, N., Thapa, P., et al. (2018). Samlet biomasse-kulstofbindingsevne under de skiftende klimatiske forhold af Paulownia *tomentosa* Steud. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* 6, 220-226. doi:10.3126/ijasbt.v6i3.20772

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Magar, LB, Shrestha, N., Khadka, S., Joshi, JR, Acharya, J., Gyanwali, GC, et al. (2016). Udfordringer og muligheder for *in vitro* -formering af Paulownia *tomentosa* Steud til kommerciel produktion i Nepal. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* 4, 155-160. doi:10.3126/ijasbt.v4i2.14752

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Mansour, AT, Ashour, M., Alprol, AE og Alsaqufi, AS (2022). Vandplanter og vanddyr i sammenhæng med bæredygtighed: dyrkningsteknikker, integration og blå revolution. *Sustainability* 14, 3257. doi:10.3390/su14063257

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Marana, B. (2018). En grøn GIS-løsning mod luftforurening i Bergamo-provinsen: paulownia-træet. *J. Geogr. Inf. Syst.* 10, 193-218. doi:10.4236/jgis.2018.102010

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Martínez Pastur, G., Perera, AH, Peterson, U. og Iverson, LR (2018). Økosystemtjenester fra skovlandskaber: en oversigt. *Ecosyst. Serv. Til. landskaber brede overvejelser* , 1-10.

[Google Scholar](#)

Miladinova-Georgieva, K., Geneve, M. og Markovska, Y. (2018a). Effekter af tilsætning af EDTA og citrat til jorden på C4-fotosyntetiske enzymer og biokemiske indikatorer for tungmetalltolerance i to paulownia-hybrider. *Plante Fysiol.* 8, 68-81.

[Google Scholar](#)

Miladinova-Georgieva, K., Ivanova, K., Georgieva, T., Geneve, M., Petrov, P., Stancheva, I., et al. (2018b). EDTA og citrat indvirkning på tungmetaller phytoremediation ved hjælp af paulownia hybrider. *Int. J. Environ. Forurene.* 63, 31-46. doi:10.1504/ijep.2018.092985

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Mohamad, ME, Awad, A., Majrashi, A., Abd Esadek, O., El-Saadony, MT, Saad, AM, et al. (2022). *In vitro* undersøgelse af virkningen af cytokiner og auxiner tilsætning til vækstmedium på mikroformering og forankring af Paulownia-arter (Paulownia hybrid og Paulownia tomentosa). *Saudi J. Biol. Sci.* 29, 1598-1603. doi:10.1016/j.sjbs.2021.11.003

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Mondal, M., Goswami, S., Ghosh, A., Oinam, G., Tiwari, O., Das, P., et al. (2017). Produktion af biodiesel fra mikroalger gennem biologisk kulstoffangst: en gennemgang. *3 Biotek.* 7, 99-21. doi:10.1007/s13205-017-0727-4

[PubMed abstrakt](#) | [CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Morozova, I., Oechsner, H., Roik, M., Hülsemann, B. og Lemmer, A. (2020). Vurdering af arealets metanudbytte fra energiafgrøder i Ukraine, bedste praksis. *Appl. Sci.* 10, 4431. doi:10.3390/app10134431

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Nelis, PA, Henke, O. og Mai, C. (2019). Sammenligning af blokplader med kernelag af kiri (Paulownia spp.) og af gran (Picea abies) med hensyn til mekaniske egenskaber. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 77, 323-326. doi:10.1007/s00107-019-01381-3

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Nelis, PA og Mai, C. (2021). Indflydelsen af træsorter med lav massefylde (Paulownia spp.) og højdensitet (Fagus sylvatica L.) på forskellige karakteristika af trelags spånplader med let og middel massefylde. *Træmateriale Sci. Eng.* 16, 21-26. doi:10.1080/17480272.2019.1659850

[CrossRef fuld tekst](#) | [Google Scholar](#)

Nelis, P. A., Michaelis, F., Krause, K. C., and Mai, C. (2018). Kiri wood (Paulownia tomentosa): can it improve the performance of particleboards? *Eur. J. wood wood Prod.* 76, 445–453. doi:10.1007/s00107-017-1222-7

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Newell, R., Raimi, D., Villanueva, S., and Prest, B. (2021). Global energy outlook 2021: pathways from Paris. *Resour. Future* 8.

[Google Scholar](#)

Newman, S., Bennett, K., and Wu, Y. (1997). Performance of maize, beans and ginger as intercrops in Paulownia plantations in China. *Agrofor. Syst.* 39, 23–30. doi:10.1023/a:1005938310106

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Nouri, H., Borujeni, S. C., and Hoekstra, A. Y. (2019). The blue water footprint of urban green spaces: an example for Adelaide, Australia. *Landsc. urban Plan.* 190, 103613. doi:10.1016/j.landurbplan.2019.103613

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Nowak, B., Moniuszko-Szajwaj, B., Skorupka, M., Puchalska, J., Kozłowska, M., Bocianowski, J., et al. (2022). Effect of paulownia leaves extract levels on *in vitro* ruminal fermentation, microbial population, methane production, and fatty acid biohydrogenation. *Molecules* 27, 4288. doi:10.3390/molecules27134288

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Nowak, D. J., and Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ. Pollut.* 116, 381–389. doi:10.1016/s0269-7491(01)00214-7

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Nunez, C. (2019). *Carbon dioxide levels are at a record high*. National geographic, 13. Here's what you need to know.

[Google Scholar](#)



Olave, R., Forbes, G., Muñoz, F., and Lyons, G. (2015). Survival, early growth and chemical characteristics of Paulownia trees for potential biomass production in a cool temperate climate. *Ir. For.*

[Google Scholar](#)

Oliveira, N., Pérez-Cruzado, C., Cañellas, I., Rodríguez-Soalleiro, R., and Sixto, H. (2020). Poplar short rotation coppice plantations under Mediterranean conditions: the case of Spain. *Forests* 11, 1352. doi:10.3390/f11121352

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Ols, C., and Bontemps, J.-D. (2021). Pure and even-aged forestry of fast-growing conifers under climate change: on the need for a silvicultural paradigm shift. *Environ. Res. Lett.* 16, 024030. doi:10.1088/1748-9326/abd6a7

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Osman, A. I., Hefny, M., Abdel Maksoud, M., Elgarahy, A. M., and Rooney, D. W. (2021). Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19, 797–849. doi:10.1007/s10311-020-01133-3

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Palma, A., Loaiza, J. M., Díaz, M. J., García, J. C., Giráldez, I., and López, F. (2021). Tagasaste, leucaena and paulownia: three industrial crops for energy and hemicelluloses production. *Biotechnol. Biofuels* 14, 89–14. doi:10.1186/s13068-021-01930-0

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Parra-Lopez, C., Sayadi-Gmada, S., and Duran-Zuazo, V. H. (2015). Production and use of biomass from short-rotation plantations in Andalusia, southern Spain: limitations and opportunities. *New Medit.* 14, 40–49.

[Google Scholar](#)

Pedersen, J. T. S., Van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., and Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: how did critiques affect their quality and relevance 1990–2022? *Glob. Environ. Change* 75, 102538. doi:10.1016/j.gloenvcha.2022.102538

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Pieratti, D. (2020). *Published. Writing like a reader: the power of imitation in writing instruction*. MLA Annual Convention. MLA.

[Google Scholar](#)

Pleguezuelo, C. R. R., Zuazo, V. H. D., Biielders, C., Bocanegra, J. A. J., Pereaatorres, F., and Martínez, J. R. F. (2015). Bioenergy farming using woody crops. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 95–119. doi:10.1007/s13593-014-0262-1

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Popescu, A., and Sabau, L. (2016). “Paulownia Species” growing for saplings in pots in Romania: technological aspects and comparative expenses, incomes and profit. *Sci. Pap. Ser. Manag. Econ. Eng. Agric. Rural. Dev.* 16, 255–265.

[Google Scholar](#)

Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., et al. (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC Sixth Assessment Report.

[Google Scholar](#)

Požoga, M., Olewnicki, D., and Jabłońska, L. (2019). *In vitro* propagation protocols and variable cost comparison in commercial production for paulownia tomentosa × paulownia fortunei hybrid as a renewable energy source. *Appl. Sci.* 9, 2272. doi:10.3390/app9112272

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Prasad, R., Gupta, S. K., Shabnam, N., Oliveira, C. Y. B., Nema, A. K., Ansari, F. A., et al. (2021). Role of microalgae in global CO2 sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective. *Sustainability* 13, 13061.

doi:10.3390/su132313061

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Ram, S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S., Chakraborty, A., et al. (2015). A review on air pollution monitoring and management using plants with special reference to foliar dust adsorption and physiological stress responses. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 45, 2489–2522. doi:10.1080/10643389.2015.1046775

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Rassool, D. (2021). *Unlocking private finance to support CCS investments*. Global CCS Institute.

[Google Scholar](#)

Robards, T. (2008). A review of the accuracy of urban forestry biomass functions: utility for the California Climate Action Registry Protocol.

[Google Scholar](#)

Rodríguez-Seoane, P., Domínguez, H., and Torres, M. D. (2020). Mechanical characterization of biopolymer-based hydrogels enriched with Paulownia extracts recovered using a green technique. *Appl. Sci.* 10, 8439. doi:10.3390/app10238439

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Roeland, S., Moretti, M., Amorim, J. H., Branquinho, C., Fares, S., Morelli, F., et al. (2019). Towards an integrative approach to evaluate the environmental ecosystem services provided by urban forest. *J. For. Res.* 30, 1981–1996. doi:10.1007/s11676-019-00916-x

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Sacchelli, S., Fabbrizzi, S., Bertocci, M., Marone, E., Menghini, S., and Bernetti, I. (2017). A mix-method model for adaptation to climate change in the agricultural sector: a case study for Italian wine farms. *J. Clean. Prod.* 166, 891–900. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.095

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Sage, R. F., and Sultmanis, S. (2016). Why are there no C<sub>4</sub> forests? *J. plant physiology* 203, 55–68. doi:10.1016/j.jplph.2016.06.009

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Santori, G., Charalambous, C., Ferrari, M.-C., and Brandani, S. (2018). Adsorption artificial tree for atmospheric carbon dioxide capture, purification and compression. *Energy* 162, 1158–1168. doi:10.1016/j.energy.2018.08.090

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Santos, M. G., Davey, P. A., Hofmann, T. A., Borland, A., Hartwell, J., and Lawson, T. (2022). Stomatal and mesophyll responses tissue to in light, *Vicia faba* CO<sub>2</sub>, and *kalanchoë fedtschenkoi*. *Stomatal Biol. Beyond*.

[Google Scholar](#)

Schneiderová, K., and Šmejkal, K. (2015). Phytochemical profile of paulownia tomentosa (thunb). *Steud. Phytochem. Rev.* 14, 799–833. doi:10.1007/s11101-014-9376-y

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Secinaro, S., Brescia, V., Calandra, D., and Biancone, P. (2020). Employing bibliometric analysis to identify suitable business models for electric cars. *J. Clean. Prod.* 264, 121503. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121503

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Sharma, R., Pradhan, L., Kumari, M., and Bhattacharya, P. (2020). Assessment of carbon sequestration potential of tree species in amity university campus Noida. *Environ. Sci. Proc.* 3, 52.

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Shreyash, N., Sonker, M., Bajpai, S., Tiwary, S. K., Khan, M. A., Raj, S., et al. (2021). The review of carbon capture-storage technologies and developing fuel cells for enhancing utilization. *Energies* 14, 4978. doi:10.3390/en14164978

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Sikkema, R., Proskurina, S., Banja, M., and Vakkilainen, E. (2021). How can solid biomass contribute to the EU's renewable energy targets in 2020, 2030 and what are the GHG drivers and safeguards in energy-and forestry sectors? *Renew. Energy* 165, 758–772.

doi:10.1016/j.renene.2020.11.047

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Silva Araújo, J., Aires Souza, J. T., Dos Santos Félix, E., De Cássia Alves, R., De Oliveira Filho, T. J., and Cunha De Lira, E. (2022). Gas exchange in genotypes of *Nopalea cochenillifera* in different seasons and evaluations times. *Acta Bot. Croat.* 81, 177–184. doi:10.37427/botcro-2022-015

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Singh, S., Bhattacharya, P., and Gupta, N. (2018). Dust particles characterization and innate resistance for *Thevetia peruviana* in different land-use pattern of urban area. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 15, 1061–1072. doi:10.1007/s13762-017-1461-5

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Šmejkal, K., Grycová, L., Marek, R., Lemièrè, F., Jankovská, D., Forejtníková, H., et al. (2007). C-geranyl compounds from *Paulownia tomentosa* fruits. *J. Nat. Prod.* 70, 1244–1248. doi:10.1021/np070063w

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Snow, W. A. (2015). Ornamental, crop, or invasive? The history of the Empress tree (*Paulownia*) in the USA. *For. Trees Livelihoods* 24, 85–96. doi:10.1080/14728028.2014.952353

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Stankova, T., Gyuleva, V., Dimitrov, D., and Popov, E. (2019). Allometric relationships for estimation of aboveground woody biomass of two clones *Paulownia* at juvenile age. *Nauka za gorata* 55, 43–54.

[Google Scholar](#)

Stephenson, P. G., Moore, C. M., Terry, M. J., Zubkov, M. V., and Bibby, T. S. (2011). Improving photosynthesis for algal biofuels: toward a green revolution. *Trends Biotechnol.* 29, 615–623. doi:10.1016/j.tibtech.2011.06.005

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Steyn, M., and Havercroft, I. (2021). Brief: inclusion of a CCS method under the emissions reduction fund.

[Google Scholar](#)

Strohbach, M. W., Arnold, E., and Haase, D. (2012). The carbon footprint of urban green space—a life cycle approach. *Landsc. Urban Plan.* 104, 220–229. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.10.013

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Stuepp, C. A., Zuffellato-Ribas, K. C., Koehler, H. S., and Wendling, I. (2015). Rooting mini-cuttings of *Paulownia fortunei* var. mikado derived from clonal mini-garden. *Rev. Árvore* 39, 497–504. doi:10.1590/0100-67622015000300010

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Suryawanshi, M., Patel, A., Kale, T., and Patil, P. (2014). Carbon sequestration potential of tree species in the environment of North Maharashtra University Campus, Jalgaon (MS) India. *Biosci. Discov.* 5, 175–179.

[Google Scholar](#)

Temirov, J., Shukurova, G., and Klichov, I. (2021). “Published. Study on the influence of stimulants on the rooting of the paulownia (*paulownia*)

and tulip (*liriodendron tulipifera*) trees during the propagation by cuttings,” in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (IOP Publishing).

[Google Scholar](#)

Testa, R., Schifani, G., Rizzo, G., and Migliore, G. (2022). Assessing the economic profitability of Paulownia as a biomass crop in Southern Mediterranean area. *J. Clean. Prod.* 336, 130426. doi:10.1016/j.jclepro.2022.130426

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Thevs, N., Baier, C., and Aliev, K. (2021). Water productivity of poplar and paulownia on two sites in Kyrgyzstan, central Asia. *J. Water Resour. Prot.* 13, 293–308. doi:10.4236/jwarp.2021.134018

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Turan, G., Zapantis, A., Kearns, D., Tamme, E., Staib, C., Zhang, T., et al. (2021). *Global status of CCS 2021. CCS Accelerating to net zero.*

[Google Scholar](#)

Turner, K., Race, J., Alabi, O., Katris, A., and Swales, J. K. (2021). Policy options for funding carbon capture in regional industrial clusters: what are the impacts and trade-offs involved in compensating industry competitiveness loss? *Ecol. Econ.* 184, 106978.

doi:10.1016/j.ecolecon.2021.106978

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Tzvetkova, N., Miladinova, K., Ivanova, K., Georgieva, T., Geneva, M., and Markovska, Y. (2015). Possibility for using of two Paulownia lines as a tool for remediation of heavy metal contaminated soil. *J. Environ. Biol.* 36, 145–151.

[PubMed Abstract](#) | [Google Scholar](#)

Van Der Gaast, W., Sikkema, R., and Vohrer, M. (2018). The contribution of forest carbon credit projects to addressing the climate change challenge. *Clim. Policy* 18, 42–48. doi:10.1080/14693062.2016.1242056

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Vega, F., Baena-Moreno, F., Fernandez, L. M. G., Portillo, E., Navarrete, B., and Zhang, Z. (2020). Current status of CO<sub>2</sub> chemical absorption research applied to CCS: towards full deployment at industrial scale. *Appl. Energy* 260, 114313. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114313

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Verma, P., and Ghosh, P. K. (2023). The economics of Forest carbon sequestration: a bibliometric analysis. *Environ. Dev. Sustain.* 26, 2989–3019. doi:10.1007/s10668-023-02922-w

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Wang, T., Zhang, X., Ma, Y., and Wang, Y. (2023). Risk contagion and decision-making evolution of carbon market enterprises: comparisons with China, the United States, and the European Union. *Environ. Impact Assess. Rev.* 99, 107036. doi:10.1016/j.eiar.2023.107036

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Winter, K., and Holtum, J. A. (2017). Facultative crassulacean acid metabolism (CAM) in four small C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> leaf-succulents. *Aust. J. Bot.* 65, 103–108. doi:10.1071/bt16015

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Woods, V. (2008a). *Paulownia as a novel biomass crop for northern Ireland? Agri-food and bioscience Institute.* Occasional publication.

[Google Scholar](#)

Woods, V. (2008b). “Paulownia as a novel biomass crop for Northern Ireland? a review of current knowledge,” in *Hillsborough, Co. Down: agri-food and biosciences Institute, global research unit* (Occasional Publication).

[Google Scholar](#)

Wu, L., Wang, B., Qiao, J., Zhou, H., Wen, R., Xue, J., et al. (2014). Effects of trunk-extension pruning at different intensities on the growth and trunk form of *Paulownia fortunei*. *For. Ecol. Manag.* 327, 128–135. doi:10.1016/j.foreco.2014.05.008

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yadav, N. K., Vaidya, B. N., Henderson, K., Lee, J. F., Stewart, W. M., Dhekney, S. A., et al. (2013). A review of Paulownia biotechnology: a short rotation, fast growing multipurpose bioenergy tree. *Am. J. Plant Sci.* 4, 2070–2082. doi:10.4236/ajps.2013.411259

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yan, Y. H., Borhani, T., Subraveti, G., Pai, N., Prasad, V., Rajendran, A., et al. (2021). Harnessing the power of machine learning for carbon capture, utilisation, and storage (CCUS)—a state-of-the-art review. *Energy and Environ. Sci.* 14, 6122–6157. doi:10.1039/d1ee02395k

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yang, H., Zhang, P., Xu, X., Chen, X., Liu, Q., and Jiang, C. (2019). The enhanced immunological activity of Paulownia tomentosa flower polysaccharide on Newcastle disease vaccine in chicken. *Biosci. Rep.* 39. doi:10.1042/bsr20190224

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yi, W., Nadeem, F., Xu, G., Zhang, Q., Joshee, N., and Tahir, N. (2020). Modifying crystallinity, and thermo-optical characteristics of Paulownia biomass through ultrafine grinding and evaluation of biohydrogen production potential. *J. Clean. Prod.* 269, 122386. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122386

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yu, Y., Jiang, X., Ramaswamy, H. S., Zhu, S., and Li, H. (2018). Effect of high-pressure densification on moisture sorption properties of Paulownia wood. *BioResources* 13, 2473–2486. doi:10.15376/biores.13.2.2473-2486

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Yuen, J. Q., Ziegler, A. D., Webb, E. L., and Ryan, C. M. (2013). Uncertainty in below-ground carbon biomass for major land covers in Southeast Asia. *For. Ecol. Manag.* 310, 915–926. doi:10.1016/j.foreco.2013.09.042

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Zhang, C., Chen, X., Wang, J., and Tan, L. (2017). Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae. *Environ. Pollut.* 220, 1282–1288. doi:10.1016/j.envpol.2016.11.005

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Zhang, Q., Jin, P., Li, Y., Zhang, Z., Zhang, H., Ru, G., et al. (2022). Analysis of the characteristics of paulownia lignocellulose and hydrogen production potential via photo fermentation. *Bioresour. Technol.* 344, 126361. doi:10.1016/j.biortech.2021.126361

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Zhao, Y., Qiao, J., Feng, Y., Wang, B., Duan, W., Zhou, H., et al. (2019). The optimal size of a Paulownia-crop agroforestry system for maximal economic return in North China Plain. *Agric. For. Meteorology* 269, 1–9. doi:10.1016/j.agrformet.2019.01.043

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Zhu, X.-G., Long, S. P., and Ort, D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annu. Rev. plant Biol.* 61, 235–261. doi:10.1146/annurev-arplant-042809-112206

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

Zhu, Z.-H., Chao, C.-J., Lu, X.-Y., and Xiong, Y. G. (1986). *Paulownia in China: cultivation and utilization*. International Development Research Centre.

Google Scholar

Ziegler, A. D., Phelps, J., Yuen, J. Q., Webb, E. L., Lawrence, D., Fox, J. M., et al. (2012). Carbon outcomes of major land-cover transitions in SE Asia: great uncertainties and REDD+ policy implications. *Glob. change Biol.* 18, 3087–3099. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02747.x

PubMed Abstract | CrossRef Full Text | Google Scholar

Zuazo, V. H. D., Bocanegra, J. A. J., Torres, F. P., Pleguezuelo, C. R. R., and Martínez, J. R. F. (2013). Biomass yield potential of paulownia trees in a semi-arid Mediterranean environment (S Spain). *Int. J. Renew. Energy Res.* 3, 789–793.

Google Scholar

**Keywords:** global warming, carbon concentrating mechanism, carbon pathways, Paulownia tree, Rubisco, PEPCase, carbon dioxide biofixation

**Citation:** Ghazzawy HS, Bakr A, Mansour AT and Ashour M (2024) Paulownia trees as a sustainable solution for CO<sub>2</sub> mitigation: assessing progress toward 2050 climate goals. *Front. Environ. Sci.* 12:1307840. doi: 10.3389/fenvs.2024.1307840

**Received:** 05 October 2023; **Accepted:** 12 February 2024;

**Published:** 28 February 2024.

**Edited by:**

Haipeng Yu, Chinese Academy of Sciences (CAS), China

**Reviewed by:**

Nadeem Tahir, Henan Agricultural University, China

Manoj Kumar Jhariya, Sant Gahira Guru Vishwavidyalaya, India

**Copyright** © 2024 Ghazzawy, Bakr, Mansour og Ashour. Dette er en artikel med åben adgang, der distribueres under vilkårene i Creative Commons Attribution License (CC BY). Brug, distribution eller reproduktion i andre fora er tilladt, forudsat at den eller de originale forfattere og copyright-indehaverne krediteres, og at den originale publikation i dette tidsskrift er citeret i overensstemmelse med accepteret akademisk praksis. Ingen brug, distribution eller reproduktion er tilladt, som ikke er i overensstemmelse med disse vilkår.

**\*Korrespondance:** Hesham S. Ghazzawy, hghazzawy@kfu.edu.sa ; Mohamed Ashour, microalgae\_egypt@yahoo.com

**Ansvarsfraskrivelse:** Alle påstande udtrykt i denne artikel er udelukkende forfatterens og repræsenterer ikke nødvendigvis påstandene fra deres tilknyttede organisationer eller udgiverens, redaktørerne og anmelderne. Ethvert produkt, der kan vurderes i denne artikel eller påstand, som kan fremsættes af dets producent, er ikke garanteret eller godkendt af udgiveren.

## Retningslinier



## Udforske



## Opsøgende



## Forbinde



Følg os



© 2024 Frontiers Media SA Alle rettigheder  
forbeholdes

[Fortrolighedspolitik](#) | [Vilkår og betingelser](#)