



# L'inverdimento globale continua nonostante l'aumento dello stress da siccità dal 2000

Xin Chen <sup>a</sup>, Tiexi Chen <sup>a,b</sup>  , Bin He <sup>c</sup>, Shuci Liu <sup>d</sup>, Shengjie Zhou <sup>a</sup>, Tingting Shi <sup>e</sup>

Mostra di più 

 Struttura |  Condividi  Citare

<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02791> 

[Ottieni diritti e contenuti](#) 

Sotto un Creative Commons [licenza](#) 

 [accesso aperto](#)

## Punti salienti

- L'inverdimento globale è un fatto indiscutibile.
- Il tasso di inverdimento globale è leggermente aumentato.
- La siccità ha solo rallentato l'inverdimento globale, ma non ha causato l'imbrunimento globale.

## Astratto

Pdf by:  
<https://www.pro-memoria.info>

Gli aumenti o le diminuzioni del verde della vegetazione basata sul telerilevamento sono di solito indicati come inverdimento o abbronzatura. La fecondazione di CO<sub>2</sub> insieme alla gestione del suolo ha determinato che l'inverdimento è dominante. Tuttavia, recentemente sono stati ampiamente riportati anche i segnali di rosolamento globale a causa dello stress da siccità. In questo studio, abbiamo utilizzato i quattro ultimi set di dati dell'indice dell'area fogliare (LAI) per esplorare questo argomento controverso e abbiamo scoperto che l'inverdimento globale non era solo presente (tendenza tra  $3,1-6,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) ma continuava anche (tendenza del tasso di crescita tra  $3,3-6,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-2}$ ) durante il 2001-2020. L'accelerazione dell'iridiscimento si è verificata nel 55,15% del globo (tendenza positiva e tendenza del tasso di crescita positiva), mentre l'accelerazione dell'irrorimento si è verificata solo nel 7,28% (tendenza negativa e tendenza del tasso di crescita positiva). In combinazione con le variabili meteorologiche, abbiamo scoperto che il

cambiamento di CO<sub>2</sub> ha dominato la tendenza LAI, mentre il cambiamento climatico ha in gran parte determinato la tendenza del tasso di crescita LAI. È importante sottolineare che il nostro studio ha evidenziato che la tendenza alla siccità non ha necessariamente innescato l'imbrunimento della vegetazione, ma ha rallentato il tasso di inverdimento.

 precedente

successivo 

## Parole chiave

Indice dell'area fogliare; Tasso; di crescita ; Inverdimento globale; Cambiamento; climatico; Tendenza; della siccità

## 1. Introduzione

La vegetazione è una delle componenti fondamentali degli ecosistemi terrestri e un regolatore del cambiamento climatico ([Alkama et al., 2022](#), [Griscom et al., 2017](#)). Dagli anni '80, l'indice globale dell'area fogliare (LAI) basato su osservazioni satellitari ha mostrato una tendenza all'aumento significativa, che è ampiamente nota come inverdimento ([Piao et al., 2020a](#)). Numerosi studi hanno confermato il fenomeno dell'inverdimento, studiato i driver e le influenze corrispondenti ([Chen et al., 2019a](#), [Chen et al., 2022b](#), [Zhu et al., 2016](#)). Questi studi hanno scoperto che l'inverdimento globale potrebbe ridurre il riscaldamento climatico aumentando il sequestro del carbonio terrestre e il raffreddamento della superficie ([Chen et al., 2019b](#), [Zeng et al., 2018](#)).

Tuttavia, la conclusione dell'inverdimento è stata recentemente messa in discussione, con alcuni studi che hanno rilevato che l'inverdimento globale è rimasto stagnante o addirittura è diventato inbrunimento dopo il 2000 ([Chen et al., 2022a](#), [Liu et al., 2023](#), [Pan et al., 2018](#), [Yuan et al., 2019](#)). Pertanto, negli ultimi anni è stata prestata sempre più attenzione al fatto che la vegetazione globale stia continuamente inverdendo o diventando marrone ([Jiang et al., 2017](#), [Wang et al., 2022](#)). Tuttavia, i risultati sembrano essere sensibili ai set di dati scelti con versioni o fonti diverse. Ad esempio, l'Encened Vegetation Index (EVI) di MODIS ha mostrato tendenze opposte nella versione 5 e nella versione 6 ([Zhang et al., 2017](#)). AVHRR-LAI ha illustrato l'imbrunimento globale dopo il 2000 ([Chen et al., 2022a](#)), che era in contrasto con i risultati precedenti basati su MODIS-LAI ([Chen et al., 2019a](#)).

L'incoerenza di questi risultati ha anche portato a diffuse polemiche tra gli studi sull'identificazione dei fattori chiave. Gli studi a sostegno dell'irroramento globale attribuiscono principalmente l'inbrunimento all'aumento dello stress da siccità e riportano potenziali meccanismi come un forte aumento della differenza di pressione di vapore saturo atmosferico (VPD) che limita la crescita della vegetazione ([Yuan et al., 2019](#)), temperature ottimali eccessive che inibiscono la fotosintesi della vegetazione ([Chen et al., 2022a](#)), l'aumento della restrizione dell'acqua sulla vegetazione ([Jiao et al., 2021](#)) e la riduzione degli effetti di fecondazione di CO<sub>2</sub> a causa della disponibilità di acqua e nutrienti ([Wang et al., 2020](#)). Tuttavia, i modelli e le osservazioni basati sui processi suggeriscono che la vegetazione globale è ancora influenzata positivamente dalla fecondazione con CO<sub>2</sub> e dalla gestione del suolo, rendendo dominante l'inverdimento ([Chen et al., 2019a](#), [Zhu et al., 2016](#)).

Queste controversie non solo aumentano l'incertezza nella stima delle fonti e dei pozzi di carbonio terrestri globali, ma ostacolano anche una migliore comprensione dei processi all'interno del ciclo del carbonio terrestre, che è di fondamentale importanza per lo sviluppo di modelli per descrivere questi processi.

Diversi set di dati chiave LAI sono stati significativamente aggiornati di recente, offrendo l'opportunità di riesaminare le tendenze globali del cambiamento della vegetazione e i loro driver per quasi due decenni. Il GIMMS-LAI3g ampiamente utilizzato è stato ulteriormente aggiornato a GIMMS-LAI4g, che risolve una serie di problemi come la deriva del sensore (Cao et al., 2023). GLASS-LAI è stato anche aggiornato alla versione 6, che mostra una maggiore precisione rispetto ad altri prodotti (Ma e Liang, 2022). L'aggiornamento di questi prodotti può contribuire a ridurre l'incertezza nell'analisi delle tendenze globali del cambiamento della vegetazione dopo il 2000.

Inoltre, la regressione lineare viene spesso utilizzata per analizzare l'andamento del cambiamento della vegetazione nello studio attuale. Tuttavia, la tendenza al cambiamento della vegetazione nel periodo successivo può essere coperta nel caso di inverdimento diffuso (o rioscorimento) nel periodo precedente (Pan et al., 2018). Alcuni studi utilizzano la regressione lineare a pezzi per caratterizzare le differenze nel cambiamento della vegetazione in diversi periodi di tempo, ma questo limita l'applicazione di alcuni set di dati con serie temporali più brevi (Chen et al., 2020, Wang et al., 2011). Pertanto, un altro potenziale problema è come determinare un indicatore affidabile del fatto che la tendenza al cambiamento della vegetazione sia cambiata in un breve periodo di tempo.

Al fine di esplorare questi problemi, in questo studio, abbiamo analizzato le tendenze globali del cambiamento della vegetazione dal 2001 al 2020 sulla base dell'ultima versione dei set di dati LAI. È importante sottolineare che abbiamo anche introdotto il concetto di tasso di crescita LAI per analizzare il tasso di inverdimento (marronatura). Infine, abbiamo ulteriormente analizzato i driver della tendenza LAI e della tendenza del tasso di crescita LAI.

## 2. Metodo

### 2.1. Dati satellitari

LAI ha un significato fisico più chiaro rispetto ad altri verdi della vegetazione, che caratterizza l'area delle foglie verdi sul terreno (Fang et al., 2019). Pertanto, abbiamo raccolto quattro set di dati LAI ampiamente utilizzati, tra cui MODIS-LAI (C61), GLASS-LAI (V6), GIMMS-LAI4g (V1) e GLOBMap-LAI (V3), e questi set di dati sono disponibili nel periodo 2001-2020. MODIS-LAI è generato sulla base delle informazioni spettrali della banda rossa e della banda vicino infrarossa utilizzando la tabella di ricerca (Knyazikhin et al., 1998). La risoluzione spaziale del set di dati è di 500 m e la risoluzione temporale è di 8 giorni. GLASS-LAI è generato sulla base dei dati di riflettanza superficiale MODIS utilizzando il modello di memoria bidirezionale a lungo termine e ha un'elevata precisione rispetto all'osservazione (Ma e Liang, 2022). La risoluzione spaziale del set di dati è di 0,05° e la risoluzione temporale è di 8 giorni. GIMMS-LAI4g è generato sulla base del prodotto PKU GIMMS NDVI (fonte di dati da AVHRR e MODIS) e 3,6 milioni di campioni Landsat LAI di alta qualità utilizzando la rete neurale di propagazione posteriore, che elimina gli effetti della deriva dell'orbita satellitare e del degrado del sensore (Cao et al., 2023). La risoluzione spaziale di questo set di dati è di 1/12° e la risoluzione temporale è di mezzo mese. GLOBMap-LAI è generato sulla base dei dati di riflettanza superficiale MODIS utilizzando l'algoritmo GLOBCARBON-LAI (Liu et al., 2012). La risoluzione spaziale di questo set di dati

è di 1/13,75° e la risoluzione temporale è di mezzo mese. Inoltre, abbiamo utilizzato il set di dati sul verde della vegetazione, tra cui MODIS-NDVI (0,05°, 8 giorni), MODIS-EVI (0,05°, 8 giorni) e PKU GIMMS-NDVI (1/12°, mezzo mese) (Li et al., 2023a) come dati ausiliari per determinare le tendenze globali del cambiamento della vegetazione. Tutti i pixel in ogni cella della griglia di 0,5° con il centro di ogni set di dati LAI e vegetazione greenness sono stati mediati a 0,5° per l'upsampling globale e tutti i dati sono stati aggregati su scala mensile per soddisfare la coerenza spazio-temporale.

## 2.2. Dati meteorologici e dati sulla concentrazione di CO2

I dati meteorologici sono stati ottenuti da ERA5-land (Munoz-Sabater et al., 2021) e le variabili selezionate includevano temperatura dell'aria, precipitazioni, radiazioni, temperatura del punto di rugiada e umidità del suolo superficiale. La risoluzione spaziale di questi dati è di 0,1° e la risoluzione temporale è mensile. Per allinearsi con i set di dati LAI, tutti i pixel dei dati meteorologici all'interno della cella della griglia di 0,5° sono stati scalati. Vale la pena notare che il VPD non è stato utilizzato nel nostro studio, sebbene sia un fattore meteorologico molto importante per la vegetazione, abbiamo scoperto che ha multicollinearità con altre variabili meteorologiche (il fattore di inflazione di varianza media globale era superiore a 10), quindi per evitare di coprire il contributo di altri driver al cambiamento della vegetazione, non è stato utilizzato il VPD. I dati sulla concentrazione di CO2 sono stati ottenuti dal set di dati CarbonTracker (CT2022) con una risoluzione spaziale di 3°× 2° su scala temporale mensile (Jacobson et al., 2023), che è stato ridimensionato a 0,5° utilizzando il metodo di ricampionamento del vicino più vicino.

## 2.3. Tendenze e tendenza del tasso di crescita

Le tendenze che rappresentano i cambiamenti interannuali della vegetazione e delle variabili meteorologiche su scala globale e di griglia sono state stimate utilizzando i minimi quadrati lineari e il t-test a due code. Inoltre, abbiamo ulteriormente stimato il tasso di crescita di tutti i dati, un concetto comunemente applicato alla concentrazione di CO2 atmosferica (Keenan et al., 2016), che viene utilizzato per rappresentare il tasso di variazione della vegetazione e delle variabili meteorologiche, come segue:

$$Data_{gr} = Data_{t+1} - Data_t$$

dove  $Data_{gr}$  rappresenta il tasso di crescita e  $t$  rappresenta un anno dal 2001 al 2020. Sono state analizzate anche le tendenze del tasso di crescita nelle serie temporali. Pertanto, ci sono quattro combinazioni di LAI: una tendenza positiva con una tendenza positiva del tasso di crescita (PP) indica che l'inverdimento sta accelerando; una tendenza positiva con una tendenza negativa del tasso di crescita (PN) indica che l'inverdimento sta rallentando; una tendenza negativa con una tendenza del tasso di crescita positiva (NP) indica che l'imbrunimento sta accelerando; una tendenza negativa con una tendenza negativa del tasso di crescita (NN) indica che l'imbrunimento sta rallentando.

## 2.4. Analisi di attribuzione

Il modello di regressione lineare multipla è stato utilizzato per quantificare il contributo di tutti i driver alla tendenza LAI e alla tendenza del tasso di crescita LAI, e questo metodo è stato ampiamente utilizzato nella quantificazione dei driver della tendenza al cambiamento della vegetazione (Jung et al., 2017, Li et al., 2023b, Song et al., 2022, Zou et al., 2023). In particolare, le variabili meteorologiche, cioè CO2, temperatura dell'aria (Airt), precipitazioni (P), radiazioni (Srad) e umidità del suolo superficiale (SM) sono state utilizzate come

variabili predittive e il LAI e il tasso di crescita LAI come variabili di risposta. Prendendo come esempio la tendenza LAI, il modello può essere espresso come

$$LAI_{obs} = \beta_{CO_2} \times CO_2 + \beta_{Airt} \times Airt + \beta_P \times P + \beta_{Srad} \times Srad + \beta_{SM} \times SM + \delta$$

dove LAI<sub>obs</sub> rappresenta il LAI osservato dal satellite durante il 2001-2020,  $\beta_{CO_2}$ ,  $\beta_{Airt}$ ,  $\beta_P$ ,  $\beta_{Srad}$  e  $\beta_{SM}$  rappresentano rispettivamente i fattori di sensibilità di CO<sub>2</sub>, temperatura, precipitazioni, radiazioni e umidità del suolo alla tendenza LAI, e  $\delta$  è un termine di errore casuale. Pertanto, il contributo relativo di diversi driver alla tendenza LAI può essere ottenuto utilizzando il fattore di sensibilità moltiplicato per i cambiamenti interannuali di diversi driver, cioè

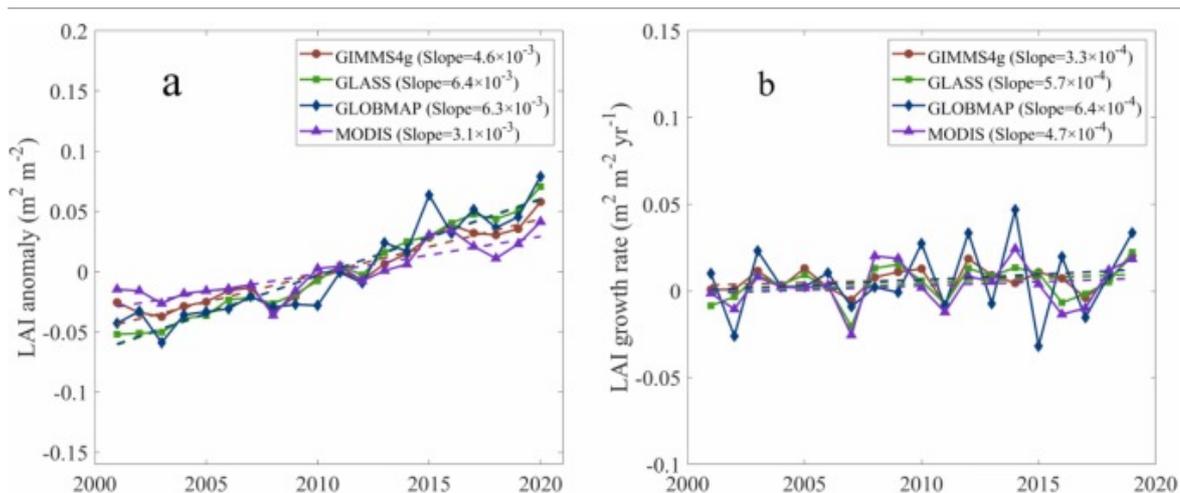
$$LAI_{obs} = LAI_{CO_2} + LAI_{Airt} + LAI_P + LAI_{Srad} + LAI_{SM} + \delta$$

dove LAI<sub>CO<sub>2</sub></sub>, LAI<sub>Airt</sub>, LAI<sub>P</sub>, LAI<sub>Srad</sub> e LAI<sub>SM</sub> rappresentano rispettivamente i contributi relativi di CO<sub>2</sub>, temperatura, precipitazioni, radiazioni e umidità del suolo alla tendenza LAI. Allo stesso modo, abbiamo calcolato il contributo di ciascun driver all'andamento del tasso di crescita LAI.

Al fine di ridurre l'incertezza del modello di regressione lineare multipla nell'analisi di attribuzione, abbiamo anche usato l'analisi di correlazione parziale per identificare l'influenza di diversi fattori sulla tendenza LAI e sull'andamento del tasso di crescita.

### 3. Risultato

Tutti e quattro i set di dati LAI hanno mostrato un significativo inverdimento globale ( $p < 0,05$ ) con una tendenza tra  $3,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  e  $6,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (Fig. 1a). Nel frattempo, il tasso di crescita LAI ha mostrato una leggera tendenza all'aumento con valori tra  $3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-2}$  e  $6,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-2}$  (Fig. 1b), sebbene nessuno di essi fosse significativo ( $p > 0,05$ ). Fig. S1 mostra la tendenza al cambiamento del verde della vegetazione. Simile a LAI, NDVI ed EVI hanno anche mostrato una significativa tendenza all'aumento e il tasso di crescita è aumentato. Pertanto, a livello globale, la vegetazione ha continuato a inverdire durante il 2001 - 2020.

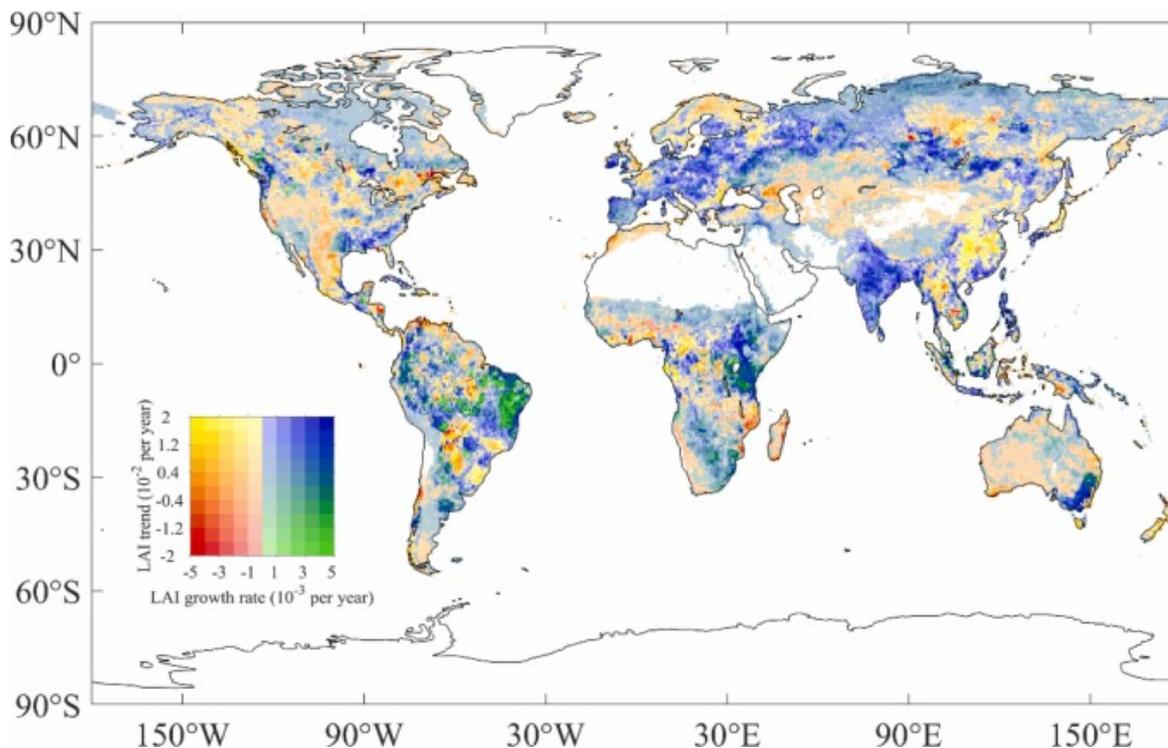


Scarica : [Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(203KB\)](#)

Scarica : [Scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 1. Tendenze (a) e tendenze del tasso di crescita (b) di quattro set di dati LAI dal 2001 al 2020.

Il modello spaziale della tendenza LAI e la tendenza del tasso di crescita LAI durante il 2001-2020 è stato ulteriormente studiato. La distribuzione delle tendenze era incoerente tra questi set di dati, specialmente nelle aree tropicali (Fig. S2). Abbiamo contato le aree con la tendenza coerente e la tendenza del tasso di crescita in quattro set di dati LAI. Come mostrato in Fig. S3, il 60,29% delle aree del globo erano incoerenti, tuttavia nelle aree coerenti, il 64,06% (25,44%/39,71%) delle aree ha mostrato un inverdimento accelerato (gruppo PP, vedi il metodo 2.3), distribuito principalmente in India, pianura europea e Africa orientale. Le aree che l'imbrunimento stava accelerando erano solo del 2,07%, e la maggior parte di esse erano distribuite nell'area orientale del Brasile. Abbiamo inoltre preso la media dei quattro set di dati come riferimento e analizzato l'andamento e l'andamento del tasso di crescita. Come mostrato in Fig. 2, l'inverdimento stava accelerando nel 55,15% del globo, tra cui l'accelerazione di inverdimento dell'India e delle pianure europee era la più ovvia, mentre l'inverdimento delle pianure della Cina e del Nord America stava rallentando. Solo il 14,44% del globo si stava abbronzando, con l'accelerazione (7,28%) e il rallentamento (7,16%) all'incirca uguale.



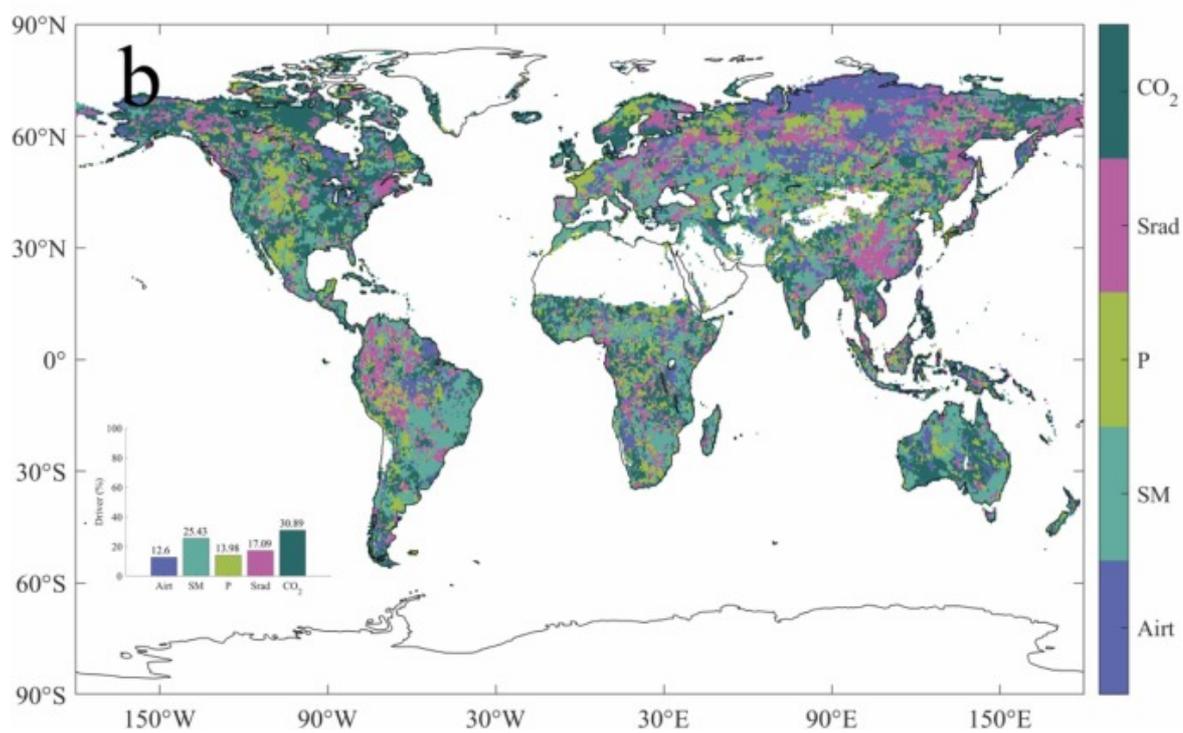
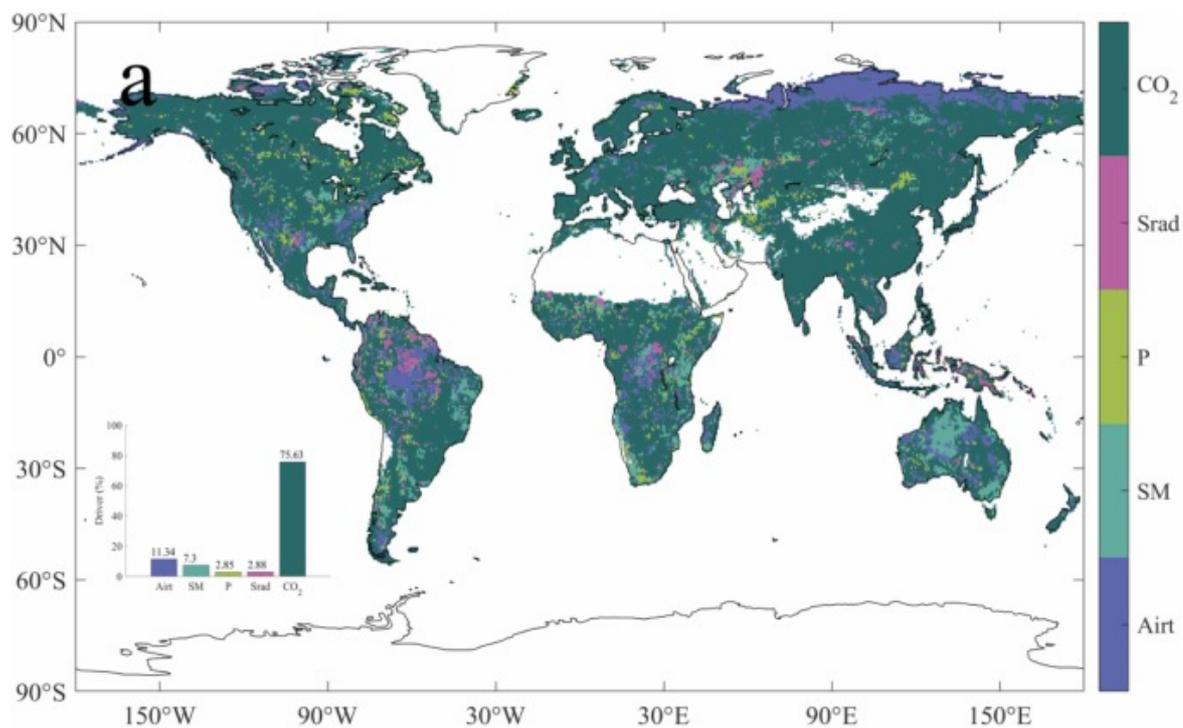
Scarica : [Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(458KB\)](#)

Scarica : [Scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 2. Distribuzione spaziale della tendenza e del tasso di crescita basata sulla media di quattro set di dati LAI. Giallo e blu indicano che LAI mostra una tendenza positiva, il giallo indica una tendenza negativa nel tasso di crescita LAI e il blu indica una tendenza positiva nel tasso di crescita LAI; il rosso e verde indicano che LAI mostra una tendenza negativa, il rosso indica una tendenza negativa nel tasso di crescita LAI e il verde indica una tendenza positiva nel tasso di crescita LAI.

Il modello di regressione lineare multipla potrebbe spiegare ( $p < 0,05$ ) la tendenza LAI e la tendenza del tasso di crescita LAI nella maggior parte delle aree del globo, e il potere esplicativo del modello era generalmente

scarso nell'Africa centrale e nelle regioni ad alta latitudine come il Nord America settentrionale (Fig. S4). L'umidità del suolo ha portato a tendenze LAI negative nella maggior parte delle aree del globo, mentre la temperatura e la CO<sub>2</sub> hanno avuto contributi positivi, specialmente in Cina, India e pianura europea (Fig. S5). Al contrario, le precipitazioni e le radiazioni non hanno avuto quasi alcun contributo alla tendenza LAI. Abbiamo inoltre calcolato i fattori dominanti della tendenza LAI in ogni griglia e abbiamo scoperto che la CO<sub>2</sub> ha dominato la tendenza LAI del 75,63% del globo, e la temperatura e l'umidità del suolo potevano raggiungere solo l'11,34% e il 7,30% rispettivamente, che erano principalmente concentrate nelle aree ad alta latitudine dell'emisfero settentrionale e dell'Australia occidentale. Tuttavia, altri fattori meteorologici potrebbero dominare la tendenza LAI solo in alcune aree (Fig. 3a).



Scarica : [Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(741KB\)](#)

Scarica : [Scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

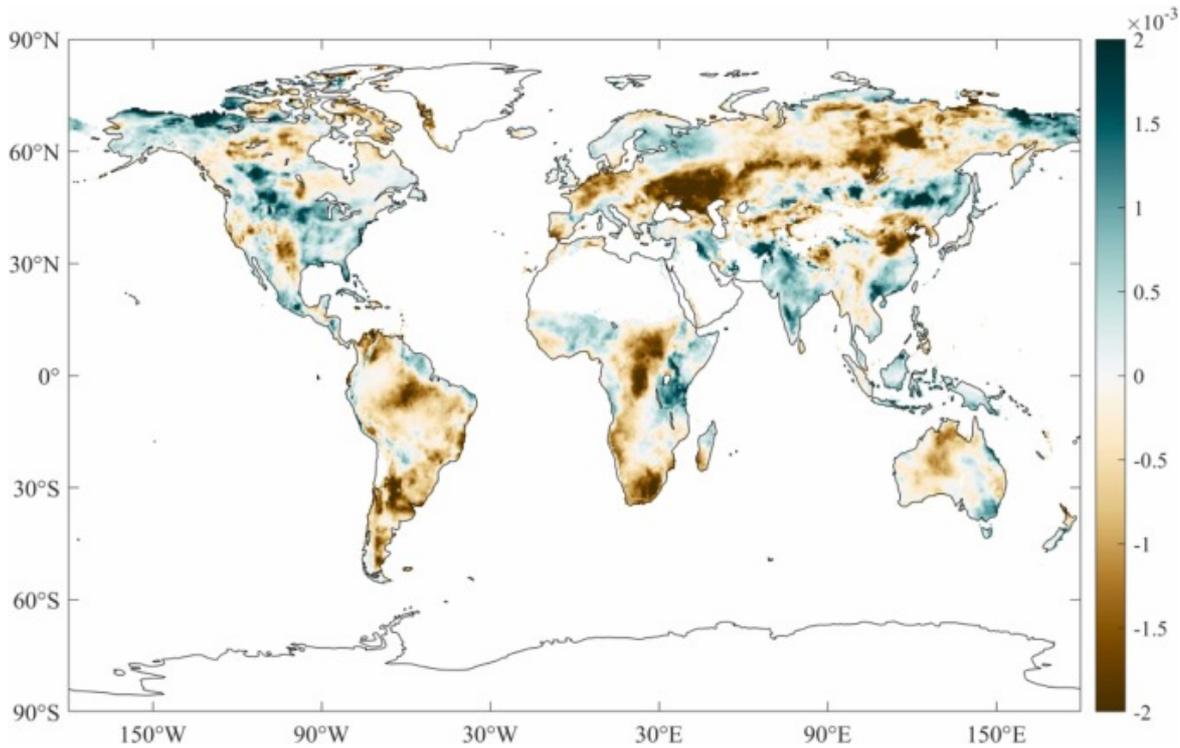
Fig. 3. I fattori dominanti della tendenza LAI (a) e della tendenza del tasso di crescita (b), definiti come i fattori che hanno contribuito maggiormente alla tendenza LAI o alla tendenza del tasso di crescita all'interno di ciascuna griglia.

Per l'andamento del tasso di crescita LAI, il contributo di ciascun driver variava con le regioni senza una chiara regola di distribuzione spaziale (Fig. 3b). In generale, l'umidità e le radiazioni del suolo hanno contribuito di

più nella maggior parte delle aree del globo, con un contributo significativamente più elevato dell'umidità del suolo rispetto ad altri fattori in aree come i tropici e l'Australia sud-orientale e un contributo negativo molto chiaro delle radiazioni nella Cina meridionale (Fig. S6). Al contrario, il contributo di temperatura, precipitazioni e CO<sub>2</sub> all'andamento del tasso di crescita LAI è stato relativamente piccolo nella maggior parte delle aree. Quando abbiamo contato il driver dominante di ogni griglia nel globo, abbiamo scoperto che la CO<sub>2</sub> poteva dominare la tendenza di crescita del LAI solo nel 30,89% delle aree, mentre la percentuale di aree dominate da fattori meteorologici è aumentata in modo significativo rispetto al loro contributo relativo alla tendenza LAI, tra cui l'umidità del suolo e le radiazioni raggiungono rispettivamente il 25,43% e il 17,09%.

L'analisi di correlazione parziale è stata utilizzata per identificare ulteriormente i fattori dominanti per la tendenza LAI e l'andamento del tasso di crescita in ogni griglia del globo. Simile ai risultati del modello di regressione multipla, la distribuzione spaziale dei due era all'incirca la stessa (Fig. S7). Tuttavia, le aree dominate dalla CO<sub>2</sub> stavano tutte diminuendo. La tendenza LAI è stata del 39,54% e la tendenza del tasso di crescita è stata dell'11,56%, causata principalmente dalle differenze nelle alte latitudini nell'emisfero settentrionale. L'analisi di correlazione parziale ha suggerito che la tendenza LAI e la tendenza del tasso di crescita in quest'area erano dominate principalmente dalla temperatura dell'aria e dalle radiazioni.

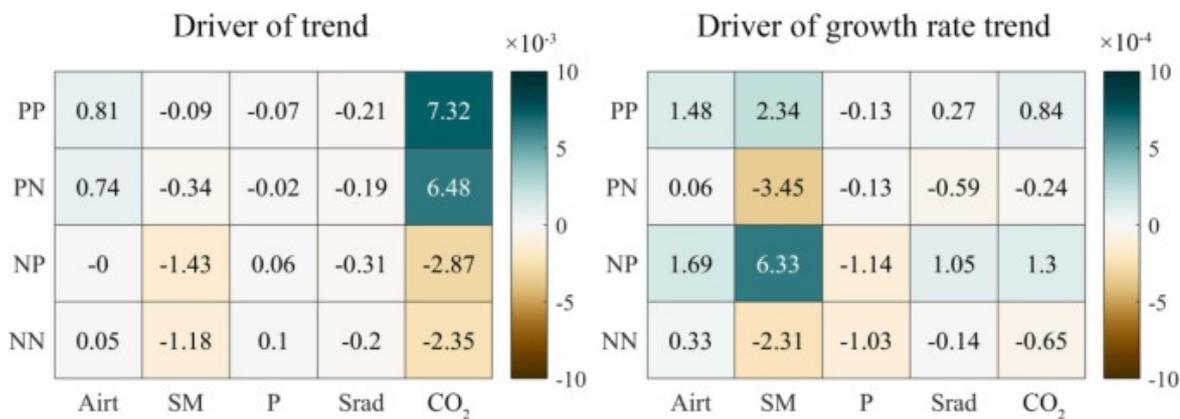
Come indice completo di temperatura e precipitazioni, l'umidità del suolo può essere utilizzata per misurare il grado di secchezza e umidità di un'area. Abbiamo notato una tendenza decrescente dell'umidità del suolo nella maggior parte del globo, indicando che lo stress da siccità era aumentato negli ultimi anni (Fig. 4). Il globo è stato diviso in quattro gruppi secondo la tendenza LAI e l'andamento del tasso di crescita come suggerito nella sezione dei metodi, cioè PP, PN, NP e NN. L'umidità del suolo nelle quattro sottoregioni ha mostrato una tendenza decrescente. La tendenza di PP, PN, NP e NN è stata  $-4,47 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  ( $p < 0,01$ ),  $-3,57 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  ( $p < 0,01$ ),  $-1,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  ( $p > 0,01$ ) e  $-0,94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  ( $p > 0,01$ ). Abbiamo inoltre calcolato l'andamento LAI e l'andamento del tasso di crescita di queste quattro sottoregioni. Come mostrato in Fig. 5, simile ai risultati dell'analisi spaziale, l'umidità del suolo ha mostrato contributi negativi alla tendenza LAI in tutte le sottoregioni, indicando che la tendenza alla siccità ha seriamente influenzato l'inverdimento della vegetazione. Nelle aree con una tendenza LAI positiva, il contributo della CO<sub>2</sub> ( $7,32 \times 10^{-3}$  e  $6,48 \times 10^{-3}$ ) è stato molto più alto di quello di altri driver, rendendo l'inverdimento globale della CO<sub>2</sub> dominante. Rispetto ad altri fattori, l'umidità del suolo ha contribuito maggiormente alla tendenza del tasso di crescita LAI, specialmente nelle aree NP e PN. Nelle aree NP, l'umidità del suolo ha avuto contributi positivi ( $6,33 \times 10^{-4}$ ), indicando che i cambiamenti dell'umidità del suolo hanno contribuito all'accelerazione dell'imbrunimento. Al contrario, l'umidità del suolo ha mostrato contributi negativi ( $-3,45 \times 10^{-4}$ ) nelle aree PN, indicando che i cambiamenti nell'umidità del suolo hanno rallentato l'inverdimento della vegetazione.



Scarica : [Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(328 KB\)](#)

Scarica : [Scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 4. Distribuzione spaziale della tendenza dell'umidità del suolo dal 2001 al 2020 (Unità:  $m^3 m^{-3} yr^{-1}$ ).



Scarica : [Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(168KB\)](#)

Scarica : [Scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 5. Contributi relativi dei driver della tendenza LAI e della tendenza del tasso di crescita in diverse aree. PP rappresenta aree con tendenza LAI positiva e tendenza del tasso di crescita positiva, PN rappresenta aree con tendenza LAI positiva e tendenza del tasso di crescita negativa, NP rappresenta aree con tendenza LAI negativa e tendenza del tasso di crescita positiva e NN rappresenta aree con tendenza LAI negativa e tendenza negativa del tasso di crescita. I contributi relativi sono stati ottenuti da una media ponderata per l'area dei contributi dei conducenti all'interno di diverse aree.

## 4. Discussioni

### 4.1. Polemica sulla tendenza al cambiamento della vegetazione dopo il 2000

Studi precedenti hanno confermato il fatto dell'inverdimento globale, ma la maggior parte di essi ha considerato la tendenza a lungo termine dal 1982, cioè tutti gli studi concordano sull'inverdimento globale durante il 1982 – 2000 (Piao et al., 2020b, Zhu et al., 2016), tuttavia non esiste un accordo diffuso sull'inverdimento globale dopo il 2000 (Liu et al., 2023, Pan et al., 2018, Yuan et al., 2019). In questo studio, sulla base degli ultimi dati di telerilevamento, cerchiamo di rispondere alla domanda chiave se il globo è diventato verde o marrone dal 2000 circa. I nostri risultati hanno mostrato che la vegetazione in tutto il mondo era inverdita e che l'inverdimento aveva mantenuto una leggera accelerazione (Fig. 1), che supporta i risultati precedenti (Chen et al., 2019a). Pertanto, la prima cosa che deve essere discussa qui sono le potenziali cause del fenomeno paradossale dell'inverdimento globale e dell'imbrunimento globale dopo il 2000. Il segnale del sensore utilizzato nei set di dati è di solito la prima considerazione. Le informazioni MODIS vengono utilizzate anche nell'algoritmo degli altri tre set di dati LAI, che portano questi set di dati che abbiamo usato non sono assolutamente indipendenti. Come tutti sappiamo, i sensori MODIS hanno superato da tempo la loro durata di servizio progettata, mostrando una serie di problemi come il degrado del sensore nella versione 5 (Tian et al., 2015, Zhang et al., 2017). Fortunatamente, MODIS è stato calibrato nelle versioni successive, il che riduce notevolmente l'incertezza di tutti i tipi di set di dati rilasciati. Inoltre, uno studio di Yan et al. (2021) ha confermato l'efficacia dell'algoritmo di calibrazione MODIS confrontando il LAI di MODIS con il successivo VIIRS lanciato, escludendo la possibilità di un falso inverdimento causato dalla degradazione del sensore.

Al contrario, l'irrogenamento globale identificato nella maggior parte degli studi attuali si basa sui risultati delle fonti di dati AVHRR (Chen et al., 2022a, Yuan et al., 2019), che dovrebbero essere usati con cautela. È risaputo che NDVI e LAI basati su AVHRR hanno molteplici fonti di incertezza. Ci sono evidenti segnali artificiali dalla deriva orbitale nei GIMMS-NDVI3g e GIMMS-LAI3g ampiamente utilizzati basati su AVHRR (Tian et al., 2015, Zhu et al., 2013). Un importante studio di Wang et al. (2020) sul continuo declino dell'effetto globale di fecondazione di CO<sub>2</sub> è anche dovuto al fatto che anche la qualità della fonte di dati AVHRR è stata ampiamente messa in discussione (Frankenberg et al., 2021, Zhu et al., 2021). Dato che l'imbrunimento globale in GIMMS-NDVI3g e GIMMS-LAI3g dopo il 2000 si traduce in inverdimento globale in PKU GIMMS-NDVI e GIMMS-LAI4g dopo il 2000 solo a causa di miglioramenti algoritmici e dell'aggiunta di informazioni MODIS, quindi una possibile ragione è che potenziali problemi con i sensori AVHRR innescano l'imbrunimento della vegetazione (Cao et al., 2023, Li et al., 2023a).

### 4.2. Indicatori del tasso di variazione della vegetazione

L'introduzione del concetto di tasso di crescita LAI fornisce una nuova prospettiva per l'analisi del cambiamento globale della vegetazione e supera in una certa misura i limiti dei tradizionali metodi di regressione a pezzi e punti di rottura. Sulla base della tendenza LAI e della tendenza del tasso di crescita LAI, abbiamo alcuni nuovi risultati. Simile ai risultati di Chen et al. (2019a), l'India e la Cina erano responsabili dell'inverdimento globale generale, ma in termini di tasso di inverdimento, i due paesi hanno mostrato direzioni opposte (Fig. 2). L'inverdimento stava accelerando in India mentre stava rallentando in Cina, cosa che è stata raramente riportata in studi precedenti. Modelli di regressione lineare multipla hanno attribuito entrambi i fenomeni agli effetti dell'umidità del suolo, della temperatura e delle radiazioni, tuttavia è chiaro che

in Cina e in India, due paesi con una significativa gestione del suolo, è ovviamente impraticabile attribuire i cambiamenti della vegetazione ai soli fattori meteorologici. Pertanto, un'altra possibile spiegazione è che la diversa gestione del territorio è responsabile della differenza nel tasso di inverdimento. In Cina, dopo un massiccio programma di imboscamento e la modernizzazione agricola, l'inverdimento potrebbe raggiungere gradualmente la saturazione (Sha et al., 2022). E in India, l'agricoltura irrigata, che ha mitigato la siccità atmosferica e del suolo e ha reso la vegetazione meno suscettibile alla pressione dell'umidità, potrebbe aver ulteriormente migliorato l'inverdimento (Ambika e Mishra, 2020).

### 4.3. Il fenomeno sinergico della tendenza alla siccità e all'inverdimento

Senza considerare le attività umane, la tendenza LAI è determinata principalmente dall'effetto positivo della fecondazione con CO<sub>2</sub> e dall'effetto negativo dello stress da siccità (Yuan et al., 2019, Zhu et al., 2016). Un crescente corpo di ricerche mostra che la crescita della vegetazione è migliorata dai vincoli di umidità a causa dell'aumento del VPD e della diminuzione dell'umidità del suolo causata dal riscaldamento climatico (Jiao et al., 2021, Liu et al., 2020). Tuttavia, non è chiaro che l'attuale tendenza alla siccità raggiunga una soglia per superare l'effetto positivo della fecondazione con CO<sub>2</sub>. L'introduzione del concetto di tasso di crescita ha fornito ulteriori spiegazioni, poiché abbiamo scoperto che la tendenza alla siccità potrebbe avere solo un impatto negativo parziale sulla vegetazione, rallentando l'inverdimento della vegetazione e accelerando l'imbrunimento della vegetazione. Tuttavia, la tendenza alla siccità non potrebbe portare all'imbrunimento globale in quanto non potrebbe superare l'effetto positivo della fecondazione di CO<sub>2</sub> che ha contribuito alla vegetazione globale (Fig. 5). Il nostro studio spiega il fenomeno sinergico delle tendenze della siccità con l'inverdimento, che è simile ai recenti risultati sulla produttività primaria lorda, cioè l'aumento della VPD compensa solo una piccola frazione dell'aumento della produttività causato dal riscaldamento e dalla CO<sub>2</sub> e la produttività primaria lorda è ancora in aumento a livello globale (Song et al., 2022).

### 4.4. Limitazioni e prospettive

Nell'analisi di attribuzione della tendenza LAI e della tendenza del tasso di crescita, ci sono state alcune differenze tra il modello di regressione lineare multipla e l'analisi di correlazione parziale alle alte latitudini dell'emisfero settentrionale. L'analisi di correlazione parziale ha mostrato che la tendenza LAI e la tendenza del tasso di crescita in questa regione sono state influenzate principalmente dalla temperatura e dalle radiazioni, mentre la regressione lineare multipla ha suggerito che la CO<sub>2</sub> era il driver dominante. I risultati dell'analisi di correlazione parziale sembrano più ragionevoli perché alcuni studi precedenti hanno dimostrato che il cambiamento della vegetazione alle alte latitudini dell'emisfero settentrionale è principalmente influenzato positivamente dal riscaldamento climatico (Berner et al., 2020, Keenan e Riley, 2018). Il modello di regressione lineare multipla si è comportato relativamente male in questa regione e potrebbe non identificare pienamente il contributo dei singoli driver. Inoltre, il nostro modello non include il contributo della gestione del territorio, che è stato evidenziato in alcuni studi precedenti (Chen et al., 2019a, Chen et al., 2022c, Chen et al., 2023). Naturalmente, il contributo della gestione del territorio alla tendenza LAI e alla tendenza del tasso di crescita può essere implicito in altri fattori, come il contributo positivo della CO<sub>2</sub> alla tendenza LAI nelle aree PP e PN.

Studi precedenti hanno dimostrato potenziali meccanismi con cui diversi fattori influenzano la tendenza LAI, come il riscaldamento climatico che promuove l'inverdimento attraverso l'allungamento della stagione di crescita alle alte latitudini (Keenan e Riley, 2018), gli effetti di fecondazione di CO<sub>2</sub> che promuovono

l'aumento del LAI (Zhu et al., 2016) e l'imboschimento e la modernizzazione agricola che portano all'inverdimento in Cina e in India (Chen et al., 2019a). Tuttavia, per quanto si tratta della tendenza del tasso di crescita LAI, questo è un nuovo concetto. Anche se abbiamo quantificato il contributo di diversi fattori alla tendenza del tasso di crescita del LAI su scala globale, non ci sono ulteriori studi sul suo potenziale meccanismo. Negli studi futuri, possiamo provare a esplorare questo problema, specialmente in Cina e in India, due paesi con tendenze opposte del tasso di crescita LAI.

## 5. Conclusione

In conclusione, sulla base degli ultimi dati di telerilevamento, abbiamo esplorato l'importante questione delle tendenze globali del cambiamento della vegetazione dopo il 2000. È importante sottolineare che abbiamo introdotto il concetto di tasso di crescita per caratterizzare il tasso di inverdimento/marrone. I nostri risultati hanno mostrato che l'inverdimento globale era ancora presente nel 2001-2020, con il 55,15% delle aree che si inverdisce a un ritmo accelerato, principalmente concentrato in India e nelle pianure europee, rispetto al 7,28% dell'imbrunimento. La regressione lineare multipla e l'analisi di correlazione parziale hanno convenuto che la CO<sub>2</sub> ha dominato la tendenza LAI, mentre il cambiamento climatico ha determinato la tendenza del tasso di crescita LAI. Analizzando diverse sottoregioni del globo, abbiamo scoperto che la tendenza alla siccità ha solo rallentato l'inverdimento globale, ma era lontana dall'innescare l'imbrunimento. Questi risultati miglioreranno la nostra comprensione dei processi all'interno del ciclo del carbonio e ridurranno il divario di ricerca per definire meglio se lo stato della vegetazione globale sta inverdendo o imbrorando negli ultimi due decenni.

PDF by:  
<https://www.pro-memoria.info>

## Dichiarazione di contributo alla paternità di CRediT

**Liu Shuci:** convalida, scrittura – bozza originale. **He Bin:** Convalida, scrittura – bozza originale. **Chen Tiexi:** concettualizzazione, metodologia, convalida, visualizzazione, scrittura – bozza originale, scrittura – revisione e modifica. **Chen Xin:** concettualizzazione, cura dei dati, analisi formale, metodologia, software, convalida, scrittura – bozza originale, scrittura – revisione e modifica, visualizzazione. **Shi Tingting:** convalida, scrittura – bozza originale. **Zhou Shengjie:** Convalida, scrittura – bozza originale.

## Dichiarazione di interesse concorrente

Gli autori dichiarano di non avere interessi finanziari concorrenti o relazioni personali note che potrebbero aver potuto influenzare il lavoro riportato in questo documento.

## Ringraziamenti

Questo studio è stato sostenuto dalla National Natural Science Foundation of China (n. [42130506](#), [42161144003](#) e [31570464](#)) e dal Postgraduate Research & Practice Innovation Program della provincia di Jiangsu (n. [KYCX23\\_1322](#)).

## Contributi dell'autore

X.C. ha compilato i dati, condotto analisi, preparato cifre. X.C. e T.X.C. hanno scritto il manoscritto. X.C. e T.X.C. hanno concepito le idee scientifiche e hanno progettato questa ricerca. B.H., S.C.L, S.J.Z. e T.T.S. hanno dato

suggerimenti costruttivi per migliorare il manoscritto.

## Appendice A. Materiale supplementare

---

 [Scarica : Scarica il documento Word \(3MB\)](#)

Materiale supplementare

.

[Articoli consigliati](#)

## Disponibilità dei dati

I dati saranno resi disponibili su richiesta.

## Riferimenti

[Alkama et al., 2022](#) R. Alkama, *et al.*

**Mitigazione del clima basata sulla vegetazione in un mondo più caldo e verde**

Nat. Comun., 13 (1) (2022), articolo 606

 [Visualizza PDF](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Ambika e Mishra, 2020](#) A.K. Ambika, V. Mishra

**Sostanziale declino dell'aridità atmosferica dovuto all'irrigazione in India**

Ambiente. Res. Lett., 15 (12) (2020), Articolo 124060

 [Visualizza PDF](#) [Riferimento incrociato](#) [Google Scholar](#)

[Berner et al., 2020](#) L.T. Berner, *et al.*

**Il riscaldamento estivo spiega l'inverdimento diffuso ma non uniforme nel bioma della tundra artico**

Nat. Commun., 11 (1) (2020), articolo 4621

 [Visualizza PDF](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Cao et al., 2023](#) S. Cao, *et al.*

**Set di dati globale spazio-temporalmente coerente dell'indice dell'area fogliare GIMMS (GIMMS LAI4g) dal 1982 al 2020**

Sistema terrestre. Sci. Dati, 15 (11) (2023), pp. 4877-4899

[Visualizza l'articolo](#) [Riferimento incrociato](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2022a](#) B. Chen, *et al.*

**Effetti inibitori del recente superamento della temperatura dell'aria Optima della produttività della vegetazione e dell'aumento della limitazione dell'acqua sulla fotosintesi inverte invertimento dell'inverdimento globale**

della Terra. Futuro, 10 (11) (2022), Articolo e2022EF002788

 [Visualizza PDF](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2019a](#) C. Chen, *et al.*

## La Cina e l'India sono leader nell'inverdimento del mondo attraverso la gestione dell'uso del suolo

Nat. Sustain., 2 (2) (2019), pp. 122-129

[Visualizza l'articolo](#) [Riferimento incrociato](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2019b](#) J.M. Chen, *et al.*

## Il cambiamento strutturale della vegetazione dal 1981 ha migliorato significativamente il pozzo di carbonio terrestre

Nat. Commun., 10 (1) (2019), Articolo 4259

 [Visualizza PDF](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2020](#) T. Chen, *et al.*

## L'inverdimento e l'inumentazione del Sahel si sono livellati dal 1999 circa in relazione alla SST

Remote Sens., 12 (17) (2020), p. 2723

[Visualizza l'articolo](#) [Riferimento incrociato](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2022b](#) T. Chen, *et al.*

## La gestione del territorio spiega il modello di inverdimento contrastante attraverso il confine Cina-Russia basato sull'approccio dell'esperimento di uso del suolo accoppiato

J. Geophys. Res.: Biogeoscienze, 127 (6) (2022), Articlee2021JG006659

 [Visualizza PDF](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2022c](#) T. Chen, *et al.*

## La gestione del territorio contribuisce in modo significativo all'arrosciamento della vegetazione osservata in Siria durante il 2001-2018

Biogeoscienze, 19 (5) (2022), pp. 1515-1525

[Visualizza l'articolo](#) [Riferimento incrociato](#) [Google Scholar](#)

[Chen et al., 2023](#) X. Chen, A. Cai, R. Guo, C. Liang, Y. Li

## Variazione della produttività primaria lorda dominata dall'indice di area fogliare in area di inverdimento significativo

J. Geogr. Sci., 33 (8) (2023), pp. 1747-1764

[Google Scholar](#)

[Fang et al., 2019](#) H. Fang, F. Baret, S. Plummer, G. Schaepman-Strub

## Una panoramica dell'indice globale dell'area fogliare (LAI): metodi, prodotti, convalida e applicazioni

Rev. Geophys., 57 (3) (2019), pp. 739-799

[Visualizza l'articolo](#) [Riferimento incrociato](#) [Vista in Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Frankenberg et al., 2021](#) C. Frankenberg, Y. Yin, B. Byrne, L. Lui, P. Gentine

## Commento su "recente declino globale degli effetti della fecondazione di CO<sub>2</sub> sulla fotosintesi della vegetazione" COMMENTO

Scienza, 373 (6562) (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Griscom et al., 2017](#) B.W. Griscom, *et al.*

## Soluzioni climatiche naturali

Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 114 (44) (2017), pp. 11645-11650

[Visualizza l'articolo ↗](#)

[Riferimento incrociato ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Jacobson et al., 2023](#) Jacobson, A.R. et al., 2023. CarbonTracker CT2022. Laboratorio di monitoraggio globale della NOAA.

[Google Scholar ↗](#)

[Jiang et al., 2017](#) C. Jiang, *et al.*

## Incoerenze della variabilità interannuale e delle tendenze nei prodotti a lungo termine dell'indice dell'area fogliare satellitare

Glob. Change Biol., 23 (10) (2017), pp. 4133-4146

[Visualizza l'articolo ↗](#)

[Riferimento incrociato ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Jiao et al., 2021](#) W. Jiao, *et al.*

## Osservato un aumento del vincolo idrico sulla crescita della vegetazione negli ultimi tre decenni

Nat. Commun., 12 (1) (2021), articolo 3777



[Visualizza PDF ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Jung et al., 2017](#) M. Jung, *et al.*

## Gli effetti compensativi dell'acqua collegano le variazioni annuali del pozzo di CO<sub>2</sub> della terra globale alla temperatura

Natura, 541 (7638) (2017), pp. 516-520

[Visualizza l'articolo ↗](#)

[Riferimento incrociato ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Keenan et al., 2016](#) T.F. Keenan, *et al.*

## Recente pausa nel tasso di crescita della CO<sub>2</sub> atmosferica a causa del maggiore assorbimento di carbonio terrestre

Nat. Commun., 7 (1) (2016), articolo 13428



[Visualizza PDF ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Keenan e Riley, 2018](#) T.F. Keenan, W.J. Riley

## Inverdimento della superficie terrestre nelle regioni fredde del mondo coerente con il recente riscaldamento

Nat. Clim. Cambiamento, 8 (9) (2018), pp. 825-828

[Visualizza l'articolo ↗](#)

[Riferimento incrociato ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Knyazikhin et al., 1998](#) Y. Knyazikhin, J.V. Martonchik, R.B. Myneni, D.J.Diner, S.W. In esecuzione

### Algoritmo sinergico per stimare l'indice dell'area fogliare della chioma della vegetazione e la frazione della radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dai dati MODIS e MISR

J. Geophys. Res.: Atmos., 103 (D24) (1998), pp. 32257-32275

[Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Li et al., 2023a](#) M. Li, *et al.*

### Set di dati globale spaziotemporalmente coerente dell'indice di vegetazione a differenza normalizzata gimms (PKU GIMMS NDVI) dal 1982 al 2022

Sistema terrestre. Sci. Dati, 15 (9) (2023), pp. 4181-4203

[Visualizza l'articolo ↗](#) [Riferimento incrociato ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Li et al., 2023b](#) S. Li, *et al.*

### La crescita della vegetazione dovuta alla fecondazione con CO<sub>2</sub> è minacciata dall'aumento del deficit di pressione del vapore

J. Hydrol., 619 (2023), articolo 129292

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Liu et al., 2020](#) L. Liu, *et al.*

### L'umidità del suolo domina lo stress da siccità sulla produzione dell'ecosistema a livello globale

Nat. Commun., 11 (1) (2020), Articolo 4892

 [Visualizza PDF ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Liu et al., 2023](#) Q. Liu, *et al.*

### Imbrunimento della vegetazione: driver globali, impatti e feedback

Trends Plant Sci., 28 (9) (2023), pp. 1014-1032

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Liu et al., 2012](#) Y. Liu, R. Liu, J.M. Chen

### Recupero retrospettivo dell'indice globale coerente a lungo termine dell'area fogliare (1981-2011) dai dati combinati AVHRR e MODIS

J. Geophys. Res.: Biogeoscienze, 117 (G4) (2012)

[Google Scholar ↗](#)

[Ma e Liang, 2022](#) H. Ma, S. Liang

### Sviluppo del prodotto GLASS 250-m leaf area index (versione 6) dai dati MODIS utilizzando il modello di deep learning bidirezionale LSTM

Sensori a distanza Environ., 273 (2022), Articolo 112985

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Munoz-Sabater et al., 2021](#) J. Munoz-Sabater, *et al.*

### ERA5-Land: un set di dati di rianalisi globale all'avanguardia per applicazioni terrestri

Sistema terrestre. Sci. Dati, 13 (9) (2021), pp. 4349-4383

[Pan et al., 2018](#) N. Pan, *et al.*

## Aumento dell'imbrunimento della vegetazione globale nascosto nell'inverdimento generale della vegetazione: approfondimenti dalle tendenze variabili nel tempo

Sensori a distanza Environ., 214 (2018), pp. 59-72

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Piao et al., 2020a](#) S. Piao, *et al.*

## Caratteristiche, fattori e feedback dell'inverdimento globale

Nat. Rev. Earth Environ., 1 (1) (2020), pp. 14-27

[Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Piao et al., 2020b](#) S. Piao, *et al.*

## Variazione interannuale del ciclo del carbonio terrestre: questioni e prospettive

Glob. Change Biol., 26 (1) (2020), pp. 300-318

 [Visualizza PDF ↗](#) [Riferimento incrociato ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Sha et al., 2022](#) Z. Sha, *et al.*

## Il potenziale di affondamento di carbonio globale della vegetazione terrestre può essere aumentato sostanzialmente da una gestione ottimale del territorio

Comune. Earth Environ., 3 (1) (2022), p. 8

 [Visualizza PDF ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Song et al., 2022](#) Y. Canzone, W. Jiao, J. Wang, L. Wang

## Aumento della produttività globale della vegetazione nonostante la crescente siccità atmosferica negli ultimi due decenni

della Terra. Futuro, 10 (7) (2022), Articolo e2021EF002634

 [Visualizza PDF ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tian et al., 2015](#) F. Tian, *et al.*

## Valutazione della coerenza temporale dei set di dati NDVI globali a lungo termine per l'analisi delle tendenze

Sensori a distanza Environ., 163 (2015), pp. 326-340

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Wang et al., 2020](#) S. Wang, *et al.*

## Recente declino globale degli effetti della fecondazione con CO2 sulla fotosintesi della vegetazione

Scienza, 370 (6522) (2020)

1295-+

[Google Scholar ↗](#)

[Wang et al., 2011](#) X. Wang, *et al.*

## La variazione della temperatura primaverile e le sue implicazioni nel cambiamento della crescita della vegetazione in Nord America dal 1982 al 2006

Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 108 (4) (2011), pp. 1240-1245

[Visualizza l'articolo ↗](#) [Riferimento incrociato ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Wang et al., 2022](#) Z. Wang, *et al.*

### Grandi discrepanze di inverdimento globale: indicazione dei dati di telerilevamento multi-source

Glob. Ecol. Conservato, 34 (2022), Articolo e02016

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Yan et al., 2021](#) K. Yan, *et al.*

### Stabilità delle prestazioni degli algoritmi MODIS e VIIRS LAI dedotta dall'analisi di lunghe serie temporali di prodotti

Sensori a distanza Ambiente, 260 (2021), Articolo 112438

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Yuan et al., 2019](#) W. Yuan, *et al.*

### L'aumento del deficit di pressione di vapore atmosferico riduce la crescita della vegetazione globale

Sci. Adv., 5 (8) (2019), p. eaax1396

 [Visualizza PDF ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Zeng et al., 2018](#) Z. Zeng, L. Peng, S. Piao

### Risposta dell'evapotraspirazione terrestre all'inverdimento della Terra

Curr. Opin. Ambiente. Sustain., 33 (2018), pp. 9-25

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Zhang et al., 2017](#) Y. Zhang, C. Canzone, L.E. Band, G. Sun, J. Li

### Rianalisi delle tendenze globali della vegetazione terrestre dai prodotti MODIS: imbrunimento o inverdimento?

Sensori a distanza Environ., 191 (2017), pp. 145-155

 [Visualizza PDF](#) [Visualizza l'articolo](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Zhu et al., 2013](#) Z. Zhu, *et al.*

### Set di dati globali dell'indice di area fogliare di vegetazione (LAI)3g e frazione di radiazione fotosinteticamente attiva (FPAR)3g derivati da studi di modellazione e mappatura dell'inventario globale (GIMMS) indice di vegetazione a differenza normalizzata (NDVI3g) per il periodo 1981-2011

Remote Sens., 5 (2) (2013), pp. 927-948

[Visualizza l'articolo ↗](#) [Riferimento incrociato ↗](#) [Vista in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Zhu et al., 2016](#) Z. Zhu, *et al.*

### Inverdimento della terra e dei suoi driver

Nat. Clim. Cambiamento, 6 (8) (2016), pp. 791-795

[Visualizza l'articolo ↗](#)

[Riferimento incrociato ↗](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Zhu et al., 2021](#) Z. Zhu, *et al.*

## Commento su "Recente declino globale degli effetti della fecondazione di CO<sub>2</sub> sulla fotosintesi della vegetazione" COMMENTO

Scienza, 373 (6562) (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Zou et al., 2023](#) L. Zou, K. Stan, S. Cao, Z. Zhu

## I modelli dinamici di vegetazione globale potrebbero non catturare la dinamica dell'indice dell'area fogliare nelle foreste pluviali tropicali: un confronto tra dati-modelli

Agricolo. Per. Meteorol., 339 (2023), articolo 109562



[Visualizza PDF](#)

[Visualizza l'articolo](#)

[Vista in Scopus ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

Pdf by:

<https://www.pro-memoria.info>

© 2023 L'autore/i. Pubblicato da Elsevier B.V.



Tutti i contenuti di questo sito: Copyright © 2024 Elsevier B.V., i suoi licenziatari e collaboratori. Tutti i diritti sono riservati, compresi quelli per il text e data mining, la formazione sull'IA e tecnologie simili. Per tutti i contenuti ad accesso aperto, si applicano i termini di licenza Creative Commons.

