

Neue Studie: Der Einfluss steigender CO₂-Werte auf die Begrünung Indiens – einer Region ohne Nettoerwärmung seit 75 Jahren

geschrieben von Chris Frey | 9. Februar 2026

[Kenneth Richard](#) on 26. January 2026

Jahrzehntelange Satellitendaten bestätigen, dass sich die Erde seit den 1980er Jahren erheblich begrünt hat – gemessen an den steigenden Werten des Blattflächenindex (LAI).

Der CO₂-Düngungseffekt (CFE) steigert die Pflanzenproduktivität durch verbesserte Lichtausnutzungs- und Wassernutzungs-Effizienz. Mit anderen Worten: Bei erhöhtem CO₂-Gehalt wird die Photosyntheserate nicht so stark beeinträchtigt wie bei begrenzter Sonneneinstrahlung und Wasserverfügbarkeit.

Eine neue [Studie](#) zeigt, dass Indien den zweitgrößten Beitrag zur globalen Begrünung beisteuert und dass die CFE „in den letzten zwei Jahrzehnten zu einer erheblichen Ausweitung der globalen Vegetationsdecke beigetragen hat“.

Die Autoren stellten fest, dass die CFE die Trendwerte der Nettoprimärproduktion [NPP] in ganz Indien im Vergleich zu den Trendwerten ohne Berücksichtigung der CFE „fast verdoppelt“ hat.

Interessanterweise hat sich trotz des erhöhten CO₂-Gehalts ein Großteil Indiens seit 2000 abgekühlt. Während sich die südliche Halbinsel und Teile Ostindiens in diesem Jahrhundert erwärmt haben, „verzeichneten die zentralen und nordwestlichen Regionen einen Abkühlungstrend“.

Es ist anzumerken, dass der jährliche mittlere Nicht-Erwärmungstrend Indiens seit 1950 anhält (wie in Sanjay et al., 2020 [gezeigt](#)).

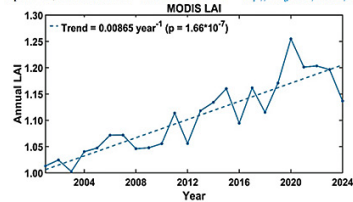


Figure S2: Time series of annual LAI over India for the period 2001–2024.

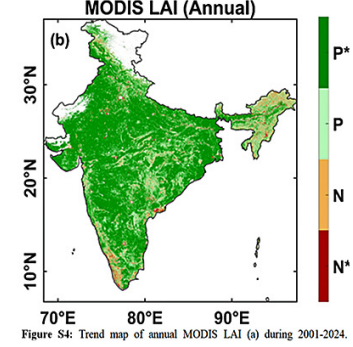


Figure S4: Trend map of annual MODIS LAI (a) during 2001–2024.

Abstract
 India is the second-largest contributor to global greening. Despite significant increase in green cover, satellite-based MODIS estimates reveal no significant increase in vegetation productivity, with major forested areas showing declines in net primary productivity (NPP), due to warming. A major limitation of MODIS vegetation productivity dataset is that it does not consider the improved biochemical rate of plant photosynthesis under higher atmospheric CO₂ levels, known as CO₂ fertilization (CFE). In this study, we incorporate the direct effect of CFE into satellite-based MODIS vegetation productivity estimates and reassess NPP trends across India from 2001 to 2024. Our analysis confirms that the NPP trend values nearly doubled after accounting for the direct effect of CFE, significantly reducing the percentage of grids exhibiting a negative trend from 21.21% to 8.86% across total vegetated land and from 51.81% to 25.23% across forested land, compared to the trends observed without CFE. Notably, most of the grids showing negative trends transitioned into statistically non-significant categories, either negative or positive. These grids are primarily located along the Western Ghats and southern peninsular India, where vegetation productivity showed only a modest increase in response to the direct effect of CFE. This limited response is likely due to concurrent warming in these regions, which dampens the benefits of CFE. In contrast, northwestern India, where atmospheric moisture stress and temperature have declined, exhibited a stronger increase in vegetation productivity after accounting for CFE—enhancing already positive trends. Overall, our findings suggest that incorporating the direct effect of CFE significantly improves the estimation of vegetation productivity trends across India. However, regional climate patterns have a strong influence on the magnitude of the increase in vegetation productivity due to the direct effect of CFE. This study enhances understanding of climate-vegetation interactions under increasing atmospheric CO₂ concentration and climate change.

Terrestrial vegetation plays a crucial role in offsetting rising atmospheric CO₂ levels and mitigating climate change [1] by absorbing CO₂ during the process of photosynthesis. Over the past decade (2013–2024), global terrestrial ecosystems have sequestered approximately 3.2 ± 0.9 GtC annually, offsetting nearly 30% of anthropogenic CO₂ emissions [2]. Gross Primary Productivity (GPP), which quantifies the amount of CO₂ absorbed during photosynthesis [3], is a key indicator of land carbon uptake. Since the 1960s, the global land carbon sink has strengthened significantly, largely due to elevated atmospheric CO₂ concentrations [2, 4] known as the CO₂ fertilization effect (CFE) [5]. Elevated CO₂ enhances plant productivity through two distinct mechanisms. The direct effect increases CO₂ availability to the Rubisco enzyme, thereby improving the biochemical rate of photosynthesis per unit leaf area and improving light-use efficiency (LUE) [6, 7]. This improved photosynthesis results in greater carbon allocation for plant growth. In parallel, elevated CO₂ also improves water-use efficiency (WUE), allowing plants to grow even under water-limited conditions [8, 9]. Together, these responses lead to an increase in leaf area [10], which enables greater light interception and further enhances GPP. These combined responses are collectively referred to as the indirect effect of CFE [11]. CFE has continued enhancing vegetation productivity in recent decades, often offsetting the negative impacts of climate stress [12, 13]. However, several studies suggest that the strength of CFE has weakened during this period due to increasing climate stress and nutrient limitations [14–16].

Satellite observations show a substantial expansion of global green cover over the past two decades, with India emerging as the second-largest contributor [27]. A recent study by Keenan et al. [11] incorporated the direct biochemical effect of CFE into the MODIS MOD17 algorithm and found that global annual GPP increased by approximately 7.3% between 1982 and 2012. The direct enhancement of LUE from CFE was nearly twice that of the indirect effect from increased leaf area.

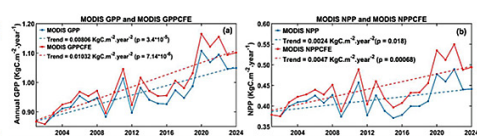


Figure 1: Time series of MODIS GPP, MODIS GPPCFE (a) and MODIS NPP, MODIS NPPCFE (b) and standardized anomalies of MODIS LAI, MODIS NPPCFE, MERRA-2 DPVP, and MERRA-2 TMEAN (c) over India for the period 2001 to 2024. The dashed lines in (a) and (b) represent the trend lines, and the value along them indicate the corresponding trend magnitudes. In figure 5, we present the annual trends of DPVP (figure 5(a)) and TMEAN (figure 5(b)) using MERRA-2 reanalysis data. DPVP exhibited a statistically significant decreasing trend across most parts of India, except for the southern peninsular region, the Western Ghats, and parts of eastern India, where trends were largely non-significant. Only a few grids in south Tamil Nadu showed a significant positive trend. TMEAN displayed a warming trend over the southern peninsula and parts of eastern India, while central (excluding Maharashtra) and northwestern regions experienced a cooling trend.

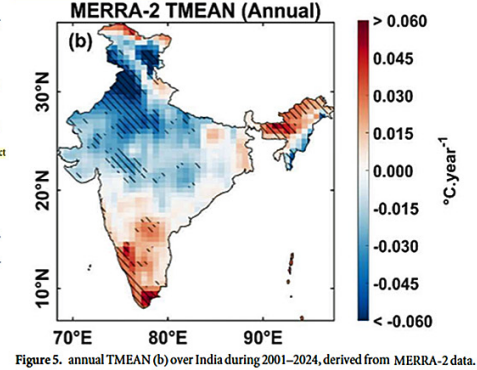


Figure 5: annual TMEAN (b) over India during 2001–2024, derived from MERRA-2 data.

Quelle: Das et al., 2026

In deutscher Übersetzung:

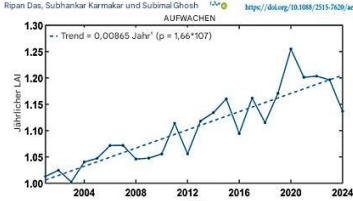


Abbildung S2: Zeitreihe des jährlichen LAI über Indien für den Zeitraum 2001–2024.

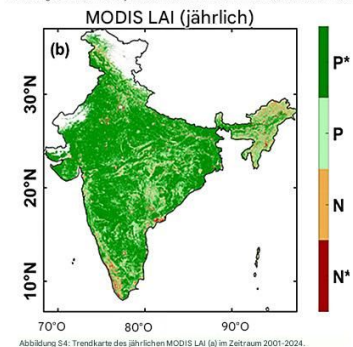


Abbildung S4: Trendkarte des jährlichen MODIS LAI (a) im Zeitraum 2001–2024.

Indien ist der zweitgrößte Beiträger zur globalen Begrünung trotz einer deutlichen Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen. Satellitenbeobachtungen zeigen eine erhebliche Ausweitung der globalen Grünfläche in den letzten zwei Jahrzehnten, wobei Indien der zweitgrößte Beiträger ist [27].

In großen Waldgebieten ist die Nettoprimärproduktion (NPP) aufgrund der Erwärmung sogar rückläufig. Eine wesentliche Einschränkung der MODIS-Daten zur Vegetationsproduktivität besteht darin, dass sie die verbesserte biochemische Photosyntheserate von Pflanzen unter höheren atmosphärischen CO₂-Konzentrationen, die sogenannte CO₂-Düngung (CFE), nicht berücksichtigt. In dieser Studie integrieren wir den direkten Effekt der CFE in die satellitenbasierten MODIS-Schätzungen zur Vegetationsproduktivität und bewerten die NPP-Trends in Indien von 2001 bis 2024 neu. Unsere Analyse bestätigt, dass sich die NPP-Trendwerte nach Berücksichtigung des direkten Effekts von CFE verdoppelt haben. Besonders bemerkenswert ist, dass die meisten Raster mit negativen Trends in statistisch nicht signifikante Kategorien, entweder negativ oder positiv, übergegangen sind. Diese Raster befinden sich hauptsächlich entlang der Westghats und im südlichen Teil der indischen Halbinsel, wo die Vegetationsproduktivität als Reaktion auf den direkten Effekt von CFE nur einen geringen Anstieg zeigt. Diese begrenzte Reaktion ist wahrscheinlich auf die gleichzeitige Erwärmung in diesen Regionen zurückzuführen, die die Vorteile von CFE dämpft. Im Gegensatz dazu zeigen Nordwestindien, wo die atmosphärische Feuchtigkeitstress und die Temperatur zurückgegangen sind, einen stärkeren Anstieg der Vegetationsproduktivität. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse darauf hin, dass die Einbeziehung des direkten Effekts von CFE die Schätzung der Trends der Vegetationsproduktivität in ganz Indien deutlich verbessert. Regionale Klimamuster haben jedoch einen starken Einfluss auf das Ausmaß des Anstiegs der Vegetationsproduktivität aufgrund des direkten Effekts von CFE. Diese Studie verbessert das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Klima und Vegetation unter steigender atmosphärischer CO₂-Konzentration und Klimawandel.

Die terrestrische Vegetation spielt eine entscheidende Rolle beim Ausgleich des Anstiegs des atmosphärischen CO₂-Gehalts und der Abschwächung des Klimawandels [1], indem sie CO₂ während der Photosynthese absorbiert. In den letzten zehn Jahren (2013–2024) haben globale terrestrische Ökosysteme jährlich etwa 3,2 ± 0,9 GtC gebunden und damit fast 30 % der anthropogenen CO₂-Emissionen kompensiert [2]. Die Brutto-Primärproduktion (GPP), die die Menge des während der Photosynthese absorbierten CO₂ quantifiziert [3], ist ein wichtiger Indikator für die Kohlenstoffaufnahme an Land. Seit den 1960er Jahren hat sich die globale Kohlenstoffsenke an Land deutlich verstärkt, vor allem aufgrund erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen [2, 4], bekannt als CO₂-Düngungseffekt (CFE) [5]. Erhöhtes CO₂ steigert die Pflanzenproduktivität über zwei verschiedene Mechanismen. Der direkte Effekt erhöht die CO₂-Verfügbarkeit für das Rubisco-Enzym, wodurch die biochemische Rate der Photosynthese pro Flächeneinheit verbessert wird [6, 7]. Dies verbessert die Lichtnutzungseffizienz (LUE) und verbessert die Wasser- und Lichtnutzungseffizienz (WUE). Parallel dazu verbessert ein erhöhter CO₂-Gehalt auch die Wasser- und Lichtnutzungseffizienz (LUE), wodurch Pflanzen unter wasser- und lichtlimitierten Bedingungen besser zurechtkommen [8, 9]. Zusammen führen diese Reaktionen zu einer Vergrößerung der Blattfläche [10], was eine stärkere Lichtabsorption ermöglicht und die Brutto-Primärproduktion (GPP) weiter steigert. Diese kombinierten Reaktionen werden zusammenfassend als indirekter Effekt der Klimabedingungen bezeichnet [11]. CFE hat die Produktivität der Vegetation in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gesteigert und damit oft die negativen Auswirkungen von Klimastress ausgeglichen [12, 13]. Mehrere Studien deuten jedoch darauf hin, dass die Stärke der CFE in diesem Zeitraum aufgrund von zunehmendem Klimastress und Nährstofflimitierungen nachgelassen hat [14–16].

Satellitenbeobachtungen zeigen eine erhebliche Ausweitung der globalen Grünfläche in den letzten zwei Jahrzehnten, wobei Indien der zweitgrößte Beiträger ist [27]. Eine aktuelle Studie von Keenan et al. [11] integrierte den direkten biochemischen Effekt von CFE in den MODIS MOD17-Algorithmus und stellte fest, dass die globale jährliche GPP zwischen 1982 und 2012 um etwa 7,3 % zunahm. Die direkte Steigerung der LUE durch CFE war fast doppelt so hoch wie der indirekte Effekt durch die erhöhte Blattfläche.

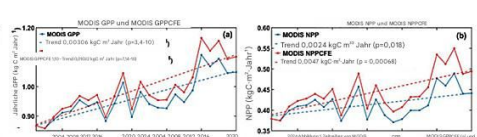


Figure 1: Time series of MODIS GPP, MODIS GPPCFE (a) and MODIS NPP, MODIS NPPCFE (b) and standardized anomalies of MODIS LAI, MODIS NPPCFE, MERRA-2 DPVP and MERRA-2 TMEAN (c) over India for the period 2001 to 2024. The dashed lines in (a) and (b) represent the trend lines, and the values along these lines give the corresponding trend magnitudes. In Figure 5, we show the annual trends of DPVP (Figure 5(a)) and TMEAN (Figure 5(b)) using MERRA-2 reanalysis data. DPVP showed a statistically significant decreasing trend across most parts of India, except for the southern peninsular region, the Western Ghats and parts of eastern India, where trends were mostly non-significant. Only a few grids in south Tamil Nadu showed a significant positive trend. TMEAN showed a warming trend over the southern peninsula and parts of eastern India, while the central (excluding Maharashtra) and northwestern regions experienced a cooling trend.

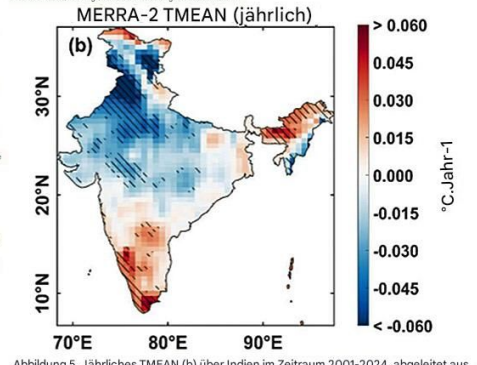
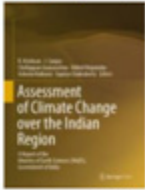



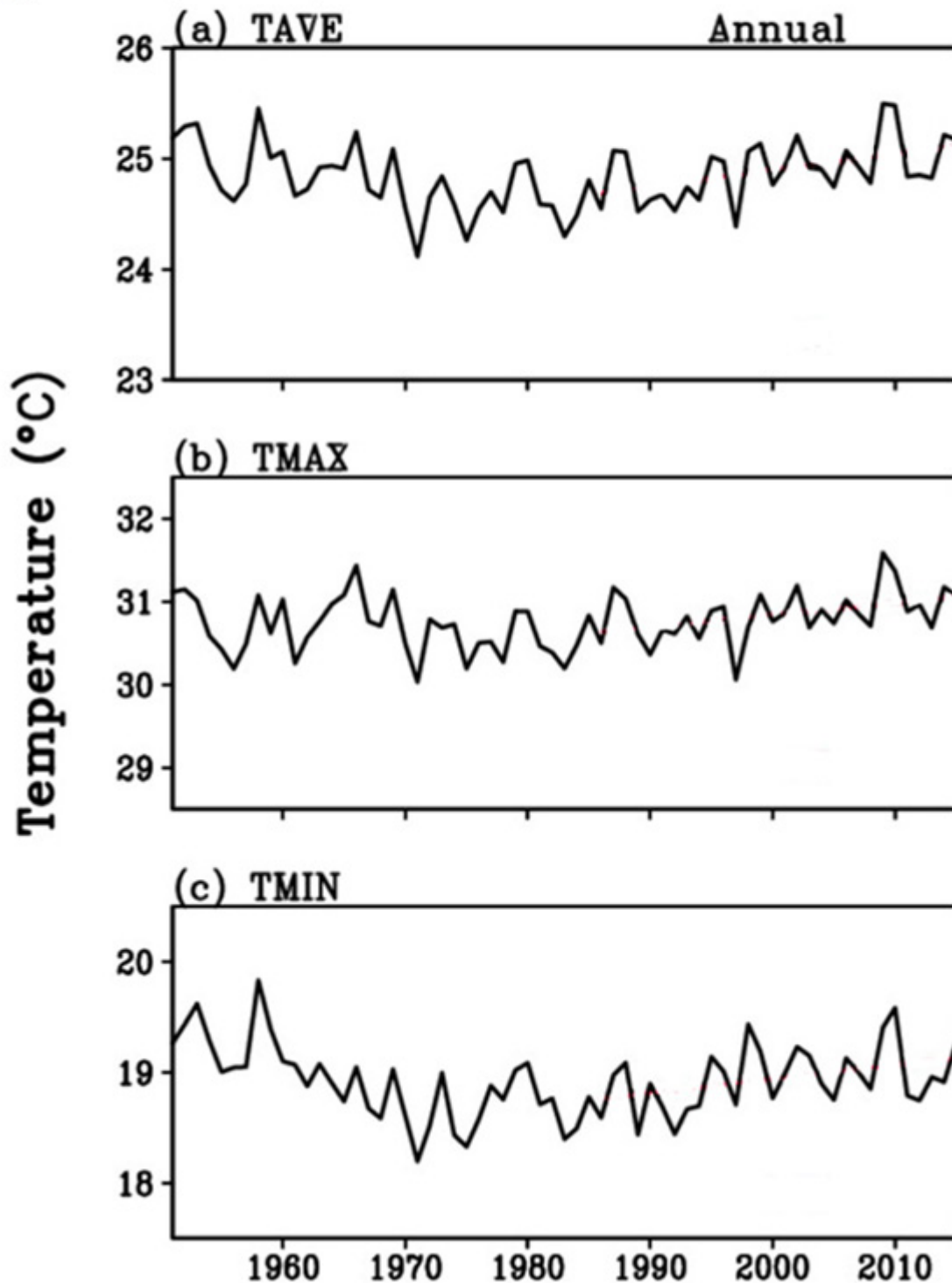
Abbildung 5: Jährliches TMEAN (b) über Indien im Zeitraum 2001–2024, abgeleitet aus MERRA-2-Daten. Jährliches TMEAN Mittlere jährliche Lufttemperatur



[Assessment of Climate Change over the Indian Region](#) pp 21-45

Temperature Changes in India

J. Sanjay , J. V. Revadekar, M. V. S. Ramarao, H. Borgaonkar, S. Sengupta, D. R. Kothawale, Jayashri Patel, R. Mahesh, S. Ingle, K. AchutaRao, A. K. Srivastava, J. V. Ratnam



Quelle: [Sanjay et al., 2020](#)

Link:

<https://notrickszone.com/2026/01/26/new-study-affirms-rising-CO₂s-greening-impact-across-india-a-region-with-no-net-warming-in-75-years/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE