

# 溶解性有机碳侧向输送对陆地碳收支的影响

王辰璞<sup>1,2,3,4,5</sup>, 谢正辉<sup>4,5,\*</sup>, 尤艳彬<sup>4,5</sup>, 刘娣<sup>1,2,3</sup>

1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210024
2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210024
3. 河海大学全球变化与水循环国际合作联合实验室, 南京 210024
4. 中国科学院大气物理研究所, 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 100029
5. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

**摘要** 陆地生态系统中溶解性有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 沿陆地-河流-海洋连续体的侧向输送是生物地球化学循环的重要组成部分, 定量评估土壤 DOC 侧向输送对陆地碳收支的影响对深入理解全球碳循环具有重要意义。本研究基于改进的陆面过程模式 CLM5.0 进行数值模拟, 揭示了 1981 至 2013 年期间全球总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 和土壤 DOC 流失量的时空变化特征, 评估了土壤 DOC 侧向输送对陆地碳收支的影响。结果表明: 全球土壤 DOC 流失量随时间呈现总体增加的趋势, 多年平均值是  $458 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 。在全球大部分地区, 土壤 DOC 侧向输送使得 GPP 和净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 减少, 但在南美洲的西北部、非洲中西部的部分区域 GPP 和 NPP 则增加, 这可能与径流量和 DOC 储量的增幅均小于 GPP 和 NPP 的增幅有关。总体而言, 土壤 DOC 侧向输送会使全球多年平均 GPP 减少约  $8.61 \text{ Pg C yr}^{-1}$ , NPP 减少约  $7.28 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。此外, 多年来 GPP 的减少量随着土壤 DOC 流失量的增加有上升趋势, 而 NPP 的减少量趋于稳定。GPP 和 NPP 减少量的年内变化为 5~7 月上升, 7~11 月下降。

**关键词** 陆面过程模式 碳循环 溶解性有机碳侧向输送 总初级生产力 净初级生产力

文章编号 中图分类号 文献标识码

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2025.24133

收稿日期 2024-09-10; 网络预出版日期 2025-01-20

作者简介 王辰璞, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆地碳收支研究。E-mail: hhu\_wcp@163.com

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 U2344224

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants U2344224)

# Impacts of lateral transport of dissolved organic carbon on terrestrial carbon budget

WANG Chenpu<sup>1,2,3,4,5</sup>, XIE Zhenghui<sup>4,5,\*</sup>, YOU Yanbin<sup>4,5</sup>, LIU Di<sup>1,2,3</sup>

1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024
3. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, HoHai University, Nanjing 210024
4. National Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
5. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Lateral transport of DOC (Dissolved Organic Carbon) along the land-river-ocean continuum in terrestrial ecosystems is a key component of biogeochemical cycle. Quantifying the impacts of lateral transport of soil DOC on terrestrial carbon budget is of great significance for a deeper understanding of the global carbon cycle. This study conducted the simulations using the improved community land surface model version 5.0 (CLM5.0) to reveal the spatial and temporal characteristics of global GPP (Gross Primary Productivity) and soil DOC losses during the years 1981 to 2013, and investigated the impact of lateral transport of soil DOC on the terrestrial carbon budget. The results showed that the global soil DOC losses were increased significantly over the years with a multi-year average value of 458 Tg C yr<sup>-1</sup>. With the lateral transport of the soil DOC, the GPP and NPP (Net Primary Productivity) decreased in most regions of the world except for the northwestern part of South America and some regions of west-central Africa where the GPP and NPP were increased, which can be related to the lower increase in runoff flux and DOC reservoir compared to GPP and NPP. Overall, the global total GPP was reduced by about 8.61 Pg C yr<sup>-1</sup> and NPP was reduced by about 7.28 Pg C yr<sup>-1</sup> on a multi-year average basis due to the lateral transport of soil DOC. Moreover, the reduction of GPP has an increased trend over the years with an increase in soil DOC losses, while the reduction of NPP tended to be stable. The intra-annual reduction of

GPP and NPP has an increased trend from May to July while has a decreased trend from July to November.

**Keywords** land surface model, carbon cycle, dissolved organic carbon lateral transport, gross primary productivity, net primary productivity

## 1 引言

土壤侵蚀和河流径流引起的侧向输送改变土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 空间格局, 影响陆地碳收支 (Tian et al., 2023)。土壤侵蚀加速了表层土壤的有机碳侵蚀, 减少了侵蚀地点可用于分解的 SOC, 导致 SOC 被深埋, 同时抑制了沉积地点的分解 (Lal, 2004; Yoo et al., 2005)。在分离和输运过程中, 土壤团聚体的化学或物理分解可能会增加 SOC 的分解, 改变 SOC 的空间格局, 进一步改变溶解性有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 的空间格局 (Kalbitz et al., 2000)。SOC 土壤侧向输送在当前的陆地生态系统模型中被忽视或未得到充分的表示, 是引起陆地碳收支估计不确定性的重要来源 (Tan et al., 2022)。

由于土壤 DOC 侧向通量无法直接测量, 传统的估算方法利用质量平衡间接评估 (陈敏鹏等, 2013), 该方法高度依赖于数据可利用性, 难以推广至全球尺度并且无时间变异性。基于过程的模型提供了土壤 DOC 侧向通量估算方法, 包括了植被光合作用、生物量分布、呼吸作用和土壤有机碳分解等生物地球化学功能 (Wei et al., 2024)。例如, Kicklighter et al. (2013) 基于 DOC 在陆地到河网的输出取决于土壤剖面中 DOC 的可用性以及陆地和河网之间的径流量, 改进了 Felzer et al. (2004) 使用的陆地生态系统模型 (TEM), 在土壤中加入 DOC 库来确定土壤剖面中 DOC 的可用性。Wu et al. (2014) 在基于碳氮动力学的生物地球化学模型 Forest-DNDC 引入新的 DOC 过程模块, 预测森林土壤中的代谢转化、吸附或解吸和 DOC 浸出, 并应用于加拿大安大略省南部的温带森林模拟, 揭示 DOC 浓度的季节性动态和在不同土壤层中观察到的浓度以及这些森林年龄序列中的 DOC 淋溶。Ren et al. (2016) 使用了基于过程的耦合水文/生物地球化学模型 (DLEM), 通过结合气候变化 (如降水和气温)、大气 CO<sub>2</sub> 的空间异质性产生的多种效应如氮沉降、土地覆盖变化和土地管理实践等, 模拟了土壤中 DOC 的产生、消耗和运输, 并评估了密西西比河流域 DOC 浓度和输送量。Lauerwald et al. (2017)、Nakhavali et al. (2018)、Tang et al. (2018)、Li et al. (2019) 以及许多研究中都在不同的基于过程的模型中加入了土壤 DOC 产生、矿化、扩散、吸附-解吸和浸出相关的过程。You et al. (2023) 在陆面模式 CLM5.0 中加入描述土壤 DOC 淋溶和流失过程并在全球尺度进行模拟。这些研究均为陆地到水体的侧向 DOC 通量的估算

提供了方法。

估算陆地碳侧向输送量可以改善内陆水域的碳通量平衡、完善陆地碳收支的计算，忽视陆地碳的侧向输送可能会导致陆地生态系统碳汇的高估。然而迄今为止，人们还没有太多关注陆地侧向碳输送对碳收支的影响。Zhang et al. (2022) 使用新发展的 ORCHIDEE-Clateral 模型估计出 2005~2014 年期间，欧洲每年土地向河流输送的碳总量约为净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 的  $(1.1\pm 0.1)\%$ ，生态系统净生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 的  $(4\pm 1)\%$ ，以及生物群落净生产力 (Net Biome Productivity, NBP) 的  $(18\pm 10)\%$ 。Lauerwald et al. (2020) 和 Hastie et al. (2021) 使用类似的建模方法估计，亚马逊河和刚果河流域的侧向 DOC 和  $\text{CO}_2$  输送量分别约为陆地 NBP 的 21% 和 14%。Beckebanze et al. (2022) 研究了俄罗斯西伯利亚勒拿河三角洲北部多边形苔原站点一个生长季的 DOC 与溶解性无机碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 通量，结果表明侧向碳通量 (DIC 和 DOC 通量) 仅占净生态系统碳交换量 (Net Ecosystem Exchange, NEE) 的 1.95%~2.42%。这些研究探讨了区域或流域尺度上的陆地侧向碳输送对碳收支影响，然而，目前针对全球尺度上土壤 DOC 侧向输送对陆地碳收支的影响的研究仍然不足。

综上，本文基于陆面过程模式 CLM5.0，加入了 You et al. (2023, 2024) 发展的土壤溶解性有机碳流失方案，通过数值模拟评估该模型对 GPP 的模拟结果，并分析了 1981 至 2013 年间考虑 DOC 侧向输送过程前后陆地碳收支在全球尺度的时空差异。研究结果将揭示 DOC 侧向输送对全球尺度陆地碳收支的影响，对于增加对全球尺度碳循环过程的理解、更好地估算碳收支是有意义的。

## 2 模式介绍

### 2.1 陆面过程模式 CLM

陆面过程模式 (Community Land Model, CLM) 最初由美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 研制，是地球系统模式 CESM 的陆面模块。CLM 被广泛用于模拟和研究陆地表面生态水文过程、地表能量交换过程以及其他生物地球物理和生物地球化学过程。最新版本的 CLM5.0 更新了 CLM4.5 的大部分组件，包括土壤结构、植被水文、积雪密度、碳氮循环和耦合、作物模型、土地利用等模块，明确表示了土地利用和土地覆盖的变化，水文方面的更新包括引入了基于干表面层的土壤蒸发阻力参数化方法及修订的冠层拦截参数，并在土壤层分辨率、碳氮循环和耦合以及雪模型等方面有了重大改进。同时，在土壤碳分解过程中重新评估了土壤碳周转的温度敏感性，使

得土壤碳分解速率随深度下降减弱（闫旭春等，2023）。CLM5.0 的生物地球化学模块（biogeochemistry, CLM5.0-BGC）发展自陆地生物化学模块 Biome-BGC（Thornton et al., 2009），可以模拟不同植被类型的碳、氮、水循环、能量流动、植被生长过程，输出 GPP、NPP、NEP、NBP、生态系统呼吸（Ecosystem Respiration, ER）和异养呼吸（Heterotrophic Respiration, HR）在内的多种变量。

## 2.2 土壤溶解性有机碳产生及流失方案

在 CLM5.0 中，只包括土壤矿物氮的淋溶过程，因此本研究采用了 You et al. (2023) 发展的土壤 DOC 的产生和流失方案。CLM5.0 中的土壤生物地球化学模块基于 CENTURY 模型（Parton et al., 1988）构建，其中将输入土壤的植被凋落物分为代谢库、纤维素库和木质素库。植物产生的 NPP 最终以凋落物的形式进入土壤，构成土壤碳库，并伴有微生物异养呼吸的中间损失。假设溶解有机质（DOM）产量是凋落物库和土壤有机质库周转的一部分，且与土壤含水量成正比，则 DOC 产量表示如下（Gerber et al., 2010）：

$$P_{\text{DOC},u \rightarrow d} = f_{\text{DOM}} \theta \text{CF}_{u \rightarrow d} \quad (1)$$

其中， $P_{\text{DOC},u \rightarrow d}$  是分解过程中产生的 DOC 通量， $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $f_{\text{DOM}}$  是进入土壤 DOM 库的部分； $\theta$  是土壤含水量， $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ； $\text{CF}_{u \rightarrow d}$  是分解级联中从上游碳库到下游碳库的碳通量， $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

植物生长和土壤呼吸后剩余的土壤有机碳作为溶解成分从土壤柱中淋溶而流失。在本研究中，DOC 流失通量分别伴随着地表径流及地下径流流出，流失通量表示如下：

$$\text{DOC}_{\text{runoff}} = [\text{DOC}] Q_{\text{surf}} k_{\text{adsorb}} - \text{SR} \quad (2)$$

$$\text{DOC}_{\text{leaching}} = [\text{DOC}] Q_{\text{dis}} k_{\text{adsorb}} - \text{SR} \quad (3)$$

其中， $\text{DOC}_{\text{runoff}}$  为土壤 DOC 径流， $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $\text{DOC}_{\text{leaching}}$  为土壤 DOC 淋溶， $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $Q_{\text{surf}}$  为地表径流， $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $Q_{\text{dis}}$  为地下径流， $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $[\text{DOC}]$  为土壤水中 DOC 浓度， $\text{g C kg H}_2\text{O}^{-1}$ ； $k_{\text{adsorb}}$  为 DOC 吸附系数；SR 为土壤异养呼吸通量， $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

$$[\text{DOC}] = \frac{\text{NS}_{\text{DOC}}}{\text{WS}_{\text{tot,soil}}} \quad (4)$$

其中， $\text{WS}_{\text{tot,soil}}$  为土壤柱上土壤含水量的总质量， $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$ ， $\text{NS}_{\text{DOC}}$  为土壤库中的 DOC， $\text{g C m}^{-2}$ 。

根据 Li et al. (2019) 和 Neff et al. (2001) 的方程，DOC 吸附系数的计算方法如下：

$$k_{\text{adsorb}} = \frac{X_i}{X_i + \text{RE}} \quad (5)$$

$$\text{RE} = mX_i - b \quad (6)$$

其中,  $X_i$  表示初始 DOC 浓度, g per g soil; RE 为 DOC 解吸量 (负值) 或吸附量 (正值), 由简单初始质量 (IM) 线性等温线计算;  $m$  (无量纲系数) 和  $b$  (mg per g soil) 是土壤对 DOC 的潜在吸附和解吸的度量。

利用经验函数方程可估计 DOC 的土壤异养呼吸通量 SR ( $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Janssens et al., 2003) :

$$SR = R_{10} Q_{s10}^{\frac{T-10}{10}} \quad (7)$$

其中,  $T$  为土壤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{10}$  为土壤温度为  $10^{\circ}\text{C}$  时的土壤异养呼吸通量;  $Q_{s10}$  为土壤呼吸温度系数。

需要对每个时间步长的总 DOC 流失通量进行限制, 使其不超过 DOC 的总量:

$$DOC_{\text{loss}} = \min\left(DOC_{\text{loss}}, \frac{NS_{\text{DOC}}}{\Delta t}\right) \quad (8)$$

其中,  $DOC_{\text{loss}}$  表示土壤 DOC 径流或淋溶,  $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。表 1 中列出了此方案所需参数。

表 1 模块所需参数

Table 1 Parameters needed for model

参数符号	参数名称	单位
$P_{\text{DOC},u \rightarrow d}$	分解过程产生的 DOC 通量	$\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$f_{\text{DOM}}$	进入土壤 DOM 库的系数	
$\theta$	土壤含水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
$CF_{u \rightarrow d}$	分解级联中从上游碳库到下游碳库的碳通量	$\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$DOC_{\text{runoff}}$	土壤 DOC 径流	$\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$DOC_{\text{leaching}}$	土壤 DOC 淋溶	$\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$Q_{\text{surf}}$	地表径流	$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$Q_{\text{dis}}$	地下径流	$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
[DOC]	土壤水中 DOC 浓度	$\text{g C kg H}_2\text{O}^{-1}$
$k_{\text{adsorb}}$	DOC 吸附系数	
SR	土壤异养呼吸通量	$\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$WS_{\text{tot\_soil}}$	土壤柱上土壤含水量的总质量	$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$
$NS_{\text{DOC}}$	土壤库中的 DOC	$\text{g C m}^{-2}$
$X_i$	初始 DOC 浓度	g per g soil
RE	DOC 解吸量或吸附量	g per g soil
$m$	土壤对 DOC 的潜在吸附系数	
$b$	土壤对 DOC 的潜在解吸量	mg per g soil

$T$	土壤温度	$^{\circ}\text{C}$
$R_{10}$	土壤温度为 $10^{\circ}\text{C}$ 时的土壤异养呼吸通量	$\text{g C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$Q_{s10}$	土壤呼吸温度系数	
$\text{DOC}_{\text{loss}}$	土壤 DOC 径流或淋溶	$\text{g C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

### 3 数据和方法

#### 3.1 模式驱动数据

CLM5.0 大气驱动数据来自 CRU-NCEP 第 7 版, 变量包括气温、降水、地表气压、太阳短波辐射、长波辐射、风速和比湿, 时间覆盖范围从 1901 年至 2016 年, 空间分辨率为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ , 时间分辨率为 6 小时。驱动模式所需的基本陆地表面数据集使用 CLM5.0 的默认设置, 空间分辨率为  $0.9^{\circ}\times 1.25^{\circ}$ 。全球月平均大气二氧化碳浓度数据集来自 NOAA 地球系统研究实验室 (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>, last access)。

#### 3.2 遥感数据

本文所用的验证总初级生产力 (GPP) 数据为来自 FLUXCOMRS+METEO (Jung et al., 2020) 碳通量数据集中的全球网格化 FLUXCOM GPP 数据 (<http://fluxcom.org/>), 该 GPP 数据集是将全球 224 个站点的涡度协方差塔的碳通量观测值与遥感和气象数据相结合, 运用随机森林 (RF)、神经网络 (ANN) 和多元自适应样条回归 (MARS) 三种机器学习方法进行升尺度得到。该数据集的空间分辨率为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ , 时间分辨率为 1 天, 本研究选取 2000 年至 2013 年的 GPP 数据对模式进行验证。该数据集已在全球和区域碳循环研究中得到广泛应用。

#### 3.3 试验设计

基于上述发展的包含溶解性有机碳侧向输送的陆面过程模式, 设计了两组试验探讨加入溶解性有机碳侧向输送方案前后陆地碳收支的变化情况。第一组模拟是不考虑溶解性有机碳侧向输送的对照试验, 第二组则是考虑了溶解性有机碳侧向输送的试验, 由两组试验结果作差得到 DOC 侧向输送的影响。模拟时间均为 1981~2013 年, 陆面模块空间分辨率为  $0.9^{\circ}\times 1.25^{\circ}$ , 结果按月输出。在正式数值模拟前, 利用 1901~1920 年的大气强迫数据循环驱动模式进行了 spin-up 以达到平衡态。

#### 3.4 分析方法

本文模拟产生的全球 GPP、NPP、ER、HR、NEP、NBP 作为陆地碳收支的评价指标。其中 NEP 是 GPP 与 ER 之差, 也是 NPP 与 HR 之差。加入土壤 DOC 侧向输送方案前后的

各碳收支指标的变化量用于评估 DOC 侧向输送对全球尺度陆地碳收支的影响。绝对变化量是加入 DOC 侧向输送方案后的模拟值减去未加入 DOC 侧向输送方案的模拟值，相对变化量 (%) 是绝对变化量与未加入 DOC 侧向输送方案的模拟值之比。

### 3.5 模拟结果验证

You et al. (2023, 2024) 在 CLM5.0 中加入土壤溶解性有机碳产生及流失方案及河流 DOC 输送过程并与主要大河观测 DOC 通量值进行对比验证，评估了该方案对 DOC 侧向输送通量模拟的合理性和准确性。本文为验证模式对碳收支通量的模拟效果，将模式模拟的年平均 GPP 数据与遥感数据进行比较。结果表明，模拟的年平均 GPP 量与 FLUXCOM GPP 数据一致性较高，模拟的 GPP 值基本在 FLUXCOM GPP 数据值的范围内。模式直接模拟得到的 GPP 和 NPP 值与遥感数据的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.73 ( $p < 0.001$ )。结果表明模式模拟的结果与遥感数据值较吻合，模拟的可靠性较高。模式模拟的多年平均 GPP 与 FLUXCOM GPP 的结果集中分布于 1:1 线附近，一致性较好。综上所述模式在估计全球年尺度 GPP 数据时具有合理精度。

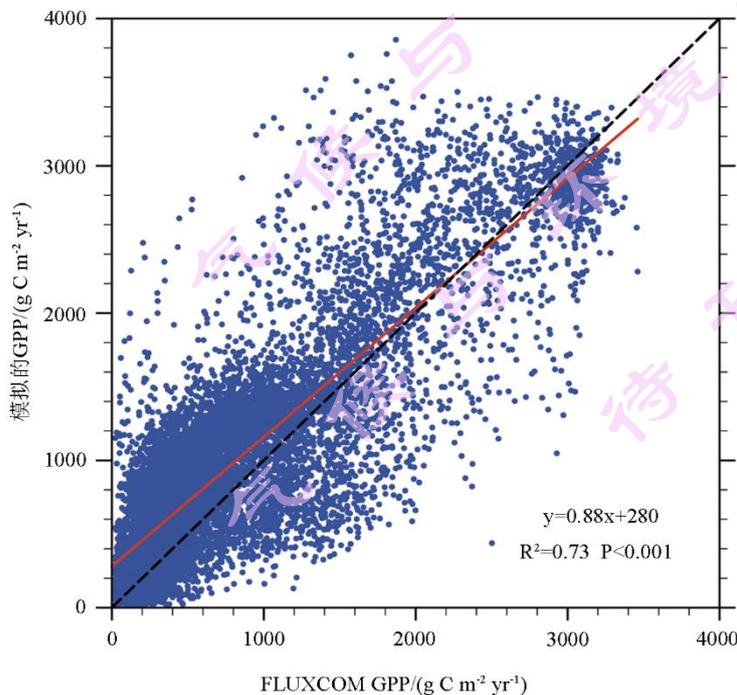


图1 模式模拟的 GPP 数据与遥感 GPP 数据的对比。

Fig. 1 Comparison of simulated GPP and FLUXCOM GPP.

## 4 结果与讨论

### 4.1 全球陆地生态系统总初级生产力时空变化特征

模拟得到的全球 1981~2013 年平均 GPP 的空间分布及纬向平均分布如图 2 所示。由图可得, GPP 的纬向分布明显, 赤道附近的热带地区是 GPP 值最大的区域, 纬向平均超过  $2.5 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 尤其在南美洲北部、非洲中西部、东南亚等少部分区域甚至超过  $3 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。其次是北纬  $30^\circ$  的北美洲东部、东亚和南纬  $30^\circ$  的南美洲东部区域, GPP 的多年平均值均超过  $2 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。北纬  $60^\circ$  的温带地区 GPP 纬向平均接近  $1 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 此纬度带附近地区 GPP 多年平均值均在  $0.8 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1} \sim 1.3 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  之间。北纬  $30^\circ$  和南纬  $30^\circ$  附近的大部分区域多年 GPP 平均值较小, 在  $0 \sim 0.5 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  之间, 特别是北美洲北部、亚洲北部和亚洲中纬度部分地区多年平均 GPP 值低于  $0.01 \times 10^9 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 因为这些地区干燥的气候和有限的水资源限制了植物的生长。总体而言, 从寒冷的高纬度地区到温暖的中纬度地区, 从干旱的亚热带地区到湿润的热带地区, GPP 呈现增加的趋势。赤道附近 GPP 的峰值表明水、阳光、温度等植物生长所需的环境的适宜。干旱亚热带地区 GPP 的下降表明植物受到干旱胁迫。北半球和南半球温带的次级峰值与全球中高纬度地区适度的水资源和光照环境相一致。

图 3 和图 4 分别展示了 1981~2013 年平均全球 GPP 值的年际变化和年内变化。由图 3 可得, GPP 年平均值随着时间推移呈现出增加的趋势 ( $0.46 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ,  $p < 0.001$ ), 从 1981 年的  $149 \text{ Pg C yr}^{-1}$  增加到 2013 年的  $160 \text{ Pg C yr}^{-1}$ , 这 33 年期间全球 GPP 最低值出现在 1983 年, 最高值出现在 2011 年, 多年平均值为  $153 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。这种多年增加的趋势与全球变暖和大气中  $\text{CO}_2$  浓度的上升有关 (Chen et al., 2024)。由图 4 可得, 1981~2013 年期间全球 GPP 值呈现较为明显的年内变化, 2~7 月和 11~12 月呈增加趋势, 7~11 月和 12 月至次年 2 月呈下降趋势, GPP 值春夏增加, 秋冬减少。最高值出现在 7 月, 约为  $18 \text{ Pg C mon}^{-1}$ , 最低值出现在 2 月, 约为  $9 \text{ Pg C mon}^{-1}$ , 平均值约为  $12 \text{ Pg C mon}^{-1}$ 。春夏季节气温的升高和降水的增加对植物生长有正向影响, 因此 GPP 值同步增加。

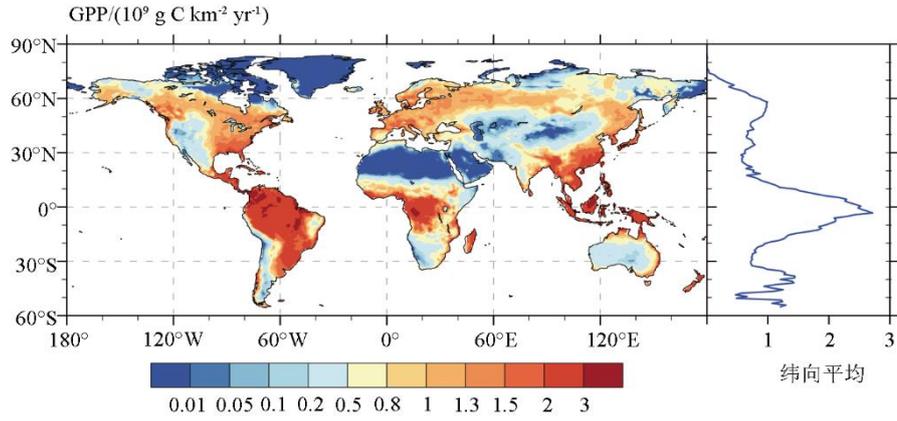


图 2 1981~2013 年全球 GPP 的多年平均空间分布及纬向平均分布。

Fig 2. Multi-year average spatial distribution and latitudinal average distribution of global GPP during years 1981 to 2013.

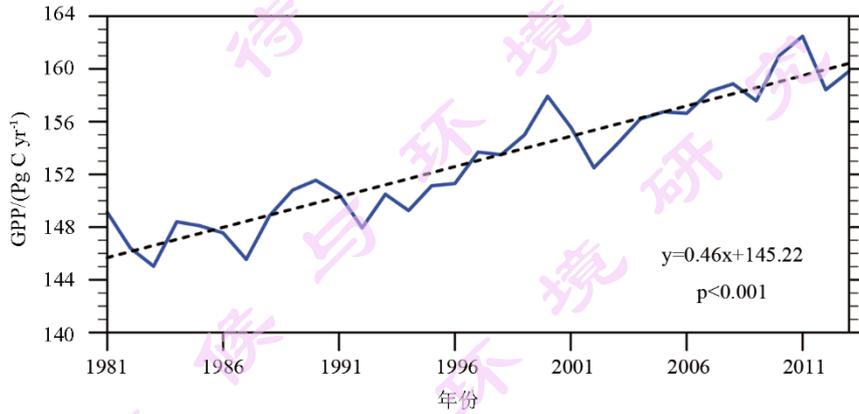


图 3 1981~2013 年平均 GPP 的年际变化，虚线表示线性趋势。

Fig 3. Interannual change of mean GPP during years 1981 to 2013, the dashed lines represent the temporal trends.

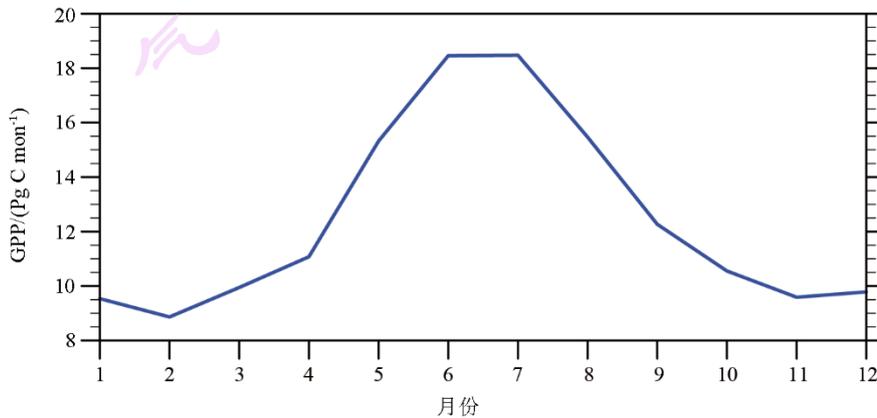


图 4 1981~2013 年平均 GPP 的年内变化。

Fig 4. Annual change of mean GPP during years 1981 to 2013.

## 4.2 全球土壤溶解性有机碳流失时空变化特征

模型模拟得到的全球 1981~2013 年平均土壤 DOC 流失的空间分布及纬向平均分布如图 5 所示。由图可得，北纬 60°附近的温带地区是土壤 DOC 流失最大的区域，纬向平均超过 12000 kg C km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>，尤其是在北亚部分区域，DOC 流失量已经超过 18000 kg C km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>，其次是赤道附近的热带南美洲、非洲中西部、北美洲中部、东南亚等地区的土壤 DOC 流失量均较大，主要原因是这些地区分布着世界主要大江大河且土壤碳储量丰富，此外降水和气温都有所增加，提高了土壤有机质的分解速率，从而使土壤 DOC 流失量增加（Wang et al., 2014; Fröberg et al., 2006）。北纬 30°以及南纬 30°附近的部分区域土壤 DOC 流失量很小，纬向平均低于 3000 kg C km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>，如格陵兰岛、北非、阿拉伯半岛、中国西北部以及南非、南美洲西南部、大洋洲西南部等区域，可能是降水减少引起的土壤湿度和径流的减少所造成。

图 6 和图 7 分别展示了 1981~2013 年平均土壤 DOC 流失量的年际变化和年内变化。由图 6 可得，土壤 DOC 流失量随着时间推移呈现出增加的趋势（5.63 Tg C yr<sup>-1</sup>， $p < 0.001$ ），从 1981 年的 417 Tg C yr<sup>-1</sup> 增加到 2013 年的 548 Tg C yr<sup>-1</sup>，这 33 年期间土壤 DOC 流失的多年平均量是 458 Tg C yr<sup>-1</sup>。出现这种变化可能的原因有气温上升促进有机物分解，降水增加导致溶解有机物的流失，以及随气候变化而产生的土壤侵蚀加剧。由图 7 可得，1981~2013 年期间土壤 DOC 流失量呈现较为明显的年内变化，2~4 月和 7~10 月呈增加趋势，4~7 月和 10~2 月呈下降趋势，土壤 DOC 流失量春秋增加，夏冬减少。最高值出现在 4 月，为 51 Tg C mon<sup>-1</sup>，最低值出现在 7 月，为 29 Tg C mon<sup>-1</sup>，平均值为 38 Tg C mon<sup>-1</sup>。产生这种现象可能的原因有春秋季节较高的降水量会带走更多 DOC，且降水量增加可能导致土壤侵蚀；春季土壤温度上升和冰雪融化导致土壤湿润，促进有机物分解和溶解，而夏季高温减少土壤中的水分，从而减少 DOC 的流失；秋季植被凋落物大量增加，促进了 DOC 的生成和流失；冬季气温低，土壤微生物活性降低，有机质分解速率减慢，DOC 流失减少（Lee et al., 2018; Verstraeten et al., 2016）。

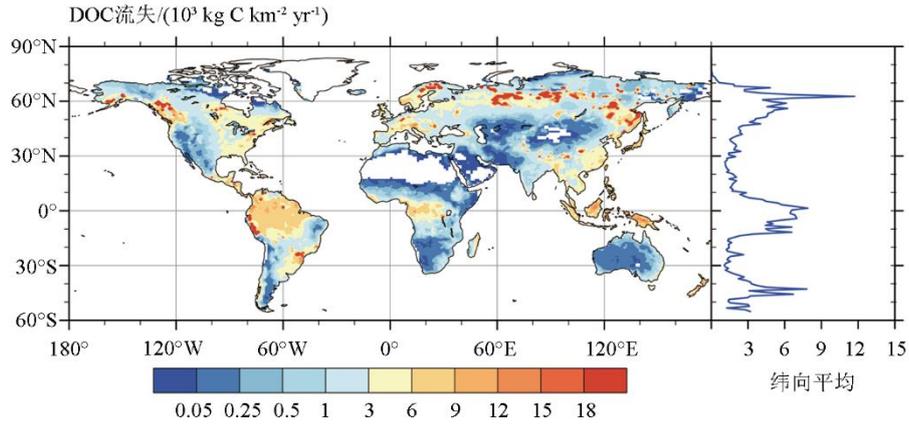


图 5 1981~2013 年全球土壤 DOC 流失的多年平均空间分布及纬向平均分布。

Fig 5. Multi-year average spatial distribution and latitudinal average distribution of global soil DOC losses during years 1981 to 2013.

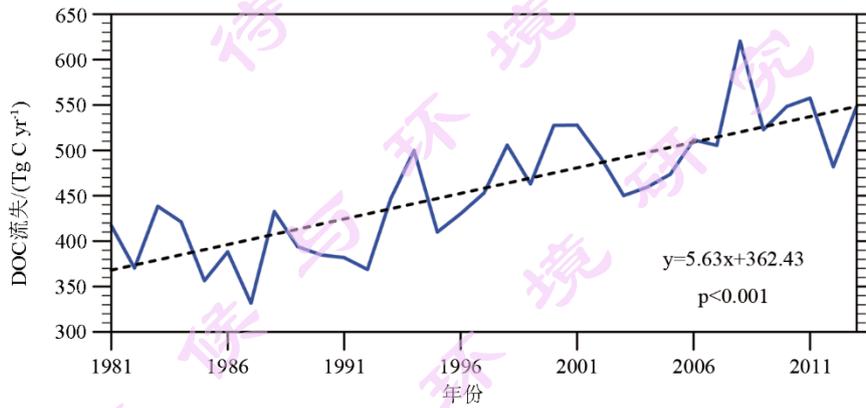


图 6 1981~2013 年平均土壤 DOC 流失的年际变化，虚线表示线性趋势。

Fig 6. Interannual change of mean soil DOC losses during years 1981 to 2013, the dashed lines represent the temporal trends.

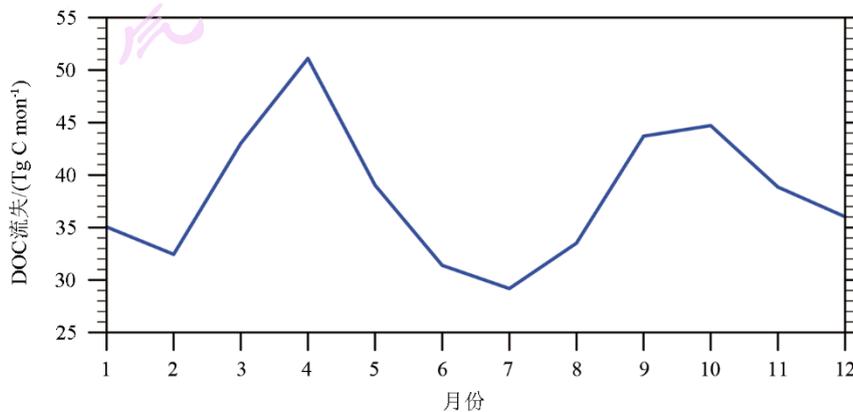


图 7 1981~2013 年平均土壤 DOC 流失的年内变化。

Fig 7. Annual change of mean soil DOC losses during years 1981 to 2013.

### 4.3 溶解性有机碳侧向输送对陆地碳收支影响

#### 4.3.1 溶解性有机碳侧向输送对陆地碳收支影响的空间分布格局

根据两组试验对比得到的结果，探讨溶解性有机碳侧向输送对陆地碳收支空间分布的影响。图 8 和图 9 分别展示了 1981~2013 年 DOC 侧向输送引起的陆地碳收支变化和相对变化的多年平均空间分布。由图 8 可得，在全球大部分地区，陆地 GPP 和 NPP 对于 DOC 侧向输送的响应是减少的，特别是南美洲的中东部地区以及非洲中部的部分区域，GPP 和 NPP 的减少达到  $400 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  以上，此外在亚洲西北部、北美洲的中部及南部、大洋洲的北部，GPP 和 NPP 的减少量也是较多的。然而在南美洲的西北部、非洲中西部的部分区域、北美洲中部小部分区域等地，土壤 DOC 流失量较多，范围在  $3000\text{-}9000 \text{ kg C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  之间，这些区域的 GPP 和 NPP 的变化是增加的，部分增加量可达到  $400 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  以上。可归因于两个因素：首先，径流量的增幅相对低于 GPP 和 NPP 的增幅；其次，受气温和湿度升高的影响，SOC 分解速率增加，导致碳不能长期固存在土壤中以及土壤呼吸作用增强，因此，DOC 储量的增幅低于 GPP 和 NPP 的增幅（Nakhavali et al., 2024a, 2024b）。ER 和 HR 与 GPP 和 NPP 对于 DOC 侧向输送的响应的空间分布基本一致。然而 DOC 侧向输送对 NEP 和 NBP 的影响却与之相反，大部分地区陆地 NEP 和 NBP 对于 DOC 侧向输送的响应是增加的，与 GPP 和 NPP 减少的区域基本对应。从影响程度方面讨论，图 9 显示大部分区域 GPP 和 NPP 减少量的相对变化在 20% 以内；而在 GPP 和 NPP 增加的区域，GPP 减少量的相对变化在 40% 以内，NPP 减少量则受到更大的影响。总体而言，不论是增加还是减少，NPP 受到的影响均大于 GPP。相对于 GPP 和 NPP，NEP 和 NBP 受到影响而产生的相对变化更大。产生这种影响的原因可能是以下几个方面：首先，输送到河流的有机碳经过长距离运输，最终沉降或渗透到洪泛区或河道中，陆地有机碳在空间上的重新分配导致陆地碳收支的改变；其次，土壤侵蚀和沉积物沉积通过改变凋落物和土壤有机碳的垂直分布来影响陆地碳收支；再者，地表径流的侧向移动通过改变土壤湿度来影响陆地碳收支，土壤湿度增加使 NPP 增加（Liao et al., 2024）。

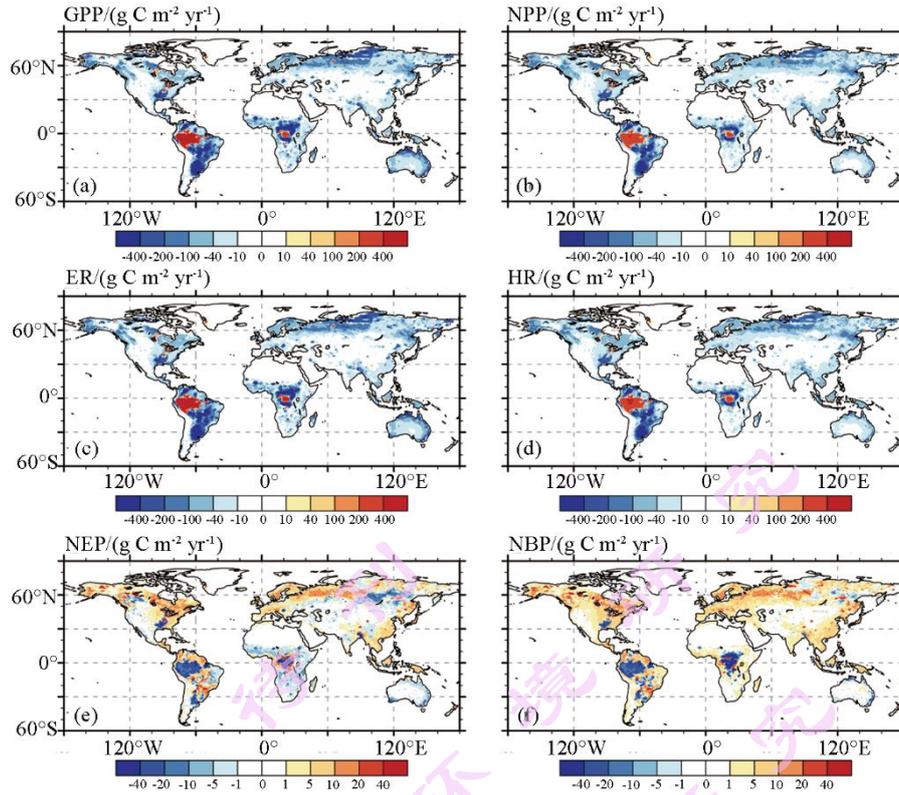


图 8 1981~2013 年土壤 DOC 侧向输送引起的陆地碳收支绝对变化的多年平均空间分布：(a) 总初级生产力、(b) 净初级生产力、(c) 生态系统呼吸、(d) 异氧呼吸、(e) 生态系统净生产力、(f) 生物群落净生产力。

Fig 8. The multi-year mean spatial distribution of absolute changes in the terrestrial carbon budget caused by lateral soil DOC transport during years 1981 to 2013: (a) gross primary productivity (GPP), (b) net primary productivity (NPP), (c) ecosystem respiration (ER), (d) heterotrophic respiration (HR), (e) net ecosystem productivity (NEP), (f) net biome productivity (NBP).

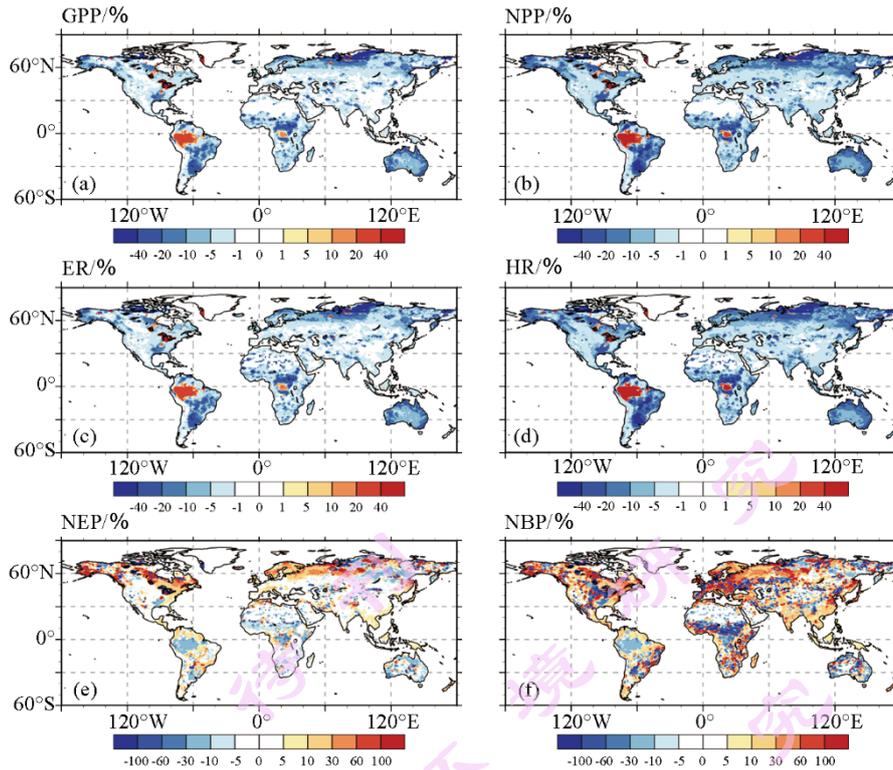


图9 1981~2013年土壤DOC侧向输送引起的陆地碳收支相对变化的多年平均空间分布：(a) GPP、(b) NPP、(c) ER、(d) HR、(e) NEP、(f) NBP。

Fig 9. The multi-year mean spatial distribution of relative changes in the terrestrial carbon budget caused by lateral soil DOC transport during years 1981 to 2013: (a) GPP, (b) NPP, (c) ER, (d) HR, (e) NEP, (f) NBP.

#### 4.3.2 溶解性有机碳侧向输送对陆地碳收支影响的时间变化规律

图10和图11分别展示了1981~2013年DOC侧向输送引起的陆地碳收支的年际变化和年内变化。由图10可得，受DOC侧向输送的影响，陆地GPP、NPP、ER、HR均减少。而在1981~2013年间，随着土壤DOC流失量的增加，GPP、ER、HR的变化量有明显的下降趋势，而NPP的变化趋于稳定。这表明尽管GPP的变化量由于土壤DOC流失量的增加而减少，与此同时ER的变化量亦减少，则NPP变化波动小，多年来基本持平。GPP的变化量从1981年的 $-8.47 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 到2013年的 $-8.82 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，多年平均是 $-8.61 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，变化速率为 $-0.02 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。NPP的变化量的多年平均是 $-7.28 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，变化速率为 $-0.01 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。ER变化速率为 $-0.03 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，下降率大于GPP和NPP。而NEP和NBP在DOC侧向输送的影响下呈现增加的趋势，仅在个别年份减少，NEP和NBP变化的多年平均值分别为 $0.12 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。表明由于土壤DOC的侧向输送，某些区域土壤DOC储量减少，导致土壤碳源减少和土壤团聚体结构的崩解，影响植物生长、

光合作用和水分吸收 (He et al., 2020; Smith et al., 2024), 从而使 GPP 和 NPP 减少。土壤 DOC 流失带走了植物呼吸需要的部分碳源, 与此同时减少的土壤有机质导致土壤微生物活动减少 (Tang et al., 2018), 影响生态系统呼吸作用, 导致 HR、ER 减少, 由于 ER 对土壤 DOC 侧向输送的响应比 GPP、NPP 敏感, 因此 NEP 增加。由图 11 可得, 陆地 GPP 和 NPP 的变化量在 5~7 月减少, 7~11 月增加, 其余月份的平均变化量较稳定, GPP 和 NPP 的变化量分别在  $-0.6 \text{ Pg C mon}^{-1}$  和  $-0.45 \text{ Pg C mon}^{-1}$  左右波动。陆地 NEP 和 NBP 的减少量 5 月达到最低, 7 月达到最高, 每年 10 月至次年 4 月变化量稳定, 基本在 0 左右波动。而土壤 DOC 流失量 2~4 月增加, 4~7 月减少, 这表明陆地 GPP 和 NPP 对土壤 DOC 流失量变化的响应是滞后的, 滞后时间大约为 3 个月。

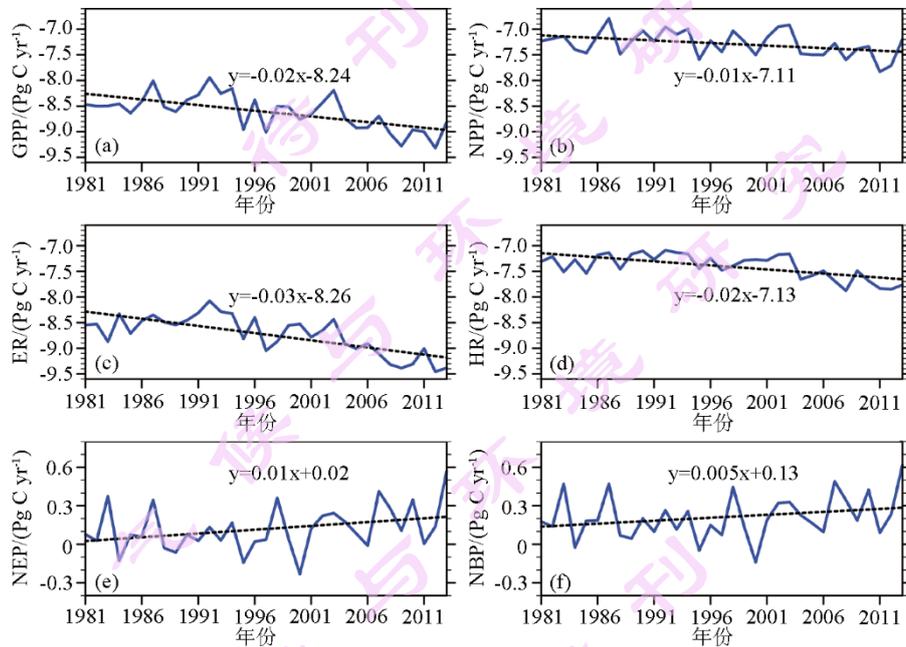


图 10 1981~2013 年土壤 DOC 侧向输送引起陆地碳收支的年际变化: (a) GPP、(b) NPP、(c) ER、(d) HR、(e) NEP、(f) NBP, 虚线表示线性趋势。

Fig 10. Interannual changes in the terrestrial carbon budget caused by lateral soil DOC transport during years 1981 to 2013: (a) GPP, (b) NPP, (c) ER, (d) HR, (e) NEP, (f) NBP, the dashed lines represent the temporal trends.

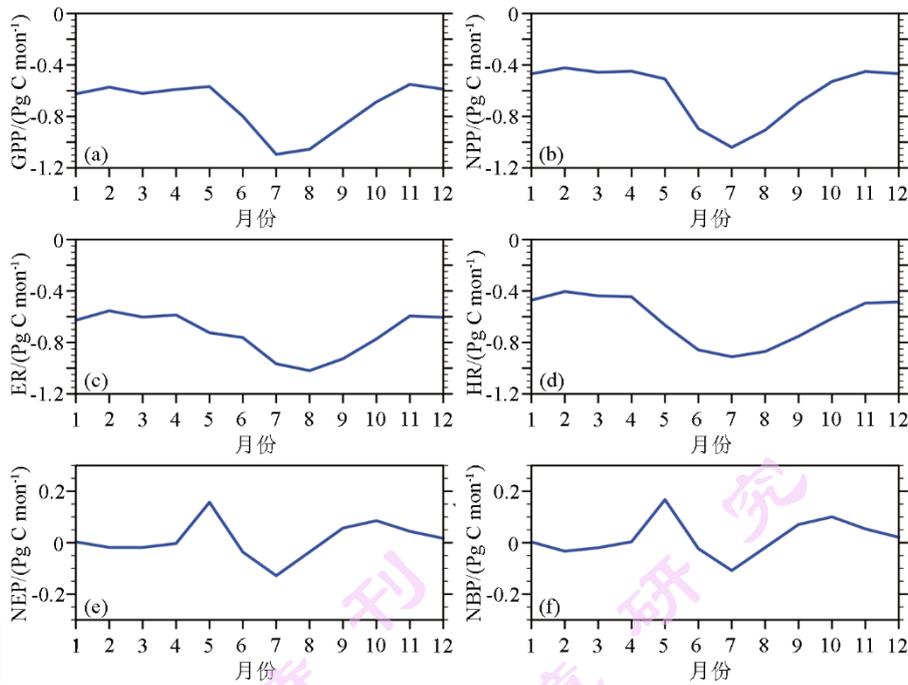


图 11 1981~2013 年土壤 DOC 侧向输送引起陆地碳收支的年内变化：(a) GPP、(b) NPP、(c) ER、(d) HR、(e) NEP、(f) NBP。

Fig 11. Annual changes in the terrestrial carbon budget caused by lateral soil DOC transport during years 1981 to 2013: (a) GPP, (b) NPP, (c) ER, (d) HR, (e) NEP, (f) NBP.

## 5 结论

本研究利用包含土壤可溶性有机碳 (DOC) 流失的陆面过程模式 CLM5.0 进行数值模拟, 从全球尺度上探讨了 1981 至 2013 年 GPP 时空变化特征, 评估土壤 DOC 侧向输送对陆地碳收支的影响, 主要结论如下:

(1) 1981 至 2013 年, 赤道附近的热带地区是全球 GPP 值最大的区域, 全球 GPP 年平均值随时间推移呈现总体增加的趋势, 多年平均值是  $153 \text{ Pg C yr}^{-1}$ , 年内变化春夏增加, 秋冬减少, 7 月达到最大值。

(2) 1981 至 2013 年, 北纬  $60^\circ$  附近温带的部分地区和赤道附近热带的部分地区土壤 DOC 流失量较大, 全球土壤 DOC 流失量随时间呈现总体增加的趋势, 多年平均值是  $458 \text{ Tg C yr}^{-1}$ , 年内变化春秋增加, 夏冬减少, 4 月达到最大值。

(3) 在全球大部分地区, 土壤 DOC 侧向输送使陆地 GPP 和 NPP 减少, 尤其在南美洲的中东部地区以及非洲中部的部分区域, GPP 和 NPP 的减少量可达到  $400 \text{ g C km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  以上; 而在南美洲的西北部、非洲中西部的部分区域 GPP 和 NPP 均增加。

(4) 土壤 DOC 侧向输送使全球陆地碳收支 GPP 和 NPP 总量减少, 变化量的多年平均分别是 $-8.61 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 和 $-7.28 \text{ Pg C yr}^{-1}$ , 且随着土壤 DOC 流失量的增加, GPP 多年的变化量有下降的趋势, 而 NPP 多年的变化量每年有波动但总体趋于稳定。GPP 和 NPP 变化量的年内变化为 5~7 月下降, 7~11 月上升, 其余月份较稳定。DOC 的侧向输送对陆地碳收支的年内变化影响具有滞后性。

**致谢:** 本研究得到国家自然科学基金项目 U2344224 的资助。感谢审稿人所提出的宝贵意见和建议, 使本修改稿质量得到极大提升。

### 参考文献 (References)

- Beckebanze L, Runkle B R K, Walz J, et al. 2022. Lateral carbon export has low impact on the net ecosystem carbon balance of a polygonal tundra catchment [J]. *Biogeosciences*, 19(16): 3863-3876. doi:10.5194/bg-19-3863-2022
- 陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 等. 2013. 土壤呼吸组分分离技术研究进展 [J]. *生态学报*, 33(22):7067-7077. Chen Minpeng, Xia Xu, Li Yinkun, et al. 2013. Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem [J]. *Acta Ecol. Sinica*, 33(22):7067-7077. doi:10.5846/stxb201207191027
- Chen Y, Zhu Z, Zhao W, et al. 2024. The direct and indirect effects of the environmental factors on global terrestrial gross primary productivity over the past four decades [J]. *Environmental Research Letters*, 19(1): 014052. doi:10.1088/1748-9326/ad107f
- Felzer B, Kicklighter D, Melillo J, et al. 2004. Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model [J]. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 56(3): 230-248. doi:10.1111/j.1600-0889.2004.00097.x
- Fröberg M, Berggren D, Bergkvist B, et al. 2006. Concentration and Fluxes of Dissolved Organic Carbon (DOC) in Three Norway Spruce Stands along a Climatic Gradient in Sweden [J]. *Biogeochemistry*, 77(1): 1-23. doi:10.1007/s10533-004-0564-5
- Gerber S, Hedin L O, Oppenheimer M, et al. 2010. Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1) doi: 10.1029/2008GB003336
- Gommet C, Lauerwald R, Ciais P, et al. 2022. Spatiotemporal patterns and drivers of terrestrial dissolved

- organic carbon (DOC) leaching into the European river network [J]. *Earth Syst. Dynam.*, 13(1): 393-418. doi:10.5194/esd-13-393-2022
- Hastie A, Lauerwald R, Ciais P, et al. 2021. Historical and future contributions of inland waters to the Congo Basin carbon balance [J]. *Earth Syst. Dynam.*, 12(1): 37-62. doi:10.5194/esd-12-37-2021
- He Y, Cheng W, Zhou L, et al. 2020. Soil DOC release and aggregate disruption mediate rhizosphere priming effect on soil C decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 144: 107787. doi:10.1016/j.soilbio.2020.107787
- JANSSENS I A\PILEGAARD K. 2003. Large seasonal changes in Q10 of soil respiration in a beech forest [J]. *Global Change Biology*, 9(6): 911-918. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00636.x
- Jung M, Schwalm C, Migliavacca M, et al. 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach [J]. *Biogeosciences*, 17(5): 1343-1365. doi:10.5194/bg-17-1343-2020
- Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review [J]. *Soil Science*, 165: 277-304. doi: 10.1097/00010694-200004000-00001
- Kicklighter D W, Hayes D J, McClelland J W, et al. 2013. Insights and issues with simulating terrestrial DOC loading of Arctic river networks [J]. *Ecological Applications*, 23(8): 1817-1836. doi:10.1890/11-1050.1
- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security [J]. *Science*, 304(5677): 1623-1627. doi:10.1126/science.1097396
- Lauerwald R, Régnier P, Guenet B, et al. 2020. How Simulations of the Land Carbon Sink Are Biased by Ignoring Fluvial Carbon Transfers: A Case Study for the Amazon Basin [J]. *One Earth*, 3(2): 226-236. doi:10.1016/j.oneear.2020.07.009
- Lauerwald R, Regnier P, Camino-Serrano M, et al. 2017. ORCHILEAK (revision 3875): a new model branch to simulate carbon transfers along the terrestrial-aquatic continuum of the Amazon basin [J]. *Geosci. Model Dev.*, 10(10): 3821-3859. doi:10.5194/gmd-10-3821-2017
- Lee M-H, Park J-H\Matzner E. 2018. Sustained production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest floors during continuous leaching [J]. *Geoderma: An International Journal of Soil Science*, 310: 163-169. doi:10.1016/j.geoderma.2017.07.027
- Liao J, Fu R, Li X, et al. 2024. Spatial Pattern of Net Primary Productivity and Asymmetric Response of

- Precipitation in Global Grassland Ecosystems [J]. *Ecology and Environment*, 33(12): 1827-1836. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.12.001
- Li M, Peng C, Zhou X, et al. 2019. Modeling Global Riverine DOC Flux Dynamics From 1951 to 2015 [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(2): 514-530. doi: 10.1029/2018MS001363
- Nakhavali M, Friedlingstein P, Lauerwald R, et al. 2018. Representation of dissolved organic carbon in the JULES land surface model (vn4.4\_JULES-DOCM) [J]. *Geosci. Model Dev.*, 11(2): 593-609. doi:10.5194/gmd-11-593-2018
- Nakhavali M, Lauerwald R, Regnier P, et al. 2024a. Historical trends and drivers of the laterally transported terrestrial dissolved organic carbon to river systems [J]. *Science of The Total Environment*, 917: 170560. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170560
- Nakhavali M, Lauerwald R, Regnier P, et al. 2024b. Predicting Future Trends of Terrestrial Dissolved Organic Carbon Transport to Global River Systems [J]. *Earth's Future*, 12(4): e2023EF004137. doi: 10.1029/2023EF004137
- Neff J C, Asner G P. 2001. Dissolved Organic Carbon in Terrestrial Ecosystems: Synthesis and a Model [J]. *Ecosystems*, 4(1): 29-48. doi:10.1007/s100210000058
- Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model [J]. *Biogeochemistry*, 5(1): 109-131. doi:10.1007/BF02180320
- Ren W, Tian H, Cai W-J, et al. 2016. Century-long increasing trend and variability of dissolved organic carbon export from the Mississippi River basin driven by natural and anthropogenic forcing [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9): 1288-1299. doi: 10.1002/2016GB005395
- Smith D J, Duston S, Barney J N, et al. 2024. Dissolved organic carbon characteristics are associated with changes in soil microbiome under different plant species [J]. *Applied Soil Ecology*, 196: 105313. doi: 10.1016/j.apsoil.2024.105313
- Tan Z, Leung L R, Li H-Y, et al. 2022. Representing Global Soil Erosion and Sediment Flux in Earth System Models [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(1): e2021MS002756. doi: 10.1029/2021MS002756
- Tang J, Yurova A Y, Schurgers G, et al. 2018. Drivers of dissolved organic carbon export in a subarctic catchment: Importance of microbial decomposition, sorption-desorption, peatland and lateral flow [J]. *Science of The Total Environment*, 622-623: 260-274. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.252

- Tian H, Yao Y, Li Y, et al. 2023. Increased Terrestrial Carbon Export and CO<sub>2</sub> Evasion From Global Inland Waters Since the Preindustrial Era [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(10): e2023GB007776. doi: 10.1029/2023GB007776
- Thornton P E, Doney S C, Lindsay K, et al. 2009. Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model [J]. *Biogeosciences*, 6(10): 2099-2120. doi:10.5194/bg-6-2099-2009
- Verstraeten A, Verschelde P, De Vos B, et al. 2016. Increasing trends of dissolved organic nitrogen (DON) in temperate forests under recovery from acidification in Flanders, Belgium [J]. *Science of The Total Environment*, 553: 107-119. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.02.060
- Wang H, Holden J, Zhang Z, et al. 2014. Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimental warming [J]. *Science of The Total Environment*, 470-471: 907-916. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.049
- Wei X, Hayes D J, Butman D E, et al. 2024. Modeling exports of dissolved organic carbon from landscapes: a review of challenges and opportunities [J]. *Environmental Research Letters*, 19(5): 053001. doi:10.1088/1748-9326/ad3cf8
- Wu H, Peng C, Moore T R, et al. 2014. Modeling dissolved organic carbon in temperate forest soils: TRIPLEX-DOC model development and validation [J]. *Geosci. Model Dev.*, 7(3): 867-881. doi:10.5194/gmd-7-867-2014
- 闫旭春, 吴晓东, 吕雅琼, 等. 2023. CLM5.0 对阿拉斯加多年冻土区土壤温度和碳循环模拟的适用性评估 [J]. *冰川冻土*, 45(03): 902-914. Yan Xunchun, Wu Xiaodong, Lv Yaqiong, et al. 2023. Applicability evaluation of CLM5.0 in simulating soil temperature and carbon cycle in Alaskan permafrost region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 45(03): 902-914. doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0068
- Yoo K, Amundson R, Heimsath A M, et al. 2005. Erosion of upland hillslope soil organic carbon: Coupling field measurements with a sediment transport model [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(3) doi: 10.1029/2004GB002271
- You Y, Jia B, Xie Z, et al. 2024. Rising CO<sub>2</sub> and land use change amplify the increase in terrestrial and riverine export of dissolved organic carbon over the past four decades [J]. *Science of The Total Environment*, 954: 176642. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176642

You Y, Xie Z, Jia B, et al. 2023. Impacts of anthropogenic water regulation on global riverine dissolved organic carbon transport [J]. *Earth Syst. Dynam.*, 14(5): 897-914. doi:10.5194/esd-14-897-2023

Zhang H, Lauerwald R, Ciais P, et al. 2022. Global changes alter the amount and composition of land carbon deliveries to European rivers and seas [J]. *Communications Earth & Environment*, 3(1) doi:10.1038/s43247-022-00575-7

气候与环境研究  
气候与环境研究  
待刊  
待刊