

# 青藏高原气候变化对草地碳汇/源格局的影响

耿垭鑫<sup>1</sup>, 易桂花<sup>1</sup>, 张廷斌<sup>2,3</sup>, 别小娟<sup>1</sup>,  
李景吉<sup>3,4</sup>, 王国严<sup>1</sup>, 林梦男<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地理与规划学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都 610059;  
3. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;  
4. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059)

**摘要:** 草地碳汇/源是植被生态系统中碳收支和碳平衡的一个重要内容, 区分碳汇和碳源对气候变化的响应可为减源增汇提供科学依据。基于MODIS NPP数据和土壤呼吸模型量化了2001—2019年青藏高原草地净生态系统生产力(NEP)的时空变化和碳汇/源格局, 利用通径分析方法分析了青藏高原气候变化对草地碳汇/源的影响。结果表明: 青藏高原草地NEP呈现东高西低的分布格局, 年平均值为 $54.41 \text{ g C m}^{-2}$ 。草地整体上以碳汇功能为主。碳汇区面积约为72.26万 $\text{km}^2$ , 碳源区面积约为47.82万 $\text{km}^2$ , 净碳汇总量 $65.35 \text{ Tg C a}^{-1}$ 。近19年青藏高原草地NEP以增加趋势为主, 青藏高原气候暖湿化趋势有利于草地NEP的增加, 增强碳汇; 而暖干化趋势对NEP的影响在不同生态地理区差异较大。

**关键词:** NEP; 碳汇/源; 气候变化; 通径分析; 青藏高原

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第六次气候评估报告 (AR6) 指出二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 等温室气体是当前全球变暖的主要驱动因子<sup>[1]</sup>, 如何有效减少 $\text{CO}_2$ 排放量是减缓全球气候变化的重中之重。作为世界上最大的发展中国家和碳排放国, 中国提出力争2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”。但这一目标难以完全依靠社会经济减排的方式达到<sup>[2,3]</sup>。相关研究表明, 植被碳汇与大气 $\text{CO}_2$ 浓度呈负相关关系, 陆地生态系统平均每年可以吸收约1/4的人为 $\text{CO}_2$ 排放量, 在降低 $\text{CO}_2$ 浓度和缓解全球变暖中发挥着重要作用<sup>[4-6]</sup>。因此生态增汇可以部分抵消工业碳排放, 是实现中国“双碳战略”的重要途径<sup>[7-9]</sup>。草地生态系统是最重要的陆地生态系统类型之一, 具有水源涵养、土壤保持和防风固沙等生态功能, 还承担着重要的固碳功能, 在全球碳固存中, 草地的贡献达到30%<sup>[10-12]</sup>, 是实现“碳中和”的重要支撑。青藏高原是中国重要的碳汇功能区之一, 其中草地生态系统是青藏高原的主体生态系统, 利用遥感数据研究大尺度下青藏高原草地碳汇/源的时空格局及其影响因素, 对于更好地评估现有草地的增汇潜力和优化当前草地布局等具有重要的科学和现实意义<sup>[13-15]</sup>。

净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 是定量描述碳汇/源大小最直接的生态指标, 指净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 和土壤异养呼吸

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2024-01-13

基金项目: 四川省科技计划项目 (2022YFS0491); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0307); 国家自然科学基金项目 (41801099)

作者简介: 耿垭鑫 (1996-), 女, 山西长治人, 硕士, 研究方向为自然地理。E-mail: gengyaxin@stu.cdut.edu.cn

通讯作者: 易桂花 (1982-), 女, 四川南充人, 博士, 教授, 研究方向为环境遥感研究。E-mail: yigh@cdut.edu.cn

(Heterotrophic Respiration, RH) 的差值<sup>[16-18]</sup>, 代表了陆地生态系统碳的净贮存或净排放, 如果 *NEP* 为正值, 表示该生态系统为碳汇, 负值则为碳源<sup>[19-21]</sup>。

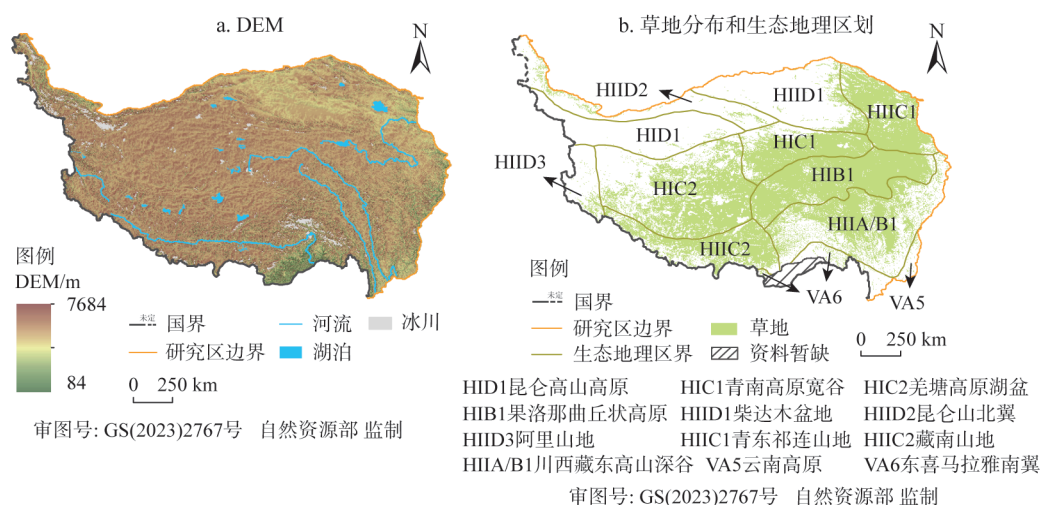
气候变化通过调节植物生理过程进而改变陆地生态系统的碳平衡<sup>[22]</sup>。气温和降水作为控制植被动态生长和分布的主要气候因子, 其变化对植被碳汇/源的影响一直是学术界关注的焦点<sup>[23-25]</sup>。杨延征等<sup>[26]</sup>利用 IBIS 模型分析得到 1960—2006 年中国的 *NEP* 总体表现为碳汇, *NEP* 与降水的相关性更强; He 等<sup>[27]</sup>的研究表明, 2000—2010 年间气候效应对中国碳汇变化的重要性约占 56.30%; 黄磊等<sup>[28]</sup>基于 BEPS 模型模拟得到全球碳汇从 2001 年的 1.57 Pg 增加到 2019 年的 2.84 Pg, 结果表明除土地利用变化外, 气候变化是影响碳汇变化最重要的驱动因素。近些年青藏高原变暖速率高于全球平均水平 ( $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )<sup>[1]</sup>, 气候变化更加敏感, 被称为中国乃至全球气候变化的“天然实验室”<sup>[29,30]</sup>。在全球变暖的背景下, 青藏高原朝着暖湿化方向发展<sup>[31,32]</sup>, 草地返青期提前<sup>[33,34]</sup>, 光合作用和碳吸收过程发生改变, 对高原草地生态系统产生了重大影响<sup>[35]</sup>。目前关于青藏高原碳汇作用的研究侧重于植被 *NPP* 对气候变化的响应<sup>[36-38]</sup>, 然而, 关于 *NEP* 对青藏高原 21 世纪初发生的气候变化的响应关注较少, 研究结果还存在一定分歧。You 等<sup>[35]</sup>认为青藏高原草地在生长季的总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 和 *NEP* 与大部分地区的气温呈正相关关系; 刘凤等<sup>[39]</sup>认为降水量对青藏高原东北部的植被碳汇起促进作用, 气温以抑制作用为主; Guo 等<sup>[12]</sup>认为草地 *NEP* 与降水的相关性最强且呈负相关关系。综上, 不同植被类型和不同地区, 其气候变化对 *NEP* 的影响会有不同, 碳汇估算必须考虑未来的气候变化趋势。因此, 研究青藏高原草地碳汇/源时空变化及其对气候变化的响应, 不仅有利于掌握草地生态系统的碳汇潜力和关键作用, 而且对理解未来气候变化下草地的碳固存能力具有重要现实意义。

由于碳通量站点有限, 很难获得大范围实测的碳吸收和排放数据。相比之下, 遥感和经验统计模型应用广泛<sup>[20]</sup>, 基于此, 本文利用 MOD17A3 *NPP* 数据和土壤呼吸模型估算 2001—2019 年青藏高原草地生态系统 *NEP*, 分析草地 *NEP* 的时空变化特征和碳汇/源格局, 采用通径分析方法定量气候变化对青藏高原草地碳汇/源的影响, 揭示近年来青藏高原草地碳汇/源与气候变化的关系, 以期为中国在当前气候变化下的碳汇增加和温室减排策略提供科学参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

青藏高原被称为“世界屋脊”和“第三极”, 地理范围北起昆仑山—祁连山脉, 南至喜马拉雅山脉, 西自兴都库什山脉和帕米尔高原西缘, 东到横断山脉东缘。中国境内青藏高原范围介于  $26^{\circ}00'\text{N}\sim39^{\circ}46'\text{N}$ 、 $73^{\circ}18'\text{E}\sim104^{\circ}46'\text{E}$ <sup>[40,41]</sup>, 是长江、黄河、雅鲁藏布江、印度河和恒河等众多河流的发源地, 总面积约  $2.58\times10^6\text{ km}^2$ , 约占中国国土总面积的 26.8%。青藏高原具有独特的植被组成和气候环境, 人类干扰强度低。研究区地势西北高、东南低, 平均海拔 4320 m 左右 (图 1a)。年平均气温约为  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量约为 360 mm, 属于典型的高原大陆性气候。区内植被类型复杂多样, 呈水平—垂直地带性, 从东南向西北依次分布着森林、灌丛、草地、高山稀疏植被和荒漠等, 其中草地是其主体生态系统<sup>[42]</sup>, 分布广泛 (图 1b), 约占高原总面积的 46%。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 青藏高原DEM、草地分布和生态地理区划

Fig. 1 DEM, grassland distribution and eco-geographical region systems of the Qinghai-Tibet Plateau (QTP)

## 1.2 数据来源

*NPP*数据来源于美国陆地过程分布式活动存档中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC) 2001—2019年的MODIS/MOD17A3HGF数据 (<https://lpdaac.usgs.gov>), 空间分辨率为500 m, 时间分辨率为年, 该数据基于遥感光能利用率—过程耦合模型模拟获得 $NPP^{[43,44]}$ 。在全球和区域碳循环研究中, MOD17A3数据得到广泛应用<sup>[45-47]</sup>。使用MRT (MODIS Reprojection Tools) 工具对MODIS *NPP*数据进行格式转换、镶嵌和重投影等预处理工作, 剔除无效值, 重采样为1 km×1 km。

气象数据来自于1952—2019年中国1 km空间分辨率的月平均气温和月降水量数据集 (<https://zenodo.org/>), 时间范围为2001—2019年。该数据是利用气候辅助插值方法将月度异常表面和基线气候学表面 (ChinaClim\_baseline) 相叠加而生成。

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据下载自中国科学院“地理空间数据云” (<http://www.gscloud.cn>) 的SRTM-3 DEM, 空间分辨率90 m, 对DEM进行镶嵌、裁剪、重采样等预处理, 得到空间分辨率为1 km的高程数据。

生态地理区划数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>), 基于温度和干湿状况将青藏高原主要划分为7个生态地理区、12个自然区 (图1b)。

植被类型来自于MODIS/MCD12Q1数据, 选取2001—2019年无土地类型变化的草地作为研究对象, 并将数据重采样为1 km×1 km。草地主要分布在HIC、HIB、HIIC和HIIA/B 4个生态地理区 (图1b), HID、HIID和VA区在本文中暂不进行分析统计。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 碳汇/源估算

本文利用 $NEP$ 定量估算碳汇和碳源的大小, 在不考虑其他自然和人为干扰时,  $NEP$ 的计算公式如下<sup>[19,20]</sup>:

$$NEP = NPP - RH \quad (1)$$

式中:  $NEP$ 指植被净生态系统生产力 ( $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $NPP$ 指植被净初级生产力 ( $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ );

$RH$ 指土壤异养呼吸量 ( $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )。当 $NEP < 0$ 时, 草地为碳源;  $NEP > 0$ 时, 草地为碳汇。

$RH$ 采用裴永志等<sup>[48]</sup>建立的气候驱动模型计算, 即:

$$RH = 0.22 \times [e^{0.0913T} + \ln(0.3145P + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中:  $T$ 表示月平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P$ 表示月降水量 ( $\text{mm}$ )。

### 1.3.2 Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验

Theil-Sen Median趋势分析又称为Sen's斜率估计, 是一种稳健的非参数统计趋势分析方法<sup>[20]</sup>。该方法不受测量误差和数据缺失的影响, 适用于长时间序列数据的趋势分析。Mann-Kendall统计检验是一种非参数检验方法, 其不需要测量值服从正态分布, 不受缺失值和异常值的影响, 用于评估趋势的显著性<sup>[49]</sup>。根据显著性检验结果将青藏高原草地 $NEP$ 变化趋势分为显著增加 ( $\beta > 0, \alpha < 0.05$ )、非显著增加 ( $\beta > 0, \alpha \geq 0.05$ )、非显著减少 ( $\beta < 0, \alpha \geq 0.05$ ) 和显著减少 ( $\beta < 0, \alpha < 0.05$ ) 4种类型。

### 1.3.3 通径分析

通径分析常用来研究在不考虑其他自变量影响时自变量对因变量的直接作用 (直接通径系数) 和该自变量通过其他自变量对因变量的间接作用 (间接通径系数)<sup>[50,51]</sup>。该方法以多元线性回归为基础, 将因变量与自变量的简单相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数, 系数绝对值越大, 表明自变量对因变量影响程度越强。为确定气候变化对青藏高原草地碳汇和碳源变化趋势的影响, 本文以气温和降水为自变量、 $NEP$ 为因变量, 计算 $NEP$ 与气温和降水之间的直接通径系数和间接通径系数。两者相加为综合系数, 分别表示气温和降水对 $NEP$ 的直接影响、间接影响和综合影响, 当系数为正时, 自变量对因变量起正效应 (促进作用); 反之为负效应 (抑制作用)<sup>[52]</sup>。经Shapiro-Wilk Test正态性检验, 研究区2001—2019年草地 $NEP$ 服从正态分布, 可以进行通径分析。

## 2 结果分析

### 2.1 草地碳汇和碳源时空分布特征

2001—2019年青藏高原草地总体表现为碳汇,  $NEP$ 呈显著增加趋势 (图2a), 年平均值从2001年的 $44.78 \text{ g C m}^{-2}$ 增加到2019年的 $60.09 \text{ g C m}^{-2}$ , 增加速率为 $0.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 明显高于内蒙古草地 $NEP$ 的平均增长率 [ $2.16 \text{ g C m}^{-2} (12 \text{ a})^{-1}$ ]<sup>[19]</sup>。其中2004年青藏高原气温降低、降水增加, 草地 $NEP$ 最低, 为 $41.01 \text{ g C m}^{-2}$ ; 2006年气温升高、降水减少, 草地 $NEP$ 最高, 为 $66.91 \text{ g C m}^{-2}$ , 这表明草地 $NEP$ 可能与气候变化关系密切。

青藏高原草地 $NEP$ 整体上呈东高西低的空间格局, 年平均值为 $54.41 \text{ g C m}^{-2}$  (图2b)。碳源区主要分布在羌塘高原湖盆区 (HIC2)、青南高原宽谷区 (HIC1) 和藏南山地区 (HIC2) 等干旱地区, 占草地总面积的39.82%, 这些区域气温低、降水少, 以高寒草原和温带灌丛草原为主, 固碳能力弱。草地碳汇区面积占比60.18%, 主要分布在青东祁连山地区 (HIIC1)、果洛那曲丘状高原区 (HIB1)、HIC1区南部、HIC2区东南部、HIIC2区东部和川西藏东高山深谷区 (HIIB/B1) 中北部等温带或湿润地区, 草地植被以高寒灌丛草甸、草原和温带草原、灌丛草原为主。总之, 青藏高原草地碳源区面积约 $47.82 \text{ 万 km}^2$ , 多年平均碳释放量达 $14.26 \text{ Tg C a}^{-1}$ ; 碳汇区面积约为 $72.26 \text{ 万 km}^2$ , 多年平均固碳量达 $79.61 \text{ Tg C a}^{-1}$ , 是碳释放量的5.6倍。草地净碳汇总量为 $65.35 \text{ Tg C a}^{-1}$ , 约占当前中国陆地碳汇强度



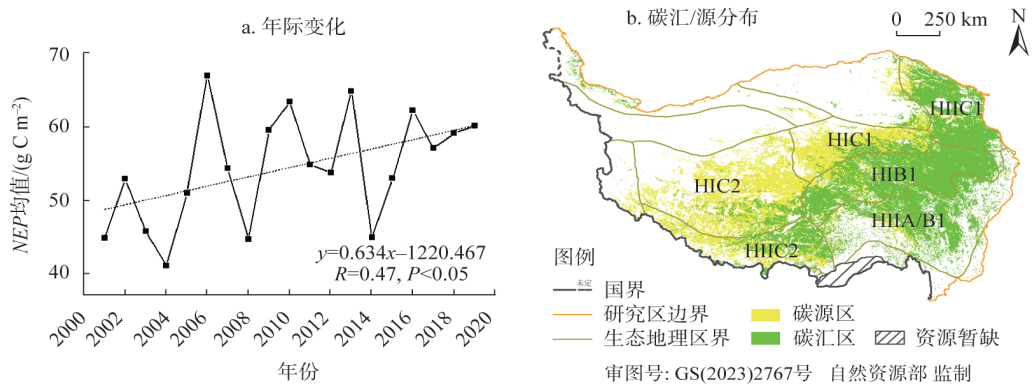


图2 2001—2019年青藏高原草地 $NEP$ 的年际变化和碳汇/源的空间分布

Fig. 2 Interannual variability of grassland  $NEP$  and spatial characteristics of grassland carbon sink/source in the QTP from 2001 to 2019

( $0.15\sim0.38\text{ Pg C a}^{-1}$ ) 的 17%~43%<sup>[8,14,23,25,27,53,54]</sup>。受地形和气候的影响,草地固碳能力在各生态地理区呈现出不同的差异特征(表1),高原温带草地碳汇功能强于亚寒带,湿润半湿润区草地碳汇功能强于半干旱区。

2.2 草地碳汇和碳源时空变化趋势

青藏高原大部分地区草地 $NEP$ 变化趋势均在 $-2\sim2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内波动,变化率较大的区域主要集中在青藏高原东北部和东南部的草地分布边缘区(图3a)。草地 $NEP$ 呈增加趋势的面积( $91.21\text{ 万 km}^2$ )大于 $NEP$ 呈减少趋势的面积( $28.87\text{ 万 km}^2$ ),增加区域分布广泛,减少趋势的区域主要分布在高原南部。从显著性分布(图3b)可以看出,19.15%的研究区通过

表1 2001—2019年青藏高原不同生态地理区草地 $NEP$ 平均值

Table 1 Average $NEP$ of eco-geographical region in the QTP grassland ecosystem from 2001 to 2019		
生态地理区	平均 $NEP/(\text{g C m}^{-2}\text{ a}^{-1})$	平均高程/m
羌塘高原湖盆区(HIC2)	-19.35	5021.98
青南高原宽谷区(HIC1)	-15.16	4694.02
藏南山地区(HIIC2)	13.93	4829.98
果洛那曲丘状高原区(HIB1)	86.99	4491.32
川西藏东高山深谷区(HIIA/B1)	116.86	4111.08
青东祁连山地区(HIIC1)	142.70	3562.52

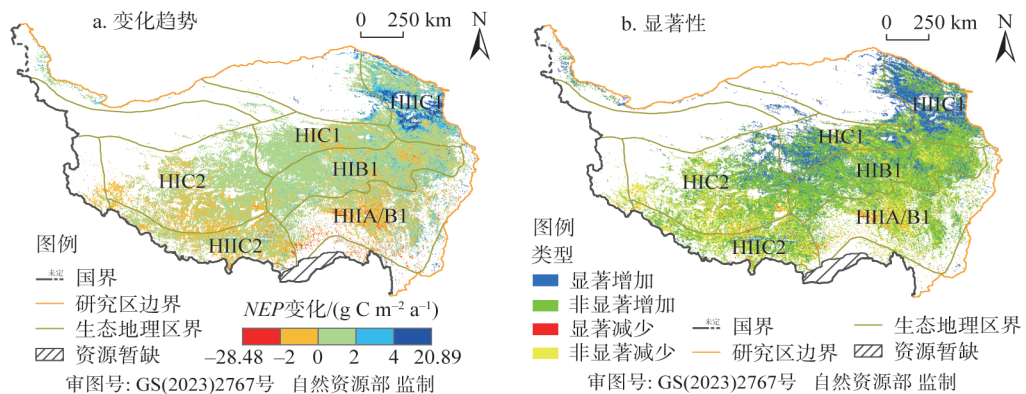


图3 2001—2019年青藏高原草地 $NEP$ 的变化趋势及其显著性

Fig. 3 Change trends and their significance of grassland  $NEP$  in the QTP from 2001 to 2019

了显著性检验。草地碳源区 $NEP$ 显著增加的区域主要分布在HIC1区西部、HIC2区东北部和HIIC1区北部,增长率为 $0\sim 2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间,占碳源区面积的18.85% (表2);草地碳汇区 $NEP$ 显著增加的区域占该区面积的17.14% (表2), 主要集中分布于HIIC1区, 增加速率 $>2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

各生态地理分区中, HIIC1区草地 $NEP$ 平均增长率最高, 为 $2.10\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ; HIB1和HIC1区草地 $NEP$ 的平均增长率次之, 分别为 $0.77\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $0.63\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ; HIIA/B1区、HIC2区和HIIC2区草地 $NEP$ 平均增长率均 $<0.5\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。相比之下, 草地碳源区和碳汇区显著减少区域仅占1.14%和1.45%, 分布离散。结果表明, 2001—2019年青藏高原草地 $NEP$ 明显增加, 草地碳汇增强。

### 2.3 气候暖湿化对草地碳汇/源影响

2001—2019年青藏高原年平均气温呈上升趋势, 线性增温率为 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ; 年降水量也呈增加趋势, 增加速率为 $6.7\text{ mm}/10\text{ a}$  (图4a)。空间上, 升温区域占比94.22%, 分布广泛; 降温区域主要发生在高原北部, 占比5.78%。高原西部、东部和东北部降水量均呈增加趋势, 占全区面积的56.01%; 而高原的北部、中部和东南部降水量呈减少趋势 (图4b)。根据气温 ( $T$ ) 和降水 ( $P$ ) 变化趋势的结果, 本文将青藏高原气候变化分为暖湿化 ( $\beta_T>0, \beta_P>0$ )、暖干化 ( $\beta_T>0, \beta_P<0$ )、冷湿化 ( $\beta_T<0, \beta_P>0$ ) 和冷干化 ( $\beta_T<0, \beta_P<0$ ) 4种趋势类型。整体上, 近19年青藏高原52.57%的区域气候趋向暖湿化, 其中HIIC1区、HIB区和HIC1区气候主要呈现暖湿化趋势, HIC2区西部和东南部以及HIIA/B1区东北部气候也表现为暖湿化趋势; 41.65%的区域气候趋向暖干化, HIIC2区、HIIA/B区以及HIC2区东部和北部气候以暖干化趋势为主 (图4b)。

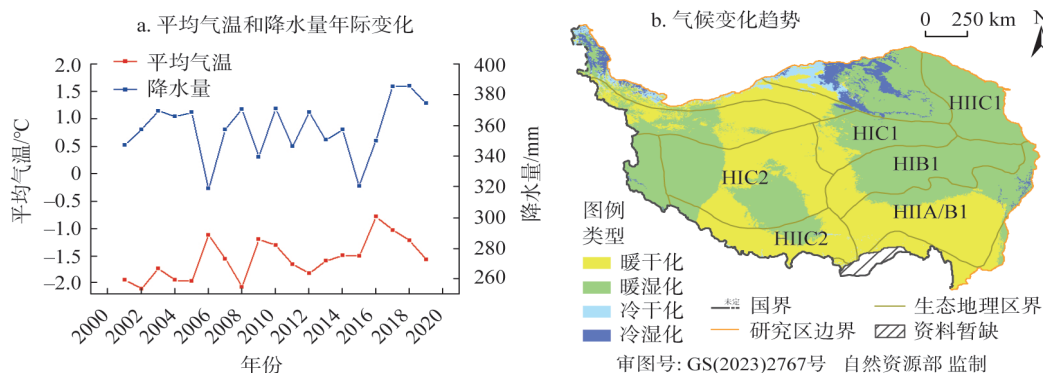


图4 2001—2019年青藏高原气候变化特征

Fig. 4 Characteristics of climate change in the QTP from 2001 to 2019

空间上, 气温和降水对青藏高原草地 $NEP$ 的影响具有明显异质性。在不考虑降水变化的影响时, 19.18%的升温区对 $NEP$ 起直接抑制作用, 集中分布在高原西南部; 80.82%的升温区直接促进了草地 $NEP$ 的增加, 主要分布于高原的中部和东部 (图5a)。升温对

碳源区 *NEP* 的正效应影响范围较广，其中 HIC1 区西部和 HIC2 区东部等地 *NEP* 增加显著，*NEP* 随气候变暖而增加，碳源有所减少；升温导致碳源区 *NEP* 减少的区域占比 25.04%，主要分布在 HIC2 区西部，该区 *NEP* 随气温升高而降低。升温对碳汇区 *NEP* 的直接正向影响占该区面积的 84.81%，尤其在 HIB1 区和 HIC1 区北部 *NEP* 随温度升高而增加明显，升温对草地 *NEP* 的直接负向影响程度较小，主要分布在 HIIA/B1 区西部。与直接影响相比，升温对草地 *NEP* 的间接影响较弱（图 5c）。升温对草地 *NEP* 的间接正向

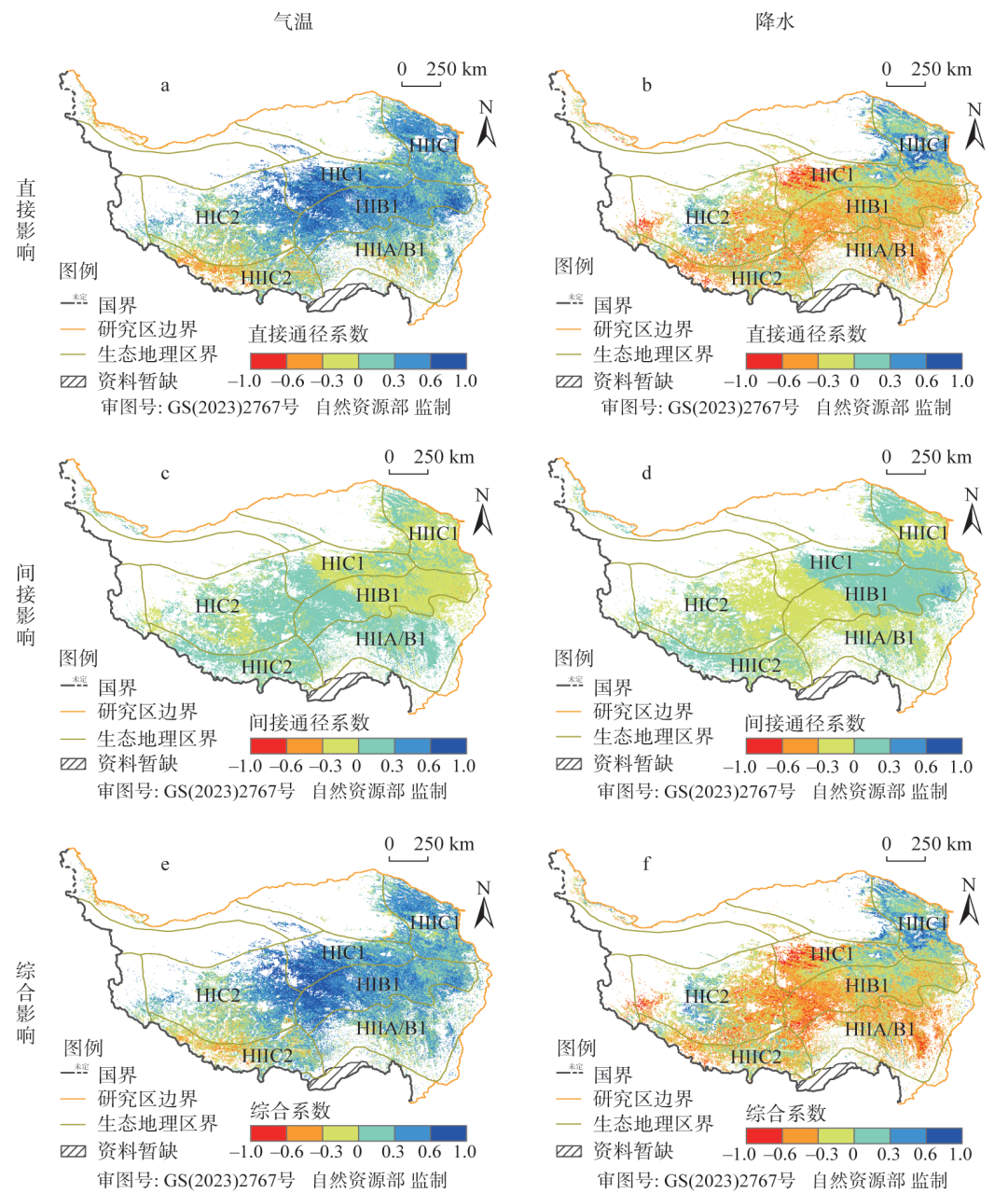


图5 2001—2019年青藏高原气候变化对草地 *NEP* 影响的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of climate change impacts on grassland *NEP* in the QTP from 2001 to 2019



影响占升温区面积的58.46%，主要分布在碳源区和高原南部的碳汇区，升温和降水的相互作用在一定程度上促进了光合作用的积累，进而增加*NPP*和*NEP*；升温对草地*NEP*的间接负向影响占升温区面积的41.54%，主要分布在高原东部的碳汇区，气温和降水的相互作用导致土壤呼吸速率增加进而导致*NEP*减少。降温主要发生在高原北部，对草地*NEP*的影响小。综合来看，在高原西南部等温带干旱地区，气候变暖对草地*NEP*产生负向影响；在高原中部和东部等亚寒带湿润地区，升温对草地*NEP*产生正向影响（图5e）。

降水对青藏高原草地*NEP*的影响以负向作用为主。降水增加对*NEP*的直接抑制作用占比70.31%，主要分布在高原东部和西南部；受直接促进作用的*NEP*区域占降水增加区域的29.69%，分布于高原东北部（图5b）。降水增加对碳源区*NEP*的直接负向影响较强，主要分布在HIC1区中西部和HIC2区东南部及西南部等地，*NEP*随降水的增加明显减少，占碳源区面积的75.19%；降水增加对碳源区草地*NEP*的直接正向影响较弱，在高原东北部有较少分布。碳汇区降水增加对*NEP*以直接负向影响为主，负向影响区主要分布于HIB1区和HIIA/B1区北部等湿润地区；而降水增加对草地*NEP*的直接正向影响占比31.33%，主要分布在HIIIC1区，该区草地*NEP*随降水增加而显著增加。考虑到降水与气温的耦合作用，降水增加对*NEP*产生的负向效应减少，正向效应增加（图5d），降水增加对草地*NEP*的间接正向影响占降水增加区域的29.23%，间接负向影响占比37.26%，变化主要发生在HIB1区中部以及东部。草地*NEP*随降水减少而增加的区域主要分布在高原南部和中部，直接负效应区域占降水减少区域的82.33%；HIIA/B1区、HIB1区西部及HIIIC2区东部的草地碳汇区、HIC1区西部、HIC2区东部及HIIIC2区西部的草地碳源区*NEP*均随降水减少而增加；直接正效应区域仅在HIC2区的中部有少面积分布。从间接作用看，降水减少在气温相互影响下对*NEP*产生的负效应减少，正效应增加，变化区域主要分布在HIIIC2区和HIC2区的中部。降水对*NEP*综合影响的分布格局与直接影响基本一致（图5f），在高原的中东部、东南以及西南部等温带较湿润地区降水对草地*NEP*以负效应为主，而在高原东北部干旱区降水对草地*NEP*以正效应为主。

整体而言，气温对青藏高原草地*NEP*产生正效应（表3），气候变暖有利于植被的光合作用，草地吸收大量的碳；降水对草地*NEP*产生负效应（表4），过多的阴雨天会削弱太阳辐射，增强土壤呼吸导致草地生态系统向大气释放大量的碳，*NEP*减少，而适当的降水可以增加草地*NEP*的积累。*NEP*与气温的通径系数高于*NEP*与降水的通径系数，表明研究区升温对草地*NEP*的影响略大于降水。气候变化对青藏高原草地碳汇/源的影响存在明显地理差异。青藏高原东北部温带干旱地区草原分布广泛，该区气候暖湿化显著增加了草地碳汇；东部亚寒带干旱地区和亚寒带半湿润地区多分布为高寒草原和灌丛草甸，该区气候暖湿化增加了草地碳汇；在东南部，温带湿润/半湿润地区为灌丛草原，该区气

表3 2001—2019年青藏高原气温对  
草地*NEP*的影响

Table 3 Impact of warming on grassland *NEP* in the QTP from 2001 to 2019

<i>NEP</i> 分类	直接影响	间接影响	综合影响
碳源区	0.21	0.03	0.24
碳汇区	0.28	0.01	0.29
平均	0.25	0.02	0.27

表4 2001—2019年青藏高原降水对  
草地*NEP*的影响

Table 4 Impact of increased precipitation on grassland *NEP* in the QTP from 2001 to 2019

<i>NEP</i> 分类	直接影响	间接影响	综合影响
碳源区	-0.23	-0.01	-0.24
碳汇区	-0.17	0.01	-0.14
平均	-0.18	0	-0.18



候暖干化在一定程度上增强了草地碳汇的固碳能力；西南部温带干旱地区植被以灌丛草原为主，草地 *NEP* 随暖干化趋势减少，碳源加强；西部亚寒带干旱地区气候暖湿化、暖干化趋势均有分布，草地多为高寒草原，*NEP* 有减有增，基本为碳源。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文基于 MODIS NPP 数据和土壤呼吸模型估算了青藏高原草地 *NEP*，采用通径分析方法研究了气候变化对草地碳汇/源的影响。结果表明，青藏高原草地碳源区面积约 47.82 万 km<sup>2</sup>，碳汇区面积约为 72.26 万 km<sup>2</sup>，净碳汇总量 65.35 Tg C a<sup>-1</sup>。草地 *NEP* 呈现由东向西递减的空间分布格局，受地形和水热条件限制，高原温带草地碳汇功能强于亚寒带，湿润半湿润区草地碳汇功能强于半干旱区。近 19 年青藏高原草地 *NEP* 增加趋势显著，碳汇增强、碳源减弱。青藏高原气候变化影响了草地碳汇/源的空间变化，暖湿化趋势在 HIIC1 区、HIB1 区和 HIC1 区有利于草地 *NEP* 的增加，在 HIIC2 区西部则抑制草地 *NEP* 积累；HIIC2 区和 HIIA/B1 区西部气候暖干化趋势导致 *NEP* 减少，而 HIIA/B1 区东部以及 HIC2 区东部和北部气候暖干化趋势则使 *NEP* 增加。

#### 3.2 讨论

*NEP* 和净生态系统碳交换 (Net Ecosystem Exchange, NEE) 在绝对值上相等，本文使用当雄站 (2004—2010 年) 和海北站 (2004—2009 年) 观测的 *NEE* 通量年值数据 (<http://nesdc.org.cn/>) 与 *NEP* 估算结果进行验证 ( $-NEE=NEP$ )。采用站点周围 3×3 像元 *NEP* 的平均值作为估算值，当雄站 *NEP* 估算值和观测值之间的  $R=0.81$ ， $RMSE=9.22$  g C m<sup>-2</sup> (图 6a)；海北站 *NEP* 估算值和观测值之间的  $R=0.05$ ， $RMSE=22.37$  g C m<sup>-2</sup>，*NEP* 估算值与当雄站观测值拟合较好 (图 6b)。本文估算结果与相关文献 (表 5) 结果相比，数值范围较为接近。

21 世纪以来，青藏高原 *NEP* 呈增加趋势<sup>[12,35,55]</sup>，本文结果也表明青藏高原草地碳汇功能有所增强。许多研究表明 *NEP* 变化的空间分布一般与 *NPP* 空间变化同步<sup>[12,20,46,57]</sup>，不论是在年际变化还是在空间分布上，青藏高原草地生态系统的 *NEP* 与 *NPP* 均具有很强的一致性，与 *RH* 相比 ( $R=0.40$ ,  $P>0.05$ )，*NEP* 时空变化与 *NPP* 相关性更强 ( $R=0.97$ ,  $P<0.01$ )。虽然 *NPP* 和 *RH* 均表现为增加趋势，但 2001—2019 年 *NPP* 增长率 (0.85 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) 是 *RH* 增

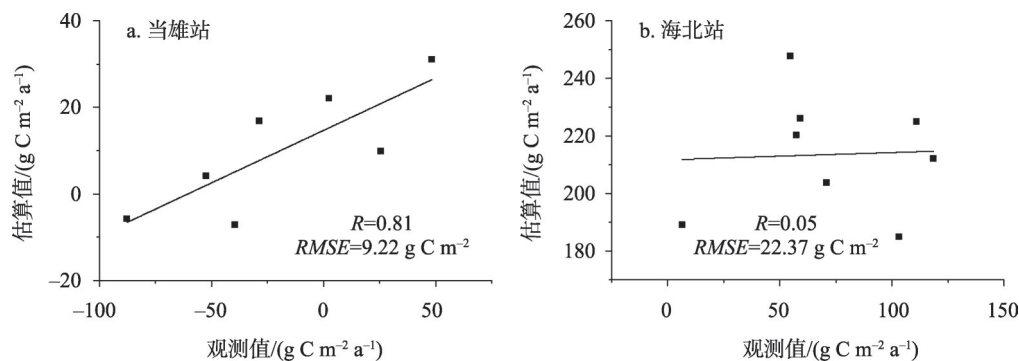


图6 估算 *NEP* 值与通量站点观测数据的比较

Fig. 6 Comparison of the estimated *NEP* with observed data from flux sites

表5 本文估算结果与已发表文献的比较

Table 5 Comparison of the results of our study with the published studies

时间段/年	研究对象	模型方法	NEP年平均值/(g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	参考文献
2001—2019	青藏高原草地	MOD17A3 和土壤呼吸模型	44.78~60.09	本文
2001—2018	兴都库什—喜马拉雅地区草地	CASA 模型和地质统计模型	27~55.90	Guo 等 <sup>[12]</sup>
2001—2015	青藏高原草地	CASA 模型和土壤呼吸模型	90~170.00	周夏飞等 <sup>[55]</sup>
2001—2010	三江源草地	VPM 模型和RE 估算模型	20~82.50	任小丽等 <sup>[56]</sup>
2001—2017	三江源区典型草地群落	BIOME-BGC 模型	49.02	陈雪娇等 <sup>[11]</sup>

长率 (0.22 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) 的 4 倍, 正是 *NPP* 和 *RH* 的非对称增长促成了 *NEP* 的总体增加, 草地碳汇功能增强。

温度控制着植被的光合作用和呼吸过程<sup>[35]</sup>。青藏高原气候寒冷, 气温仍低于植被光合作用的最适温度, 变暖仍有促进高寒草地生长与增强碳汇的空间<sup>[58]</sup>。大范围的升温是 *NEP* 增大的一个关键气候因素<sup>[47]</sup>, You 等<sup>[35]</sup>的研究也表明青藏高原草地 *NEP* 与大部分地区的气温呈正相关关系, 但这与刘凤等<sup>[39]</sup>得出的青藏高原东北部植被 *NEP* 与气温呈负相关关系的结论不同, 可能受研究数据和植被类型的影响, 因此对青藏高原东部植被碳汇与气温的关系还需要进一步研究证实。不同的是, 高原西部和东南部变暖会增加土壤呼吸速率和生理干旱, 降低光合作用速率<sup>[59]</sup>, 从而抑制 *NPP* 和 *NEP*。

青藏高原湿润区降水增加会减少太阳辐射、削弱光合作用<sup>[60]</sup>, 导致 *NEP* 上升趋势减缓, 同时降水可能加速土壤侵蚀, 降低土壤有机质含量, 进而降低土壤生产力<sup>[36]</sup>。因此, 该区降水减少有利于生态系统 *NEP* 积累, Guo 等<sup>[12]</sup>和刘凤等<sup>[39]</sup>对三江源等高原湿润区的研究均得出了相似结论。周夏飞等<sup>[55]</sup>研究表明 *NEP* 与年降水量呈正相关的区域主要分布在青藏高原西南及东北部, 呈负相关的区域主要分布在青藏高原西北部及东南部, 这正说明在干旱区, 降水增加可以缓解草地植被的干旱胁迫、调节植物生理过程, 加强生产力积累, 但降水减少则会加剧植被缺水, 抑制草地固碳。

另外, 本文通径分析结果的决定系数  $R^2=0.52$ , 表明除了气候因子, 陆地生态系统的碳固存还受到其他环境因素影响, 如 CO<sub>2</sub> 浓度、氮沉降和土地利用变化等<sup>[57,61]</sup>, 放牧也会对草地碳固存产生压力<sup>[8,62]</sup>, 对青藏高原草地 *NEP* 影响因素的全面分析有待于进一步研究。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022: 3-32.

[2] 王利宁, 彭天铎, 向征根, 等. 碳中和目标下中国能源转型路径分析. 国际石油经济, 2021, 29(1): 2-8. [WANG L N, PENG T D, XIANG Z J, et al. Analysis of China's energy transition pathways under the goal of carbon neutrality. International Petroleum Economics, 2021, 29(1): 2-8.]

[3] 刘宇, 羊凌玉, 李欣蓓, 等. 碳中和目标实现下中国转型发展路径研究. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2022, 24(4): 27-36. [LIU Y, YANG L Y, LI X B, et al. Research on the pathway for China's transformation and development toward carbon neutrality. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2022, 24(4): 27-36.]

[4] LE QUÉRÉ C, RAUPACH M R, CANADELL J G, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 831-836.

[5] AHLSTRÖM A, RAUPACH M R, SCHURGERS G, et al. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO<sub>2</sub> sink. Science, 2015, 348(6237): 895-899.

[6] KEENAN T F, WILLIAMS C A. The terrestrial carbon sink. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43

- (1): 219-243.
- [7] QIN Z C, DENG X, GRISCOM B, et al. Natural climate solutions for China: The last mile to carbon neutrality. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(6): 889-895.
- [8] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574. [YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China Life Sciences*, 2022, 52(4): 534-574.]
- [9] 唐志鹏, 于浩杰, 陈明星, 等. 基于函数极值条件下的中国碳达峰碳中和情景分析. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1247-1260. [TANG Z P, YU H J, CHEN M X, et al. The scenario analysis of China's carbon emission peak and carbon neutrality based on extremum condition of function. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1247-1260.]
- [10] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 等. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应. *草业学报*, 2016, 25(11): 1-14. [GANG C C, WANG Z Q, YANG Y, et al. The NPP spatiotemporal variation of global grassland ecosystems in response to climate change over the past 100 years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(11): 1-14.]
- [11] 陈雪娇, 周伟, 杨晗. 2001—2017年三江源区典型草地群落碳源/汇模拟及动态变化分析. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1583-1592. [CHEN X J, ZHOU W, YANG H. Simulation and dynamic change of carbon source/sink in the typical grassland communities in the Three River Source Area from 2001 to 2017. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1583-1592.]
- [12] GUO D, SONG X N, HU R H, et al. Large-scale analysis of the spatiotemporal changes of net ecosystem production in Hindu Kush Himalayan Region. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1180-1195.
- [13] 汪涛, 王晓昶, 刘丹, 等. 青藏高原碳汇现状及其未来趋势. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(7): 1506-1516. [WANG T, WANG X Y, LIU D, et al. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(7): 1506-1516.]
- [14] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 69-74. [ZHANG M, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Spatial distribution and changing trends of net ecosystem productivity in China. *Geography and Geo-information Science*, 2020, 36(2): 69-74.]
- [15] 徐冠华, 刘琦岩, 罗晖, 等. 后疫情时代全球气候变化的应对与抉择. *遥感学报*, 2021, 25(5): 1037-1042. [XU G H, LIU Q Y, LUO H, et al. Responses and choices of global climate change in the post-epidemic era. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(5): 1037-1042.]
- [16] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 414-419. [FANG J Y, KE J H, TANG Z Y, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 414-419.]
- [17] CUI E Q, BIAN C Y, LUO Y Q, et al. Spatial variations in terrestrial net ecosystem productivity and its local indicators. *Biogeosciences*, 2020, 17(23): 6237-6246.
- [18] 胡波, 孙睿, 陈永俊, 等. 遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2061-2071. [HU B, SUN R, CHEN Y J, et al. Estimation of the net ecosystem productivity in Huang-Huai Hai Region combining with Biome-BGC model and remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2061-2071.]
- [19] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系. *地理学报*, 2016, 71(1): 21-34. [DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 21-34.]
- [20] ZHANG J J, HAO X M, HAO H C, et al. Climate change decreased net ecosystem productivity in the arid region of Central Asia. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4449, Doi: 10.3390/rs13214449.
- [21] 常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(5): 517-521. [CHANG S L, YANG H X, GE J P. Advance and questions in net ecosystem production. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2005, 41(5): 517-521.]
- [22] FU Z, STOY P C, LUO Y Q, et al. Climate controls over the net carbon uptake period and amplitude of net ecosystem production in temperate and boreal ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 9-18.
- [23] CHUAI X W, QI X X, ZHANG X Y, et al. Land degradation monitoring using terrestrial ecosystem carbon sinks/sources and their response to climate change in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3489-3502.
- [24] ZHOU W, HUANG L, YANG H, et al. Interannual variation in grassland net ecosystem productivity and its coupling relation to climatic factors in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(3): 1583-1597.

- [25] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658. [ZHAO N, ZHOU L, ZHUANG J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7648-7658.]
- [26] 杨延征, 马元丹, 江洪, 等. 基于IBIS模型的1960—2006年中国陆地生态系统碳收支格局研究. 生态学报, 2016, 36(13): 3911-3922. [YANG Y Z, MA Y D, JIANG H, et al. Evaluating the carbon budget pattern of Chinese terrestrial ecosystem from 1960 to 2006 using Integrated Biosphere Simulator. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3911-3922.]
- [27] HE H L, WANG S Q, ZHANG L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [28] 黄磊, 贾根锁, 房世波, 等. 地球大数据支撑联合国可持续发展目标: 气候变化与应对. 中国科学院院刊, 2021, 36(8): 923-931. [HUANG L, JIA G S, FANG S B, et al. Big earth data for UN sustainable development goals: Climate change and action. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(8): 923-931.]
- [29] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855. [PIAO S L, ZHANG X Z, WANG T, et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2842-2855.]
- [30] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511-2527. [CHEN S T, GUO B, YANG F, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2511-2527.]
- [31] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035. [CHEN D L, XU B Q, YAO T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3025-3035.]
- [32] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381. [DUAN A M, XIAO Z X, WU G X. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 374-381.]
- [33] DU Q J, YI G H, ZHOU X B, et al. Analysis of asymmetry in diurnal warming and its impact on vegetation phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau using MODIS remote sensing data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 15(2): 28502, Doi:10.1117/1.JRS.15.028502.
- [34] 袁巧丽, 杨建. 青藏高原草地植被物候变化及其对气候变化的响应. 中国草地学报, 2021, 43(9): 32-43. [YUAN Q L, YANG J. Phenological changes of grassland vegetation and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(9): 32-43.]
- [35] YOU Y F, WANG S Y, PAN N Q, et al. Growth stage-dependent responses of carbon fixation process of alpine grasslands to climate change over the Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291: 108085, Doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108085.
- [36] GAO Y H, ZHOU X, WANG Q, et al. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001-2008 in the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 356-362.
- [37] 张懿锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211. [ZHANG Y L, QI W, ZHOU C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1197-1211.]
- [38] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2000—2014年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应. 干旱区地理, 2020, 43(3): 592-601. [XU J, CHEN H L, SHANG S S, et al. Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on CEVSA model. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 592-601.]
- [39] 刘凤, 曾永年. 2000—2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5792-5803. [LIU F, ZENG Y N. Analysis of the spatio-temporal variation of vegetation carbon source/sink in Qinghai Plateau from 2000-2015. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5792-5803.]
- [40] 张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8. [ZHANG Y L, LI B Y, ZHENG D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [41] 张懿锂, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围. 地理研究, 2021, 40(6): 1543-1553. [ZHANG Y L, LI B Y, LIU L S, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1543-1553.]
- [42] SUN H Z, CHEN Y B, XIONG J N, et al. Relationships between climate change, phenology, edaphic factors, and net



- primary productivity across the Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 107: 102708, Doi: 10.1016/j.jag.2022.102708.
- [43] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 等. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. *地理学报*, 2016, 71(9): 1596-1612. [SUN Q L, LI B L, LI F, et al. Review on the estimation of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwater Region, China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1596-1612.]
- [44] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095. [WANG Q, ZHANG T B, YI G H, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan Mountain Area from 2004 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3084-3095.]
- [45] NEUMANN M, ZHAO M S, KINDERMANN G, et al. Comparing MODIS net primary production estimates with terrestrial national forest inventory data in Austria. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 3878-3906.
- [46] LI Z, CHEN Y N, ZHANG Q F, et al. Spatial patterns of vegetation carbon sinks and sources under water constraint in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125355, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125355.
- [47] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 等. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2878-2890. [MAO Y, JIANG Y J, ZHANG C Y, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in Southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2878-2890.]
- [48] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110. [PEI Z Y, ZHOU C P, OUYANG H, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 102-110.]
- [49] 杨正兰, 张廷斌, 易桂花, 等. 气候变化背景下横断山区植被叶面积指数时空变化特征分析. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(11): 2670-2681. [YANG Z L, ZHANG T B, YI G H, et al. Spatio-temporal variation of vegetation LAI in Hengduan Mountains under the background of climate change. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11): 2670-2681.]
- [50] 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 等. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应. *地理研究*, 2020, 39(1): 152-165. [XIE S D, MO X G, HU S, et al. Responses of vegetation greenness to temperature and precipitation in the Three-North Shelter Forest Program. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 152-165.]
- [51] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1361-1372. [YANG D, YI G H, ZHANG T B, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1361-1372.]
- [52] 赵晓涵, 张方敏, 韩典辰, 等. 内蒙古半干旱区蒸散特征及归因分析. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1614-1623. [ZHAO X H, ZHANG F M, HAN D C, et al. Evapotranspiration changes and its attribution in semi-arid regions of Inner Mongolia. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1614-1623.]
- [53] YU G R, ZHU X J, FU Y L, et al. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798-810.
- [54] WANG M M, ZHAO J, WANG S Q, et al. Detection and attribution of positive net ecosystem productivity extremes in China's terrestrial ecosystems during 2000-2016. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108323, Doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108323.
- [55] 周夏飞, 於方, 曹国志, 等. 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 76-81. [ZHOU X F, YU F, CAO G Z, et al. Spatiotemporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Qinghai-Tibet Plateau grassland ecosystem during 2001-2015. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 76-81.]
- [56] 任小丽, 何洪林, 张黎, 等. 2001—2010 年三江源区草地净生态系统生产力估算. *环境科学研究*, 2017, 30(1): 51-58. [REN X L, HE H L, ZHANG L, et al. Net ecosystem production of alpine grasslands in the Three-River Headwaters Region during 2001-2010. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(1): 51-58.]
- [57] PIAO S L, CIAIS P, LOMAS M, et al. Contribution of climate change and rising CO<sub>2</sub> to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(3-4): 133-142.
- [58] 汪涛, 朴世龙. 青藏高原陆地生态系统碳汇估算: 进展、挑战与展望. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 313-323. [WANG T, PIAO S L. Estimate of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau: Progresses, challenges and perspectives. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 313-323.]

- [59] TENG M J, ZENG L X, HU W J, et al. The impacts of climate changes and human activities on net primary productivity vary across an ecotone zone in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136691, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136691.
- [60] LIU Y, ZHOU Y, JU W, et al. Impacts of droughts on carbon sequestration by China's terrestrial ecosystems from 2000 to 2011. *Biogeosciences*, 2014, 11(10): 2583-2599.
- [61] ZHANG L, REN X L, WANG J B, et al. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: Regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 14003, Doi: 10.1088/1748-9326/aacc95.
- [62] BAI Y F, COTRUFO M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603-608.

## Impacts of climate change on grassland carbon sink/source patterns in the Qinghai-Tibet Plateau

GENG Ya-xin<sup>1</sup>, YI Gui-hua<sup>1</sup>, ZHANG Ting-bin<sup>2,3</sup>, BIE Xiao-juan<sup>1</sup>,  
LI Jing-ji<sup>3,4</sup>, WANG Guo-yan<sup>1</sup>, LIN Meng-nan<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Earth and Planet Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation  
for Soil & Water Pollution, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Grassland carbon sink/source is an important part of carbon budget and carbon balance in vegetation ecosystem. Distinguishing the response of carbon sink and carbon source to climate change can provide a scientific basis for reducing sources and increasing sinks. Based on MODIS NPP data and the soil respiration model, we quantified the spatial and temporal variability of Net Ecosystem Productivity (NEP) and carbon sink/source patterns in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) grassland ecosystem from 2001 to 2019, and analyzed the impact of climate change on grassland carbon sink/source using path analysis. The results show that the *NEP* in the grassland of the QTP presents a distribution pattern of higher in the east and lower in the west, with the average annual *NEP* of  $54.41 \text{ g C m}^{-2}$ . Most of the grassland area in the QTP has functioned as a carbon sink since 2001. The areas of carbon sink are about  $72.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ , with an average carbon sequestration of  $79.61 \text{ Tg C a}^{-1}$ . The carbon source areas are about  $47.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ , with an average carbon release of  $14.26 \text{ Tg C a}^{-1}$ . Over the past 19 years, the trend of *NEP* in grassland of the QTP has been increasing. The trend of warming and humidification in the QTP was conducive to the increase of grassland *NEP* and the enhancement of carbon sinks. However, the effects of warming and drying trends on *NEP* varied greatly in different eco-geographical region systems.

**Keywords:** NEP; carbon sink/source; climate change; path analysis; Qinghai-Tibet Plateau