

DOI: 10.20103/j.stxb.202401160140

张盈盈, 刘旻霞, 潘竟虎, 陈雪娇, 陈友艳, 张鑫. 甘南高寒草甸碳收支时空格局及动态模拟. 生态学报, 2024, 44(13): 5542-5553.

Zhang Y Y, Liu M X, Pan J H, Chen X J, Chen Y Y, Zhang X. Spatial and temporal characteristics of the alpine meadow carbon budget in Gannan, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5542-5553.

## 甘南高寒草甸碳收支时空格局及动态模拟

张盈盈, 刘旻霞\*, 潘竟虎, 陈雪娇, 陈友艳, 张鑫

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:** 草甸生态系统具有强大的碳汇功能, 在全球碳循环过程中发挥着重要作用。区域尺度草甸生态系统碳通量的精准模拟, 可以为揭示草地碳循环对全球变化的反馈机制提供理论依据。生态过程模型则是分析和预测区域碳平衡的重要途径。以甘南州高寒草甸生态系统为研究对象, 利用参数优化后的 Biome-BGC 模型, 模拟 1979—2018 年高寒草甸总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 和净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP), 以表征该区域碳收支的时空分布特征。以上述 40 年实测气象数据为基准, 并结合第六次国际耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6, CMIP6) 中的 3 种共享社会经济路径 (Shared Socio-economic Pathways, SSPs) 情景, 对甘南州 2019—2100 年高寒草甸碳收支进行情景模拟。结果表明: (1) 参数优化后的 Biome-BGC 模型能较好的模拟甘南州高寒草甸 GPP 和 NEP, 且 GPP 模拟对比 NEP 的模拟效果更好; (2) 甘南州高寒草甸在整个研究阶段表现为碳汇, 过去 40 年 GPP、NEP 波动范围为  $600\text{--}1100\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $150\text{--}300\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ , GPP 显著上升, NEP 呈波动性上升趋势。未来暖湿化情景下, 高寒草甸碳收支年际波动较大, NEP 呈先上升再下降趋势, 2060 年前后出现极小值, 年均增幅约为  $2.02\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ , 气温、降水和大气  $\text{CO}_2$  浓度升高共同影响该地碳收支格局; (3) 季节尺度上表现为冬春季节为碳源、夏秋季节为碳汇, 植被生长季固碳作用增强。年内 GPP、NEP 呈倒“U”型变化趋势, 峰值均出现在 7、8 月, 低温以及持续增温对碳汇具有抑制作用, 生长季降水量与植被生产力呈正相关; (4) 碳汇/碳源的空间分布随时间而变化, 具有明显的地域差异性, 总体上碳汇增长率由西南向东北递减。

**关键词:** 高寒草甸; 碳收支; 时空格局; Biome-BGC 模型; 参数优化

## Spatial and temporal characteristics of the alpine meadow carbon budget in Gannan, China

ZHANG Yingying, LIU Minxia\*, PAN Jinghu, CHEN Xuejiao, CHEN Youyan, ZHANG Xin

College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Meadow ecosystems serve as significant carbon sinks, playing a crucial role in the global carbon cycle. Precise simulation of carbon fluxes in regional-scale meadow ecosystems can provide a theoretical basis for understanding the feedback mechanisms of meadow carbon cycling to global changes. Ecological process models are essential for analyzing and predicting regional carbon balance budget. This study focused on the alpine meadow ecosystem in Gannan Prefecture and utilized the parameter-optimized Biome-BGC model to simulate the gross primary productivity (GPP) and net ecosystem productivity (NEP) from 1979 to 2018, characterizing the spatiotemporal distribution characteristics of carbon budget in this region. With the benchmark of 40 years of observed meteorological data and considering three Shared Socio-economic Pathways (SSPs) from the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6), scenario simulations of meadow carbon balance budget in Gannan Prefecture from 2019 to 2100 were conducted. The results indicated that: the parameter-

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31760135); 甘肃省自然科学基金项目 (20JR10RA089); 甘肃省林业和草原科技创新与国际合作项目 (KJCX2021005); 甘肃省高校产业支撑计划项目 (2023CYZC-21)

收稿日期: 2024-01-16; 采用日期: 2024-04-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaminl@163.com

optimized Biome-BGC model performed well in simulating GPP and NEP of alpine grasslands in Gannan Prefecture, with a better performance in GPP simulation compared to NEP; (2) Alpine meadows in Gannan Prefecture behaved as a carbon sink throughout the study period, with GPP and NEP fluctuating between  $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $1100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , and between  $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , respectively. GPP showed a significant increase, while NEP exhibited a fluctuating upward trend. Under future warmer and wetter scenarios, the carbon balance of alpine grasslands fluctuates greatly annually, with a trajectory that is first rising and then downward, with a very tiny NEP around 2060, and an average yearly increase of roughly  $2.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , the carbon balance influenced jointly by temperature, precipitation and atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration in this region; (3) At the seasonal scale, the winter and spring seasons act as carbon sources, while the summer and autumn seasons act as carbon sinks, with carbon sequestration during the vegetation growth season enhanced. both GPP and NEP exhibit a reverse “U”-shaped trend throughout the year, with July and August serving as the peaks., low temperatures and ongoing warming have an inhibitory effect on carbon sequestration, while the amount of precipitation during the growing season is positively correlated with vegetation productivity; (4) Significant regional variations may be seen in the spatial distribution of carbon sinks and sources throughout time, with the development rate of carbon sinks generally decreasing from the southwest to the northeast.

**Key Words:** alpine meadow; carbon budget; spatial and temporal pattern; Biome-BGC model; parameter optimization

陆地生态系统碳循环指生态系统与外界进行以  $\text{CO}_2$  为主的碳交换过程,是地球上最大的物质和能量循环系统之一<sup>[1]</sup>。碳汇大小是生态系统碳循环作用的结果,全球碳计划最新研究结果表明,陆地生态系统每年固定碳约为  $(3.8 \pm 0.8) \text{ Gt}$ <sup>[2]</sup>。气候变暖背景下,人类活动对陆地生态系统植被结构以及群落组成造成巨大影响,全球植被总体呈现绿化趋势,此反馈在高寒生态系统尤其突出<sup>[3-4]</sup>。高寒草甸是该区域的主要植被类型之一,对气候变化高度敏感<sup>[5]</sup>。准确模拟高寒草甸生态系统关键碳通量并预测其对不同气候变化情景的响应规律,对理解未来生态系统结构和功能的变化具有重要意义<sup>[6-8]</sup>。

生态系统总初级生产力 (Gross primary productivity, GPP) 指绿色植物通过光合作用单位时间内在单位面积上所固定的  $\text{CO}_2$  总量,是陆地生态系统碳通量的最大组成部分<sup>[9]</sup>;净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 是指示陆地生态系统碳收支的重要指标,用以说明区域碳汇/碳源的分配情况<sup>[10]</sup>。模型模拟陆地生态系统碳循环过程是大尺度范围碳通量计算的工具体<sup>[11]</sup>。现有的生态系统碳循环模型主要有统计模型、光能利用率模型、以及生态系统过程模型<sup>[12]</sup>。Biome-BGC 模型作为一种典型的生理生态过程模型,模型综合程度高、机理性强,且源代码公开<sup>[13]</sup>,因此被广泛用于模拟和计算陆地生态系统的碳、水和营养物质循环流动的过程<sup>[14-15]</sup>。目前多位学者对模型模拟青藏高原高寒草甸碳通量与气候变化的关系进行了探索,Zheng 等<sup>[16]</sup>通过确定草地新生长期的开始和凋落期的结束代替先前春季返青期和秋季反褐期的中点,从而矫正模型物候模块,解释降水和气温对草地 NEP 的促进作用;Sun 等<sup>[17]</sup>验证了水分和养分对植被生长和生产力的限制,说明生长季节水分胁迫的增加和土壤氮有效性的降低会导致植被 GPP 的降低。以上研究为我们理解高寒草甸生态系统及其碳通量如何响应全球气候变化提供了重要的理论基础,但关于长期增温和降水改变的响应机制尚不清楚。

黄河源于青海,却成河于甘南。作为“黄河首曲”,甘南高寒草甸表现出重要的生态屏障功能<sup>[18]</sup>。同时,特殊的地理位置以及复杂的人为因素共同导致其生态环境较为脆弱。高寒草甸作为我国草地生态系统中密度最大的草地类型,具有研究草地碳平衡与气候变化关系的代表性。随着“环境革命”的持续推进,甘南高寒草甸的碳汇潜力被不断放大,定量评估草地碳汇对区域碳收支平衡具有重要意义。尽管李传华等<sup>[19]</sup>运用参数本地化后的模型模拟了青藏高原五道梁地区净初级生产力及其未来趋势,但在青藏高原东北部,关于未来气候情景模式下区域尺度 GPP、NEP 年际与年内趋势特征尚不清楚,这在很大程度上限制了我们对高寒草甸

碳源/碳汇对气候变化的响应以及如何提高草地碳汇潜力的理解。鉴于此,本文以甘南州高寒草甸为研究对象,基于参数优化的 Biome-BGC 模型,利用野外实测数据以及涡度相关数据,拟探究甘南州高寒草甸过去 40 年以及模拟未来碳通量变化趋势,以期为该区域草地生物多样性保护、固碳释氧及生态系统多功能维护提供理论支撑,为促进黄河流域生态保护和高质量发展及“双碳”背景下的碳中和目标提供可行路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

甘南藏族自治州,地处甘肃省西南部(33°06'N—36°10'N, 100°46'E—104°44'E),青藏高原东北一隅,三大自然区交汇之处。地势由西北向东南递减,平均海拔 3000 m 以上。全州分为 3 个自然类型区,南部的岷迭山区,东部的丘陵山地,以及西北部广阔的草甸草原。境内为典型的高原大陆性气候,冬冷夏凉,冬短夏长。光照充足,全年日照时间在 1800—2600 h 之间;年均降水量为 400—800 mm,主要集中在 5—10 月份;温度变化较大,年均温在 2℃ 左右。研究区内植被类型属于典型的高寒草甸,主要优势种为莎草科的矮生嵩草 (*Kobresia humilis*) 和禾本科的垂穗披碱草 (*Clinelymus nutans*) 等,土壤属于高寒草甸土。为探究甘南高寒草甸的时空变化趋势以及适应模型的需要,本文基于获取输入数据的分辨率考虑,将甘南州全域划分为 361 个大小为 10 km (分辨率约为 0.1°) 的栅格单元,其中高寒草甸分布区为 94 个格点(图 1),采用 Biome-BGC 模型逐单元进行模拟。

### 1.2 数据来源与处理

数据准备共包括气象数据、初始化文件数据以及植被生理生态参数文件 3 部分,具体数据来源如表 1。(1) 其中气象数据存储为 NetCDF 格式,根据模型驱动的需要,使用 Python 编程软件,提取每个格点的最高温、最低温以及降水量的日尺度数据,并转化为适应模型的驱动的 ASCII 文件,其中,太阳辐射量和日长等数据根据山地小气候模型 (Mountain Microclimate Simulation Model, MTCLIM) 计算得出。(2) 所需的初始化文件数据包括站点信息、土壤质地信息以及历年大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据等,因 CO<sub>2</sub> 年内波动区间较小,故本研究时间尺度上主要关注其年际变化;在空间格局上,其差异并不显著,故不纳入考虑范畴。综上,将甘南州 CO<sub>2</sub> 浓度进行统一量值,年内变化部分不予考虑。(3) 植被生理参数是模型中对草甸植被的生态生理特性描述的数据,共 43 个,本文中分别对物质能量循环、水分循环和碳氮循环有较大影响的三项参数<sup>[23–25]</sup>进行测定,实测参数为叶片碳氮比、凋落后碳氮比、以及细根碳氮比。具体于 2020 年 7 月在合作站点以及玛曲站点实地采集的生物量样本,分别采用重铬酸钾法和微量凯氏定氮法<sup>[26]</sup>测定植物的碳、氮含量。部分参数参考文献资料<sup>[17]</sup>,并基于玛曲观测站 2012 年实测涡度相关数据<sup>[27]</sup>,对剩余模型默认值进行优化。

### 1.3 Biome-BGC 模型

Biome-BGC 作为一种基于过程的生物地球化学模型,被广泛用于模拟陆地生态系统从单一站点到区域乃至全球范围的碳、氮和水循环<sup>[28]</sup>。本文运用模型中 Farquhar 在 1980 年提出的适用于 C3 植物叶片的光合作用程序 (photosynthesis routine)<sup>[29]</sup> 和酶动力学模型 (the enzyme kinetics model)<sup>[30]</sup> 估算 GPP。GPP、NEP 计算如下:

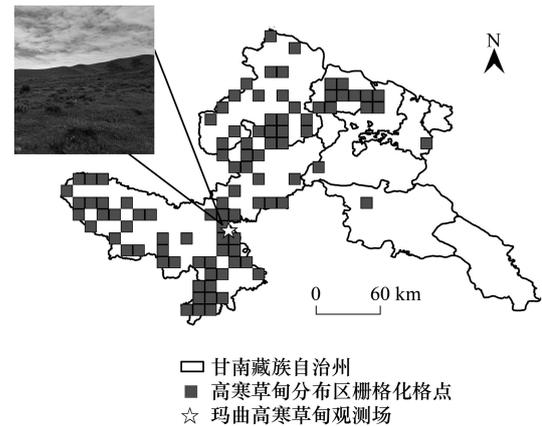


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

表 1 模型运行相关数据

Table 1 Data related to model runs

数据 Data	时间 Time	分辨率 Resolution	来源 Source
行政边界 Administrative boundaries	2020	—	—
日最高温 & 日最低温 & 日降水量 Daily maximum temperature & minimum temperature & precipitation	1979—2018	10000m	国家青藏高原科学数据中心 <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> 中国区域地面要素驱动数据集 (CMFD) <sup>[20]</sup> <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/</a>
经度 & 纬度 & 海拔 Longitude & Latitude & Elevation	—	90m	地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
土壤质地 Soil texture	—	1000m	世界土壤数据库 (HWSDV2.0) <a href="https://gaez.fao.org/pages/hwsd">https://gaez.fao.org/pages/hwsd</a>
二氧化碳浓度 Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )	1979—2018	—	美国夏威夷莫纳罗亚天文台 (Mauna Loa Observatory) <a href="http://co2.now.org">http://co2.now.org</a> 全球年平均浓度观测数据集 <a href="http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo">http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo</a>
草甸生态系统分布数据 Meadow ecosystem distribution data	—	1000m	中国生态系统评估与生态安全格局数据库 <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn">http://www.ecosystem.csdb.cn</a>
涡度相关数据 Eddy related data	2014—2015	—	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> 若尔盖高寒湿地生态系统研究站玛曲观测场涡动 相关数据 <sup>[21]</sup>
未来气候情景模拟 Simulation of future climate scenarios	—	—	CMIP6 典型浓度路径 <a href="https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/">https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/</a> 情景模式比较计划
CMIP6 气候模式下未来气温变化数据 Data on future temperature changes under CMIP6	—	—	孟雅丽等 <sup>[22]</sup>

CMIP6: 第六次国际耦合模式比较计划 Coupled Model Intercomparison Project phase 6

$$GPP = A_m \times f_c \times (CO_2) \times f_t(t) \times f_w(w) \times f_n \quad (1)$$

式中,  $A_m$  为无环境因子胁迫和固定大气 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, 冠层绿叶的总光合速率;  $f_c, f_t, f_w, f_n$  分别为大气 CO<sub>2</sub> 浓度、气温、土壤湿度和土壤养分相关胁迫因子。

$$NEP = GPP - Re \quad (2)$$

式中,  $Re$  为生态系统总呼吸, 为自养呼吸与异养呼吸之和,  $GPP$  为总初级生产力,  $NEP$  为净生态系统生产力。

#### 1.4 PEST 模型参数优化

PEST (Parameter ESTimation) (<http://www.pesthomepage.org/>) 作为一种独立的非参数模型, 通过获取模型模拟值与实际观测值之间的差异函数, 再基于 Gauss-Marquardt-Levenberg 算法对目标函数求最小值来实现参数优化计算<sup>[31]</sup>。本研究基于若尔盖高寒湿地研究站玛曲观测场<sup>[24]</sup> (33.89N, 102.16E) 2012 年涡动相关数据, 除去植被类型参数及固定比例参数, 从驱动 Biome-BGC 模型的 43 个生理生态参数中识别 15 个待优化参数, 根据 White<sup>[29]</sup> 等提出的模型参数平均值的置信区间, 将待优化参数取值范围定为  $(x - \Delta x, x + \Delta x)$ , 其中  $x$  为参数基准值,  $\Delta = 0.2x$ 。最终生成基于 GPP 和 NEP 的两套优化参数值 (表 2)。

#### 1.5 情景模拟设计

第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6), 包含了 23 个来自世界各国专家自行组织和设计的模式比较子计划 (CMIP6-endorsed MIPs), 情景模式比较计划 (Scenario MIP) 作为 CMIP6 最重要的子计划之一<sup>[32]</sup>, 延续了 CMIP5 的典型浓度路径 (Representative Concentration Path, RCP) 情景。相较于其它气候模式, 其考虑的过程更为复杂, 包含碳氧循环的地球系统模式居多, 有效提高了在青藏高原气候变化预测的准确性<sup>[33]</sup>。本文

选择低排放情景 (SSP126)、中等排放情景 (SSP245)、高排放情景 (SSP585) 三类<sup>[34]</sup>, 将 2019—2100 年划分为 21 世纪初期、中期、末期三个时段进行模拟 (表 3)。其中气温数据来源于孟雅丽等人<sup>[27]</sup>在关于青藏高原 21 世纪气温变化的研究, CO<sub>2</sub> 浓度数据来源于 IPCC 的预测排放情景。

表 2 高寒草甸部分生理生态参数优化结果

Table 2 Optimization results of some physiological and ecological parameters in alpine meadows

参数 Parameters	初始值 Initial value	取值范围 Range of values	单位 Units	基于 GPP 的 优化值 Optimized values based on GPP	基于 NEP 的 优化值 Optimized values based on NEP
年全株死亡率 Annual whole-plant mortality fraction	0.1	(0.08, 0.12)	1/a	0.098	0.096
当前生长比例 Current growth proportion	0.5	(0.4, 0.6)	—	0.505	0.513
冠层水分截留系数 Canopy water interception coefficient	0.021	(0.0168, 0.0252)	—	0.0168	0.0188
冠层比叶面积 Canopy average specific leaf area (projected area basis)	45	(36, 54)	m <sup>2</sup> /kgC	43.418	42.213
阳生叶与阴生叶比叶面积比例 Ratio of shaded SLA; sunlit SLA	2	(1.6, 2.4)	—	2.4	2.4
Rubisco 酶活叶氮量 Fraction of leaf N in Rubisco	0.15	(0.12, 0.18)	—	0.1501	0.1498
角质层导度 Cuticular conductance (projected area basis)	0.00001	(0.000008, 0.000012)	m/s	0.000008	0.000012
气孔导度打开时叶片水势 Leaf water potential; start of conductance reduction	-0.6	(-0.72, -0.48)	MPa	-0.48	-0.72
气孔导度关闭时叶片水势 Leaf water potential; complete conductance reduction	-2.3	(-2.76, -1.84)	MPa	-2.76	-2.76
气孔导度开始缩小时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; start of conductance reduction	930	(744, 1116)	Pa	933.877	903.228

GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity; NEP: 净生态系统生产力 Net ecosystem productivity

表 3 未来情景模拟

Table 3 Future scenario modeling

共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways	年份 Year	温度变化 T/°C Temperature change	降水变化 P/% Precipitation change	CO <sub>2</sub> 浓度/(μ mol/mol) CO <sub>2</sub> concentration
SSP126	2019—2040	0.07—0.11	0—4	540
	2041—2070	1.09—1.54	4—6	510
	2071—2100	1.17—1.66	4—8	490
SSP245	2019—2040	0.24—0.32	0—2	560
	2041—2070	1.33—1.93	4—8	650
	2071—2100	2.12—2.96	4—8	660
SSP585	2019—2040	0.55—0.75	0—4	640
	2041—2070	1.75—2.58	6—10	960
	2071—2100	4.19—5.94	15—20	1370

## 1.6 未来趋势分析

采用 Theil-Sen 中值趋势分析方法<sup>[35]</sup>对甘南州高寒草甸 NEP 逐格点进行时间变化趋势分析, 并通过

Mann-Kendall 法<sup>[36]</sup>进行显著性检验。当斜率  $S$  大于 0, 该序列呈上升趋势,  $S$  小于 0 时则呈下降趋势; 当标准值  $Z$  的绝对值大于等于 1.65、1.96 和 2.58 时则说明该时间序列分别通过了置信水平 90%、95% 和 99% 的显著性检验。本文将 NEP 变化趋势分为 5 类: 不显著减少 ( $S < 0, P > 0.1$ ), 不显著增加 ( $S > 0, P > 0.1$ ), 微显著增加 ( $S > 0, 0.05 < P < 0.1$ ), 显著增加 ( $S > 0, 0.01 < P < 0.05$ ), 极显著增加 ( $S > 0, P < 0.01$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型精度验证

运用参数优化后的 Biome-BGC 模型, 得到 1979—2018 年甘南高寒草甸 GPP、NEP 的日尺度数据。将模拟结果与若尔盖高寒湿地研究站玛曲观测场 2013—2015 年逐日涡动相关数据<sup>[24]</sup>进行相关性分析及显著性检验, 采用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 以及平均绝对误差 (MAE) 对模拟结果精度评价。结果表明 (图 2), 经参数优化后的 Biome-BGC 模型能在一定程度上校正 GPP 和 NEP 的高值区低估以及低值区高估的偏离现象, 从而使模拟值与实测值之间的线性拟合斜率更接近于 1:1 线。参数优化后 GPP 的  $R^2$  为 0.79, RMSE 为 0.64; NEP 的  $R^2$  为 0.73, RMSE 为 1.35, 且 MAE 有明显下降。由此可见, 参数优化后模型模拟结果精度和可信度较高, 且 GPP 对比 NEP 模拟效果更好。

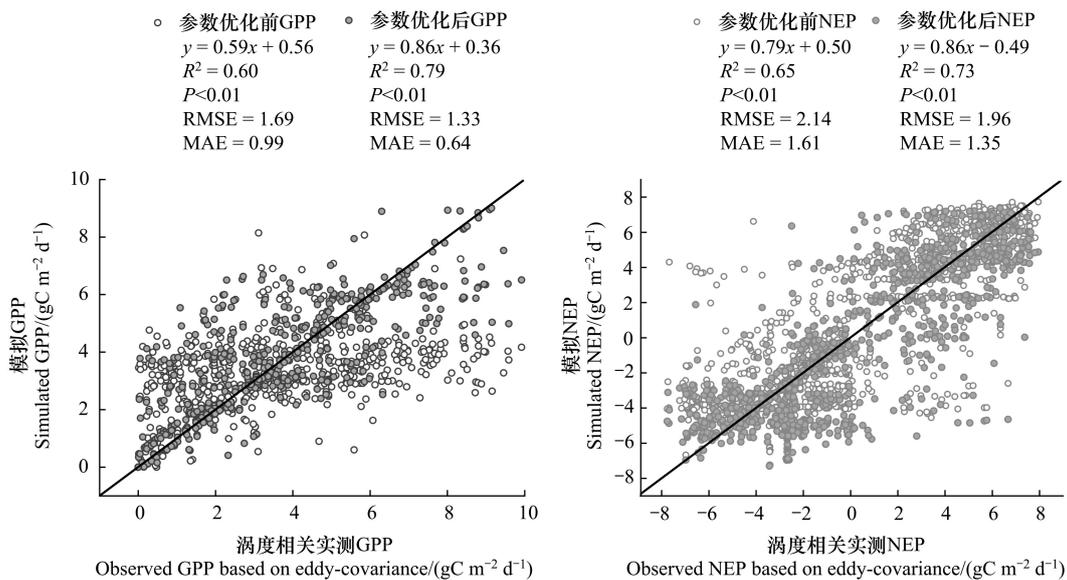


图 2 2013—2015 年参数优化前后 Biome-BGC 模型模拟的日 GPP、NEP 与站点实测值对比

Fig. 2 Daily GPP, NEP simulated by Biome-BGC model before and after parameter optimization compared to measured values at the site, 2013—2015

GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity; NEP: 净生态系统生产力 Net ecosystem productivity; SSP: 共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways; 图中数值为平均值  $\pm$  标准误差, 阴影部分表示 95% 置信水平的置信区间

### 2.2 甘南高寒草甸 GPP、NEP 时间变化趋势

#### 2.2.1 甘南高寒草甸 GPP、NEP 1979—2100 年年际变化趋势

如图 3 所示, 为研究甘南高寒草甸过去 40 年以及至 2100 年碳收支的时间变化趋势, 本文将 1979—2100 年划分为 4 个研究阶段。历史模拟阶段内, 甘南州高寒草甸年均 GPP 在 1979—2018 年区间内整体呈现增长趋势, 年均总量介于  $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (1986 年) 和  $900 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (2010 年) 之间, 多年平均值为  $677.61 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。将 2020 年到 2100 年划分为 21 世纪初期、中期、末期三个阶段, GPP 年均值在低排放情景 (SSP126)、中等排放情景 (SSP245)、高排放情景 (SSP585) 均呈现波动性增长趋势。相较于 GPP, 甘南州年均 NEP 在 1979—2018 年间波动幅度较大, 年均 NEP 介于  $150 \text{ g C/m}^2$  到  $300 \text{ g C/m}^2$  之间, 2019 年到 2100 年间

三种情景模式下 NEP 均呈现出先增加再减少的趋势,且三种模式下变化趋势趋于一致,但波动范围大,在 2040—2060 年间存在显著下跌。SSP126 模式下三个阶段平均值分别为  $295.52 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $255.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $297.82 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ;SSP245 模式下三个阶段平均值为  $325.41 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $306.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $331.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ;SSP585 模式下三个阶段平均值为  $352.48 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $339.94 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $355.73 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

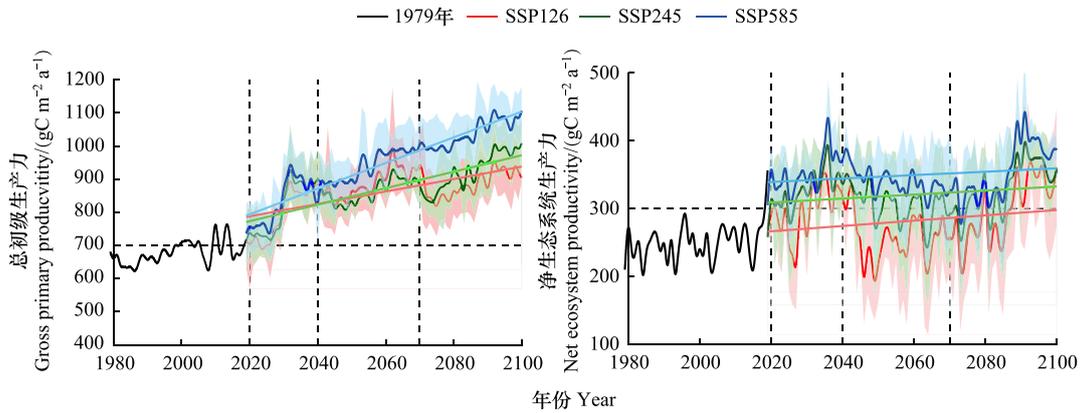


图 3 甘南高寒草甸 1979—2100 年 GPP、NEP 年均变化趋势

Fig.3 Trends in annual average changes of GPP and NEP in alpine meadows of Gannan from 1979 to 2100

SSP:共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways;图中数值为平均值±标准误差,阴影部分表示 95%置信水平的置信区间

### 2.2.2 甘南高寒草甸 GPP、NEP 平均年内变化趋势

为探究不同阶段甘南州高寒草甸年内碳收支变化趋势,本文分别计算了 1979—2018 年、2019—2100 年甘南州高寒草甸 94 个栅格点月平均 GPP、NEP。如图 4 所示,历史时期 GPP、NEP 变化分别与气温表现出一定正向相关性,趋势为“单峰”模式,GPP 较 NEP 走势更陡,变化趋势更为明显。4—10 月 GPP 为正值,7 月份

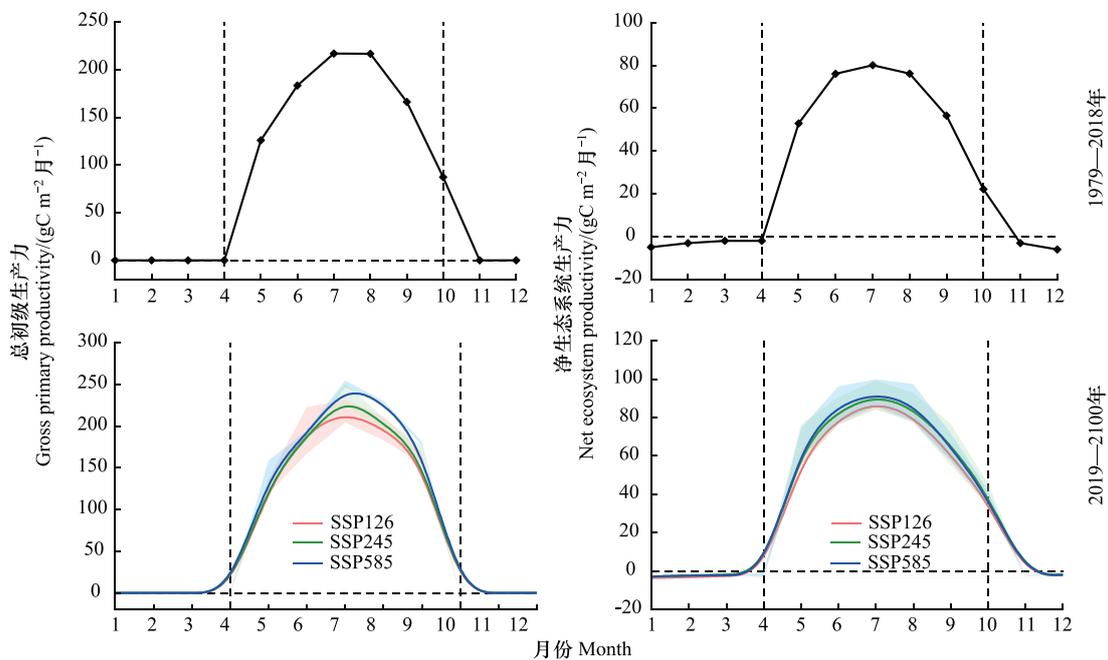


图 4 甘南高寒草甸 1979—2100 年月平均 GPP、NEP 变化趋势

Fig.4 Trends of monthly mean GPP and NEP in alpine meadows of Gannan from 1979 to 2100

4—10 月为该地植被生长季,图中使用垂直虚线在年内尺度上进行分隔

达到峰值  $203.23 \text{ g C/m}^2$ , NEP 波动幅度较小, 冬末春初时表现为弱碳源。未来尺度上, 三种气候模式下 GPP、NEP 年内变化趋势表现为倒“U”型, GPP 6—9 月相差较大, 7 月达到峰值, 分别为  $208.32 \text{ g C/m}^2$ 、 $221.54 \text{ g C/m}^2$ 、 $242.14 \text{ g C/m}^2$ 。NEP 变化区间略小于 GPP, 1—4 月和 11—12 月转变为微弱的碳源, 4 月和 11 月分别为该年碳汇/碳源的临界值, 低温是该地碳汇的限制因素。而每年的 5—10 月作为该地植物的生长季, 则为碳汇, 除个别年份外, 大部分年份均于 7、8 月份时候达到峰值, 分别为  $85.93 \text{ g C/m}^2$ 、 $88.64 \text{ g C/m}^2$ 、 $95.04 \text{ g C/m}^2$ 。

### 2.3 情景模拟下甘南高寒草甸碳收支空间变化特征

#### 2.3.1 甘南高寒草甸 NEP 2020—2100 年空间变化特征

陆地生态系统碳源汇通常用 NEP 测度, 如果 NEP 为正值, 表明该生态系统为碳汇; 反之则为碳源。基于对气候变化敏感性的反应程度, 以及直观表现甘南州高寒草甸碳收支的地域差异性, 以下研究仅对高寒草甸 NEP 进行分析。三种气候情景模式下甘南州高寒草甸 NEP 整体呈现西南高东北低的空间分布格局 (图 5), 年均值  $>300 \text{ g C/m}^2$ , 整个研究时段表现出强烈的碳汇趋势。SSP126 气候模式中, 该趋势最为明显, 高值区集中于西南部, 局部范围内由西南向西北递减, NEP 波动范围不超过  $100 \text{ g C/m}^2$ , 最大值为  $349.23 \text{ g C/m}^2$ , 最小值略高于  $100 \text{ g C/m}^2$ ; 而在 SSP245 气候情景模式中, NEP 中部低值区分布最广, 各地区之间波动幅度较大, 由东北向西南呈跨越式增长, 表现出随纬度升高而碳汇能力降低的趋势, 部分地区多年平均超过  $300 \text{ g C/m}^2$ , 最大值达到  $449.92 \text{ g C/m}^2$ , 最小值为  $325.41 \text{ g C/m}^2$ , 跨度超过  $100 \text{ g C/m}^2$ ; SSP585 模式中 NEP 分布较为分散, 低值区出现向西南扩张趋势, 西部部分地区出现低值集聚, 最高值为  $10.05 \text{ g C/m}^2$ , 低值为  $352.78 \text{ g C/m}^2$ 。

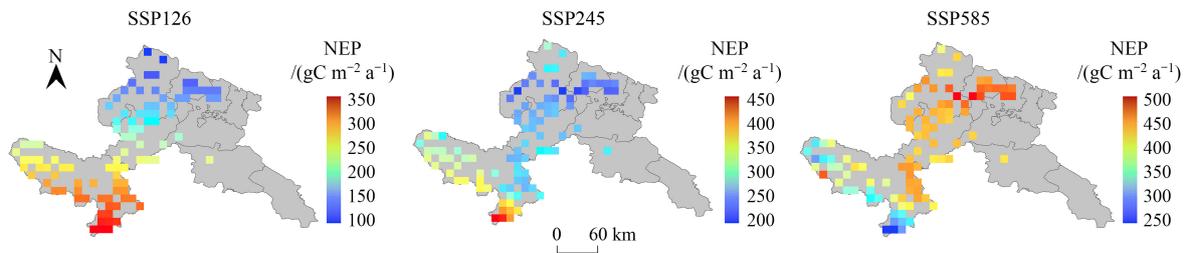


图 5 不同气候情景下甘南高寒草甸 2020—2100 年年均 NEP

Fig.5 Annual average NEP of Gannan alpine meadow under different climate scenarios from 2020 to 2100

对 2020—2100 年甘南高寒草甸 NEP 进行 Sen 趋势分析和 MK 检验结果如图 6 所示, 未来变化趋势上年增长率与 NEP 分布趋势一致, 总体由西南向东北递减。在 SSP126、SSP245、SSP585 三种气候情景模式下, NEP 呈现增加趋势的格点分布占总数的 87.23%、82.98%、84.04%, 极显著增加与显著增加面积占比最多。三个阶段波动范围分别为  $-0.83—5.41 \text{ g C/m}^2$ 、 $-1.70—5.75 \text{ g C/m}^2$ 、 $-2.12—3.98 \text{ g C/m}^2$ , 平均增长率为  $2.27 \text{ g C/m}^2$ 、 $1.84 \text{ g C/m}^2$ 、 $1.96 \text{ g C/m}^2$ 。西南地区碳汇趋势从 21 世纪初期、中期到末期明显增加, 增加速率由快减慢, 而在东北方向是先增加再下降, 此变化在 SSP126 情景中最为显著, 其最高变化率出现在西南方向, 高值在该地聚集性分布, 达到单位面积上  $3.2 \text{ g C/m}^2$  以上, 变化率最低的地方则出现在北部以及中部地区, 表现为负增长的趋势; SSP585 模式中最低, 单位面积上低于  $-2 \text{ g C/m}^2$ , 该模式下整个研究区内增长滞缓, 中部部分地区出现负增长, 各地区差异明显扩大。

#### 2.3.2 甘南高寒草甸 NEP 多年平均季节变化特征

高寒草甸对温度和降水的反应具有强烈的时空异质性。因此在模拟过去高寒草甸 NEP 的基础上, 拟探究未来气候条件下研究区内 NEP 季节分布特征。见图 7, 研究区冬春季节部分区域表现为弱碳源, 主要分布在合作、夏河等地, 西南部表现为较强的碳汇趋势。夏季全州高寒草甸均表现为极强的碳汇特征, 此时段各地区差异较小, 且都达到一年内最高值。秋季 NEP 变化表现出与春季相同的趋势, 但 NEP 值高于春季。整体上植被生长季 NEP 波动幅度更大, 区域碳汇差异最小。

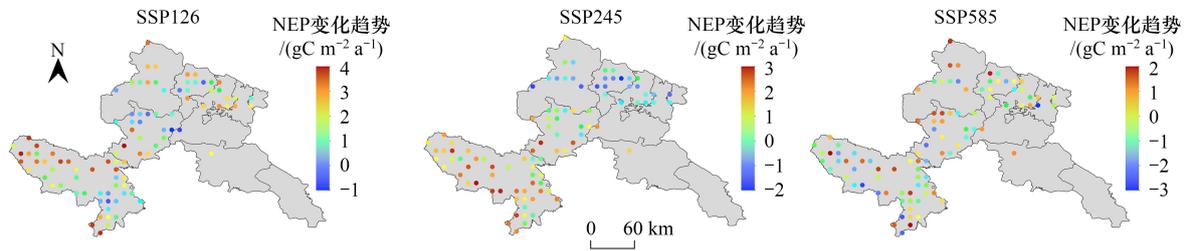


图 6 不同气候情景下甘南高寒草甸未来 2020—2100 年年均 NEP 变化趋势

Fig.6 Trends of annual average NEP in Gannan alpine meadows under different climate scenarios in the future from 2020 to 2100

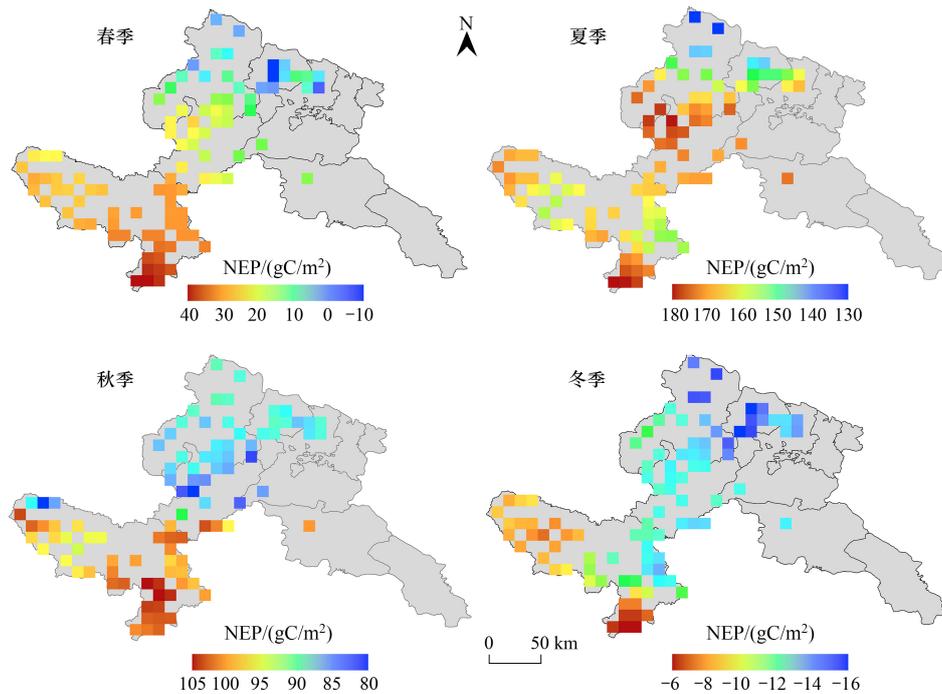


图 7 甘南高寒草甸不同季节 NEP

Fig.7 NEP in different seasons in Gannan alpine meadow

### 3 讨论

#### 3.1 甘南高寒草甸碳收支与其它研究结果的比较

植被光合作用以及土壤呼吸作用由众多复杂的生理生态过程组成,不同模型模拟我国草地碳汇特征存在一定差异。选取已发表文献中关于高寒草甸 GPP、NEP 的计算结果,提取本研究中相同时段的研究结果与之对比。结果显示(表 4),经参数优化后的 NEP 略高于其他研究,可能是由于输入数据的不确定性导致。

#### 3.2 甘南高寒草甸碳收支时间变化趋势

环境因子通过多种机制作用于生态系统碳通量各组分,直接决定生态系统是否表现为碳汇<sup>[41]</sup>。青藏高原高寒草甸属于气候变化的敏感地带,长时间尺度上高寒草甸 NEP 主要受年际气候因子的影响,低温是其主要限制因素之一<sup>[42]</sup>。1979—2018 年间,研究区内 GPP、NEP 呈波动性增长态势,NEP 波动幅度较大(图 3),高寒草甸整体表现为碳汇<sup>[43]</sup>。2020 年后,该地气候呈现暖湿化趋势,气温和降水显著上升,高寒草甸碳汇功能被进一步放大,整个时段研究区内 GPP 呈现出增长态势,NEP 先震荡性上升,后有下降趋势(图 3)。直到 2060 年左右,NEP 出现大幅度下跌,可能是由于此时气温达到 1.5℃ 的水平,极端降水事件频发,一系列气候

变化问题出现导致其产生负反馈<sup>[44]</sup>。年内尺度上受季节性气候因子的影响,降水量则是高寒草甸 NEP 的主要限制因子。生长季表现为显著的碳汇(图 4),7、8 月 NEP 极大值的出现与该地的雨热同期,可能由于此时气温较高、降水充沛促进植物光合作用固碳释氧。水热协同作用下,能促进植被生长季提前,但植被 GPP、NEP 对升温的反应存在阈值,只有在温度适宜时<sup>[45]</sup>,区域碳汇可能才会达到最大值,一旦超过该拐点,则会对植物的生长产生抑制作用,同时造成该地固碳能力减弱。

表 4 甘南高寒草甸 GPP、NEP 与其它研究结果对比

Table 4 Comparison of the results of GPP, NEP and other studies in Gannan alpine meadows

碳交换指数 Index of carbon exchange	研究时段 Study period	方法及模型 Methods or models	模拟均值 Simulated value/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	Biome-BGC 模拟 Biome-BGC simulated value/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	参考文献 References
GPP	2000—2019	VPM	713.46	698.17	2000—2019 甘南藏族自治州草地退化草蓄平衡动态监测研究 <sup>[37]</sup>
	2019	C-FIX	633.16	659.84	沙化和退化对甘南草地生态系统固碳的影响 <sup>[38]</sup>
NEP	2001—2020	土壤呼吸模拟	172.92	251.14	中国天然草地生产力遥感估算及其时空变化成因研究 <sup>[39]</sup>
	2000—2010	土壤呼吸模拟	213.18	248.30	省域生态系统碳汇/源的时空演变及其驱动机制 <sup>[40]</sup>

### 3.3 甘南高寒草甸碳收支空间变化特征

空间尺度上,甘南高寒草甸碳收支在未来变化趋势上总体由西南向东北递减(图 6),与该地 NEP 年均值分布趋势一致(图 5)。西南部玛曲县高寒草甸面积分布广阔,是生态修复工程的重点区域,草地面积以及生物多样性增加有利于区域碳汇增强;此外,海拔梯度是陆地生态系统形成新生态环境的重要驱动力,NEP 随海拔变化,海拔越高、越冷的生态系统对气候变化更为敏感<sup>[46]</sup>,故高海拔地区 NEP 增长速率高于其它区域。季节尺度上,气候因子通过调控植物的光合作用、呼吸作用等进而直接影响区域 NEP 变化<sup>[47]</sup>。春季、秋季、冬季 NEP 分布表现出与年际相同的趋势,而夏季对升温、降水表现出更高的敏感性,从而导致高寒草甸整体 NEP 增加,各区域碳汇差距缩小(图 7)。此外,高寒草甸碳汇与该地植被生长季表现一致,夏秋季节表为强烈的碳汇,而冬春季节部分地区表现为弱碳源,表明该区域在陆地碳循环中的作用随时间和空间而变化。

## 4 结论

本文针对如何理解区域尺度甘南州高寒草甸生态系统碳收支对气候变化的响应这一科学问题,运用 PEST 模型进行参数本地化,结合涡度相关实测数据优化 Biome-BGC 模型,并基于 CMIP6 气候情景模式进行模拟。结果表明:(1) 甘南州高寒草甸在历史时期以及未来不同阶段整体表现为碳汇,过去 40 年已吸收  $2.60 \times 10^{14}$  g C;(2) 未来暖湿化情景下,高寒草甸生态系统碳汇将增强,三种情景下将吸收  $3.16 \times 10^{14}$  g C、 $3.47 \times 10^{14}$  g C、 $3.76 \times 10^{14}$  g C,长时间尺度上受气温影响,未来趋势上年际波动较大。季节尺度上受年降水量限制,整体表现为冬春季节为碳源、夏秋季节为碳汇;(3) 碳汇/碳源的空间分布随时间而变化,具有明显的地域差异性,总体上增长率由西南向东北递减。高寒草甸对温度的敏感性具有较大时空变异性,气候变化对草甸生态系统碳通量的影响将取决于该生态系统生产力和水分条件的共同作用。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 朱再春,刘永稳,刘祯,朴世龙. CMIP5 模式对未来升温情景下全球陆地生态系统净初级生产力变化的预估. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 31-39.
- [ 2 ] Friendlingstein P, O'sullivan M, Jones M W, et al. Global Carbon Budget 2023. Earth System Science Data, 2023, 15(12): 5301-5269. Global Carbon Budget 2023. Earth System Science Data, 2023, 15(12): 5301-5269.

- [ 3 ] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [ 4 ] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新. 从青藏高原到第三极和泛第三极. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931.
- [ 5 ] 陶国启, 陈之光, 张立锋, 赵亮, 唐艳鸿, 古松. 三江源高寒草甸冻融循环期 CO<sub>2</sub> 通量变化特征. *生态学报*, 2023, 43(21): 9010-9023.
- [ 6 ] Doughty C E, Metcalfe D B, Girardin C A J, Amézquita F F, Cabrera D G, Huasco W H, Silva-Espejo J E, Araujo-Murakami A, da Costa M C, Rocha W, Feldpausch T R, Mendoza A L M, da Costa A C L, Meir P, Phillips O L, Malhi Y. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 2015, 519(7541): 78-82.
- [ 7 ] Webb J R, Santos I R, Maher D T, Finlay K. The importance of aquatic carbon fluxes in net ecosystem carbon budgets: a catchment-scale review. *Ecosystems*, 2019, 22(3): 508-527.
- [ 8 ] Giltrap D L, Kirschbaum M U F, Laubach J, Hunt J E. The effects of irrigation on carbon balance in an irrigated grazed pasture system in New Zealand. *Agricultural Systems*, 2020, 182: 102851.
- [ 9 ] Ryu Y, Baldocchi D D, Kobayashi H, van Ingen C, Li J, Black T A, Beringer J, van Gorsel E, Knohl A, Law B E, Rouspard O. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(4).
- [ 10 ] Zhang T, Zhang Y J, Xu M J, Zhu J T, Wimberly M C, Yu G R, Niu S L, Xi Y, Zhang X Z, Wang J S. Light-intensity grazing improves alpine meadow productivity and adaptation to climate change on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15949.
- [ 11 ] Cramer W P. Using plant functional types in a global vegetation model, 1997, 1: 271.
- [ 12 ] 王乐, 朱求安, 杜灵通. 草地碳循环主要影响因素及研究方法进展. *草原与草坪*, 2023, 43(4): 144-156.
- [ 13 ] Chen J M, Liu J, Cihlar J, Goulden M L. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [ 14 ] 袁洪艺, 杜灵通, 潘海珠, 乔成龙, 田静, 易志远, 吴宏明, 张祎, 施光耀, Irumva Olivier. 基于参数优化的人工灌丛生态系统碳通量模拟. *生态学报*, 2023, 43(13): 5546-5557.
- [ 15 ] 康满春, 朱丽平, 许行, 查同刚, 张志强. 基于 Biome-BGC 模型的北方杨树人工林碳通量对气候变化的响应研究. *生态学报*, 2019, 39(7): 2378-2390.
- [ 16 ] Zheng L, Qi Y C, Wang Y J, Peng J, Qin Z C. Calibration and validation of phenological models for Biome-BGCMuSo in the grasslands of Tibetan Plateau using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 322: 109001.
- [ 17 ] Sun Q L, Li B L, Zhang T, Yuan Y C, Gao X Z, Ge J S, Li F, Zhang Z J. An improved Biome-BGC model for estimating net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Modelling*, 2017, 350: 55-68.
- [ 18 ] 曹瑞红, 张美玲, 李晓娟, 罗上学, 贾晓楠, 朱美婷, 聂雅梅. 甘南高寒草甸土壤有机碳储量时空分布特征的模拟分析. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2145-2153.
- [ 19 ] 李传华, 韩海燕, 范也平, 曹红娟, 王玉涛, 孙皓. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原五道梁地区 NPP 变化及情景模拟. *地理科学*, 2019, 39(8): 1330-1339.
- [ 20 ] You Q Y, Xue X, Peng F, Xu M H, Duan H C, Dong S Y. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133-143.
- [ 21 ] You Q Y, Xue X, Peng F, Xu M H, Duan H C, Dong S Y. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133-143.
- [ 22 ] 王少影. 2015 年若尔盖高寒湿地生态系统研究站玛曲观测场涡动相关数据. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>), 2016. <https://www.doi.org/10.12072/ncdc.nieer.db3318>. 2023.
- [ 23 ] 孟雅丽, 段克勤, 尚激, 李双双, 邢莉, 石培宏. 基于 CMIP6 模式数据的 1961—2100 年青藏高原地表气温时空变化分析. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 24-33.
- [ 24 ] Zheng Z T, Zhu W Q, Zhang Y J. Direct and lagged effects of spring phenology on net primary productivity in the alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1223.
- [ 25 ] Wang X F, Ma M G, Song Y, Tan J L, Wang H B. Coupling of a biogeochemical model with a simultaneous heat and water model and its evaluation at an alpine meadow site. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(10): 4085-4096.
- [ 26 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 72-75.
- [ 27 ] 孟宪红, 张宇, 尚伦宇, 王少影, 李照国, 吕世华. 黄河源区玛曲高寒草地陆面过程观测数据集 (2010-2019 年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>), 2023. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.NCDC.ZPWERS.DB4092>. 2023.
- [ 28 ] 刘丽慧, 孙皓, 李传华. 基于改进土壤冻融水循环的 Biome-BGC 模型估算青藏高原草地 NPP. *地理研究*, 2021, 40(5): 1253-1264.

- [29] White M A, Thornton P E, Running S W, Nemani R R. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, 4(3): 1-85.
- [30] Running S W, Hunt E R Jr. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. *Scaling Physiological Processes*. Amsterdam: Elsevier, 1993: 141-158.
- [31] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10: 4259.
- [32] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J F, Lowe J, Meehl G A, Moss R, Riahi K, Sanderson B M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [33] Lun Y R, Liu L, Cheng L, Li X P, Li H, Xu Z X. Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(7): 3994-4018.
- [34] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485-498.
- [35] 冯娴慧, 曾芝琳. 粤港澳大湾区植被覆盖特征与变化趋势的自然驱动力研究. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1713-1724.
- [36] Zhang Z Y, Ju W M, Zhou Y L. The effect of water stress on net primary productivity in Northwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(46): 65885-65898.
- [37] 张聪. 2000—2019年甘南藏族自治州草地退化及草畜平衡动态监测研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [38] 唐希颖, 武红, 董金玮, 刘小燕, 李伟, 崔耀平. 沙化和退化状态对甘南草地生态系统固碳的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(2): 278-286.
- [39] 侯蒙京. 中国天然草地生产力遥感估算及其时空变化成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [40] 刘春雨. 省域生态系统碳源/汇的时空演变及驱动机制——以甘肃省为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [41] Liu P, Zha T S, Jia X, Black T A, Jassal R S, Ma J Y, Bai Y J, Wu Y J. Different effects of spring and summer droughts on ecosystem carbon and water exchanges in a semiarid shrubland ecosystem in Northwest China. *Ecosystems*, 2019, 22(8): 1869-1885.
- [42] Wang H, Liu H Y, Cao G M, Ma Z Y, Li Y K, Zhang F W, Zhao X, Zhao X Q, Jiang L, Sanders N J, Classen A T, He J S. Alpine grassland plants grow earlier and faster but biomass remains unchanged over 35 years of climate change. *Ecology Letters*, 2020, 23(4): 701-710.
- [43] 李成一, 李希来, 杨元武, 张世彬, 杨鹏年. 围栏封育对黄河源区斑块化退化高寒草甸碳交换及其组分的影响. *生态学报*, 2023, 43(24): 10228-10237.
- [44] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, O'Gorman P A, Maher N. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 508-513.
- [45] 孙倩, 张美玲, 王鑫婧, 徐士博. 不同气候情景下甘肃草地碳收支时空模拟与预测. *环境科学*, 2023, 44(10): 5842-5851.
- [46] Wei D, Tao J, Wang Z Z, Zhao H, Zhao W, Wang X D. Elevation-dependent pattern of net CO<sub>2</sub> uptake across China. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2489.
- [47] Yuan M S, Zhu Q A, Zhang J, Liu J X, Chen H, Peng C H, Li P, Li M X, Wang M, Zhao P X. Global response of terrestrial gross primary productivity to climate extremes. *The Science of the Total Environment*, 2021, 750: 142337.