

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.008

引用格式:王晓毅,井长青,王公鑫.基于Biome-BGCMuSo的草地碳/水通量参数优化及其对极端气候的响应[J].草地学报,2026,34(4):1215—1228

WANG Xiao-yi, JING Chang-qing, WANG Gong-xin. Optimization of Grassland Carbon/Water Flux Parameters Based on Biome-BGCMuSo and Their Responses to Extreme Climate[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1215—1228

基于 Biome-BGCMuSo 的草地碳/水通量参数 优化及其对极端气候的响应

王晓毅,井长青*,王公鑫

(新疆农业大学草业学院,新疆草地资源与生态重点实验室,西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室,
新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:不同草地生态系统碳/水循环对极端气候响应及其机制存在差异。本研究基于生物地球化学循环模型 Biome-BGCMuSo (BGC with Multilayer Soil Module) 结合涡度相关数据,通过敏感性分析和参数优化,探究了不同草地类型碳/水通量差异及其对极端气候的响应。结果表明,碳通量模拟对植被光合生理及碳分配参数敏感,水通量对叶片、根系参数敏感,且不同草地类型存在差异,优化高敏感参数可显著提升碳通量模拟精度,但水通量模拟仍有待进一步提高。生长季热浪期间,3种草地仍为碳汇,温性荒漠草原和山地草甸日间碳汇分别减弱 28.7% 和 29.4%;极端降雨提升了3种草地的碳/水通量;干旱事件使温性荒漠草原碳汇增强 62.5%,山地草甸碳汇减弱 16.3%。本研究揭示了干旱-半干旱区草地碳/水循环对极端气候的不同响应机制,为预测气候变化下草地生态过程演变提供了科学依据。

关键词:Biome-BGCMuSo 模型;草地碳/水通量;参数优化;极端气候事件

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1215-14

Optimization of Grassland Carbon/Water Flux Parameters Based on Biome-BGCMuSo and Their Responses to Extreme Climate

WANG Xiao-yi, JING Chang-qing*, WANG Gong-xin

(College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The responses of carbon/water cycles in different grassland ecosystems to extreme climatic events and the underlying mechanisms varied. This study, employed the biogeochemical cycle model Biome-BGCMuSo (BGC with Multilayer Soil Module), integrated with eddy covariance data, conducted sensitivity analysis and parameter optimization to investigate variations in carbon/water fluxes across different grassland types and their responses to extreme climates. The results showed that carbon flux simulations were sensitive to vegetation photosynthetic physiology and carbon allocation parameters, while water flux simulations were sensitive to leaf and root parameters, with variations across grassland types. Optimizing highly sensitive parameters significantly improved carbon flux simulation accuracy, but water flux simulations still require refinement. During growing season heatwaves, all three grassland types remained carbon sinks, though diurnal carbon sequestration decreased by 28.7% and 29.4% in temperate desert steppe and mountain meadows, respectively. Extreme rainfall enhanced carbon and water fluxes across all three grasslands. Drought events increased carbon

收稿日期:2025-05-26;修回日期:2025-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(42161024);2025年中央财政林草科技推广示范项目(新[2025]TG09号);新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAU-GRI2025001)资助

作者简介:王晓毅(2001-),女,汉族,新疆塔城人,硕士研究生,主要从事草地生态遥感研究,E-mail:17590823770@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:jingchangqing@126.com

sequestration by 62.5% in temperate desert steppe but decreased it by 16.3% in mountain meadows. This study reveals distinct response mechanisms of carbon and water cycles in grasslands of arid-semiarid regions to extreme climatic events, providing scientific basis for predicting the evolution of grassland ecological processes under climate change.

Key words: Biome-BGCMuSo model; Grassland carbon/Water fluxes; Parameters optimization; Extreme climate events

草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,在全球碳循环和气候调节中扮演着关键角色,其碳储量仅次于森林,占全球陆地碳储量的40.5%^[1],因此具备较大的碳汇潜力^[2]。草地主要分布于干旱-半干旱地区,覆盖了全球陆地面积的三分之一^[3],在连接生物圈与大气圈的能量循环中,通过CO₂的固存,对碳循环和水循环产生重要的调节作用^[4-6]。总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)、净生态系统碳交换量(Net ecosystem exchange, NEE)、生态系统呼吸(Ecosystem respiration, Reco)以及实际蒸散发(Evapotranspiration, ET)等碳/水通量,是衡量陆地生态系统与大气之间物质和能量交换的关键指标^[7]。

为准确监测陆地生态系统与大气间的碳/水平衡,涡度相关法已被广泛应用于陆地不同生态系统碳/水通量的测定^[8-9]。涡度相关法结合生态过程模型,能够有效评估植被生产力,为预测未来气候变化影响提供重要依据^[10]。相较于工作量大、代表性不足的传统野外采样方法^[11],涡度相关法可较好地模拟站点或区域尺度长时间序列的碳/水通量,已成为评估草地生态系统生产力的主要手段^[12]。目前常用的生态系统过程模型包括CENTURY^[13]、Biome-BGC (Biome-Biogeochemical Cycles)^[14]、BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator)^[15]等。CENTURY已用于模拟不同类型生态系统(草原、农田、森林和稀树草原等)的碳和养分动态^[16-17]。BEPS模型则主要用于模拟生态系统碳、水和能量循环的昼夜变化^[18]。Biome-BGC模型能够模拟陆地生态系统中植被、凋落物和土壤中水、碳和氮的储存与通量^[19],它基于生物地球化学循环原理,考虑了光合作用、呼吸作用、养分吸收等关键过程,并可耦合气象数据和土壤参数进行动态模拟。其模块化的结构和较强的可移植性,使其能够适应不同类型生态系统的模拟需求,为探究气候变化对草地碳/水通量的影响提供了重要的技术支撑。生物地球化学循环模型(BGC with Multilayer Soil Module, Biome-BGCMuSo)^[20]在Biome-BGC模型的基础上增加了多层土壤模块等新内容,改进和完

善了对土壤水分、氮平衡模拟,以及与土壤水分相关的植物衰老和物候发育等过程的模拟,还增加了植被管理模块,能够更好地模拟不同管理活动下各种陆地生态系统的碳、氮和水循环模型优势明显,近年来得到了更广泛的应用。

近几十年来,全球极端气候事件频发,对草地生态系统的碳/水通量可能产生显著影响^[21-22],中国北方草地位于欧亚大陆草原带东段,横跨多个地理单元,在气候变化背景下其生态敏感性尤为突出。干旱与半干旱草地生态系统在全球碳平衡中具有重要作用,且其碳动态与气候变化紧密关联^[23]。然而,由于不同草地类型在水热条件、植被组成及地理分布上的差异,其碳/水通量对极端气候事件的响应亦存在显著区别^[24]。此外,不同类型草地的碳汇能力本身即具有显著空间异质性^[25],在极端气候事件频发的背景下,各类干旱-半干旱草地碳/水通量的变化格局及其驱动机制仍存在较大不确定性。

因此,本研究提出了基于模型碳/水通量高敏感参数优化的模拟精度提升方法。拟首先利用涡度相关实测数据对Biome-BGCMuSo模型的生理/生态参数进行敏感性分析,找出不同草地类型影响碳/水通量的关键高敏感参数,并通过参数优化算法提升模型模拟精度。基于此,定量对比3种具有显著水文和植被差异的草地生态系统(温性荒漠草原、典型草原、山地草甸)碳/水通量对不同极端气候事件(热浪、极端降雨、干旱事件)的响应差异。该研究结果将为深入理解干旱-半干旱区草地生态系统碳/水循环提供理论支持,并为未来的气候变化应对策略提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国西北干旱-半干旱区3个典型涡度相关(Eddy Covariance, EC)观测站开展。地理位置自西向东依次为:新疆菊花台站,内蒙古四子王旗站、多伦站。涵盖了中国干旱-半干旱区广泛分布的荒漠、草原、草甸三大草地生态系统类型,具有较

强的区域代表性(站点分布详见图1)。1)菊花台站(CN-NTM, 43°27' N, 87°09' E, 2289 m)位于新疆乌鲁木齐县,以中旱生草本植物为主,年平均降水量为442.3 mm,年平均气温为3.2°C,是天山北坡典型山地草甸的代表。2)四子王旗站(CN-SW, 41°46' N, 111°53' E, 1456 m)位于内蒙古高原中心东南缘,以短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)等旱生

草本植物为主,年平均降水量为322.2 mm,年平均气温为4.0°C,属于荒漠草原生态系统类型。3)多伦站(CN-DL, 42°02' N, 116°17' E, 1324 m)位于内蒙古多伦县西南,以大针茅(*Stipa grandis* P. A. Smirn.)、克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.)等草本植物为主,年平均降水量为385.0 mm,年平均气温为1.6°C,属于典型草原生态系统类型。

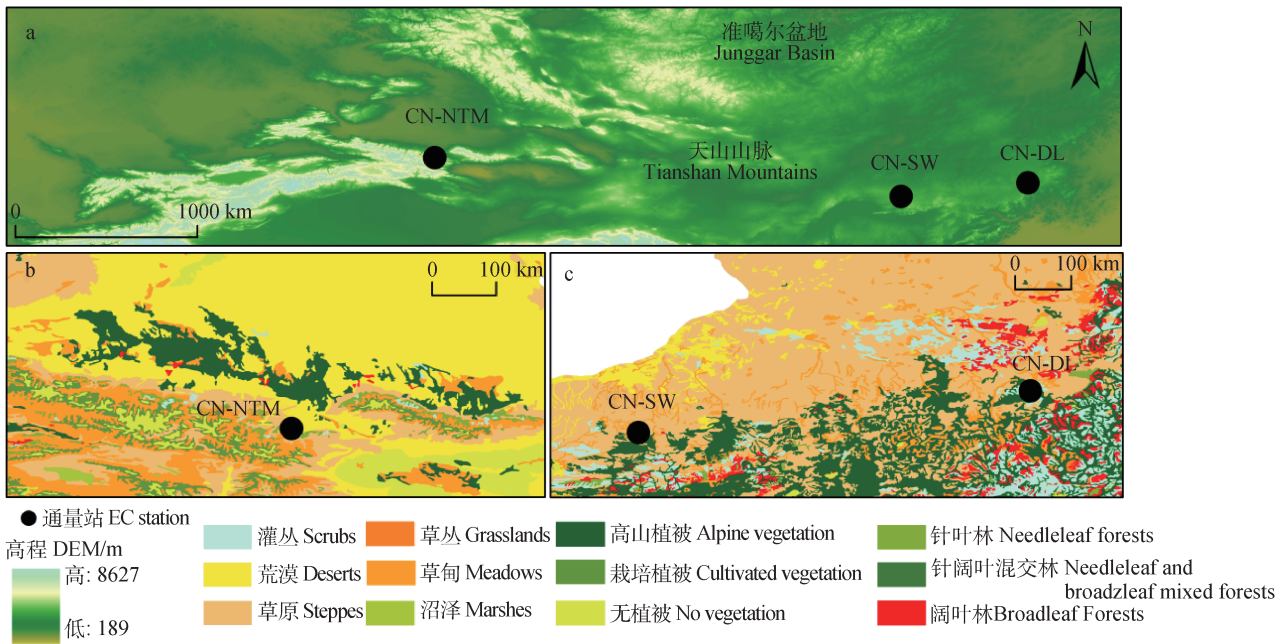


图1 研究区示意图

Fig1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

多伦站2013年数据、菊花台站2018年数据、四子王旗站2013年数据的碳/水通量数据及气象数据来源于涡度相关系统观测。涡度相关系统主要由开路式CO₂/H₂O分析仪(LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Logan, USA)和数据采集器(CR5000, Campbell Scientific, Logan, USA)组成。CO₂/H₂O分析仪与三维超声风速仪观测高度为2 m,采样频率为10 Hz,分别用来测定CO₂、水汽脉动和风速、温度脉动,并通过数据采集器记录和存储10 Hz的原始通量数据,原始数据按照标准方案和质量控制协议进行处理,包括去噪、二维坐标旋转、时间滞后校正、WPL校正、频谱校正等以生成30分钟的通量值。

1.3 碳/水通量参数敏感性分析及关键参数优化

1.3.1 模型简介 本研究使用的是模型的最新版

本Biome-BGCMuSo v6.2^[20],该模型由匈牙利厄尔泰大学气象系Zoltán BARCZA教授的研究小组发布,可以用以模拟陆地生态系统碳、氮和水循环过程,尤其适用于评估气候变化及土地利用对生态系统功能的影响。该模型为站点模型,模拟站点所在区域生态系统的土壤-植物-大气连续体之间的水、碳、氮循环以及能量交换过程,模型模拟可分为物理过程(太阳辐射和水的循环过程的计算)以及生理生态过程(碳和氮的循环过程的计算)。其核心优势在于能够模拟陆地生态系统中碳/水、氮与能量通量的时空耦合过程,并支持人类活动(如土地利用变化)与气候变化的多情景交互影响评估。模型的驱动数据主要包括地理数据、气象数据和植被生理生态参数,以日步长运行,可输出日、月以及年尺度的通量。除基本的气象数据(每日最高和最低气温以及降水量)外,其他气象数据可以通过MT-CLIM模型进行估计。Biome-BGCMuSo模型每次执行时至少使用四个输入文件。一为初始化文件

(INI 文件),它提供有关模拟的一般信息,包括模拟场地的物理和气候特征的描述;二是气象数据文件(MET 文件),它包含模拟场地的日均空气温度、降水量、湿度、辐射和日长值;三是生态生理参数文件(EPC 文件),它包含场地植被的生态生理描述,以及叶片碳/氮比率、最大气孔导度等参数;四是土壤属性文件(SOIL 文件),它包括土壤组成、特征和土壤含水量等参数。

1.3.2 参数敏感性分析方法 本研究首先识别 Biome-BGCMuSo 模型影响碳/水通量模拟的关键参数,为模型改进和应用提供参考。针对模型 EPC 文件中 139 个参数的默认值,除去标记性参数,并依据模型手册、相关文献以及实际生态过程与数据合

理性,对 35 个有效参数分别以 $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 50\%$ 和 $\pm 100\%$ 的幅度进行扰动,并驱动 Biome-BGCMuSo 模型进行模拟运算。使用敏感性判别指数(D_{sen})进行判别^[26-27],以 GPP 为例:

$$D_{sen} = \frac{\sum_{i=1}^n |GPP_i - GPP_{def}|}{n \times GPP_{def}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, GPP_i 为参数 i 次浮动后模型模拟的 GPP 值, GPP_{def} 为参数取值为缺省值时模型模拟的 GPP 值, n 为参数浮动的次数。参数的敏感性判别指数可以显示该参数变化对模型模拟结果的影响程度。数值越大,表示参数变动对模型模拟结果的影响越显著,参数越敏感,反之亦然。

表 1 敏感性分析所用生理生态参数列表

Table 1 List of physiological and ecological parameters used in sensitivity analysis

参数 Parameters	单位 Unit	EPC 文件序号 EPC file serial number
生长季节中转移生长阶段的比例 FTG	—	11
凋落物与生长季节的比 FL	—	12
年火灾死亡率分数 FM	—	24
植被生长期全株死亡比例 WPM	—	25
活叶中 C:N 比 $C:N_{leaf}$	—	26
新鲜落叶中 C:N 质量比 $C:N_{lit}$	—	27
细根中 C:N 比 $C:N_{fr}$	—	28
果实中 C:N 比 $C:N_f$	—	29
软茎中 C:N 比 $C:N_s$	—	30
凋落叶不稳定比例 L_{lab}	—	40
凋落叶纤维素比例 L_{cel}	—	41
细根易分解比例 FR_{lab}	—	42
细根纤维素比例 FR_{cel}	—	43
软茎中易变分数的比例 $t1_{softstemlitr}$	—	46
冠层水截留系数 W_{int}	$LAI^{-1} \cdot d^{-1}$	49
冠层光衰减系数 k	—	50
总叶面积与投影叶面积比例 $LAI_{all:proj}$	—	54
阴叶与阳叶叶面积指数的比例 $SLA_{shade:sun}$	—	55
叶片中 Rubisco 蛋白质氮的比例 FLNR	—	56
最大气孔导度 g_{smax}	$m \cdot s^{-1}$	58
界面层导度 g_{bl}	$m \cdot s^{-1}$	60
经验指数根分布参数 $R_{distrib}$	—	65
最大根深对应的根权值 R_{length}	—	66
根深函数形状参数(坡度) R_{length}	—	67
控制单位碳增长(GPP)的生长呼吸代价 GR	—	69
每天氮维持呼吸量 MR_{pern}	$kg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$	70
共生和非共生氮固定(总氮量) $nfix$	$kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	73
关键土壤水含量比例 VWC_{ratio}	—	96
开始减少导度的 VPD 值 vpd_{open}	Pa	99
地上植物材料最大衰老死亡系数 $S_{abovebiom}$	—	101
地下植物材料最大衰老死亡系数 $S_{belowbiom}$	—	102
衰老的叶子转化为枯落物的速率 $mort_{snsc}$	—	106
耐旱参数 DTP	—	109
土壤水分亏缺对光合作用下调的影响 $Photo_{STRESS}$	—	110
平均比叶面积 SLA1	—	137

1.3.3 参数优化 贝叶斯优化作为一种全局优化策略,旨在构建目标函数的概率代理模型,并据此推断最优参数配置。该算法包含明确目标函数、构建概率模型、初始化参数集合、评估目标函数值、更新概率代理模型、选择下一组待评估参数。算法从初始参数集出发,通过迭代式评估目标函数并不断精炼概率代理模型,逐步推断出全局最优参数解,直至满足预设的收敛准则。算法可由R4.4.2版本中的“Bayesian Optimization”软件包实现,本研究设置先验评估次数为100,迭代次数为50,并以Kling-Gupta效率(KGE)^[28]作为优化目标,由“hydroGOF”软件包实现。KGE的取值范围为负无穷至1,其数值越接近1,代表模拟结果与观测数据的拟合程度越高。KGE的计算公式如下:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{sim}}}{\sigma_{\text{obs}}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\text{sim}}}{\mu_{\text{obs}}} - 1\right)^2} \quad (2)$$

式中, r 表示观测值和模拟值之间的线性相关性, σ_{obs} 、 σ_{sim} 分别表示观测值标准差和模拟值标准差, μ_{sim} 、 μ_{obs} 分别为模拟值均值和观测值均值。

为了验证参数优化的模拟精度,本文选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)作为Biome-BGCMuSo模型优化效果的综合评价指标:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2}{N}} \quad (4)$$

式中: Y_i 为实测通量值, Y'_i 为模拟通量值, $\bar{Y}$ 为实测通量均值, N 为总样点数。

1.4 极端气候事件分析方法

本研究基于涡度相关数据,分析了在热浪事件、极端降雨事件、干旱事件下,温性荒漠草原、典型草原、山地草甸碳/水通量的响应变化。研究站点植物生长季节主要为5月至9月,因此,对于热浪的定义,本研究选取生长季的日最高温度数据,并对其进行排序,将最高的10%温度天数定义为“热天”,如果连续出现5个或5个以上的“热天”,则定义为1次热浪事件^[29]。

采用百分数阈值法^[30]定义极端降雨事件。将不同类型草地生长季每日降水数据按照从小到大的顺序进行排列,选取第99个百分位数作为阈值,大于或等于这个阈值的降水事件被定义为极端降雨事件^[31]。设某变量有 n 个值,按升序排列,得到 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m, \dots, X_n$,则百分位值为:

$$X_0 = (1-a)X_j + aX_{j+1} \quad (5)$$

式中, $j = [p(n+1)]$, $a = p(n+1) - j$ 。 j 为变量,按照升序排列后的顺序, p 为百分位值对应的概率,方括号表示数值取整, n 为序列样本容量。

根据国家气象干旱等级(GB/T20481-2017),标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)被划分为5个等级,当某一地区日SPEI小于或等于-0.5时,即被视为处于干旱状况,具体干旱状况等级划分见表1。基于该标准,在汇总日尺度SPEI数据后,结合游程理论,从SPEI时间序列中提取干旱事件。若连续7天日尺度SPEI值均小于-0.5,将这7天中的第1天确定为干旱事件的起始;若连续时段内所有日尺度SPEI值始终小于-0.5,该连续时段则被视为1次完整的干旱事件,而一旦出现SPEI值大于或等于-0.5的情况,便标志着干旱事件结束。

表2 标准化降水蒸散指数(SPEI)干旱等级划分

Table 2 Drought grade classification of the standardized precipitation evapotranspiration index

干旱等级 Degree of aridity	干旱类型 Type of drought	SPEI范围 SPEI scope
1	无旱 Drought-free	$\text{SPEI} > -0.5$
2	轻度干旱 Mild drought	$-1 \leq \text{SPEI} \leq -0.5$
3	中度干旱 Moderate drought	$-1.5 \leq \text{SPEI} \leq -1$
4	严重干旱 Severe drought	$-2 \leq \text{SPEI} \leq -1.5$
5	极端干旱 Extreme drought	$\text{SPEI} \leq -2$

2 结果与分析

2.1 不同草地类型碳/水通量参数优化

2.1.1 不同草地类型碳/水通量高敏感性参数 基于敏感性判别指数,以 $D_{\text{sen}} > 1\%$ 为标准找出不同

草地类型的敏感性参数和非敏感性参数。然后,选取各草地类型中敏感性指数排名前8位的参数,将其确定为该草地类型模型的高敏感参数。结果显示:碳通量方面,温性荒漠草原的碳通量主要受光合生理参数和生长发育参数的共同调控。冠层光

衰减系数(K , 50)和最大气孔导度($g_{\max}$, 58)直接影响光合作用效率,进而决定植被吸收二氧化碳的能力。生长季节中转移生长阶段的比例(FTG, 11)、根深函数形状参数(R_{length} , 67)和凋落物与生长季节的比(FL, 12)等生长发育参数调控碳的输入、分配和输出过程,决定碳汇或碳源的功能(图 2a、图 2d、图 2g)。典型草原影响碳通量的参数更加多样,除了光合生理参数,还涉及细根纤维素比例(FR_{cel} , 43)、凋落叶纤维素比例(L_{cel} , 41)以及活叶中的 C:N 比($C:N_{\text{leaf}}$, 26)等,这些参数反映了碳在植物体内的分配、转化与分解(图 2b、图 2e、图 2h)。山地草甸的碳通量则对生长季节中转移生长阶段的比例(FTG, 11)、叶片中 RuBisco 蛋白质氮的比例(FLNR, 56)、共生和非共生氮固定(n_{fix} , 73)及关键土壤含水量比例(VWC_{ratio} , 96)较为敏感,反映了生

长季动态变化和氮素循环的影响(图 2c、图 2f、图 2i)。

水通量方面,温性荒漠草原的水通量主要受平均比叶面积($SLA1$, 137)、衰老叶子转化为枯落物的速率($mort_{\text{snsc}}$, 106)和经验指数根系分布参数(R_{distrib} , 65)的影响,这些参数影响蒸腾、蒸发和吸收过程,从而影响光合作用和植被生长(图 j)。典型草原则受冠层光衰减系数(K , 50)、平均比叶面积($SLA1$, 137)、软茎中易变分数的比例($tl_{\text{softstemlitr}}$, 46)和地上植物材料最大衰老死亡系数($S_{\text{abovebiom}}$, 101)等参数影响,调控水分的蒸腾、截留和流失(图 k)。山地草甸的水通量除光合生理参数外还受到总叶面积与投影叶面积比例($LAI_{\text{all:proj}}$, 54)和凋落物与生长季节的比(FL, 12)影响,强调了植被结构和物质循环在水分蒸散中的作用(图 l)。

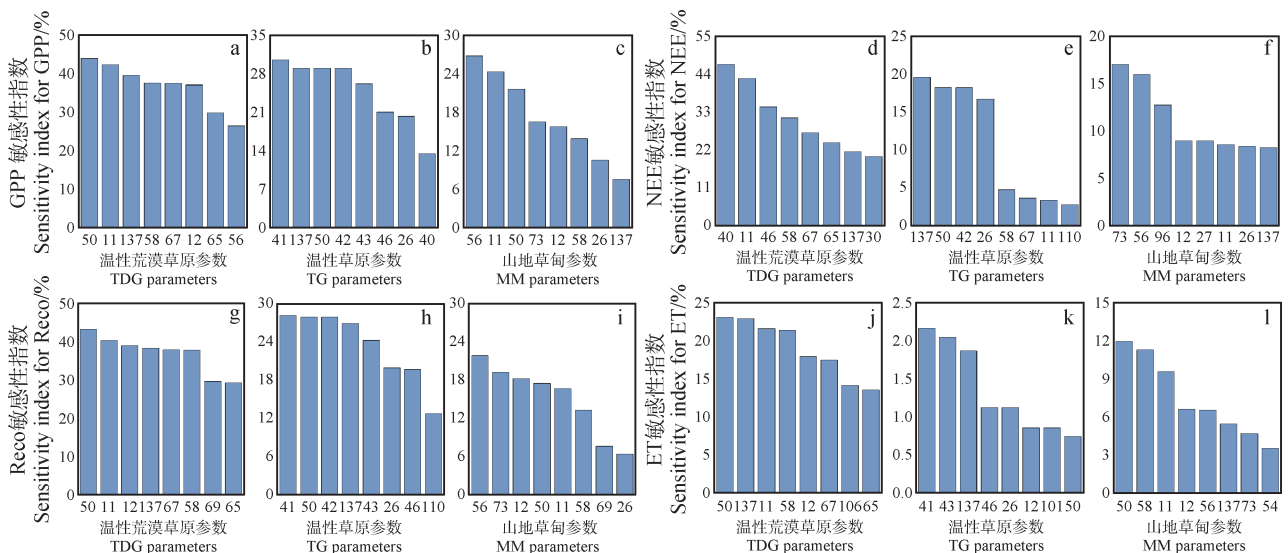


图2 温性荒漠草原、典型草原、山地草甸参数敏感性判别指数

Fig. 2 Discriminant index of parameter sensitivity for temperate desert grassland, typical grassland, and meadow grassland

注:柱状图代表敏感性指数,图中横坐标表示参数序号。TDG表示温性荒漠草原,TG表示温性草原,MM表示山地草甸

Note: Bars represent sensitivity indices, and the horizontal coordinates in the graph indicate the parameter numbers. TDG indicates temperate desert grassland, TG indicates temperate grassland, and MM indicates mountain meadows

2.1.2 不同草地类型碳/水通量参数优化 通过模型参数优化,显著提升了温性荒漠草原GPP和Reco的模拟精度。GPP,Reco的 R^2 分别较优化前提高了0.19和0.27(图 3e,图 3g)。然而,NEE和ET的模拟精度提升效果不明显(图 3f,图 3h)。GPP在春季前期,模拟值和优化值均低于观测值,表明模型对早期植被恢复阶段的碳吸收能力可能存在低估。春季中期,模拟值被严重高估,优化后的值虽更接近观测值,但在生长季中期(5月)仍存在高估现象(图 3a)。NEE的模拟结果与GPP

相似,主要表现为碳汇,模拟值的碳汇强度远大于观测值,优化后的值有所改善,但在生长季中期同样存在碳汇高估。冬季,模拟值和优化值均表现为碳源,且均高于观测值,说明模型可能对冬季碳源的估算存在偏差(图 3b)。Reco在生长季模拟值被严重低估,优化后的效果虽有所提升,但仍模拟值低于观测值;不过, R^2 的提升表明优化后模型在描述Reco的整体变化方面有所改进。冬季,模拟值和优化值均高于观测值,与NEE呈现相似的偏差(图 3c,图 3g)。

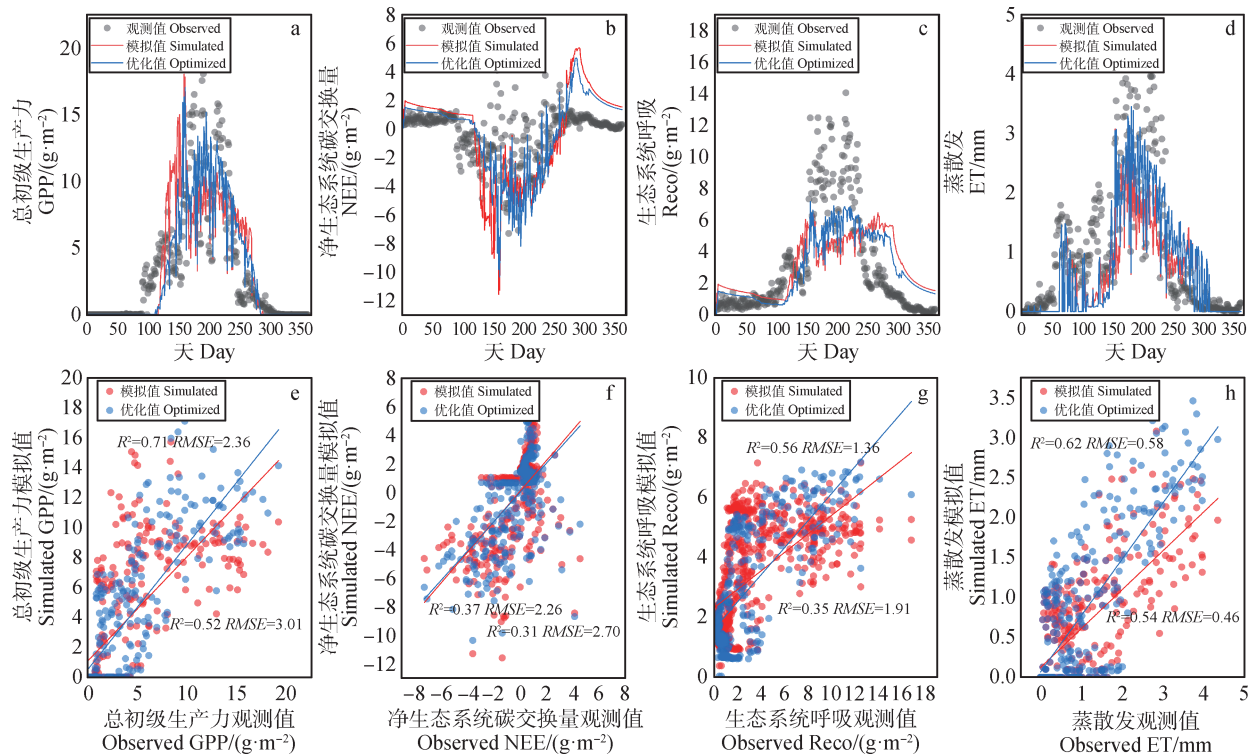


图3 温性荒漠草原GPP,NEE,Reco,ET的日变化特征及模拟日碳/水通量和涡度相关系统观测的日碳/水通量散点图

Fig. 3 Characterization of daily changes in GPP, NEE, Reco, and ET in temperate desert grasslands and scatter plots of simulated daily carbon/water fluxes and daily carbon/water fluxes observed by eddy correlation systems

注:图a-d中灰色小圆点表示观测值,红色实线为模拟值,蓝色实线为优化值。图e-h中红色小圆点表示模拟值,蓝色小圆点表示优化值,红色实线表示模拟值与观测值的线性回归,蓝色实线表示优化值与观测值的线性回归, R^2 为决定系数, RMSE为均方根误差,下同

Note: In Figures a-d the grey dots indicate the observed values, the red solid line indicates the simulated values, and the blue solid line indicates the optimised values. The red dots in Figs. e-h indicate the simulated values, the blue dots indicate the optimised values, the red solid line indicates the linear regression between the simulated values and the observed values, and the blue solid line indicates the linear regression between the optimised values and the observed values, R^2 is the coefficient of determination, RMSE is the root mean square error, the same as below

参数优化亦显著提升了典型草原GPP和Reco的模拟精度。GPP,Reco的 R^2 分别较优化前提高了0.17和0.49,表明模拟结果与观测数据的拟合程度显著增强(图4e,图4g)。对比优化前后的模拟结果发现,优化前GPP在秋季存在高估现象。对于Reco,优化前模拟值在5月前与观测值匹配良好,趋势一致,但从5月开始,模拟值与观测值开始偏离。经过优化,无论短期季节波动还是长期年际变化,模拟值都能更准确反映实际情况,与观测值更为吻合(图4a,图4c)。优化前的NEE模拟值在生长季存在低估,优化后显著改善,模拟值更接近观测值(图4b)。模拟结果显示,参数优化在提高典型草原碳通量模拟精度方面作用显著,但对于ET的模拟效果改善有限,未来在ET的模拟机制与参数适配性方面仍需更深入的探索(图4d,图4h)。

模型参数优化对山地草甸GPP,NEE和Reco

的模拟精度提升显著,但对ET的优化效果不明显。GPP,NEE,Reco的 R^2 较优化前分别提高了0.22,0.11,0.30(图5e-g)。对比优化前后模拟结果,可以发现模型在优化前普遍高估了夏季GPP和NEE,低估了生长季的Reco(图5-c)。参数优化有效地缓解了这些偏差,使得模拟值更接近观测数据。上述结果表明,针对碳/水通量进行参数优化是提升山地草甸生态系统模型预测能力的重要手段,但ET的模拟仍需进一步改进。

2.2 极端气候事件对不同草地类型碳/水通量的影响

2.2.1 碳/水通量对热浪的响应差异

热浪期间,不同草地类型的碳水通量响应各异。仅典型草原GPP略高于热浪前后,而温性荒漠草原、山地草甸GPP分别下降了22.7%和22.2%(图6a)。3种草地类型NEE均经历了“碳源-碳汇-碳源”的转变,总

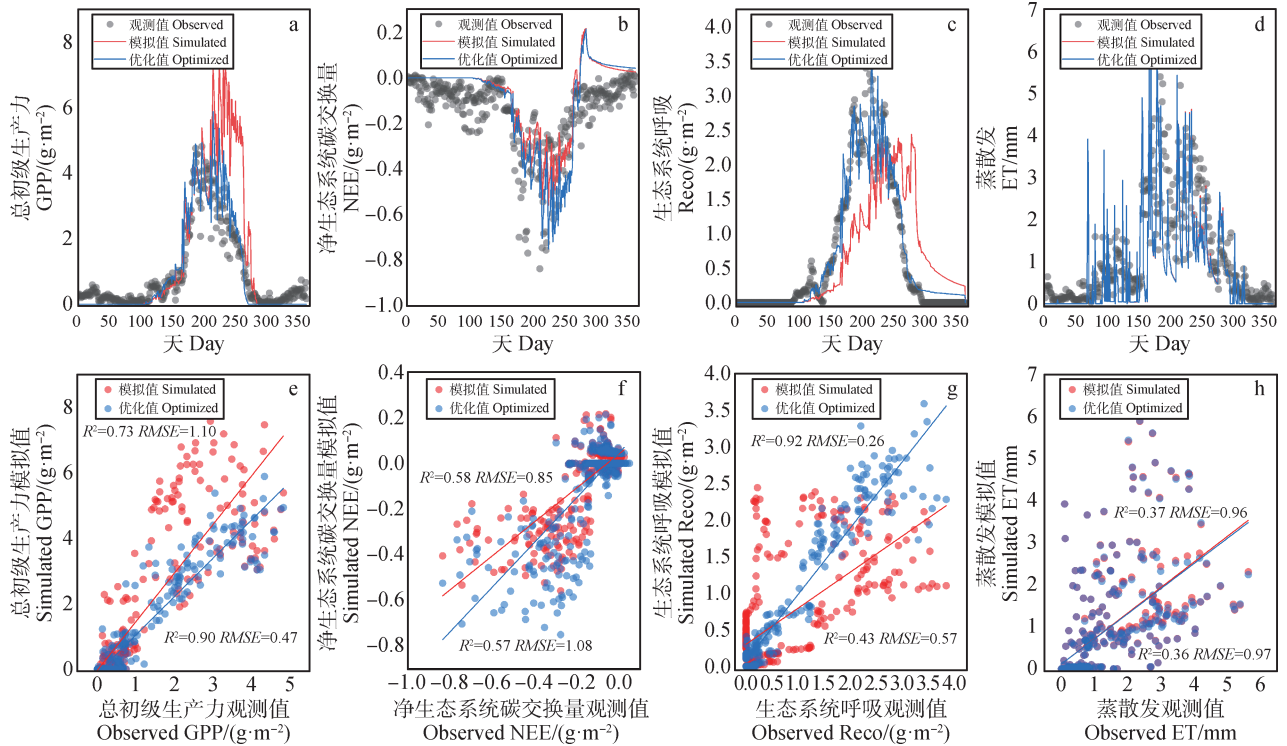


图 4 典型草原 GPP, NEE, Reco, ET 的日变化特征及模拟日碳/水通量和涡度相关系统观测的日碳/水通量散点图

Fig. 4 Characteristics of daily changes in typical grassland GPP, NEE, Reco, and ET and daily carbon/water fluxes from simulated daily carbon/water fluxes and eddy correlation system observations Scatterplot of daily carbon/water fluxes

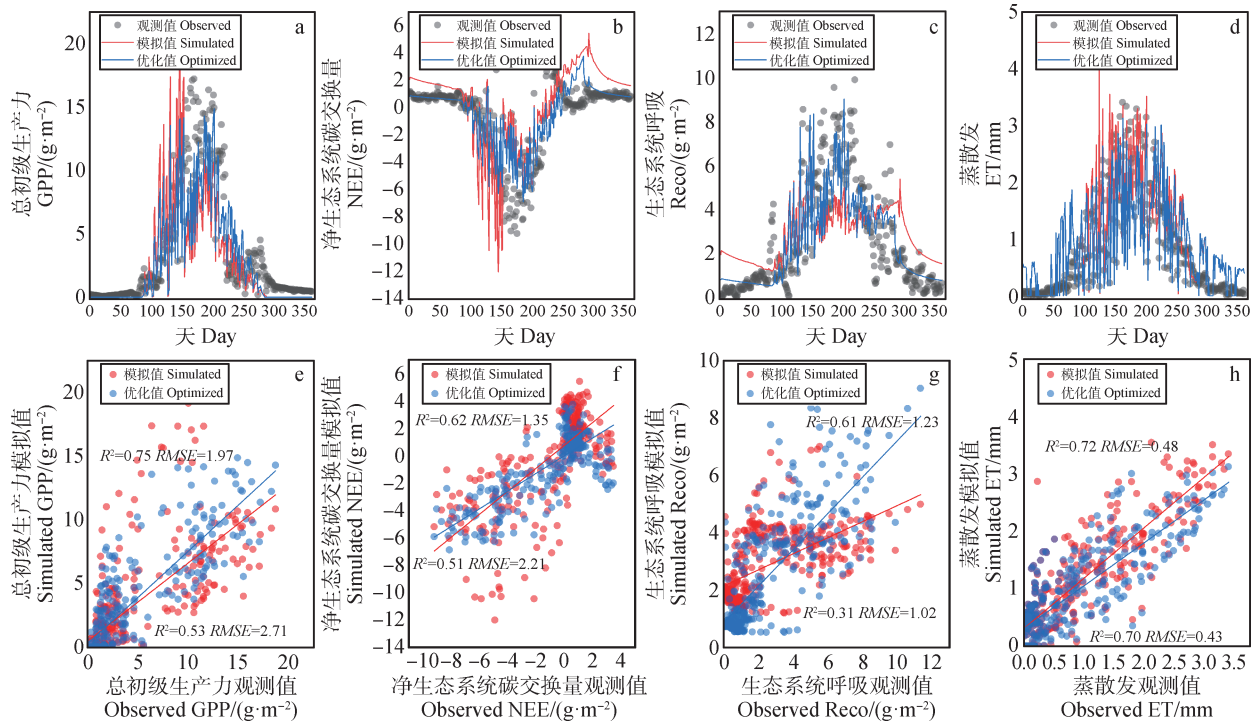


图 5 山地草甸 GPP, NEE, Reco, ET 的日变化特征及模拟日碳/水通量和涡度相关系统观测的日碳/水通量散点图

Fig. 5 Characterization of daily changes in GPP, NEE, Reco, and ET in mountain meadows and scatter plots of simulated daily carbon/water fluxes and daily carbon/water fluxes observed by eddy correlation systems

体表现为碳汇。温性荒漠草原 NEE 在热浪期间及其前后差异较小,但日间碳汇减弱 28.7%。典型草

原热浪前后日间 NEE 趋于一致,夜间热浪期间 NEE 低于热浪前后。山地草甸热浪期间 NEE 低于

热浪前后,碳汇强度减弱29.4%,且热浪结束后未能恢复至热浪前水平(图6c)。3种草地类型Reco在热浪期间变化幅度不同,温性荒漠草原Reco波动较大,且热浪期间Reco低于热浪前后。典型草原Reco波动平缓,热浪期间日间及夜间Reco均高于

热浪前后,且热浪后恢复至热浪前水平。山地草甸Reco在热浪期间低于热浪前,且热浪后Reco值更低(图6b)。蒸散方面,热浪期间温性荒漠草原ET低于热浪前后,典型草原ET无明显变化,而山地草甸ET高于热浪前后(图6d)。

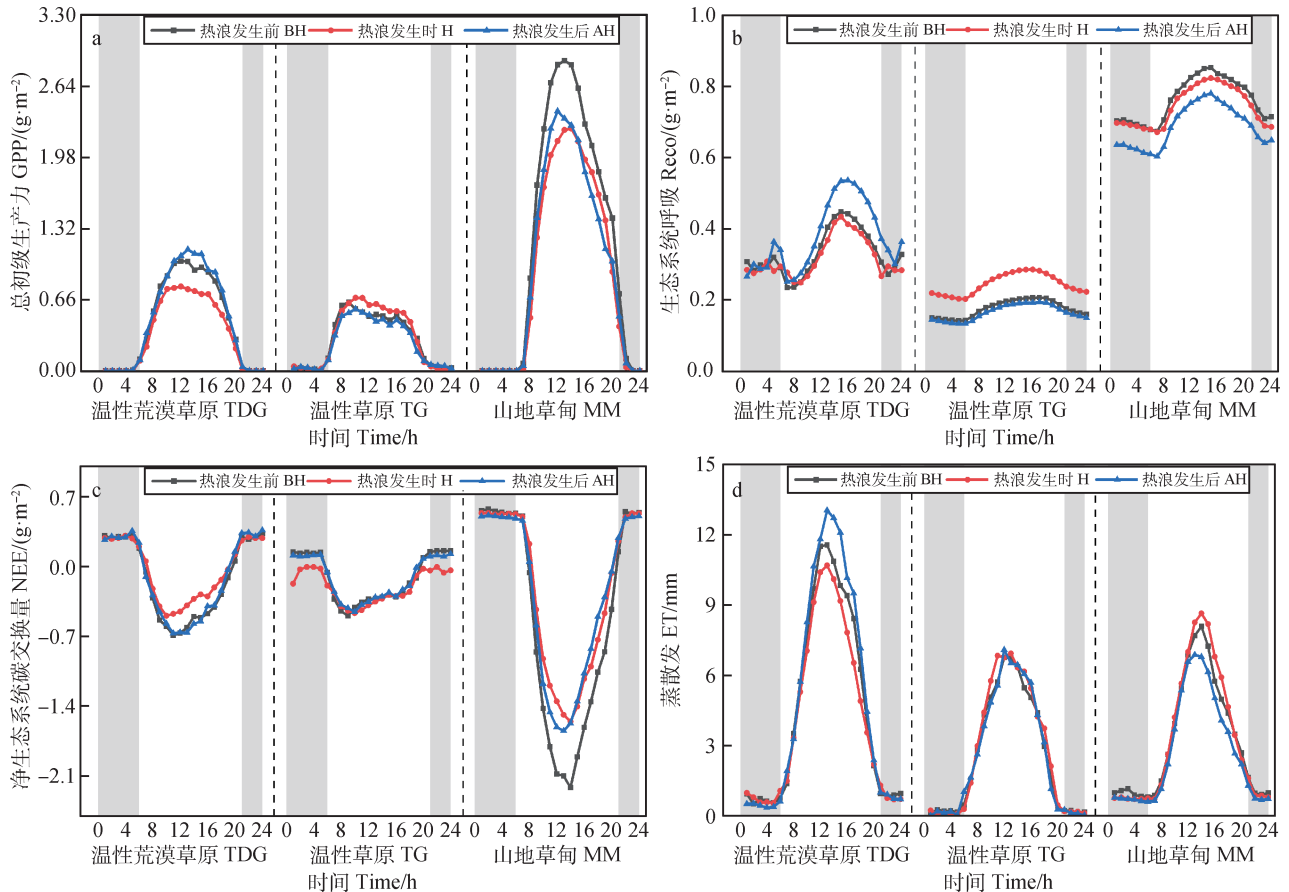


图6 温性荒漠草原、典型草原、山地草甸热浪阶段碳/水通量变化

Fig. 6 Changes in carbon/water fluxes during heat wave phases in temperate desert grasslands, typical grasslands, and mountain meadows
注: BH为热浪发生前5天该时段平均值, H为热浪发生时该时段平均值, AH为热浪后该时段平均值, 虚线为分割不同草地类型的辅助线, 阴影表示夜间

Note: BH represents mean value of the period 5 days before the heat wave, H represents mean value of the period during the heat wave, AH represents mean value of the period after the heat wave, dashed line is an auxiliary line dividing the different grass types, and shading indicates nighttime

2.2.2 碳/水通量对极端降雨事件的响应差异
极端降雨对不同草地类型的碳/水循环产生显著影响。3类草地日间GPP在降雨期间均有升高, 降雨后与降雨期间持平(图7a)。而日间NEE均为负值, 主要表现为碳汇。其中, 温性荒漠草原在极端降雨期间碳汇能力增强43.0%, 典型草原NEE无显著变化, 而山地草甸日间12:00—16:00时NEE碳汇能力减弱8.5%且降雨后未能恢复(图7c)。3种草地类型的日间Reco均在极端降雨期间升高, 温性荒漠草原Reco波动较大, 而山地草甸Reco提升了38.2%, 显著高于其他类型(图7b)。对于水通量, 3

种草地类型ET均高于降雨前后, 山地草甸升高了34.4%且降雨后ET恢复较快, 而温性荒漠草原和典型草原ET分别升高了48.5%和26.8%, 且降雨后仍未恢复至降雨前水平(图7d)。

2.2.3 碳/水通量对干旱事件的响应差异
干旱发生时, 温性荒漠草原和典型草原日间GPP值均高于干旱发生前后, 而山地草甸的GPP则显著降低21.3%且未能恢复至干旱前水平(图8a)。3种草地类型在干旱期均表现为碳汇, 其中温性荒漠草原碳汇能力增强62.5%, 典型草原NEE无显著变化, 山地草甸碳汇能力减弱16.3%并转为碳源(图8c)。

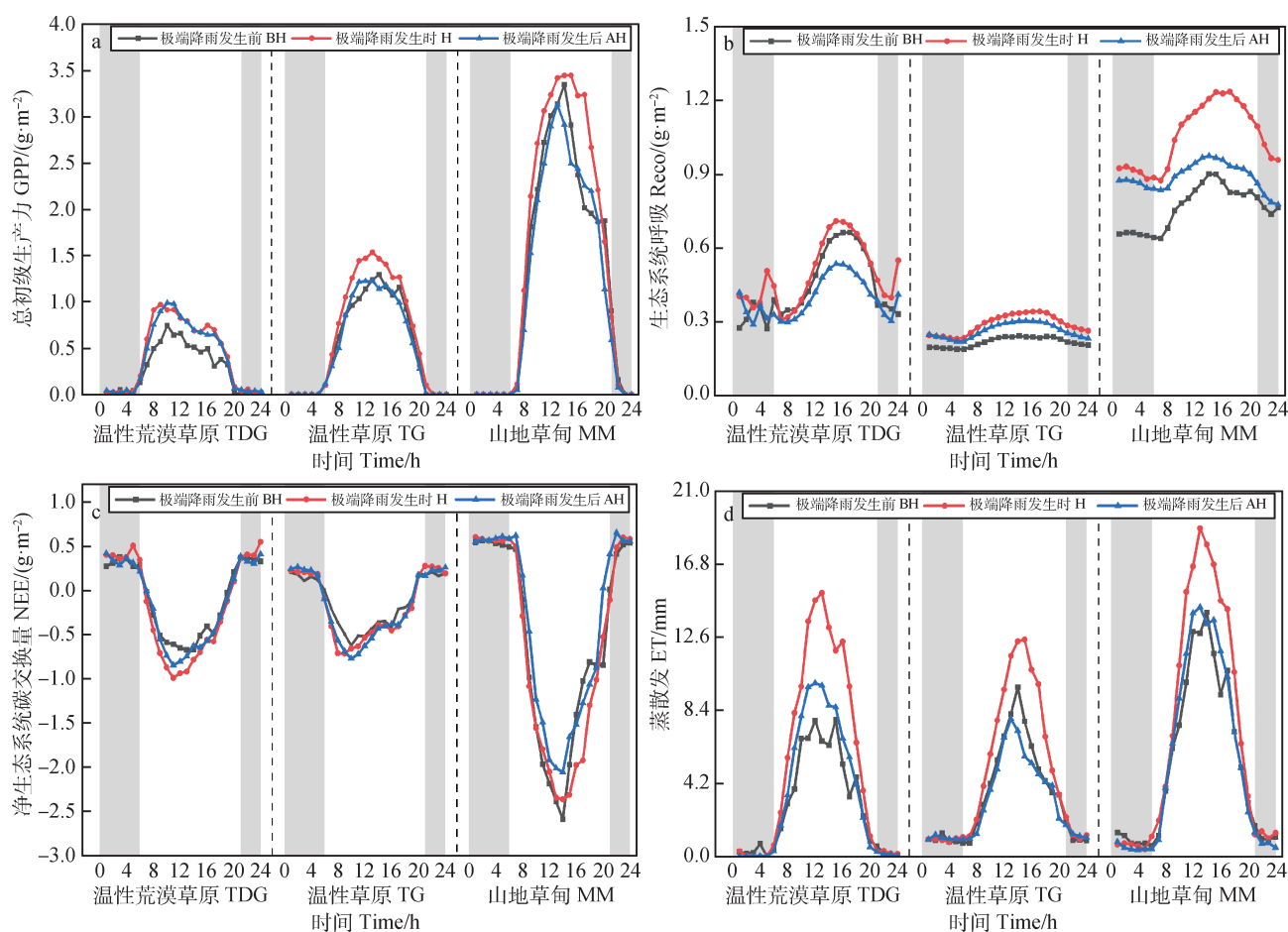


图7 温性荒漠草原、典型草原、山地草甸极端降雨阶段碳/水通量变化

Fig. 7 Changes in carbon/water fluxes during extreme rainfall phases in temperate desert grasslands, typical grasslands, and mountain meadows

注: BH为极端降雨发生前1~5天该时段平均值, H为极端降雨发生时该时段平均值, AH为极端降雨后该时段平均值, 虚线为分割不同草地类型的辅助线, 阴影表示夜间

Note: BH stands for mean value for the period 1-5 days before extreme rainfall, H stands for mean value for the period when extreme rainfall occurs, AH stands for mean value for the period after extreme rainfall, dotted line is an auxiliary line dividing different grassland types, and shading indicates nighttime

干旱显著影响温性荒漠草原Reco, 导致其波动增大且高于干旱前后, 而典型草原Reco变化较小, 山地草甸Reco则明显降低14.0%且持续处于较低水平(图8b)。此外, 干旱期间温性荒漠草原ET升高了50.8%, 显著高于干旱前及其他两种草地类型, 而山地草甸的ET在干旱后未能恢复(图8d)。

3 讨论

3.1 不同草地类型共同敏感参数: K, FTG, g_{smax} 和 SLA1

对不同草地类型进行敏感性分析表明, 3种草地类型碳/水通量对参数K, FTG, g_{smax} 和 SLA1均敏感。K与光密切相关, 草地通过光合作用可以接

收到更多的光合有效辐射并固定更多的 CO_2 。SLA1可以通过控制叶片的生长状态来影响碳通量的输出。 CO_2 通过光合作用进入生物圈, 并通过呼吸作用返回大气, 这两个生理过程对生态系统的碳循环至关重要^[32]。FTG是3种草地类型的高敏感参数, 这可能是由于植物的生长发育阶段对碳/水通量具有根本性的调控作用, 关系到植物在不同生长阶段的物质分配和能量利用, 无论是温性荒漠草原、典型草原还是山地草甸, 植物的生长节律都是影响碳/水循环的关键因素。

模型中影响生态系统碳/水通量的主要生理生态参数是影响光合作用和呼吸作用的相关参数, 然而, 它们各自响应的最大敏感性参数因环境、植被类型和其他因素而异。例如Yang等^[33]基于Biome-

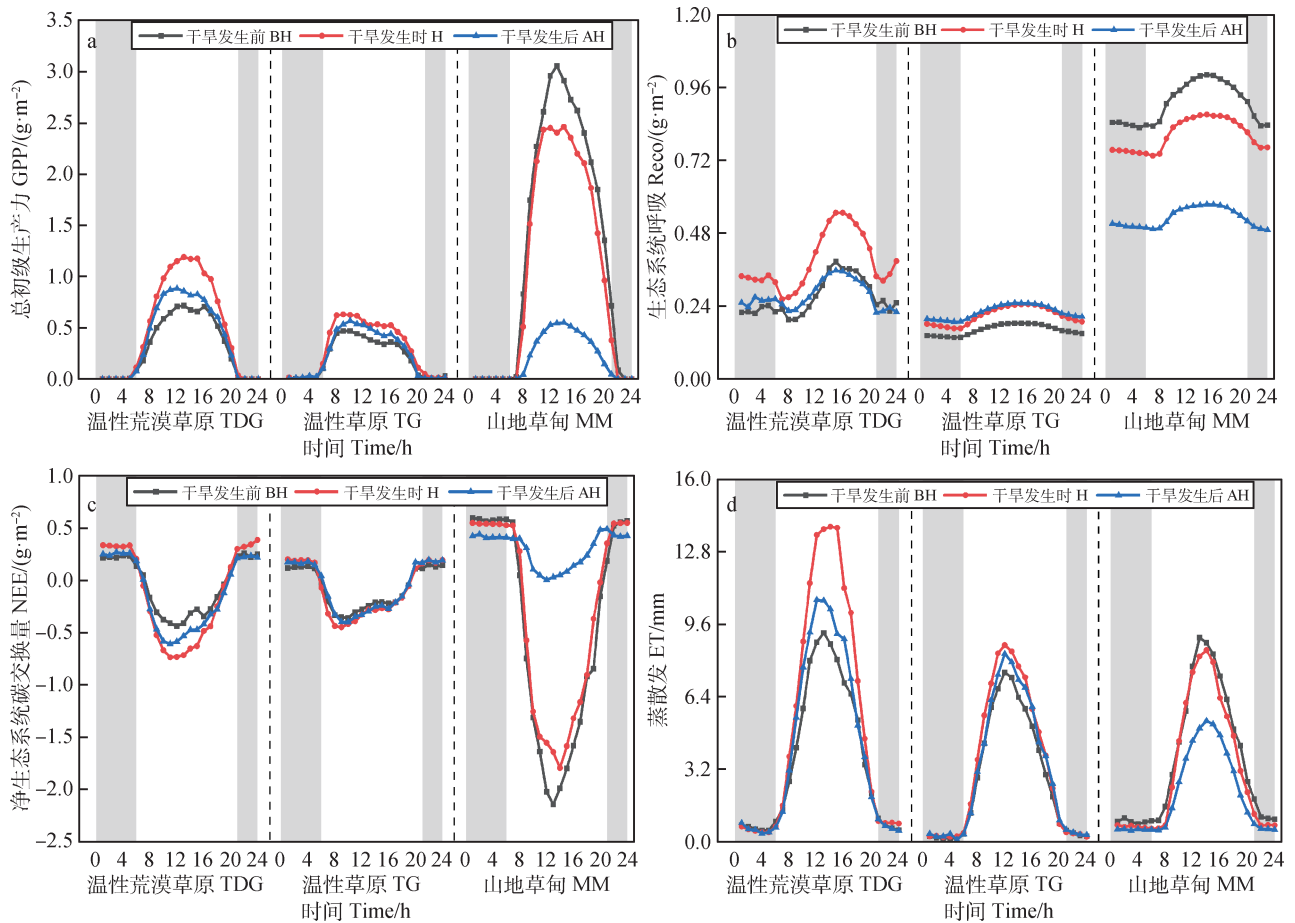


图8 温性荒漠草原、典型草原、山地草甸干旱阶段碳/水通量变化

Fig. 8 Changes in carbon/water fluxes during drought stages in temperate desert grasslands, typical grasslands, and mountain meadows

注: BH为干旱发生前7天该时段平均值, H为干旱发生时该时段平均值, AH为干旱后该时段平均值, 虚线为分割不同草地类型的辅助线, 阴影表示夜间
Note: BH stands for mean value of the period 7 days before the drought, H stands for mean value of the period during the drought, AH stands for mean value of the period after the drought, dotted line is an auxiliary line dividing the different grass types, and shading indicates nighttime

BGCMuSo模型对天然橡胶林和橡胶种植园碳通量进行敏感性分析发现,天然橡胶林碳通量关键参数为SLA1和K,橡胶种植园的碳通量主要受每天氮维持呼吸量 MR_{pern} 的影响。Zhang等^[34]用Biome-BGC模型确定了高山草甸NEE的关键敏感参数为 $C:N_{leaf}$, SLA1, K等。You等^[35]用Biome-BGC模型确定了高寒草原GPP的关键敏感参数主要为 $C:N_{fr}$, $C:N_{leaf}$, $C:N_{lit}$ 等。上述研究也表明,与森林生态系统相比,草地生态系统的敏感参数通常更集中于反映植物光合生理与凋落物分解过程的参数。本研究发现,温性荒漠草原碳/水通量关键敏感参数为K, FTG, SLA1等,典型草原碳/水通量关键敏感参数为 L_{cel} , FR_{lab} , K, SLA1等,山地草甸碳/水通量关键敏感参数为FLNR, FTG, $nfix$, K, FTG等,体现了不同草地类型间水通量调控机制的差异。造成这种差异的原因可能在于不同草地类型在土壤水分利用策略、植被根系分布以及蒸腾速率等方面存在显著差异,

进而导致其对特定生理参数的敏感性不同。未来研究应进一步探究这些参数对不同草地生态系统碳/水循环的耦合作用,以提升模型模拟精度。

3.2 参数优化后的模型对碳/水通量模拟效果提升明显

本研究基于涡度相关数据对Biome-BGCMuSo模型进行了优化,结果显示,优化后的模型在模拟温性荒漠草原的GPP和ET、典型草原和山地草甸的GPP和Reco时,其趋势和数值均与观测值较为接近。然而,在生长季,模型模拟的温性荒漠草原Reco与观测值之间存在偏差,这可能与模型对土壤呼吸的模拟不足有关,Mao等和Aguilos等^[36-37]基于Biome-BGC模型在森林生态系统碳通量研究中也指出,呼吸算法的固有缺陷或对土壤温度模拟的过度简化,是导致此类偏差的主要原因。此外,模型对3种草地NEE的模拟精度提升不明显,这可能与碳/水过程复杂的耦合机制有关,同时气候变暖与

人类活动等外部因素也增加了模拟的难度^[38]。

水通量方面,可能由于模型中土壤水分平衡模块表达不够准确^[39],部分站点ET模拟结果仍然不理想。叶面积指数(Leaf area index, LAI)是模型中与光合作用、呼吸作用和蒸散等重要生理生态过程模拟密切相关的关键状态变量,其模拟的准确性直接决定了这些核心生理生态过程模拟的可靠性,进而影响ET模拟结果。因此,对模型中LAI的模拟过程进行改进,有望显著提升ET的模拟精度^[40]。尽管本研究结合涡度数据对Biome-BGCMuSo模型进行了优化,但部分敏感性参数缺乏实测数据,且天然草地类型多样,模拟过程复杂。因此,未来研究需要结合更多观测数据,如遥感LAI产品数据等对模型参数进行更全面的校正,并针对不同草地植被类型构建更合理的输入参数集^[41]。

通过Biome-BGCMuSo模型对不同草地生态系统碳/水通量的模拟,旨在验证其在干旱-半干旱区草地的适用性,识别关键参数,并将其拓展至更大尺度的同类生态系统的参数优化。研究结果可为区域尺度模型的验证、模拟与应用提供科学依据与研究基础,未来应深入探索以栅格化多源时空数据作为模型输入,并将站点尺度的参数优化结果推广至区域模型应用。

3.3 不同草地类型碳/水通量对极端气候事件的响应不同

持续高温加速蒸散速率,导致土壤水分快速流失,不仅降低了ET,也抑制了草地的碳通量。本研究得出,热浪期间,高温热胁迫致气孔关闭、光合减弱,温性荒漠草原和山地草甸碳通量均下降显著,而典型草原碳通量和ET受热浪影响不显著。热浪会显著改变草地生态系统的热量和水分条件,这种瞬时影响更剧烈,但是影响的持续时间仅限于热浪发生时及热浪后的一段时间^[29]。相关研究显示,热浪过后,若水分条件充足,植物生长能够迅速恢复,热浪对光合作用的负面影响就相对较小^[42-44]。此外,温性荒漠草原和典型草原的碳通量在热浪前后差异不显著,表明二者在热浪事件后能够快速恢复,可能是因为这两类草原植被耐旱性较强,对维持碳通量稳定起到了重要作用^[45]。

极端降雨事件提高了草地的碳/水通量,山地草甸Reco表现尤为显著,短期内可显著促进其植物呼吸。然而,降雨后不同草地类型的碳/水通量恢

复情况存在差异,这种差异可能与植物生长响应及土壤湿度变化密切相关。极端降雨对草地碳平衡的主要调节作用机制是刺激生态系统的呼吸作用,且更显著的呼吸作用刺激与植物生物量积累相关,这可能有助于根际土壤群落的快速恢复^[46]。值得注意的是,仅山地草甸的ET在降雨后能恢复至降雨前水平,这表明极端降雨对温性荒漠草原和典型草原可能产生更长期的影响。不同草地类型对极端降雨的响应差异显著,其恢复过程受植被类型、土壤湿度和微气候条件的综合影响,反映出不同草地类型的适应能力和生态弹性差异。

干旱事件对山地草甸影响较大,干旱结束后碳/水通量短期内均未恢复,该类型草地植被耐旱性较低,干旱事件引发的水分胁迫降低了植被叶气孔导度^[47],进而导致光合速率和蒸腾速率下降。相反的,温性荒漠草原碳/水通量在干旱发生时不降反升,表现了其对干旱的较强适应性,在短期干旱情况下,地下水补给上升有助于缓解干旱胁迫,进而实现植物生长的部分补偿^[48]。随着干旱过后水分条件的改善,干早期积累的呼吸底物促使微生物群落迅速恢复^[49],表现为土壤呼吸强度显著增加。在蒸散方面,山地草甸ET在干旱发生后未能快速恢复到干旱前水平,可能与干旱损伤了植被结构及功能有关^[50-51],这限制了ET恢复到干旱前水平。

本研究结果揭示了草地碳/水通量对不同极端事件的响应差异,不仅为Biome-BGCMuSo模型在不同草地生态系统中的应用提供了植被光合、碳分配参数等方面的优化依据,同时也验证了模型在复杂气候事件情景下的预测能力,具有一定的模型方法学意义,但在极端气候事件的定义上有一定的局限性,未来研究仍需结合多种气候指标与生物响应阈值,以更精准地界定极端气候事件。

4 结论

本研究基于Biome-BGCMuSo模型,对3种不同草地的碳/水通量开展参数敏感性分析与优化,提升了模型模拟效果,并探讨了极端气候事件的影响。结果表明:(1)模型参数K,SLA1,FTG和 g_{max} 对3类草地碳/水通量模拟均表现为高敏感;(2)优化后模型对GPP和Reco的模拟精度显著提升,NEE有所改善,但ET仍需改进;(3)热浪期间,3种草地仍为碳汇,温性荒漠草原和山地草甸日间碳汇减弱较明显。

极端降雨提升了3种草地GPP, Reco和ET。干旱事件使得温性荒漠草原碳汇明显增强。该研究结果将为深入理解干旱-半干旱区不同水分胁迫下的草地生态系统碳/水循环提供一定的理论支持。

参考文献

- [1] ZHANG K, WANG Y, MAMTIMIN A, et al. Variation characteristics and influencing mechanisms of CO₂ flux from grassland ecosystem in the Central Tianshan Mountains, China[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113069
- [2] FANG J Y, YU G R, LIU L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020
- [3] LIU X W, ZHANG R P, GUO J, et al. Analysis of the spatiotemporal dynamics of grassland carbon sinks in Xinjiang via the improved CASA model[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113062
- [4] 邸乐. 宛川河流域不同生态系统碳/水通量变化特征及其影响因素的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022: 1-6
- DI L. Study on variation characteristic and influencing factors of carbon and water flux in different ecosystems of wanchuan river basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022: 1-6
- [5] NETSIANDA A, MHANGARA P. Aboveground biomass estimation in a grassland ecosystem using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, 197(2): 138
- [6] WANG Y Y, XIAO J F, MA Y M, et al. Carbon fluxes and environmental controls across different alpine grassland types on the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 311: 108694
- [7] SU T C, WANG Y B, YOU C H, et al. Effects of drought on optimum temperature of carbon fluxes in temperate grasslands[J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(12): 124099
- [8] DHAKAL K, KAKANI V G, WAGLE P, et al. Regional switchgrass carbon sequestration estimates from high-frequency eddy covariance and Mesonet observations[J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2023, 6(1): e20328
- [9] BALDOCCHI D D, HINCKS B B, MEYERS T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331-1340
- [10] 杨倩, 朱小华, 欧阳光洲, 等. 基于CLM5.0的内蒙古呼伦贝尔草地生产力模拟参数优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 139-148
- YANG Q, ZHU X H, OUYANG G Z, et al. Optimization of the simulated parameters of grassland productivity using CLM5.0 in Hulunbuir of Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(6): 139-148
- [11] 刘欢欢, 陈印, 刘悦, 等. 基于随机森林模型的黄土高原草地净初级生产力时空格局及未来演变趋势模拟[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(1): 123-131
- LIU H H, CHEN Y, LIU Y, et al. Simulation of spatial pattern and future trends of grassland net primary productivity in the Loess Plateau based on random forest model[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(1): 123-131
- [12] FANG M Z, LIU W, ZHANG J Y, et al. Quantitative evaluation of the applicability of classical forest ecosystem carbon cycle models in China: a case study of the biome-BGC model[J]. *Forests*, 2024, 15(9): 1609
- [13] POWLSON D S, SMITH P, SMITH J U. Evaluation of soil organic matter models: using existing long-term datasets[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996: 283-291
- [14] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls[J]. *Earth Interactions*, 2000, 4(3): 1-85
- [15] LIU J, CHEN J M, CIHLAR J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 158-175
- [16] 袁晨光, 宋艳华, 田梦, 等. 基于Century模型的麦玉两熟农田土壤固碳潜力研究——以河南省襄城县为例[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(35): 70-75
- YUAN C G, SONG Y H, TIAN M, et al. Study on soil carbon sequestration potential of wheat and maize double-cropping farmland based on century model—a case study of Xiangcheng County, Henan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(35): 70-75
- [17] 吴安云, 李湘凌, 赵燕, 等. 基于CENTURY模型的淮南市农田土壤有机碳动态模拟[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(10): 1305-1313
- WU A Y, LI X L, ZHAO Y, et al. Simulation of soil organic carbon dynamics in farmland in Huainan City based on CENTURY model[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2024, 47(10): 1305-1313
- [18] XING X L, WU M S, ZHU H J, et al. Optimized gross primary productivity over the croplands within the BEPS particle filtering data assimilation system (BEPS_PF v1. 0)[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2025, 17(1): e2024MS004412
- [19] SUN Q L, LI B L. Developing the biome-BGC model to estimate net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[C]//2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). IEEE, 2016: 334-337
- [20] HIDY D, BARCZA Z, HOLLOS R, et al. User's Guide for Biome-BGCMuSo 6. 2[J]. Budapest: ELTE, 2021: 2158-2165
- [21] 蒋丽, 祝廷成, 马略耕, 等. 松嫩草地碳和水通量对全球变化的响应[J]. *科技导报*, 2011, 29(6): 35-42
- JIANG L, ZHU T C, MA L G, et al. Responses of ecosystem's carbon and water fluxes to global change on the Songnen steppe[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(6): 35-42
- [22] WANG T H, WANG X F, ZHANG Q, et al. Effects of extreme temperature events on carbon fluxes in different ecosystems in the Heihe River Basin, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 362: 110380
- [23] CHAI H, MA J Y, ZHANG J W, et al. Nonlinear responses of ecosystem carbon fluxes to precipitation change in a semiarid grassland[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1519879
- [24] ZHAO H C, JIA G S, WANG H S, et al. Seasonal and interannual variations in carbon fluxes in East Asia semi-arid grasslands[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 1128-1138
- [25] JOHNSTON S E, GUNAWARDANA P V S L, ROOD S B, et al. Multidecadal trends in organic carbon flux through a grassland river network shaped by human controls and climatic cycles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(4): e2021GL096885
- [26] 李英. 生态过程模型参数敏感性的时空异质性分析——以Biome-BGC模型为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 14-16

- LI Y. Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: The BIOME-BGC model as an example[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018:14-16
- [27] 李一哲, 张廷龙, 刘秋雨, 等. 生态过程模型敏感参数最优值的时空异质性分析——以 BIOME-BGC 模型为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1):84-92
- LI Y Z, ZHANG T L, LIU Q Y, et al. Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: The BIOME-BGC model as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1):84-92
- [28] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2):80-91
- [29] 曲鲁平. 热浪对中国北方草地生态系统碳通量的影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016:26-27
- QU L P. Heat waves effect on grassland ecosystem carbon flux in north China[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2016:26-27
- [30] CHOI N, LEE M I, CHA D H, et al. Decadal changes in the interannual variability of heat waves in East Asia caused by atmospheric teleconnection changes[J]. Journal of Climate, 2020, 33(4):1505-1522
- [31] 张秋锦, 黄一民, 郝丽婷, 等. 基于百分位阈值法的洞庭湖流域高温热浪时空特征[J]. 气象与环境学报, 2025, 41(1):66-73
- ZHANG Q J, HUANG Y M, HAO L T, et al. Spatiotemporal characteristics of high temperature and heat wave in Dongting Lake Basin based on percentile threshold method[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2025, 41(1):66-73
- [32] WARING R H, RUNNING S W. Forest ecosystems: Analysis at multiple scales[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007:1-16
- [33] YANG F, ZHANG L, YAN M, et al. Carbon flux modeling with the calibrated biome-BGCMuSo in China's tropical forests: natural and rubber-planted forests[J]. Forests, 2025, 16(4):661
- [34] ZHANG M Y, MA Y J, CHEN P, et al. Growing-season carbon budget of alpine meadow ecosystem in the Qinghai Lake Basin: a continued carbon sink through this century according to the Biome-BGC model[J]. Carbon Balance and Management, 2023, 18(1):25
- [35] YOU Y F, WANG S Y, MA Y X, et al. Improved modeling of gross primary productivity of alpine grasslands on the Tibetan Plateau using the biome-BGC model[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11):1287
- [36] MAO F J, LI P H, ZHOU G M, et al. Development of the BIOME-BGC model for the simulation of managed Moso bamboo forest ecosystems[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 172:29-39
- [37] AGUILOS M, TAKAGI K, LIANG N S, et al. Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 197:26-39
- [38] YANG Y H, FANG J Y, MA W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s[J]. Global Change Biology, 2010, 16(11):3036-3047
- [39] 张廷龙, 孙睿, 胡波, 等. 改进 Biome-BGC 模型模拟哈佛森林地区水、碳通量[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9):2099-2106
- ZHANG T L, SUN R, HU B, et al. Simulation of water and carbon fluxes in Harvard forest area by using improved Biome-BGC model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9):2099-2106
- [40] LIU Q Y, ZHANG T L, DU M X, et al. A better carbon-water flux simulation in multiple vegetation types by data assimilation[J]. Forest Ecosystems, 2022, 9:100013
- [41] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 不同草地类型 WOFOST 模型参数敏感性分析[J]. 草业学报, 2022, 31(5):13-25
- QIN G X, WU J, LI C B, et al. Sensitivity analysis of WOFOST model crop parameters in different grassland types[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(5):13-25
- [42] BRILLI F, HÖRTNAGL L, HAMMERLE A, et al. Leaf and ecosystem response to soil water availability in mountain grasslands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12):1731-1740
- [43] SCHMITT M, BAHN M, WOHLFAHRT G, et al. Land use affects the net ecosystem CO₂ exchange and its components in mountain grasslands[J]. Biogeosciences, 2010, 7(8):2297-2309
- [44] DE BOECK H J, DREESSEN F E, JANSSENS I A, et al. Climatic characteristics of heat waves and their simulation in plant experiments[J]. Global Change Biology, 2010, 16(7):1992-2000
- [45] HOOVER D L, KNAPP A K, SMITH M D. Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes[J]. Ecology, 2014, 95(9):2646-2656
- [46] ARCA V, POWER S A, DELGADO-BAQUERIZO M, et al. Seasonal effects of altered precipitation regimes on ecosystem-level CO₂ fluxes and their drivers in a grassland from Eastern Australia[J]. Plant and Soil, 2021, 460(1):435-451
- [47] 王碧霞, 曾永海, 王大勇, 等. 叶片气孔分布及生理特征对环境胁迫的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2):122-126, 131
- WANG B X, ZENG Y H, WANG D Y, et al. Responses of leaf stomata to environmental stresses in distribution and physiological characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2):122-126, 131
- [48] JIAO T, WILLIAMS C A, DE KAUFWE M G, et al. Patterns of post-drought recovery are strongly influenced by drought duration, frequency, post-drought wetness, and bioclimatic setting[J]. Global Change Biology, 2021, 27(19):4630-4643
- [49] WANG Z Y, SUN G, LUO P, et al. A study of soil-dynamics based on a simulated drought in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(5):833-844
- [50] LEI T J, PANG Z G, WANG X Y, et al. Drought and carbon cycling of grassland ecosystems under global change: a review[J]. Water, 2016, 8(10):460
- [51] ZAVALLONI C, GIELEN B, LEMMENS C M H M, et al. Does a warmer climate with frequent mild water shortages protect grassland communities against a prolonged drought? [J]. Plant and Soil, 2008, 308(1):119-130

(责任编辑 闵芝智)