

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.025 CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.025

陈鹭, 耿庆玲, 任海航. 基于Biome-BGC模型的黄土高原典型生态系统水分利用效率时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 253-266.

CHEN Lu, GENG Qingling, REN Haihang. Spatiotemporal variation in water use efficiency of typical ecosystems on the Loess Plateau based on Biome-BGC model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 253-266.

## 基于Biome-BGC模型的黄土高原典型生态系统 水分利用效率时空变化特征

陈鹭, 耿庆玲, 任海航

(郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450052)

**摘要:** [目的] 为明晰黄土高原典型生态系统碳水耦合特征, 揭示不同类型生态系统水分利用效率(WUE)年际、年内动态变化、空间格局及其差异。[方法] 结合多源遥感与通量数据, 基于优化改进的Biome-BGC模型, 模拟分析黄土高原退耕还林(草)工程实施以来(2000—2018年)森林、灌丛和草地3类典型生态系统WUE的时空演变特征。[结果] 1) 优化模型对各类型生态系统GPP和ET的模拟精度均有所提升, 尤以森林模拟精度最优( $R^2$ 分别为0.95、0.94), 但草地模拟不确定性相对较大( $R^2$ 分别为0.73、0.67)。2) 2000—2018年黄土高原GPP、ET和WUE均呈增加趋势, 森林与草地的WUE为显著增加(增速分别为5.38%、18.45%), 灌丛WUE则表现出下降趋势; 空间上, 黄土高原大部分地区(70.23%)WUE呈增加趋势, 但ET的显著增加区面积明显大于WUE和GPP, 且多集中在植被覆盖显著增加的区域。3) 3种类型生态系统WUE均表现出“双峰一谷”的年内变化特征, 峰值分别出现在5月和10月, 7月为低谷期, 且整个生长季各生态系统WUE和GPP均表现为森林>灌丛>草地, 灌丛ET在生长季初期和后期与森林ET相近甚至更高。[结论] 森林和草地相较灌丛更适宜作为黄土高原植被恢复的优先类型, 森林和草地WUE在过去植被恢复工程实施下呈增加趋势, 灌丛为下降趋势。研究结果为黄土高原地区生态恢复和碳水资源管理与调控提供有益参考。

**关键词:** 生态系统水分利用效率; 碳水通量; 时空变化; Biome-BGC模型; 黄土高原

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0253-14

### Spatiotemporal Variation in Water Use Efficiency of Typical Ecosystems on the Loess Plateau Based on Biome-BGC Model

CHEN Lu, GENG Qingling, REN Haihang

(School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the carbon-water coupling characteristics of typical ecosystems on the Loess Plateau and to reveal the interannual and intra-annual dynamics, spatial patterns, and differences in water use efficiency (WUE) across different ecosystem types. [Methods] By integrating multi-source remote sensing and flux data, an optimized Biome-BGC model was employed to simulate and analyze the spatiotemporal evolution characteristics of WUE in three typical ecosystems on the Loess Plateau (forest, shrubland, and grassland) from 2000 to 2018 following the implementation of the Grain for Green Program (GFGP). [Results] 1) The optimized model significantly improved simulation accuracy for gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration (ET) across all ecosystem types, with forests showing the highest accuracy ( $R^2=0.95$  for GPP;  $R^2=0.94$  for ET). Grasslands, however, exhibited relatively greater uncertainty in simulations ( $R^2=0.73$  for GPP;  $R^2=0.67$  for ET). 2) During 2000—2018, GPP, ET, and WUE all increased on the Loess Plateau. Notably, WUE in forests and grasslands increased significantly (growth rates of 5.38% and 18.45%, respectively), whereas WUE in shrublands declined. Spatially, the majority (70.23%) of the Loess Plateau showed increasing WUE, but the

收稿日期: 2025-06-12

修回日期: 2025-08-18

录用日期: 2025-09-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1308200); 国家自然科学基金项目(41801085); 河南省科技攻关项目(242102320232)

第一作者: 陈鹭(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统管理与评估研究。E-mail: cl\_1021@gs.zzu.edu.cn

通信作者: 耿庆玲(1988—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事生态遥感与植被恢复生态效应评估研究。E-mail: gq1403@zzu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

areas with significant increases in ET were much larger than those of WUE or GPP, predominantly located in the regions with markedly enhanced vegetation cover. 3) All three ecosystem types showed a double-peak and single-trough pattern of intra-annual variation in WUE, with peaks in May and October and a trough in July. During the entire growing season, both WUE and GPP across all ecosystem types followed the order: forest > shrubland > grassland. Notably, ET in shrublands approached or even exceeded that of forests during the early and late growing seasons. [Conclusion] Compared to shrublands, forests and grasslands are more suitable as the priority types for vegetation restoration on the Loess Plateau. With past vegetation restoration projects, WUE increased in forests and grasslands but declined in shrublands. These findings provide valuable insights for ecological restoration and carbon-water resource management and regulation on the Loess Plateau.

**Keywords:** ecosystem water use efficiency; carbon-water flux; spatiotemporal variation; Biome-BGC model; Loess Plateau

Received: 2025-06-12

Revised: 2025-08-18

Accepted: 2025-09-30

Online(www.cnki.net): 2025-11-11

黄土高原作为全球最大的生态工程实施区,自退耕还林(草)工程启动以来,植被覆盖率已从1999年的31.6%提升至2017年的65.2%<sup>[1]</sup>。该类大规模土地利用变化深刻改变区域碳水交换过程,并进一步影响区域的水分利用格局。水分利用效率(water use efficiency, WUE)作为表征生态系统碳水循环关系的关键指标,也是衡量生态系统响应气候及土地利用变化的重要指标<sup>[2]</sup>,通常被定义为生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)与总蒸散发量(evapotranspiration, ET)的比值<sup>[3-4]</sup>。在全球气候变化及黄土高原经历大规模土地利用变化背景下,明确各类型生态系统WUE的动态特征是优化黄土高原植被恢复策略,促进该区植被可持续生长的前提和基础。

目前,已有大量学者<sup>[5-6]</sup>从不同空间尺度开展生态系统水分利用效率及其时空变化特征研究。站点尺度上,通常利用生态系统的涡度相关通量监测技术;区域尺度上,则常基于多源GPP和ET产品<sup>[7-8]</sup>或利用遥感数据结合多种统计方法<sup>[9]</sup>开展不同区域WUE时空格局研究。但是,基于站点的通量观测数据通常时间尺度有限,区域尺度扩展困难;区域尺度研究多是对WUE整体特征分析,缺乏生态系统类型间的对比和差异化解析。实际上,WUE作为植物生理状态的关键度量指标,受陆地生态系统中植被自身的条件影响,不同类型的植被群落间WUE存在差异<sup>[10-11]</sup>,不同生态系统碳水耦合关系也会随温度、降水等气候因子<sup>[12]</sup>及物候等<sup>[13]</sup>发生变化。因此,WUE与碳水通量变化分析对于深入理解不同生态系统碳水耦合特征的差异,进一步优化植被恢复策略尤为重要。

从数据来源方面看,国内外学者<sup>[14-15]</sup>开展WUE的大范围区域尺度特征分析通常利用MODIS数据、GLASS产品等<sup>[16]</sup>长时间序列卫星遥感数据,但受时空分辨率影响,遥感数据通常难以捕捉生态系统的

异质性,使得WUE估算中存在较大不确定性,尤其在复杂地形的黄土高原地区更为明显,而对于衡量碳水交换关键过程及其控制机制的研究则通常依据ChinaFLUX, FLUXNET等通量观测数据集<sup>[17]</sup>,如DOU等<sup>[18]</sup>基于ChinaFLUX 2003—2020年的83个通量观测站点的实测数据表明,中国陆地生态系统的WUE存在显著的空间异质性。但是,目前通量观测数据存在站点分布不均,区域代表性有限等问题,使得模型模拟成为生态系统碳水通量与WUE分析的重要途径。目前国内外发展一系列陆地生态系统碳水循环研究的模型,包括Thornthwaite模型<sup>[19]</sup>、TEM等<sup>[20]</sup>经验模型,Biome-BGC<sup>[21]</sup>、BEPS等<sup>[22]</sup>生态过程模型及CASA模型等<sup>[23]</sup>遥感模型。其中,Biome-BGC模型是典型的陆地生态系统碳水循环生态过程模型,能够模拟日、月、年多个时间尺度的碳水通量<sup>[24]</sup>,也能实现在空间尺度上由单一植被类型到区域尺度的扩展<sup>[25]</sup>,是开展不同类型生态系统碳水循环研究的重要手段<sup>[26]</sup>。当前,黄土高原实测通量站点较为缺乏,难以满足WUE的区域化分析需求,有关黄土高原WUE的研究多在个别站点和部分典型植被<sup>[27-28]</sup>或典型区域<sup>[29]</sup>尺度展开且缺少WUE年内动态变化特征的认识,对于此类难以获取实地观测数据的区域,Biome-BGC模型为实现WUE的区域化模拟与年际、年内动态特征分析提供一种有效的实现途径。

本研究基于Biome-BGC模型,结合模型参数优化与改进,将其由点尺度扩展至区域尺度开展黄土高原典型生态系统WUE的模拟和时空变化分析,以全面认识和理解黄土高原各类型生态系统水分利用现状,并从不同时间尺度(如年、季节)解析生态系统WUE的动态变化特征,为未来进一步探究气候变化等对生态系统的影响提供科学支持。

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

黄土高原(33°48'~41°12'N,100°11'~114°56'E) 位于黄河流域中游,东至太行山以西、南抵秦岭以北、西起乌鞘岭、北抵长城,东西长约 1 000 km,南北宽约 750 km,总面积约 64 万 km<sup>2</sup>。地貌特征为典型的黄土地貌,地形破碎,沟壑纵横(图 1)。属于温带大陆性季风气候,年平均气温 9~12℃,年降水量 100~800 mm,降水量在时间和空间上差异显著,降水多集中在 6—9 月,季节分布不均使黄土高原成为我国水土流失最严重的地区,导致土地退化、削弱生态系统调节功能,恶化生态环境,制约经济发展。为治理黄土高原水土流失和生态环境问题,我国自 1999 年以来在陕西、甘肃为主的大部分地区开展退耕还林(草)的土地保护和恢复工程,通过增加耕地、荒山和荒地的还林还草,缓解水土流失、减轻洪涝灾害、保护生物多样性,同时改变黄土高原地区的土地利用状况和植被组成情况,形成以荒漠植被、C3 草地、作物、落叶阔叶灌木、温带落叶阔叶林、温带常绿针叶林等为主的植被类型。

## 1.2 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括基础地理数据、气象数据、土壤和植被数据及相关遥感数据(表 1)。其中,基础地理数据主要为 DEM 和各类矢量数据,来源于黄土高原科学数据中心及中国科学院资源环境科学与数据

中心;气象数据主要来源于国家青藏高原科学数据中心及国家地球系统科学数据中心(Science Data Center),主要包括日降水量、最高温度和最低温度数据,获取数据时间为 2000—2018 年。按照模型需求,将其处理为 TIFF 格式的逐日文件。土壤数据来源于中国土壤特征数据集,主要包含表层 0~30、30~100 cm 土壤沙粒、粉粒及黏粒百分比,数据集的分辨率为 1 km,数据格式为 TIFF,采用 ArcGIS 对数据进行投影变换和栅格计算,形成 0~100 cm 土层的土壤质地百分比数据;植被数据主要为中国植被功能型分类(PFTS)数据,数据类型为 GRID,空间分辨率为 1 km,对获取到的数据重采样至 0.1°,按照黄土高原区域主要生态系统类型重分类为森林、灌丛和草地 3 类。

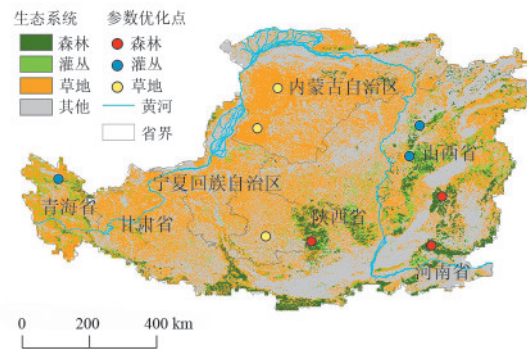


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

表 1 主要数据来源

Table 1 Main data sources

数据类型	数据	时间分辨率	空间分辨率	来源
高程数据	DEM 数据	—	1 km	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	降水数据	日	0.1°	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/">https://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/</a>
气象数据	温度数据	日	1 km	<a href="https://essd.copernicus.org/">https://essd.copernicus.org/</a>
	CO <sub>2</sub> 浓度数据	年	站点	美国的夏威夷莫纳罗亚气象台观测数据集
土壤数据	土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒)	—	1 km	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
植被数据	植被功能型数据	—	1 km	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
遥感数据	GPP MOD17A2 HGF、NIRv GPP、CMG GPP	—	500 m	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a>
	ET MOD16A2 GF、GPR ET、ETMonitor ET	—	500 m	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
通量数据	长白山、海北、内蒙古	30 min/月	站点	<a href="http://www.chinaflux.org/">http://www.chinaflux.org/</a>

GPP 遥感数据主要包括 MOD17A2 HGF、NIRv GPP 及基于改进光能利用率模型得到的 CMG GPP 产品;ET 遥感数据则包括 MOD16A2 GF、GPR ET 及基于多参数化、适用于不同土地覆盖类型的地表蒸散发遥感估算模型计算的 ETMonitor 数据集。考虑黄土高原地区缺乏通量观测站点的分布,本研究结合中国通量观测研究网(ChinaFlux)中可公开获取的森林、灌丛及草地生态系统 3 个通量观测站点(长白山、海北、内蒙古),获取各通量站逐月、逐日、逐 30 min 的通量观测数据及气象数据,具体包括净生态系

统碳交换量(net ecosystem exchange, NEE)、总生态系统呼吸(total ecosystem respiration, Re)、总生态系统碳交换量(gross ecosystem exchange, GEE)、潜热(latent heat, LE)和显热(sensible heat, SH)等,并通过以上通量参数计算得到 GPP 和 ET,最终用于 GPP 和 ET 遥感数据集的精度评估和优选。

## 1.3 研究方法

1.3.1 Biome-BGC 模型 Biome-BGC 模型是以日为时间步长,能够模拟不同类型生态系统、不同时间尺度(日、月、年)碳水通量等生理生态过程模型,模

型包含光合作用、蒸腾作用、呼吸作用(自养呼吸和异养呼吸)、分解作用及光合产物的分配等植物生长过程中的多种主要生理生态过程<sup>[30]</sup>,可实现对生态系统碳水耦合过程的模拟与综合管理研究,并可利用相关程序设计实现其空间化应用功能,进而为生态系统碳水耦合调控机制及区域效应分析提供支撑。本研究采用 Biome-BGC 模型 4.2 版本,并基于模型并行运算实现黄土高原生态系统 WUE 的区域化模拟研究。模型支持冷气候常绿针叶林、落叶针叶林、热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、C3 草地、C4 草地和灌木植被类型的通量模拟,驱动需要输入以日为步长的气象数据、初始化文件数据、植被生理参数等,模型的输出值包括总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、日蒸散量(ET)、植被蒸腾(Tr)和土壤蒸发(Es)等。Biome-BGC 模型共有 43 个生理生态参数,其中,部分参数用来描述站点基本情况及相关缺省值,如描述植被类型<sup>[6,31]</sup>。本研究主要对除去缺省参数的最大气孔导度、叶片碳氮比、比叶面积、冠层消光系数和冠层截留系数等其他 25 个参数进行优化。

模型运行过程包含自动初始化(Spinup)过程和常规模拟(Normal)2 个阶段。Spinup 模式旨在模拟生态系统在不受外界干扰下的稳定状态;Normal 模拟是以 Spinup 后生成的碳水状态作为初始化运行条件开展生态系统碳、水通量及其他状态分量的模拟。对于模型中不能通过直接观测得到的数据,如饱和水汽压差、短波辐射和日长等,由山地气候模型(MT-CLIM)模拟得到<sup>[32]</sup>,其输出结果可直接运用于 Biome-BGC 模型的运行中,在此基础上对模型进行敏感性分析和 PEST 参数优化试验(参数优化点位置见图 1),并通过优选出的 GPP 和 ET 遥感数据,结合决定系数(coefficient of determination,  $R^2$ )和均方根误差(root mean square error, RMSE)2 个统计指标进行模型的精度和适用性评价。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

式中: $y_i$ 为真实值; $\hat{y}_i$ 为预测值; $\bar{y}_i$ 为平均值; $m$ 为结果值的个数。

1.3.2 趋势分析 基于 Biome-BGC 模型模拟的黄土高原各类型生态系统碳水通量及 WUE 在 2000—2018 年的变化趋势分析,采用 Sen's Slope 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合的方法。Sen's Slope 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势分析方法<sup>[33]</sup>,被广泛用于生态水文、气象等相关要素的时间序列变化趋势分析,其具体计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i \times x_i) - \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n t_i \sum_{t=i}^n x_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \times \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (3)$$

式中:slope 为年际变化率; $n$ 为研究时段的年数,在本研究中为 19; $x_i$ 为自变量在第  $i$  年的值;slope > 0 表示该因子呈增长趋势,反之表示下降趋势。

M-K 检验是一种非参数统计检验方法,通常与 Sen's Slope 法相结合<sup>[33]</sup>,被广泛用于生态水文、气象等相关要素的时间序列变化趋势分析及显著性检验,其结果基于统计量  $Z$  值进行判断,计算公式为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:Var 为方差函数; $Z > 0$  为增加趋势, $Z < 0$  为减少趋势; $|Z| > 1.96$  时表示目标变量在 0.05 水平上具有显著性变化趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于 Biome-BGC 模型的碳水通量模拟及精度评价

基于各 GPP、ET 数据产品与各类型生态系统碳水通量观测数据的结果对比可以看出,对于森林生态系统(长白山站),3 种 GPP 数据与通量观测数据间的  $R^2$  均较高,其中 CMG GPP 数据与观测数据间的拟合精度最高, $R^2$  达到 0.95,且 RMSE 值最低;NIRv GPP 数据的精度次之, $R^2$  为 0.92,但其 RMSE 较高,MOD GPP 的精度最低, $R^2$  为 0.88,但其 RMSE 相对较低;对于灌丛生态系统(海北站),CMG GPP 数据的精度同样较高, $R^2$  为 0.94,但不同于森林生态系统,MOD GPP 数据对于灌丛生态系统的精度仅次于森林, $R^2$  为 0.93,且 RMSE 远低于 CMG GPP;对于草地生态系统(内蒙古站),各 GPP 数据的不确定性较大, $R^2$  最高也仅为 0.74,但仍以 CMG GPP 数据精度最高(图 2)。3 种 ET 数据集与各类型生态系统观测数据结果相比,表现最好的为 GPR ET 数据,其对森林、灌丛和草地生态系统的模拟精度分别为 0.95、0.90、0.68,均高于 MOD ET 和 ETMonitor ET 数据的精度,其中,MOD ET 数据的精度相较于其他 2 个数据精度最差,但各数据的精度均表现为森林高于灌丛高于草地(图 3)。

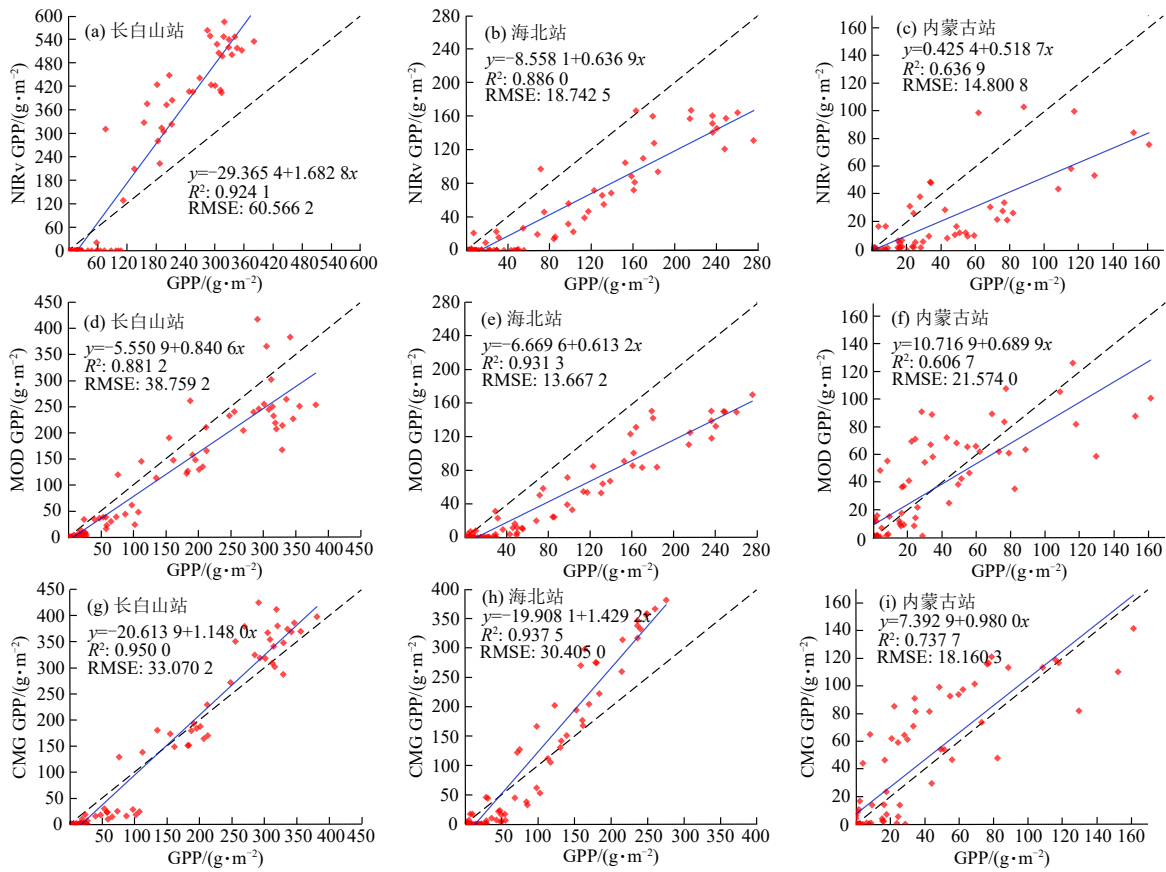


图 2 GPP 数据与通量观测数据在各类型生态系统中的对比

Fig.2 Comparison of GPP data and flux observation data across various ecosystem types

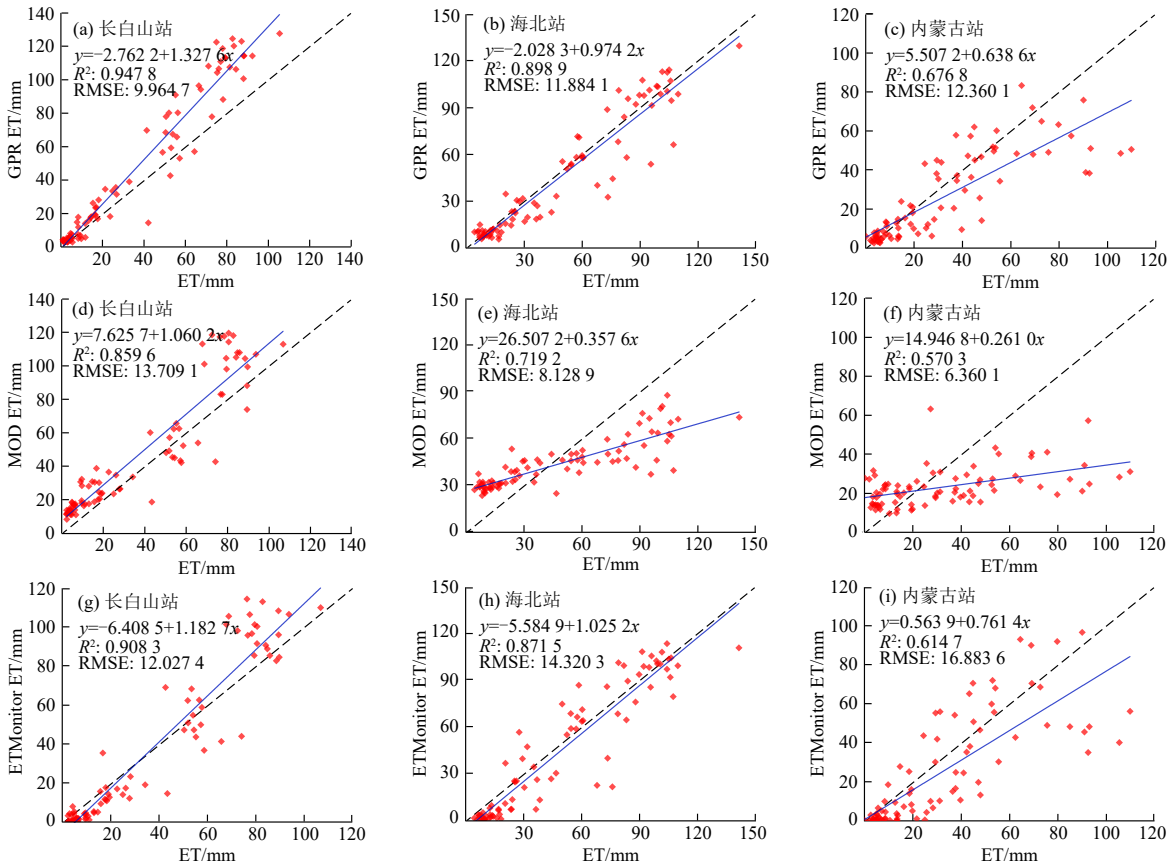


图 3 ET 数据与通量观测数据在各类型生态系统中的对比

Fig.3 Comparison of ET data and flux observation data across various ecosystem types

基于各 GPP、ET 数据的精度,以最优精度数据集作为衡量各类型生态系统碳水通量模拟结果的验证数据,结合 PEST 参数优化结果开展 Biome-BGC 模型模拟与精度验证,结果表明,模型优化后各类型生态系统 GPP 模拟精度均有所提升, $R^2$ 均在 0.85 以上,且 RMSE 均有下降,并仍以森林生态系统的模拟精度最高( $R^2$ 达 0.95),灌丛次之,草地最低(图 4);同时,优化后 Biome-BGC 模型对各类型生态系统 ET 的模拟精度也均在 0.85 以上。其中,

森林和灌丛 ET 模拟精度相近,草地相较于二者相对较低(图 5),且模型对于月尺度 GPP 和 ET 的模拟精度也均有明显提升。模型优化前 GPP 总体偏低,优化后则更接近观测值,尤其是生长季(5—9 月)GPP 较高时,优化后偏差明显减少。同时,优化后模型模拟的 ET 与验证数据的吻合度更高,偏差明显降低。表明 PEST 参数优化效果明显,优化后的参数设定能显著提高 Biome-BGC 模型的模拟精度。

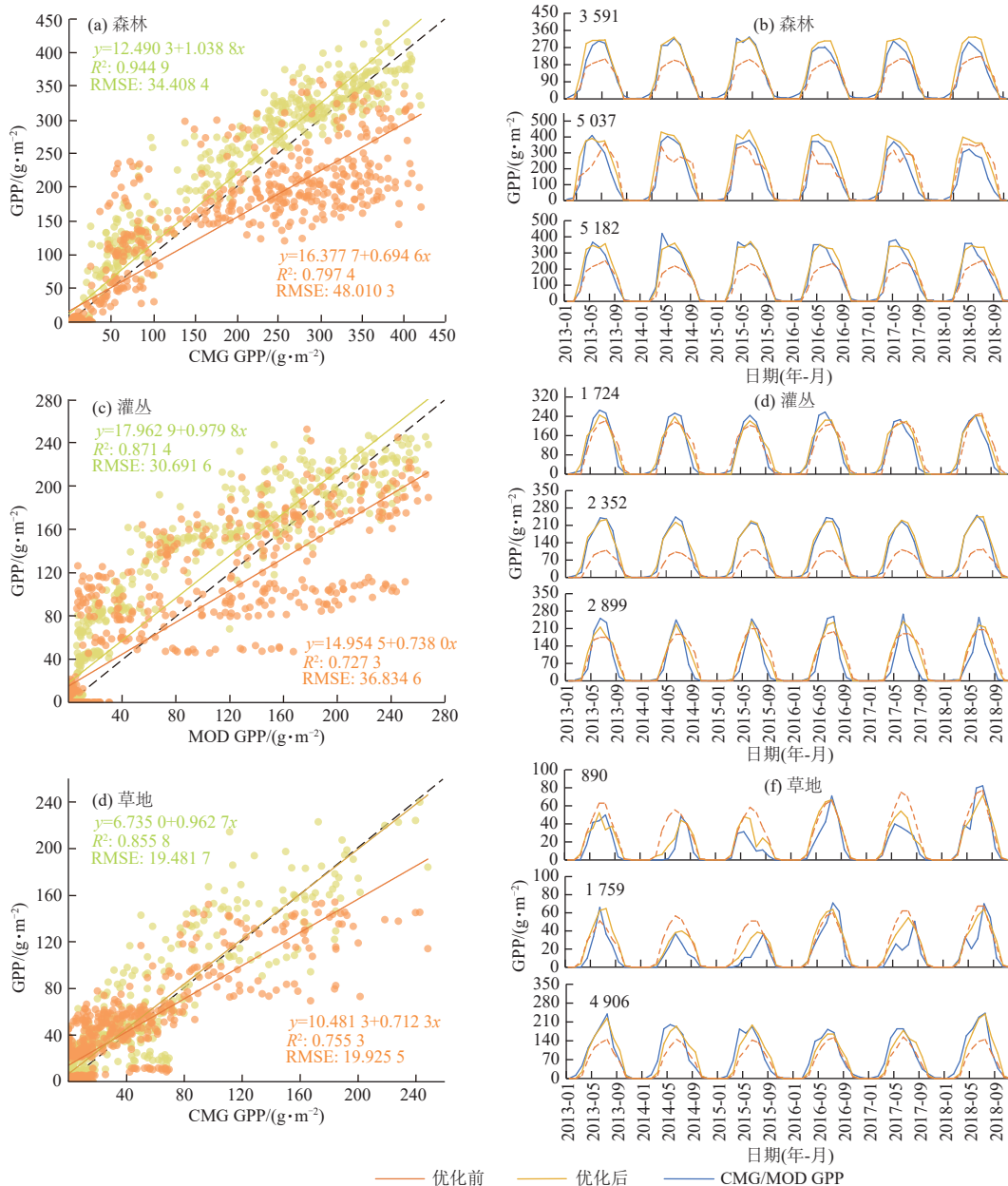


图 4 参数优化前后 Biome-BGC 模型 GPP 模拟结果的对比验证

Fig.4 Comparison and validation of GPP simulation results of Biome-BGC model before and after parameter optimization

### 2.2 黄土高原典型生态系统碳水通量及 WUE 年际变化特征

利用参数优化后的 Biome-BGC 模型对研究区 2000—2018 年 3 种典型生态系统的 GPP 和 ET 进行

区域模拟及 WUE 量化,结果显示,GPP、ET 和 WUE 在空间上均表现为由东南向西北递减的格局(图 6)。同时,各类型生态系统的 WUE、GPP 和 ET 均表现为森林>灌丛>草地。

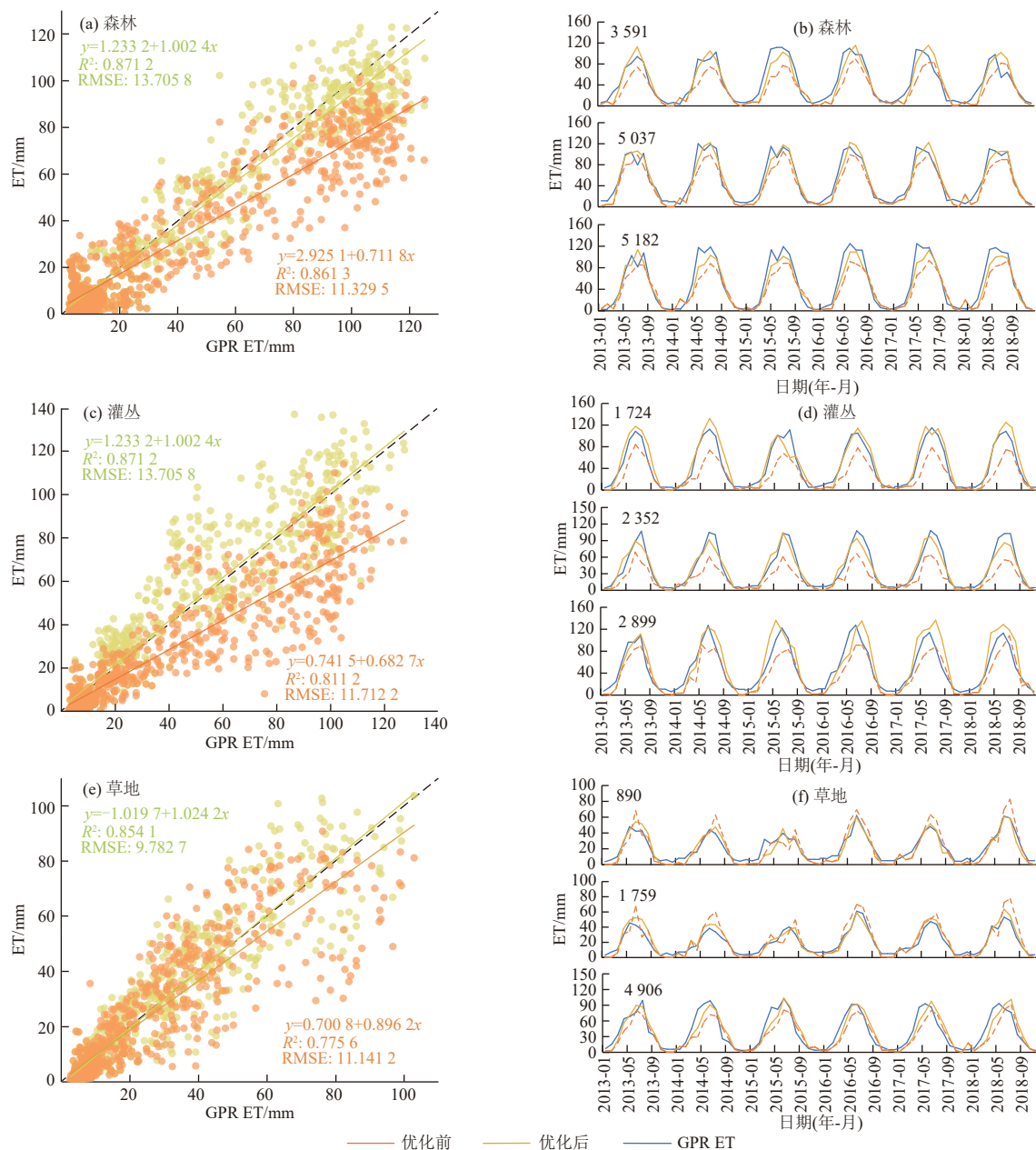


图 5 参数优化前后 Biome-BGC 模型 ET 模拟结果的对比验证

Fig.5 Comparison and validation of ET simulation results of Biome-BGC model before and after parameter optimization

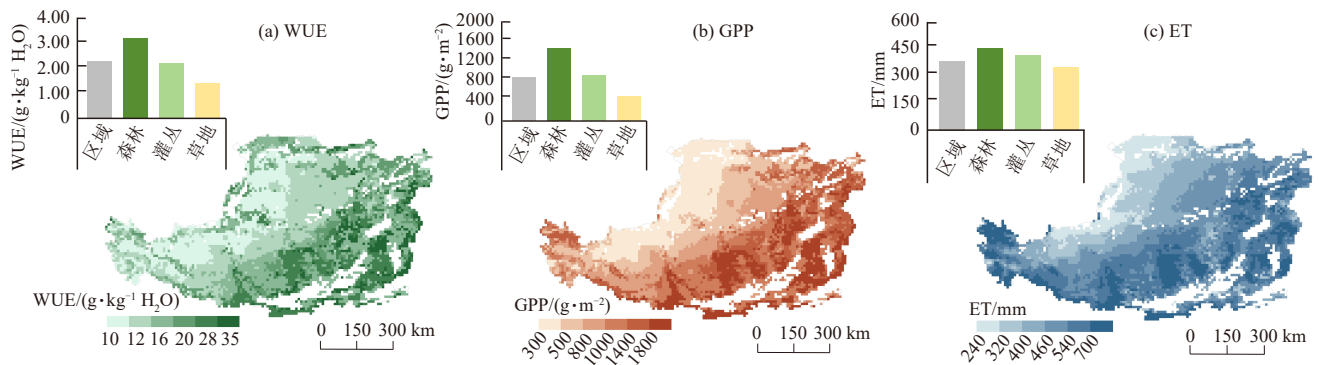


图 6 2000—2018 年黄土高原 WUE、GPP 和 ET 空间分布格局

Fig.6 Spatial distribution patterns of WUE, GPP, and ET on the Loess Plateau from 2000 to 2018

时间趋势上,黄土高原区域 GPP、ET 和 WUE 度的波动(图 7)。其中, WUE 在 2000—2018 年从 2.19 增长至 2.38 g/kg H<sub>2</sub>O(以 C 计,下同),增长

率为 8.45%，最小值发生在 2003 年，为 2.07 g/kg H<sub>2</sub>O，最大值出现在 2018 年，为 2.38 g/kgH<sub>2</sub>O；GPP 由 2000 年的 826.85 增长至 2018 年的 989.85 g/m<sup>2</sup>，增长率 19.71%，持续增加趋势较为明显；区域年

ET 由 376.41 mm 增长至 415.51 mm，增长率为 10.38%，最大值发生在 2018 年，为 415.51 mm，最小值为 2001 年的 340.89 mm，最大最小值相差 21.89%。

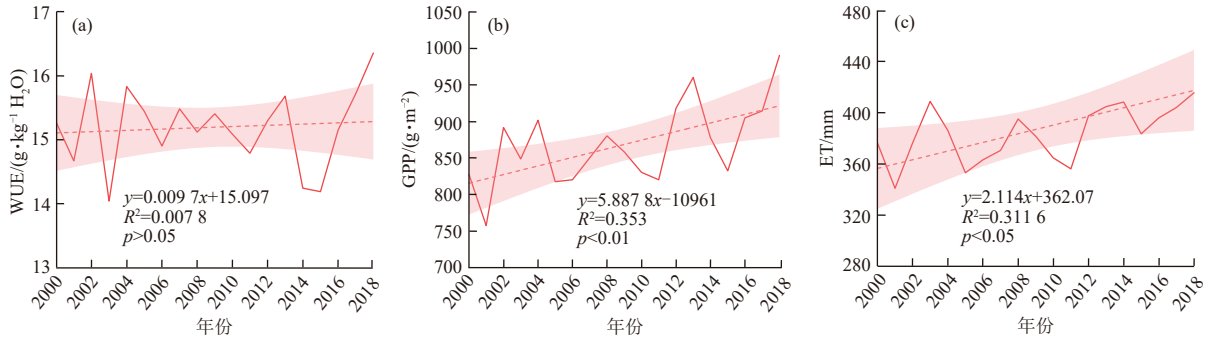


图 7 2000—2018 年黄土高原 WUE、GPP 和 ET 时间变化趋势

Fig.7 Temporal variation trends of WUE, GPP, and ET on the Loess Plateau from 2000 to 2018

对于不同类型生态系统，GPP 和 ET 在 2000—2018 年均呈显著增加趋势(图 8)。其中，草地生态系统 GPP 和 ET 增加幅度均最高，19 a 增长百分比分别为 36.31% 和 15.08%，森林和灌丛的 GPP 增长百分比分别为 8.99%、14.8%，ET 增长百分比分别为

3.47%、7.57%，森林生态系统 ET 增加比例相对较低。对于 WUE，3 类生态系统变化趋势并不一致，灌丛 WUE 在 2000—2018 年呈下降趋势，而森林和草地 WUE 为增加趋势，增加幅度分别为 5.38% 和 18.45%，但 3 类生态系统 WUE 变化趋势均不显著。

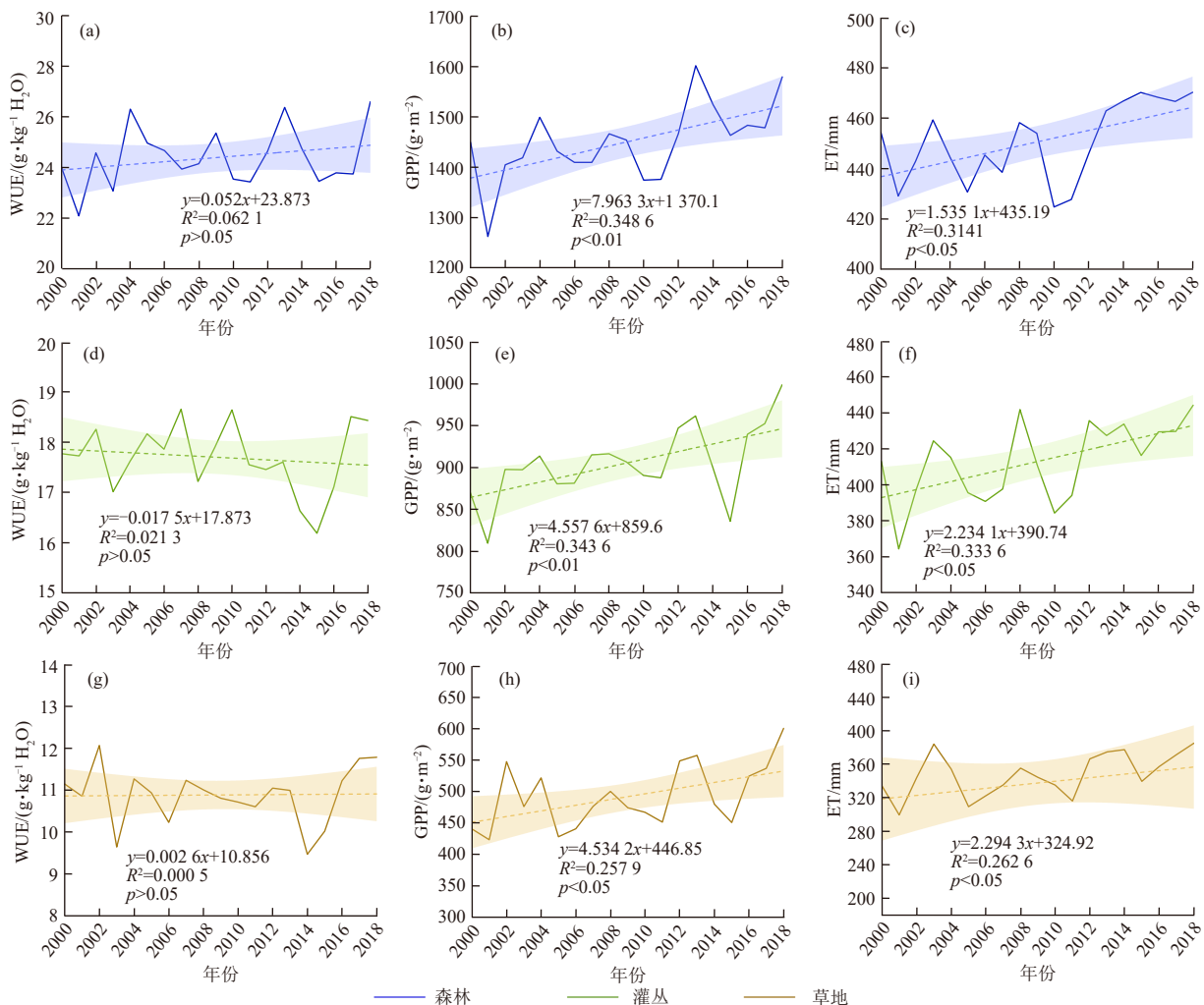


图 8 2000—2018 年黄土高原 3 种典型生态系统类型 WUE、GPP 和 ET 时间变化特征

Fig.8 Temporal variation characteristics of WUE, GPP, and ET for three typical ecosystem types on the Loess Plateau from 2000 to 2018

图 9 为 2000—2018 年黄土高原 WUE、GPP 和 ET 变化趋势的空间格局。黄土高原大部分区域的 WUE、GPP 和 ET 呈增加趋势,但显著增加区面积比例相对较低,分别为 5.14%、14.84%、31.18%。其中, WUE 和 GPP 的显著增加区主要位于吕梁山脉的森林灌丛区,而 ET 的显著增加区则主要位于黄土高原中部退耕还林(草)工程实施的核心区。WUE 下降的地区主要位于黄土高原西北地区的草地及荒漠草地,并以不显著下降为主。GPP 和 ET 下降的区域相对较

低,均不足 10%。对于各类型生态系统、WUE、GPP 和 ET 的变化均以不显著增加为主,但不同类型生态系统变化有所差异。对比 WUE、GPP 和 ET 结果显示, WUE 的下降区在森林、灌丛、草地各类型生态系统中的占比均相对较高,分别为 6.12%、7.29%、15.81%, 而 GPP 和 ET 的下降区面积占比相对较低,分别仅占 0.73%、0.64%、4.68% 及 0.98%、1.90%、3.62%。GPP 的显著增加以森林为主,其次为灌丛和草地,而 ET 的显著增加以草地为主,其次为森林和灌丛。

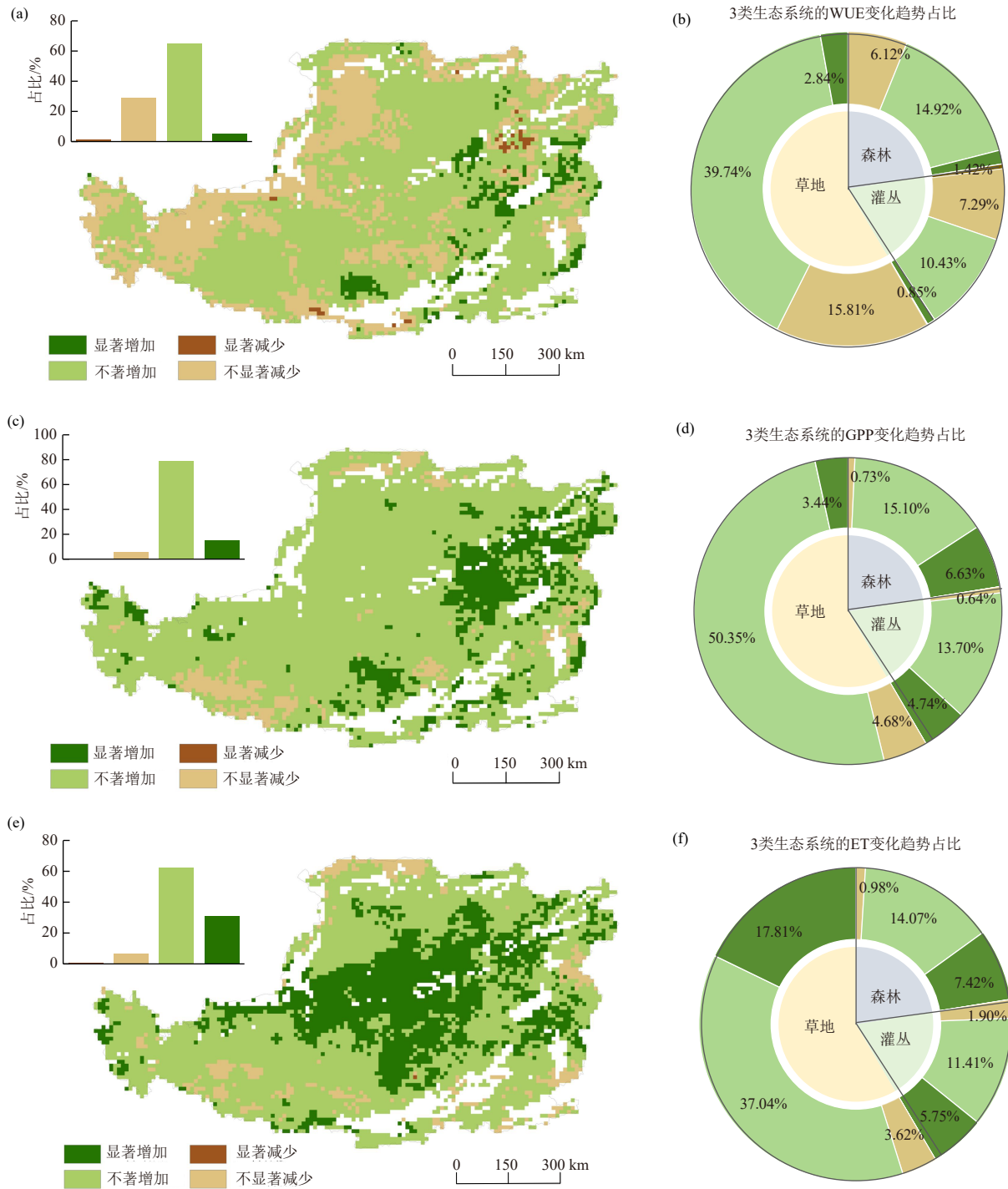


图 9 2000—2018 年黄土高原 3 种典型生态系统 WUE、GPP 和 ET 空间变化特征

Fig.9 Spatial variation characteristics of WUE, GPP, and ET for three typical ecosystem types on the Loess Plateau from 2000 to 2018

### 2.3 黄土高原典型生态系统碳水通量及 WUE 年内变化特征

黄土高原 3 类典型生态系统的 WUE 在年内变化特征较为相似,均呈“双峰”形曲线特征,峰值分别出现在 5、10 月,7 月则为 WUE 的谷值,且在生长季后期(10 月)的峰值高于生长季初期(5 月);同时,整个生长季各类型生态系统 WUE 均表现为森林 > 灌丛 > 草地(图 10)。GPP 和 ET 年内变化则表现为先增加后下降的

变化特征,但草地 GPP 的年内变化特征与森林和灌丛不同。草地 GPP 5—8 月呈持续增加态势,最大值出现在 8 月,而森林和灌丛 GPP 最大值均在 7 月,且森林 GPP 在 8 月下降较为明显,比 7 月降低 6.64%;对于 ET 而言,3 类生态系统变化特征较为一致,均在 7 月达到最大,且 5—8 月,森林 ET > 灌丛,而 5 月之前灌丛 ET 与森林较为接近,8 月之后,灌丛 ET 则高于森林,草地的 ET 在整个生长季始终低于森林和灌丛。

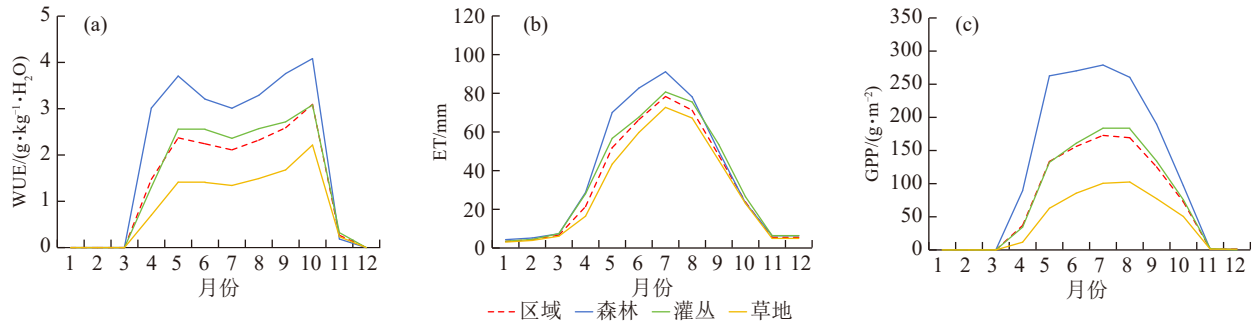


图 10 黄土高原各类型生态系统 WUE、GPP 和 ET 的年内变化特征

Fig.10 Intra-annual variation characteristics of WUE, GPP, and ET for various ecosystem types on the Loess Plateau

空间上,黄土高原各月份 WUE 均呈东南向西北递减的变化格局(图 11),同时,随着生长季气温回升,整个区域 WUE 均表现为增加趋势,且 WUE 高值区由东南向西北方向逐渐扩展,但 7 月 WUE 有所降低,8 月之后开始增加,并在 10 月高值区面积达到最大,与前述 WUE 年内变化趋势相吻合,10 月为

各类型生态系统 GPP 的峰值。对比黄土高原植被类型的分布(图 1),森林生态系统在 4 月之后 WUE 快速增加,除 7 月有所降低外,4—10 月持续处于较高值状态,而西北部的草地生态系统在 4 月之后则表现为逐渐增加状态,其低值区面积不断向西北方向缩减。

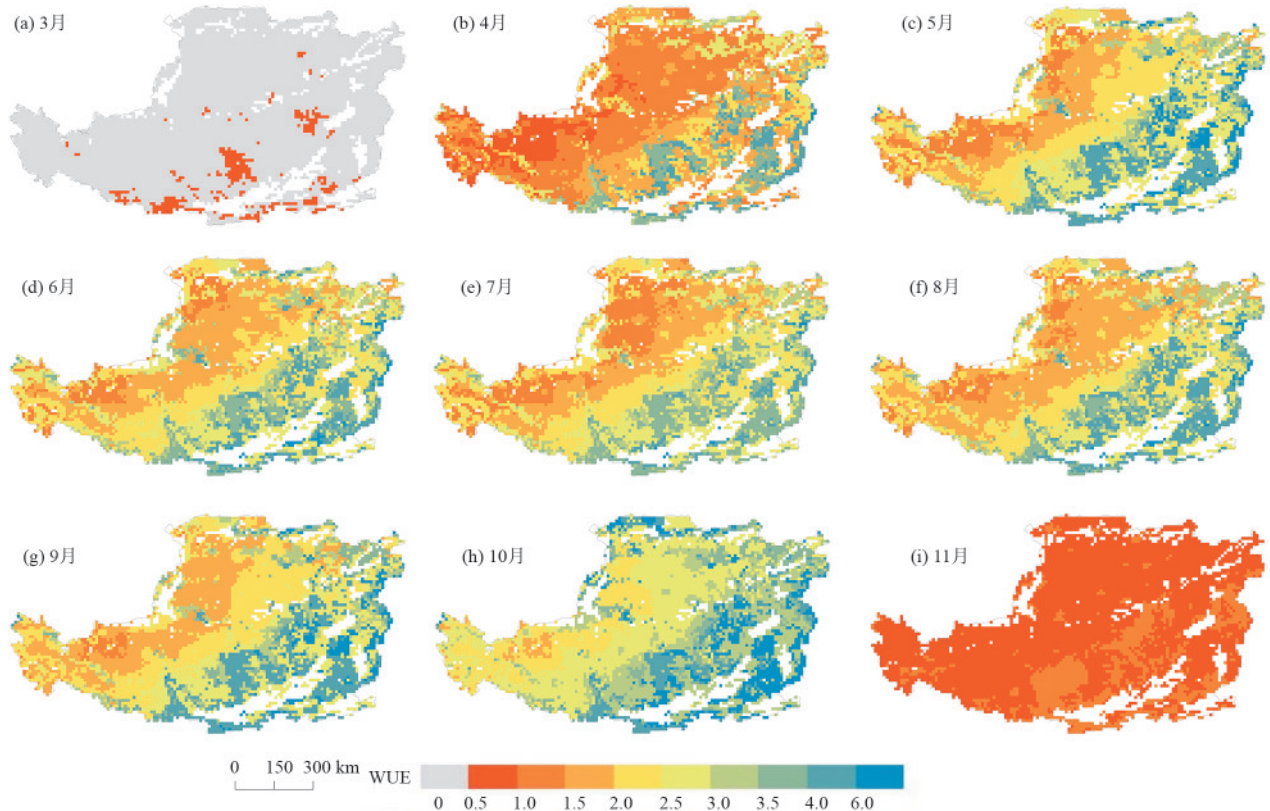


图 11 2000—2018 年生长季黄土高原地区 WUE 逐月变化的空间格局

Fig.11 Spatial patterns of monthly WUE variations on the Loess Plateau during growing seasons from 2000 to 2018

### 3 讨论

揭示不同生态系统类型 WUE 动态变化特征及其差异,明确各类型生态系统碳水耦合关系能够有效指导干旱区生态系统管理与调控。受实际生态系统空间分布复杂性影响,无论是遥感观测还是模型模拟有关 WUE 的评估均存在一定的不确定性,对于草地生态系统尤为明显。本研究通过对比通量观测与多种 GPP 和 ET 遥感数据发现,草地生态系统较森林和灌丛均具有更大的不确定性(图 2、图 3),其不确定性可能受以下因素影响:1)群落异质性。草地生态系统的植被类型组成较为丰富,生物多样性更大,群落异质性明显,尤其是黄土高原地区草地植被组成复杂,各生物群落间的碳水通量均存在一定差异,从而使草地生态系统的观测与模拟存在较大的不确定性。2)外界环境变化影响。与森林和灌丛相比,草地生态系统对外界环境变化响应更为敏感,尤其草地物候对降水响应敏感,生态脆弱性更大<sup>[34]</sup>;同时,草地受放牧等人为干扰较为强烈,从而进一步影响模拟结果的不确定性。3)土壤水力参数影响差异。草地生理生态参数受土壤水力参数影响较大,如最大气孔导度是草地生态系统 GPP 和 ET 模拟的敏感参数,但该参数受土壤水分影响较大,土壤水分胁迫情况下会导致气孔关闭从而影响光合作用和蒸腾速率,并进一步影响比叶面积、叶干物质分配系数等植被生理生态参数<sup>[35-36]</sup>。因此,在开展生态系统碳水通量和 WUE 模拟与评估时,需重点关注对草地生态系统的模拟精度,减少草地生态系统生理生态参数不确定性对模拟结果的影响。

从年际变化趋势看,黄土高原 GPP 和 ET 均表现为增加趋势,但由于 GPP 增加速率高于 ET 的变化速率使得该区域 WUE 也整体呈增加趋势,主要由于 2000 年以来大规模植被恢复工程的实施显著提高黄土高原地区的植被覆盖率和生态固碳率,促进 GPP 的快速增加<sup>[37]</sup>。各类型生态系统 WUE 表现并不一致,森林、草地 WUE 呈增加趋势,而灌丛 WUE 则表现为下降趋势,表明灌丛并不是最优的植被恢复类型,结合 GPP 和 ET 年内变化特征可以看出,灌丛在生长季初期(5 月之前)及生长季后期(8 月之后)ET 与森林 ET 相接近甚至高于森林的 ET(图 10),而其 GPP 明显低于森林 GPP。同时,相比于森林和草地,干旱胁迫下灌丛气孔导度响应相对较缓,存在气孔关闭延迟机制,净光合速率在受抑制情况下,蒸腾耗水仍持续,从而使得灌丛 WUE 表现出与森林和草地不同的变化趋势<sup>[38]</sup>。从空间上可以看出,黄土高原 WUE、GPP 和 ET 均表现出明显的由东南向西北递

减的趋势,与黄土高原降水变化梯度格局相似。相关研究<sup>[39]</sup>已经表明,降水是驱动旱区植被固碳能力提升的主要气候因子,并影响着各类型生态系统的 GPP 和 ET<sup>[40]</sup>。因此,对于干旱半干旱区而言,森林和草地可作为植被恢复的优先类型,对于降水较为缺乏的地区,可以草地类型为主;对于降水相对丰富的地区,则可考虑森林作为恢复植被。同时,根据研究结果,ET 显著增加区面积比例明显高于 GPP 和 WUE,且各类型生态系统均如此,主要与退耕还林(草)工程实施下植被覆盖度显著提高导致实际蒸散量增加有关<sup>[41]</sup>。

黄土高原 3 类典型生态系统生长季内的 WUE 均呈“双峰”形曲线特征,峰值分别在 5、10 月,7 月则为 WUE 谷值,结合 GPP 和 ET 的年内变化特征可以看出,随着温度增加,GPP 在 5 月之前迅速增加,之后受温度胁迫影响 GPP 增加速率较缓,研究<sup>[42]</sup>显示,夏季受高温、强辐射和水分胁迫影响,导致气孔关闭,抑制光合作用产物生成,从而影响 GPP 生产;8 月之后,随着温度下降,GPP 由温度胁迫转为温度限制,并不断开始下降,但在 GPP 较高的 6—8 月,ET 也相对较高,尤其 7 月受高温影响各类型生态系统 ET 均最高,从而使得 WUE 表现出“双峰一谷”的年内变化特征。因此,从生态系统管理角度看,在 WUE 第 1 个峰值期需减少放牧、砍伐等生态系统干扰活动,并可适当促进水分供给,以促进生态系统的碳积累,而在第 2 个峰值期则可利用高峰后植物养分积累期进行合理放牧;同时,在进行植被恢复时可采用春季型物种和秋季型物种(如 C4 牧草)相结合的恢复模式,延长全年 WUE 高效期。

### 4 结论

1)对于各 GPP 数据产品而言,CMG GPP 数据对森林和草地的拟合精度更高,对于灌丛,MOD GPP 数据集表现出更好的拟合效果;对于 ET 数据,GPR ET 数据集对 3 类典型植被类型均表现出较好的拟合精度,更适合作为 Biome-BGC 模型模拟的验证数据,且各数据对森林 GPP 和 ET 的监测精度较高,对草地生态系统监测的不确定性较大,同样模型优化后对森林 GPP 和 ET 的模拟精度较高,草地 GPP 和 ET 的模拟精度相对较低。

2)2000—2018 年,黄土高原的 WUE、GPP 和 ET 均呈上升趋势,但各类型生态系统 WUE 表现并不一致,森林和草地 WUE 均呈波动性增加趋势,而灌丛 WUE 则表现为下降趋势。在空间上,黄土高原 WUE、GPP 和 ET 均呈现由东南向西北递减的格局特征,其大部分地区呈增加趋势,并以不显著增加为

主,但ET显著增加区面积更大,多集中在植被覆盖显著增加的区域。

3)黄土高原各类型生态系统WUE表现为“双峰一谷”的年内变化特征,峰值分别出现在5、10月,7月为谷值;同时,整个生长季各类型生态系统WUE和GPP均表现为森林>灌丛>草地,但ET在各类型中的表现不同,灌丛ET在生长季初期和生长季后期与森林ET相近甚至更高。

本研究明确各类型生态系统碳水通量和WUE的年际年内变化特征,可为黄土高原生态修复与水资源管理提供精准调控窗口,但后续研究可通过建立黄土高原的涡度相关系统并结合生理生态参数的空间异质性调查进一步优化模型,同时关注草地生态系统碳水通量数据的精准量化和改进,以提高其对草地生态系统WUE的模拟精度,减少其模拟的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] 赵东晓,蔡建勤,土小宁,等.黄土高原水土保持植被建设问题及建议[J].中国水土保持,2020,5:7-9.  
ZHAO D X, CAI J Q, TU X N, et al. Issues and suggestions on soil and water conservation vegetation construction on the Loess Plateau[J].Soil and Water Conservation in China,2020,5:7-9.
- [2] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].生态学报,2018,38(23):8296-8305.  
DU X Z, ZHAO X, WANG H Y, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (23):8296-8305.
- [3] GAO Y, ZHU X J, YU G R, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 195:32-37.
- [4] 孙红,方国飞,阮琳琳,等.亚洲半干旱区碳水通量时空格局及驱动因素[J].生态学报,2022,42(12):4742-4757.  
SUN H, FANG G F, RUAN L L, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of carbohydrate flux in semi-arid region of Asia[J].Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4742-4757.
- [5] 韩再惠,陈燕,吴志俊,等.气候变化对内蒙古温带草原生态系统碳、水通量及水分利用效率的影响[J].水利规划与设计,2024,2:38-43.  
HAN Z H, CHEN Y, WU Z J, et al. Effects of climate change on carbon and water fluxes and water use efficiency in temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia [J]. Water Resources Planning and Design, 2024, 2:38-43.
- [6] 温永斌,韩海荣,程小琴,等.基于Biome-BGC模型的千烟洲森林水分利用效率研究[J].北京林业大学学报,2019,41(4):69-77.  
WEN Y B, HAN H R, CHENG X Q, et al. Forest water use efficiency in Qianyanzhou based on Biome-BGC model, Jiangxi Province of eastern China[J].Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(4):69-77.
- [7] 黄卓,曹银轩,徐喜娟,等.基于多源GPP和ET产品的秦岭生态系统水分利用效率研究[J].水土保持学报,2022,36(5):181-194.  
HUANG Z, CAO Y X, XU X J, et al. Study on the ecosystem water use efficiency of the Qinling Mountains with multi-source GPP and ET products [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):181-194.
- [8] MA R X, CUI X M, WANG D C, et al. Spatial and temporal characteristics of water use efficiency in typical ecosystems on the Loess Plateau in the last 20 years, with drivers and implications for ecological restoration[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22):e5632.
- [9] ZHANG T, PENG J, LIANG W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010[J].Science of the Total Environment, 2016, 565:105-122.
- [10] JIN Z, LIANG W, YANG Y T, et al. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):e8191.
- [11] LIN S, WANG G X, HU Z Y, et al. Spatiotemporal variability and driving factors of Tibetan Plateau water use efficiency [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(22):e2020JD032642.
- [12] CHIESI M, FIBBI L, VANUCCI S, et al. Use of remote sensing and biogeochemical modeling to simulate the impact of climatic and anthropogenic factors on forest carbon fluxes[J].Remote Sensing, 2024, 16(2):e232.
- [13] 谈幸燕,贾仰文,牛存稳,等.中国黄土高原天然林地和草地水分利用效率对物候的响应[J].中国科学:地球科学,2023,53(9):2110-2126.  
TAN X Y, JIA Y W, NIU C W, et al. Response of water-use efficiency to phenology in the natural forest and grassland of the Loess Plateau in China[J].Science China Earth Sciences, 2023, 66(9):2081-2096.
- [14] 秦格霞,孟治元,李妮.黄土高原水分利用效率动态及其对干旱和地表温度的响应[J].干旱区地理,2024, 47(11):1887-1898.  
QIN G X, MENG Z Y, LI N. Dynamics of water use efficiency and its response to drought and land surface temperature on the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(11):1887-1898.
- [15] 陈凌伟.2001—2020年黄河流域水分利用效率时空变化

- 及其对环境因素的响应[J].水土保持通报,2022,42(5):222-230.
- CHEN L W. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River basin during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(5):222-230.
- [16] 王乐,朱求安,张江,等.黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响[J].生态学报,2023,43(8):3103-3115.
- WANG L, ZHU Q A, ZHANG J, et al. Characteristics of water use efficiency during the changing process of vegetation in the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(8):3103-3115.
- [17] 张婷,周军志,李建柱,等.陆地生态系统碳水通量特征研究进展[J].地球环境学报,2022,13(6):645-666.
- ZHANG T, ZHOU J Z, LI J Z, et al. Review on research and development of carbon and water fluxes characteristics in terrestrial ecosystem [J]. Journal of Earth Environment,2022,13(6):645-666.
- [18] DOU X J, YU G R, CHEN Z, et al. High spatial variability in water use efficiency of terrestrial ecosystems throughout China is predominated by biological factors [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2024,345:e109834.
- [19] SISHU F K, TILAHUN S A, SCHMITTER P, et al. Revisiting the Thornthwaite Mather procedure for baseflow and groundwater storage predictions in sloping and mountainous regions[J].Journal of Hydrology X,2024,24:e100179.
- [20] ZHAO B L, ZHUANG Q L, SHURPALI N, et al. North American boreal forests are a large carbon source due to wildfires from 1986 to 2016[J].Scientific Reports,2021,11(1):e7723.
- [21] SRINET R, NANDY S, PATEL N R, et al. Simulation of forest carbon fluxes by integrating remote sensing data into Biome-BGC model [J]. Ecological Modelling,2023,475:e110185.
- [22] XING X L, WU M S, ZHANG W X, et al. Modeling China's terrestrial ecosystem gross primary productivity with BEPS model: Parameter sensitivity analysis and model calibration [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2023,343:e109789.
- [23] 周娜芳,贡恩军,白天豪,等.基于CASA模型的秦巴山区NPP时空动态及影响因素分析[J].生态学报,2025,45(4):1829-1843.
- ZHOU N F, GONG E J, BAI T H, et al. Analysis of temporal and spatial dynamics and its influencing factors of NPP in Qinba Mountain Area based on the CASA model [J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1829-1843.
- [24] 康满春,朱丽平,许行,等.基于Biome-BGC模型的北方杨树人工林碳水通量对气候变化的响应研究[J].生态学报,2019,39(7):2378-2390.
- KANG M C, ZHU L P, XU H, et al. Modelling the responses of carbon and water fluxes with climate change for a poplar plantation in northern China based on the Biome-BGC model [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(7):2378-2390.
- [25] 梅晓丹,李丹,王强,等.基于Biome-BGC模型的小兴安岭森林碳通量时空分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(11):7-10.
- MEI X D, LI D, WANG Q, et al. Spatial-temporal analysis of forest carbon flux of in Xiaoxing' Anling based on Biome-BGC model [J]. Geomatics and Spatial Information Technology,2021,44(11):7-10.
- [26] 袁洪艺,杜灵通,潘海珠,等.基于参数优化的人工灌丛生态系统碳水通量模拟[J].生态学报,2023,43(13):5546-5557.
- YUAN H Y, DU L T, PAN H Z, et al. Simulation of carbon and water fluxes of planted shrub ecosystem in desert steppe biome zone based on parameter optimization [J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(13):5546-5557.
- [27] 张蓝霄,李雅婧,胡晓创,等.基于Biome-BGC模型的刺槐人工林生产力和内在水分利用效率研究[J].林业科学研究,2023,36(3):1-10.
- ZHANG L X, LI Y J, HU X C, et al. Productivity and intrinsic water use efficiency of *Robinia pseudoacacia* plantations based on Biome-BGC model [J]. Forest Research,2023,36(3):1-10.
- [28] HE L Y, ZHONG L, MA Y M, et al. A study on the simulation of carbon and water fluxes of Dangxiang alpine meadow and its response to climate change [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2024,17(5):e100507.
- [29] 吴冠宇.基于Biome BGC模型的黄土丘陵区典型林地水分利用效率研究[J].地下水,2022,44(4):104-106.
- WU G Y. Study on water use efficiency of typical forest land in the loess hilly region based on Biome-BGC model [J]. Ground Water,2022,44(4):104-106.
- [30] SONG X, ZHOU Z, SHEN R C, et al. Evaluating the suitability of NPP simulation for subtropical forest ecosystems by calibrating the Biome-BGC model: An empirical study at interannual and inter-monthly scales [J]. Ecological Modelling,2025,509:e111275.
- [31] LIU H Y, DING Q, LI Y C, et al. Improved Biome-BGC model for simulating spatiotemporal dynamics of gross primary productivity in evergreen broadleaf forests of the karst region [J]. Environmental Modelling and Software,2025,192:e106563.
- [32] 邵于洋,李恒鹏,耿建伟,等.基于改进Biome-BGC模型的东南丘陵区茶园生态系统碳通量模拟[J].应用生态学报,2025,36(5):1339-1349.
- SHAO Y Y, LI H P, GENG J W, et al. Simulation of carbon flux in tea plantation based on an improved Biome-BGC model in hilly areas of southeast China [J]. Chinese

- Journal of Applied Ecology, 2025, 36(5): 1339-1349.
- [33] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 等. 贵州省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 408-416.  
QIAN F Y, LAN A J, FAN Z M, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of NPP in Guizhou Province from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 408-416.
- [34] LIU M M, WU W Q, LI H. The influence of grassland ecological compensation policy on grassland quality: Evidence from the perspective of grassland ecosystem vulnerability[J]. Agriculture, 2023, 13(9): e1841.
- [35] WANKMÜLLER F J P, DELVAL L, LEHMANN P, et al. Global influence of soil texture on ecosystem water limitation[J]. Nature, 2024, 635: 631-638.
- [36] 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.
- [37] WANG Y, GAO G Y, HUANG Y Z, et al. Ecosystem water use efficiency and carbon use efficiency respond oppositely to vegetation greening in China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2025, 964: e178575.
- [38] WANG P, LI X Y, WANG L X, et al. Divergent evapotranspiration partition dynamics between shrubs and grasses in a shrub-encroached steppe ecosystem[J]. New Phytologist, 2018, 219(4): 1325-1337.
- [39] 唐可欣, 郭建斌, 何亮, 等. 中国旱区 GPP 时空演变特征及影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(6): 964-973.  
TANG K X, GUO J B, HE L, et al. Characteristics of the spatial and temporal evolution of gross primary productivity and its influencing factors in China's drylands[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(6): 964-973.
- [40] MA L X, YU G R, CHEN Z, et al. Cascade effects of climate and vegetation influencing the spatial variation of evapotranspiration in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 344: e109826.
- [41] ZHOU H X, CHENG C W, HU M J, et al. Spatiotemporal characteristics of evaporation in China and its response to revegetation in a typical region by a generalized complementary approach[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 342: e109700.
- [42] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 302-314.  
LIU X F, HU B Y, REN Z Y. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its driving forces on the Loess Plateau during 2000—2014 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(2): 302-314.
- (上接第 252 页)
- [44] 王冰, 张鹏杰, 张秋良. 不同林型兴安落叶松林土壤理化特征[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 65-71.  
WANG B, ZHANG P J, ZHANG Q L. Soil physico-chemical characteristics of *Larix gmelinii* forest with different forest types[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 65-71.
- [45] 马婵华, 徐争强. 水位和放牧对若尔盖沼泽湿地土壤有机碳的影响[J]. 四川环境, 2025, 44(1): 34-40.  
MA C H, XU Z Q. Effects of water level and grazing on soil organic carbon on Zoige wetland[J]. Sichuan Environment, 2025, 44(1): 34-40.
- [46] 刘思泽, 刘宏强, 黄雪梅, 等. 不同恢复模式对退化高寒沼泽湿地土壤轻重组有机碳的影响[J]. 四川林业科技, 2023, 44(6): 69-76.  
LIU S Z, LIU H Q, HUANG X M, et al. Effects of different restoration models on soil light and heavy fraction organic carbon in degraded alpine marsh wetland[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023, 44(6): 69-76.
- [47] 白岩松, 张雨鉴, 秦倩倩, 等. 大兴安岭典型灌木叶片功能性状对环境因子的响应[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 131-139.  
BAI Y S, ZHANG Y J, QIN Q Q, et al. Responses of leaf functional traits in typical shrubs to environmental factors in the Daxing'an Mountains, northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(1): 131-139.