

季节性干旱对中国陆地生态系统碳-水耦合机制的影响

刘祥平, 胡卓玮, 王永财, 王咪, 侯文星

(首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: [目的] 分析季节性干旱对生态系统水分利用效率(WUE)及其碳-水耦合机制的影响, 为增强植被固碳能力、优化水资源配置以及制定生态系统保护对策提供科学依据。[方法] 基于 2001—2023 年中国陆地生态系统数据, 采用趋势分析与相关性分析等方法, 系统评估 WUE 的时空演变特征、季节变化规律及其对干旱的响应机制。结合 XGBoost-SHAP 可解释性机器学习模型与 LOWESS 拟合方法, 进一步量化干旱胁迫因子的非线性响应特征与阈值效应。[结果] 中国极端干旱事件发生频率及植被 WUE 均呈显著季节性变化特征。春季极端干旱发生频率最高且影响范围最广; WUE 在夏季最高, 其变化由春季的总初级生产力(GPP)与蒸散发协同驱动, 逐步转变为夏秋季的“GPP 主导”格局, 并呈现出自南向北递减的空间格局。春季 WUE 受土壤水分和蒸散的共同调控, 而夏秋季则主要由土壤水分控制。[结论] 干旱对 WUE 的影响存在显著的季节差异, 并主要受土壤水分条件制约。加强主控季水分管理并优化植被结构, 是提升生态系统抗旱韧性、应对气候变化与生态风险的关键策略。

关键词: 季节性干旱; 水分利用效率; 标准化降水蒸散指数(SPEI); 碳-水耦合; 中国

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0270-14

中图分类号: Q948

文献参数: 刘祥平, 胡卓玮, 王永财, 等. 季节性干旱对中国陆地生态系统碳-水耦合机制的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 270-283. Liu Xiangping, Hu Zhuowei, Wang Yongcai, et al. Impacts of seasonal drought on carbon-water coupling mechanism in China's terrestrial ecosystems [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 270-283.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.025

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.025

Impacts of seasonal drought on carbon-water coupling mechanism in China's terrestrial ecosystems

Liu Xiangping, Hu Zhuowei, Wang Yongcai, Wang Mi, Hou Wenxing

(College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] The impact of seasonal drought on water use efficiency (WUE) of ecosystems and its carbon-water coupling mechanisms was analyzed in order to provide a scientific basis for enhancing vegetation carbon sequestration capacity, optimizing water resource allocation, and formulating ecosystem protection strategies. [Methods] Based on data from China's terrestrial ecosystems from 2001 to 2023, the spatiotemporal dynamics and seasonal patterns of WUE and its responses to drought were systematically assessed using trend and correlation analyses. By integrating the XGBoost-SHAP interpretable machine learning model with LOWESS fitting, the nonlinear response characteristics and threshold effects of drought stress factors were further quantified. [Results] The frequency of extreme drought events and the WUE of vegetation in China both exhibited pronounced seasonal patterns. Extreme droughts occurred most frequently and extensively in spring, while WUE reached its peak in summer. Its seasonal variations were jointly driven by gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration in spring, gradually shifting to a 'GPP-dominated' pattern in summer and autumn,

收稿日期: 2025-09-19

修回日期: 2025-11-29

采用日期: 2025-12-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“大尺度生态质量与生态服务评估大数据智能挖掘技术和关键参数网格化平台建设应用示范”(2023YFF1303703)

第一作者: 刘祥平(1996—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 博士研究生, 研究方向为生态与水资源。Email: lxplxp233@163.com。

通信作者: 胡卓玮(1979—), 男(汉族), 江西省乐平市人, 博士, 教授, 主要从事生态水文遥感研究。Email: huzhuowei@cnu.edu.cn。

with a decreasing gradient from south to north. In spring, WUE was co-regulated by soil moisture and evapotranspiration, whereas in summer and autumn, it was primarily controlled by soil moisture. [Conclusion] The impact of drought on WUE exhibits significant seasonal differences and is primarily constrained by soil moisture conditions. Enhancing water management during the key controlling seasons and optimizing vegetation structure are essential strategies for improving ecosystem drought resilience and mitigating climate change and ecological risks.

Keywords: seasonal drought; water use efficiency; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); carbon-water coupling; China

陆地生态系统通过植被的光合作用和蒸腾作用调节土壤和大气之间的能量交换及水循环过程,从而强化了陆地表面与大气之间的碳-水耦合过程^[1-2]。干旱作为制约陆地生态系统功能的关键胁迫因子,可通过抑制光合作用,改变植被水分利用策略等途径削弱碳汇功能^[3]。在气候变暖背景下,干旱事件的频率与强度呈加剧趋势,并可能通过加强陆气反馈而增加短暂干旱演变为长期季节性干旱的可能性^[4]。中国气候类型和植被结构复杂多样,厘清干旱对生态系统碳-水耦合的季节性影响,对于区域生态安全评估和水资源管理具有重要的科学与实践价值。

植被通过调节气孔导度来平衡光合碳吸收与蒸腾水分散失,从而决定碳固定效率与水分利用成本^[5]。随着植被覆盖度提升,土壤-植物-大气连续体结构随之拓展,陆气之间的碳水交换被显著强化^[6]。生态系统水分利用效率(water use efficiency, WUE)是刻画陆地生态系统碳增益和水分损失权衡关系的重要指标^[7],反映植物在资源受限条件下的生理调节能力。然而,生态系统过程具有明显的季节性节律,使得干旱对植被功能的影响在不同生长季、气候背景或物候阶段表现出强烈的季节依赖性。已有研究表明,夏季干旱对WUE的影响比秋季干旱更为显著^[8];在华中天然栎林中,秋季干旱降低WUE,而春夏干旱反而产生促进作用^[9]。这些结果表明,即便在相似的干旱条件下,WUE响应可能因季节、植被类型与环境背景差异而呈现显著异质性^[10-11]。中国生态系统类型复杂多样,但目前针对不同气候区和不同生物群系,季节性干旱如何影响WUE的全国尺度比较研究仍较为缺乏^[12],季节依赖性的过程机制也缺乏系统化。

此外,当前研究多依赖相关分析或多元回归等线性方法评估干旱与WUE的关系^[13-14],难以揭示干旱胁迫因子对WUE的非线性影响及潜在阈值效应。实际上,不同强度的干旱胁迫对WUE可能产生完全不同甚至相反的影响,因此以常数系数描述干旱效应容易掩盖其复杂性。相比之下,机器学习方法在处理非线性和高维异构数据方面展现出显著优势,

其中极端梯度提升树(extreme gradient boosting, XGBoost)能够有效捕捉变量间的非线性关联^[15]。然而,该类模型的“黑箱”特性限制了其机理解释,使得其预测结果缺乏生态过程导向的可解释性。

本研究以标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)表征季节性干旱程度,结合XGBoost分析中国不同气候区亚型生物群落WUE对干旱的非线性响应特征。同时,引入SHAP(SHapley Additive exPlanations)可解释性算法^[16],并结合局部加权回归拟合曲线(locally weighted scatterplot smoothing, LOWESS)量化不同干旱胁迫因子对植被WUE的影响趋势及阈值效应。以期增强植被固碳能力,优化水资源配置以及制定生态系统保护对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国位于东亚地区,地势西高东低,呈三级阶梯分布,地形复杂多样,山地面积约占国土总面积的2/3以上。中国经纬度跨度巨大且大部分地区处于季风区,气温和降水量呈现出显著的季节性差异。根据植被地理地带性原则并结合气候、地貌和土壤等辅助指标,中国植被区划共有8个分区:温带荒漠区(24.13%)、温带草原区(13.47%)、青藏高原高寒植被区(16.13%)、亚热带常绿阔叶林区(25.63%)、温带针叶、落叶阔叶混交林区(4.87%)、热带季风雨林、雨林区(2.69%)、暖温带落叶阔叶林区(10.28%)和寒温带针叶林区(2.78%)(图1)。

1.2 数据来源与处理

数据来源见表1。MODIS GPP产品(MOD17 A2HGF)时间分辨率为8 d,采用累积法生成月尺度GPP数据集。月尺度气象和土壤水分数据包括降水量(precipitation, PRE)、潜在蒸散量(potential evapotranspiration, PET)、实际蒸散量(actual evaporation, ET)、表层土壤水分(surface soil moisture, SMs)及根区土壤水分(root zone soil moisture, SMrz)。为保证数据质量和分析可靠性,

对缺失数据采用时间序列样条插值填补,对异常值使用 3×3 滑动窗口平滑处理以降低噪声。所有栅格数据通过双线性插值重采样至 $0.05^\circ\times 0.05^\circ$ 的统一空间分辨率,并统一投影至WGS 84坐标系。

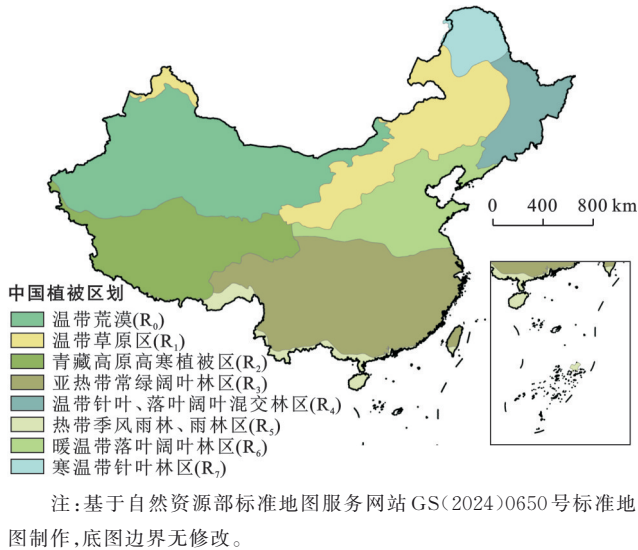


图1 中国植被区划分区

Fig.1 Spatial distribution of vegetation zones in China

1.3 研究方法

1.3.1 SPEI 指数

SPEI 指数是一个被广泛用于衡量水平衡的量化指数,它假设在特定时间段内降水和潜在蒸散量之间的差异遵循对数-逻辑概率分布,通过降水量与潜在蒸散量之差与平均状态的偏差来描述一个地区的干旱状况^[17]。SPEI 综合了标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)的多时间尺度和帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)对蒸发需求变化的敏感性,已被证明是衡量持续时间、程度和强度等干旱状况的可靠气象干旱指数^[18]。本研究选用SPEI-03(指在3个月累积时间尺度上计算所得的干旱指数)分别计算春季(3—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月)的季节平均SPEI值,以反映短期气象干旱对植被的影响。由于降水属于偏态分布,因此采用log-logistic^[19]概率分布函数对数值序列(降水量与潜在蒸散发的差值)进行拟合得到SPEI值。参照中国以往基于SPEI值的干旱强度分类方法,将每年的极端季节性干旱确定为季节平均SPEI-03值低于 -1.5 ^[20]。

表1 数据来源及其空间分辨率

Table 1 Data sources and their spatial resolution

数据类型	数据名称	数据来源	空间分辨率
气象数据	PRE	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)	$1\text{ km}\times 1\text{ km}$
	ET	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)	$1\text{ km}\times 1\text{ km}$
	E	全球土地蒸发阿姆斯特丹蒸发模型(GLEAM) (https://www.gleam.eu)	$0.1^\circ\times 0.1^\circ$
地表覆盖数据	土地利用数据	资源与环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	$30\text{ m}\times 30\text{ m}$
	中国植被区划数据	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)	—
土壤水分数据	SMs	全球土地蒸发阿姆斯特丹蒸发模型(GLEAM) (https://www.gleam.eu)	$0.1^\circ\times 0.1^\circ$
	SMrz	全球土地蒸发阿姆斯特丹蒸发模型(GLEAM) (https://www.gleam.eu)	$0.1^\circ\times 0.1^\circ$
遥感数据	GPP	美国国家航空航天局(NASA)对地观测系统(EOS)的MODIS GPP产品(MOD17A2HGF) (https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears)	$500\text{ m}\times 500\text{ m}$

1.3.2 WUE 模拟

WUE 为生态系统总初级生产力(GPP)与耗水量(ET)之比。根据春、夏、秋季的月度GPP/ET值,得到对应季节的WUE。利用最小二乘拟合方法对原始WUE进行长期线性趋势去趋势化。回归方程表示如下:

$$y_t^T = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

$$y_t^D = y_t - y_t^T \quad (2)$$

式中: t 表示时间; a_0 和 a_1 分别表示回归方程的截距和斜率,通过最小二乘法计算得到; y_t^T 为基于回归方程的预测序列; y_t 为原始序列; y_t^D 为去除线性变化趋势

后的序列。

在每个季节和网格单元中,计算WUE标准化距平的时间序列,其计算公式如下:

$$A_{i,t} = \frac{x_{i,t} - \bar{x}_t}{\sigma(x_t)} \quad (3)$$

式中: $A_{i,t}$ 为WUE的标准化距平; $x_{i,t}$ 为第 i 年第 t 季的WUE值; \bar{x}_t 和 $\sigma(x_t)$ 分别为研究期间第 t 季节WUE的平均值和标准差。

1.3.3 相关性分析

基于SPEI指数与去趋势WUE标准化距平数据进行像元尺度的相关性分析。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: R_{xy} 表示 WUE 与 SPEI 之间的相关系数, \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示 SPEI 和 WUE 的平均值; x_i 表示 SPEI 某年某季节的值; y_i 表示 WUE 某年某季节的值。

1.3.4 可解释性机器学习

XGBoost 采用梯度提升决策树作为基本模型,通过正则化项控制模型的复杂度,具有高效、可解释性强等特点。在探索因变量与每个特征值之间的非线性关系的同时还考虑了变量之间的交互效应,使其在考察各解释变量对响应变量的相对重要性中具有较好的结果^[21]。在本研究中,对关键模型参数进行了系统设置与优化。模型共设置 100 棵基学习树,学习率设为 0.1,最大树深度为 3,以控制模型复杂度并避免过拟合。样本按照 8:2 比例划分为训练集与测

$$\varphi_i(f) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|! \cdot (|N| - |S| - 1)!}{|N|!} \cdot (f(S \cup \{i\}) - f(S)) \quad (6)$$

式中: N 为 ET, SMs 等影响因素的集合; i 为某一特定位置的影响因素; S 为不包含因素 i 的因素子集; $\varphi_i(f)$ 为因素 i 的 SHAP 值; $f(S)$ 为给定因子 S 子集的模型预测输出。

2 结果与分析

2.1 季节性干旱时空变化特征

2001—2023 年,中国季节性极端干旱频次在 5 次以内(图 2)。其中,春季极端干旱发生的频次较高,尤其是在华东地区、内蒙古草原、黄河流域以及东部沿海地区最为显著。这些区域由于气候条件、土地利用方式以及季节性降水波动,水分短缺风险较大。此外,春季极端干旱的影响面积最大,约占总面积的 62.9%。夏季极端干旱主要集中在内蒙古草原区。秋季极端干旱则表现出独特的高海拔响应特征,高频核心区主要分布在青藏高原和云贵川地区。

通过分段线性拟合方法评估了 21 世纪以来中国不同气候区亚型生物群落的年际干旱趋势(图 3a)。基于各区域平均 SPEI 趋势可以发现,寒温带针叶林区以及温带针叶、落叶阔叶混交林区域在春季表现出显著的干旱加剧趋势,且极端干旱事件的发生频次明显升高(图 3b)。这一变化可能与多重气候因子共同作用有关,一方面,降水量的年际不稳定性增强使得春季水分输入波动加剧;另一方面,春季气温提升加速了蒸散过程的进行,加深了春季干旱程度。相比之下,夏季和秋季的极端干旱变化呈现更强的

试集,并采用 5 折交叉验证以提升模型的泛化能力和稳定性。在解释变量选取方面,结合生态系统干旱响应的机理特征,从高蒸散需求和低降水供给两类干旱压力出发,采用 ET 和 E 表征植被蒸散需求,使用 SMs 和 SMrz 表示土壤湿度状况,以量化不同胁迫因子在干旱过程中的独立贡献。计算公式如下:

$$\hat{y} = \varphi(x_i) = \sum_{k=1}^k f_k(x_i) \quad f_k(x_i) \in F \quad (5)$$

式中: $F = \{f(x) = \omega_{q(x)}\} (q: R^m \rightarrow T, \omega_{q(x)} \in RT)$ 为 k 棵树集成的函数空间; k 为模型中决策树的个数; T 为叶子节点个数, x_i 为第 i 个样本($i=1, 2, \dots, 2756$); $f_k(x_i)$ 为第 k 个树的预测值; \hat{y} 表示模型最终输出的预测值。

为进一步揭示各因子对 WUE 变化的边际影响,本研究采用一种剥离交互效应影响的 SHAP 方法,更加直观地展现主效应的变化趋势。SHAP 通过计算 Shapley 值量化每个特征对模型输出的贡献,计算公式如下:

年际波动性。尽管整体趋势并不显著,但多数区域在秋季仍呈现出干旱程度缓慢增强的倾向。说明秋季干旱具有阶段性增强特征,而非持续单调加剧。

2.2 WUE 的季节性时空变化特征

受 GPP 与 ET 季节性差异的共同影响,生态系统 WUE 在不同季节呈现显著的空间分布差异(图 4)。其中,夏季的平均 WUE 最高,尤其是四川和东北地区。这主要归因于该区域以针叶林为主(如冷杉、雪松等),夏季光合活性显著增强,GPP 较高;同时,针叶林相较于阔叶林具有较低的蒸散速率,从而提高了单位水分消耗的碳固定效率,表现出较高的水分利用效率。春季和秋季,WUE 受 GPP 季节性差异的影响明显,以 GPP 为主导的 WUE 增加呈现自南向北递减的趋势。夏季,WUE 的增加受到 GPP 和 ET 的共同影响。GPP 主导作用在南方区域更为显著,ET 的影响随着纬度的增加而增强。

为探究 GPP 和 ET 在 WUE 变化中的主导作用,本研究从碳水耦合的角度出发,比较了 6 种情景下 GPP 和 ET 在不同区域和季节中的控制作用(图 5a—5c)。研究期间,春季和秋季 WUE 主要呈现上升趋势,且大部分地区 WUE 的变化受 GPP 增加的主导作用驱动。春季,WUE 的增加主要受 GPP 和 ET 协同变化的驱动,其中 GPP 的增幅普遍大于 ET 增幅,表明碳固定能力的增强在提升水分利用效率中占主导作用。秋季,WUE 的增加趋势更加显著,主要由 GPP 的增长推动。夏季 WUE 存在波动,无显

著变化趋势。

值得注意的是,青藏高原高寒植被区 WUE 在多个季节均呈上升趋势,表明该区域的碳水耦合过程

逐步向以碳增加为主导的方向发展。这些发现进一步揭示了不同生态系统中碳水耦合关系的区域异质性及其季节性响应特征。

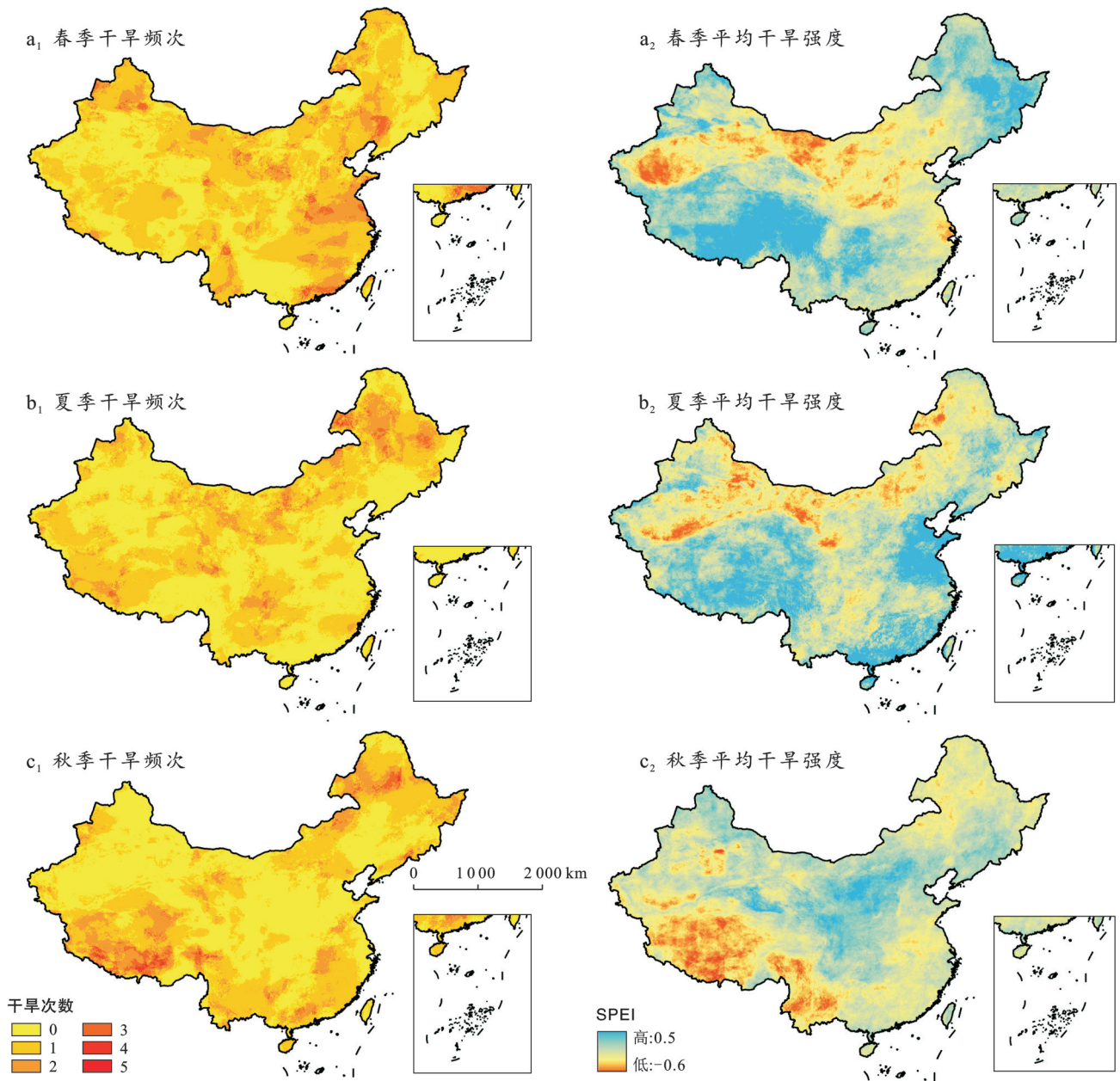


图 2 2001—2023 年中国季节性干旱频次及平均干旱强度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of seasonal drought frequency and average drought intensity in China (2001—2023)

2.3 植被碳水耦合对季节性干旱的响应

2.3.1 植被 WUE 与干旱的相关性分析

本研究基于 SPEI 和 WUE 标准化异常量化植被 WUE 对干旱的响应。当 WUE 与 SPEI 呈显著正相关时,表明湿润条件有利于 WUE 的提升,此类区域称为水分亏缺抑制区;当 WUE 与 SPEI 呈显著负相关时,表明较干旱条件下 WUE 反而提升,这可能是湿润条件下 WUE 由于水分过多而抑制光合作用,亦或者是太阳辐射减少抑制了植被生产力的提升,此

类区域称为水分过剩抑制区。

2001—2023 年, SPEI 与 WUE 异常的相关性表现出显著的地理和季节差异(图 5d—5f)。东北地区春季 WUE 与干旱呈最强负相关,主要是由于春季干旱对该地区 GPP 的影响较小,但对 ET 的影响较大。夏季水分亏缺抑制区的面积最大,约占研究区域的 63.1%。干旱和半干旱地区的 WUE 对湿润条件更敏感,表现出明显的正相关关系。在低纬度地区, SPEI 和 WUE 呈负相关,这可能与生态系统对干旱的响应

与其对气候变化的适应和恢复力有关。相比之下, 秋季植被 WUE 与干旱的相关性总体较弱,水分过剩

抑制区和水分亏缺抑制区分别占研究区面积的 51.5% 和 48.5%。

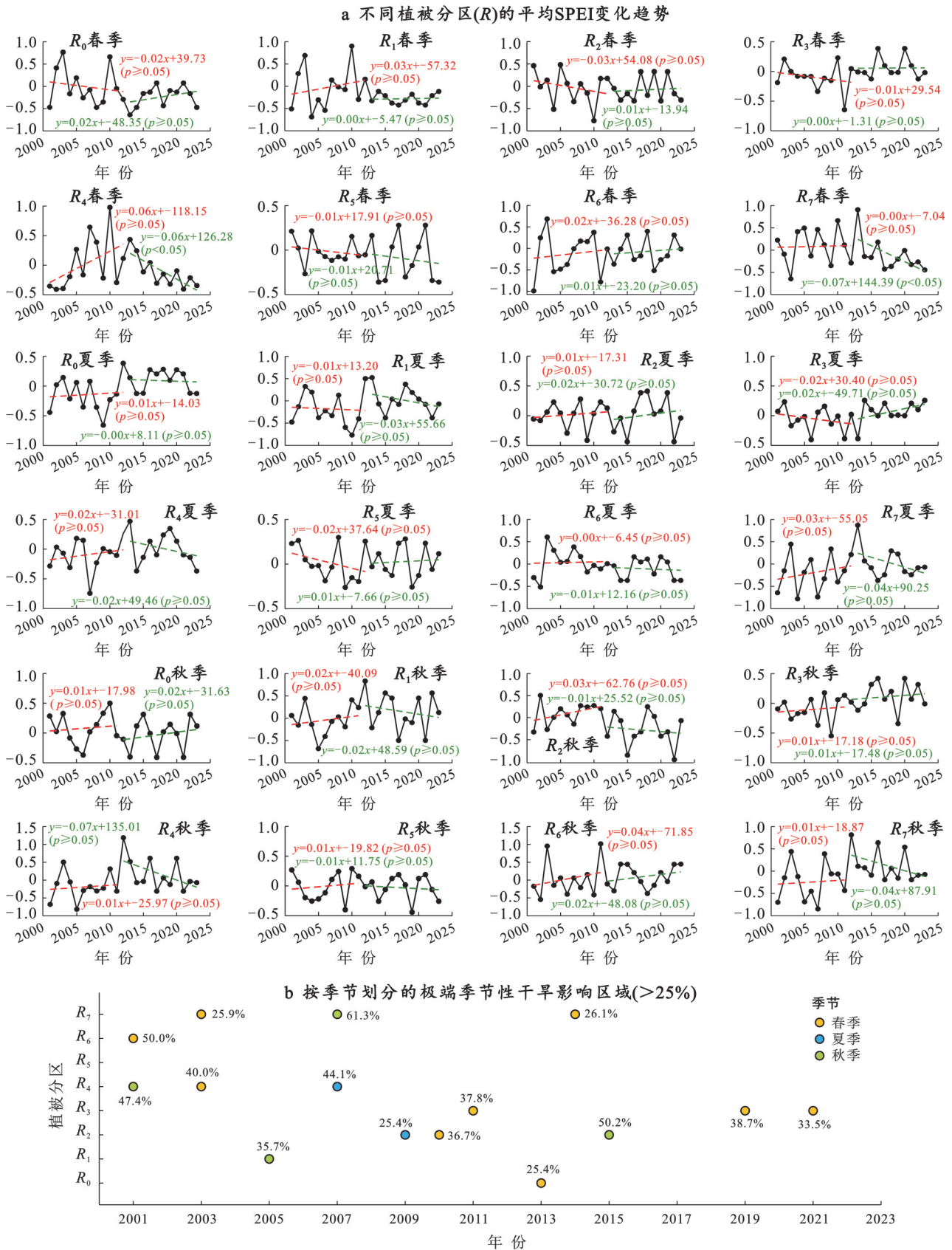
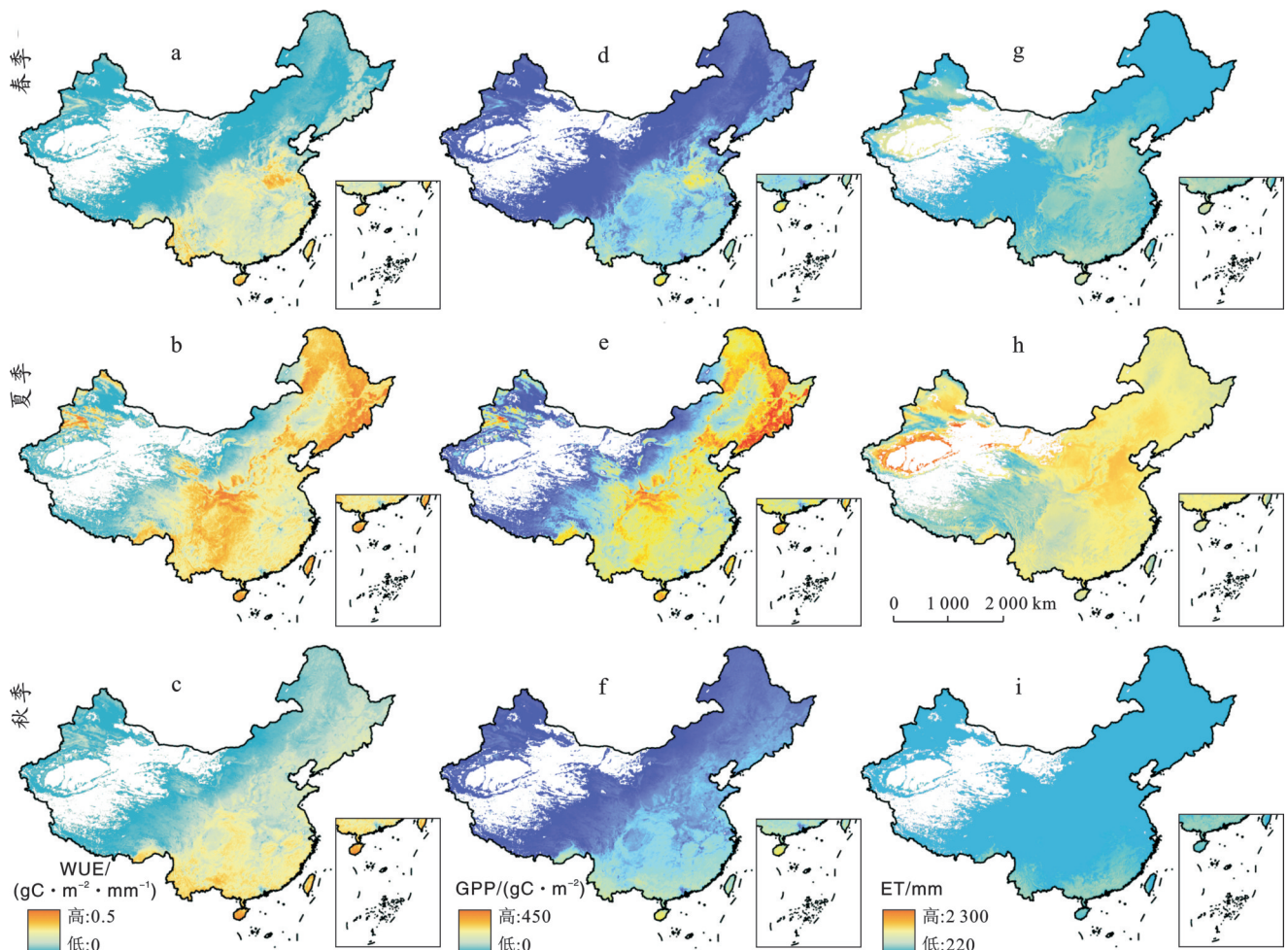


图 3 2001—2023年中国不同植被分区季节性干旱变化趋势

Fig.3 Trends in seasonal drought changes across different vegetation zones in China (2001—2023)



注:a-c表示植被生态系统水分利用效率(WUE)多年平均值的季节性空间分布;d-f表示植被总初级生产力(GPP)多年平均值的季节性空间分布;g-i表示实际蒸发量(ET)多年平均值的季节性空间分布。

图4 2001—2023年中国多年平均植被WUE, GPP, ET的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of multi-year average vegetation WUE, GPP, and ET in China (2001—2023)

2.3.2 不同气候区生物群落WUE异常对季节性干旱的响应差异

中国多元化的气候梯度与生态系统类型导致季节性干旱对WUE的影响机制具有显著空间异质性。同时,不同区域植被WUE对干旱的响应程度在不同季节之间差异较大(图6)。从季节性变化来看,热带季风雨林区、亚热带常绿阔叶林区和暖温带落叶阔叶林区的WUE在春季对干旱最为敏感,且这种敏感性随纬度降低而增强。这可能与区域春季光合作用较强、叶片水分需求增加以及土壤水分供应尚未充足有关。温带草原区和青藏高原区夏季干旱对WUE的影响程度明显高于春季和秋季干旱,说明夏季降水不足会对草地植被物种的供水产生极为不利的影

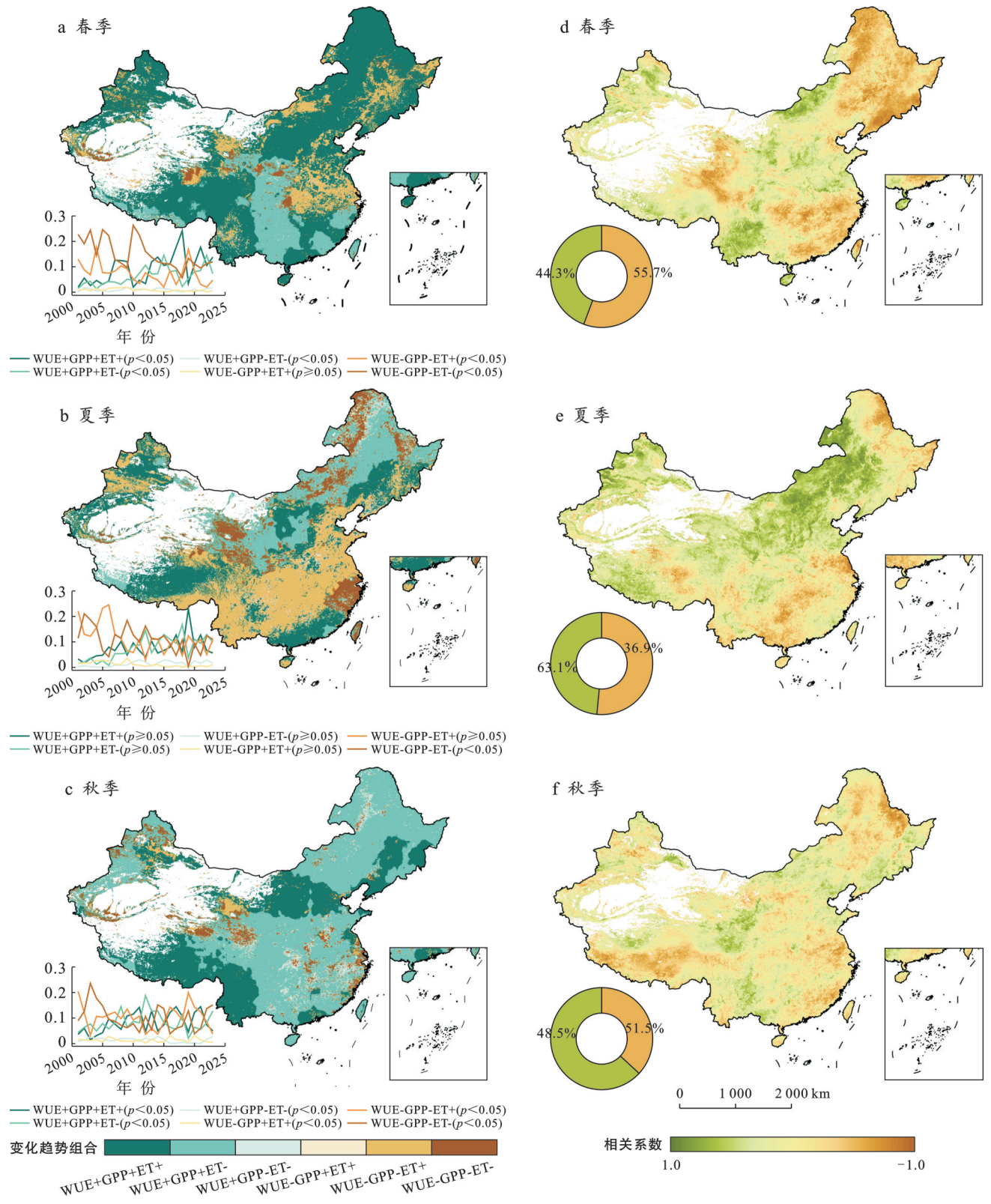
响。此外,由于寒温带针叶林区全年气温偏低、土壤水分可用性有限,WUE与SPEI全年呈负相关,气孔调控与光合作用抑制的耦合效应贯穿全年。这些结

果表明,干旱对WUE的影响程度和方向不仅取决于不同生物群系的植物功能性状和水分利用策略,也受季节和地理环境的影响。

2.4 干旱胁迫因子对植被WUE的非线性影响和阈值效应

2.4.1 WUE对干旱胁迫因子的非线性响应特征

植被WUE对干旱的响应不仅受季节性变化和生物群系类型的调控,干旱胁迫过程本身也是关键影响因素^[22]。根据SPEI指数,干旱通常表现为高蒸散量和低降水量两种胁迫方式。降水不足限制了植物从土壤中获取水分的能力,从而抑制光合作用并降低水分利用效率。同时,高蒸腾作用产生的负拉力无法通过木质部导管有效地降低土壤水分输送至叶片,导致植物体内水分亏缺和脱水^[23]。因此,本研究基于XGBoost模型量化干旱胁迫因子对植被WUE的非线性影响(图7),并通过变量重要性评估各胁迫因子对WUE异常的直接贡献。



注:a-c 为 WUE, GPP 和 ET 的标准化异常的变化趋势;“+”表示 WUE(GPP 或 ET)正异常;“-”表示 WUE(GPP 或 ET)负异常;折线表示 6 种时空模式占比的年度变化趋势。d-f 为中国季节性干旱与 WUE 异常相关性的空间分布,环形图表示正相关和负相关区域面积占比。

图 5 2001—2023 年中国碳水耦合变化趋势及其与季节性干旱的相关性

Fig.5 Trends in carbon-water coupling changes and their correlation with seasonal droughts in China (2001—2023)

通过干旱胁迫因子贡献占比分析可知,大多数地区春季 WUE 变化主要受土壤水分和蒸散量的共同作用,而夏季和秋季则更多的是由土壤水分主导。在温

带荒漠和青藏高原高寒植被地区,夏季和秋季 WUE 的变化主要受 SMs 控制。这一现象可归因于该区域植被类型以低矮草本和灌木为主,根系较短,且高海

拔和低温条件下蒸散作用受限,植被蒸散需求较低,表明土壤水分是该区域夏秋季碳水耦合变化的主要调控因子。在亚热带常绿阔叶林区,秋季WUE变化

主要受到SMs和E的共同驱动;而在热带季风雨林区,WUE全年受土壤水分和蒸散发的共同影响,反映了林冠盖度增加对植被蒸腾增强的调控作用。

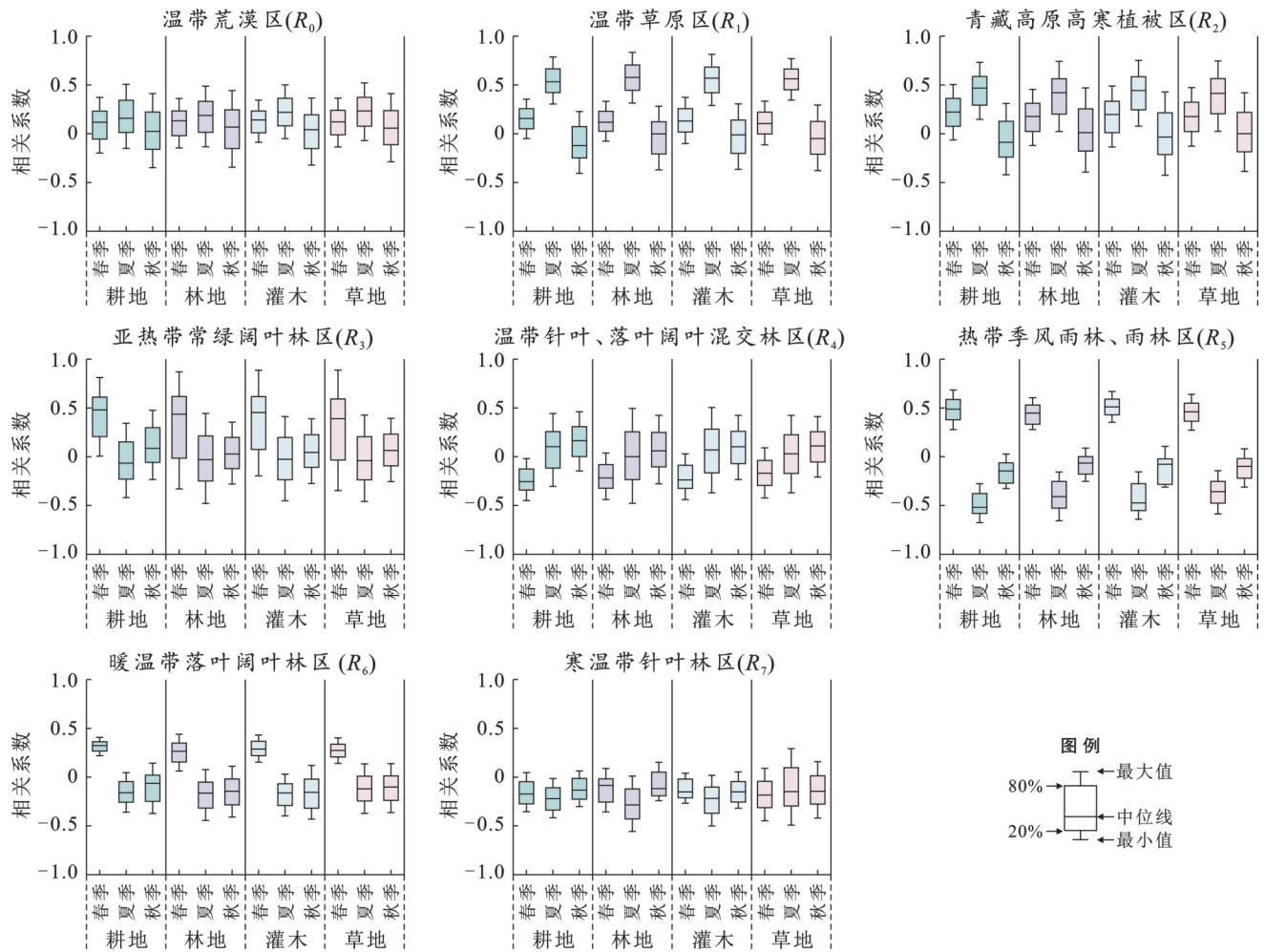


图 6 季节性干旱与不同生物群系(R)水分利用效率(WUE)异常的相关性

Fig.6 Correlation between seasonal droughts and water use efficiency (WUE) anomalies across different biomes (R)

2.4.2 干旱胁迫因子对WUE非线性相关性的阈值效应

本研究通过LOWESS拟合反映特征变量对WUE的平均影响(图8,图9),其中,y轴为特征变量的贡献值,小于零表示负面影响,大于零表示正面影响;黑色虚线为基准线,表示该特征值对WUE无显著影响。

研究结果表明,春季E在低于特定阈值时对WUE主要产生负向影响,超过阈值后转为正向影响。例如,青藏高原高寒植被的阈值最低,为314.6,温带草原区次之,为627.7。这主要是由于低矮植被的GPP变化较小,E的增加导致了WUE减少。与之相反,夏季和秋季表现为E较低时WUE与E呈负相关,而超过阈值后转为正相关。在热带季风雨林区,E对WUE的正向效应仅在超过1817时显现,这可能与夏季高温提升大气蒸散需求、裸土蒸发及冠层截流等“非生产性”水分损失增加有关。

夏季和秋季SMs的SHAP值多呈现先负后正的变化趋势,表明随着SMs的增加,其对WUE的正向影响逐渐增强。例如,亚热带常绿阔叶林的SMs阈值为0.39,当SMs低于该阈值时,干旱对WUE产生负向影响,高于阈值后正向影响逐渐增强。相反,春季大部分区域的植被处于生长早期,碳储存能力较弱,当SMs过多时,植被无法完全利用水分,导致ET增加。

此外,不同生物群系中SMrz与SMs对WUE的作用表现出反向调节关系:当SMs增加导致WUE上升时,SMrz的增加则可能使WUE下降;而当SMs对WUE产生负向影响时,SMrz的增加则对WUE起到一定的正向调节作用,体现出植被对水分可及性的差异化响应机制。因此,各区域在制定水分管理和植被保护策略时,应充分考虑其土壤水分的垂直分布特征,以实现更高效的水分利用。

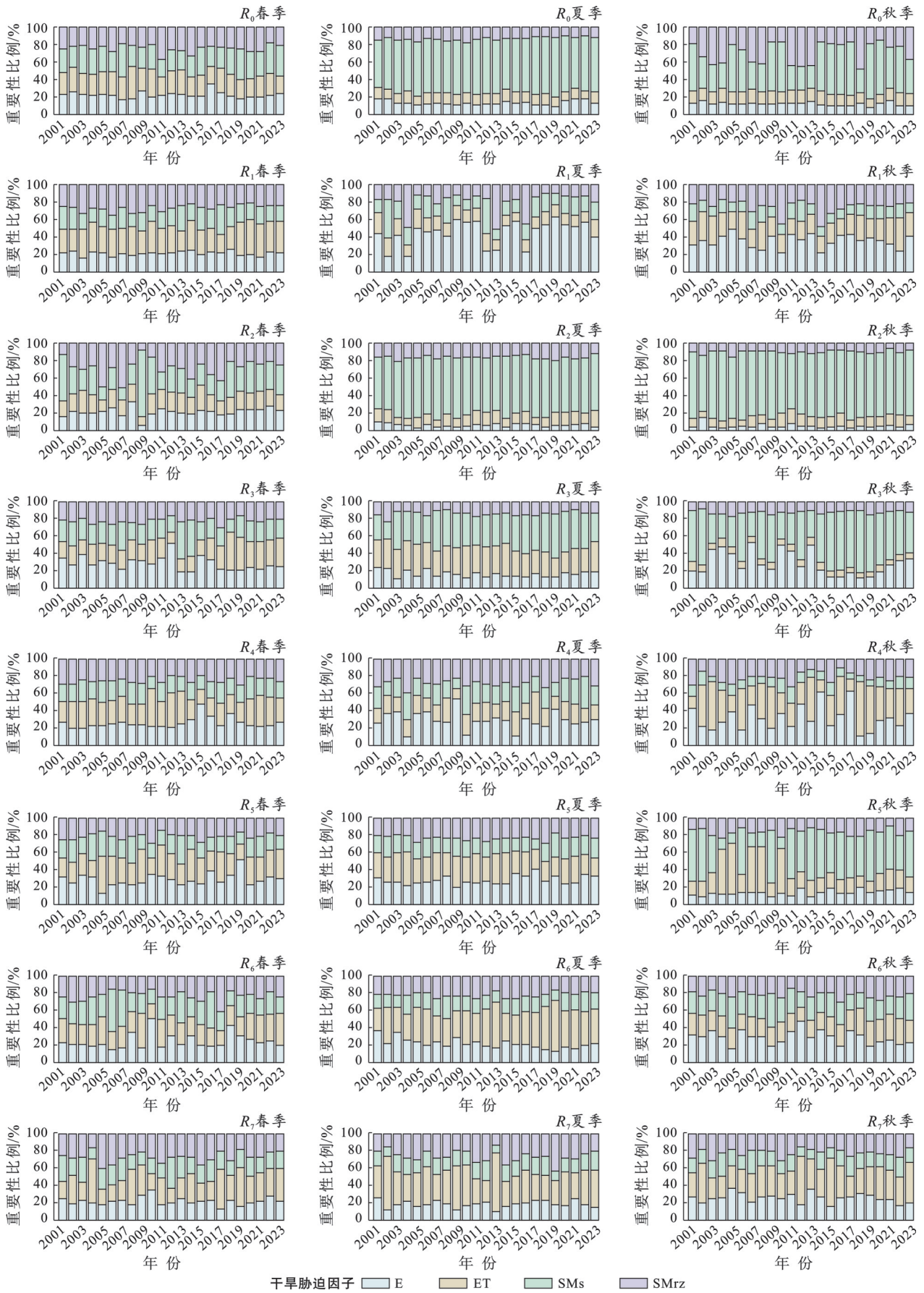


图 7 干旱胁迫因子对不同植被群系 (R) 水分利用效率 (WUE) 影响的重要性占比

Fig.7 Importance proportions of drought stress factors affecting water use efficiency (WUE) of different biomes (R)

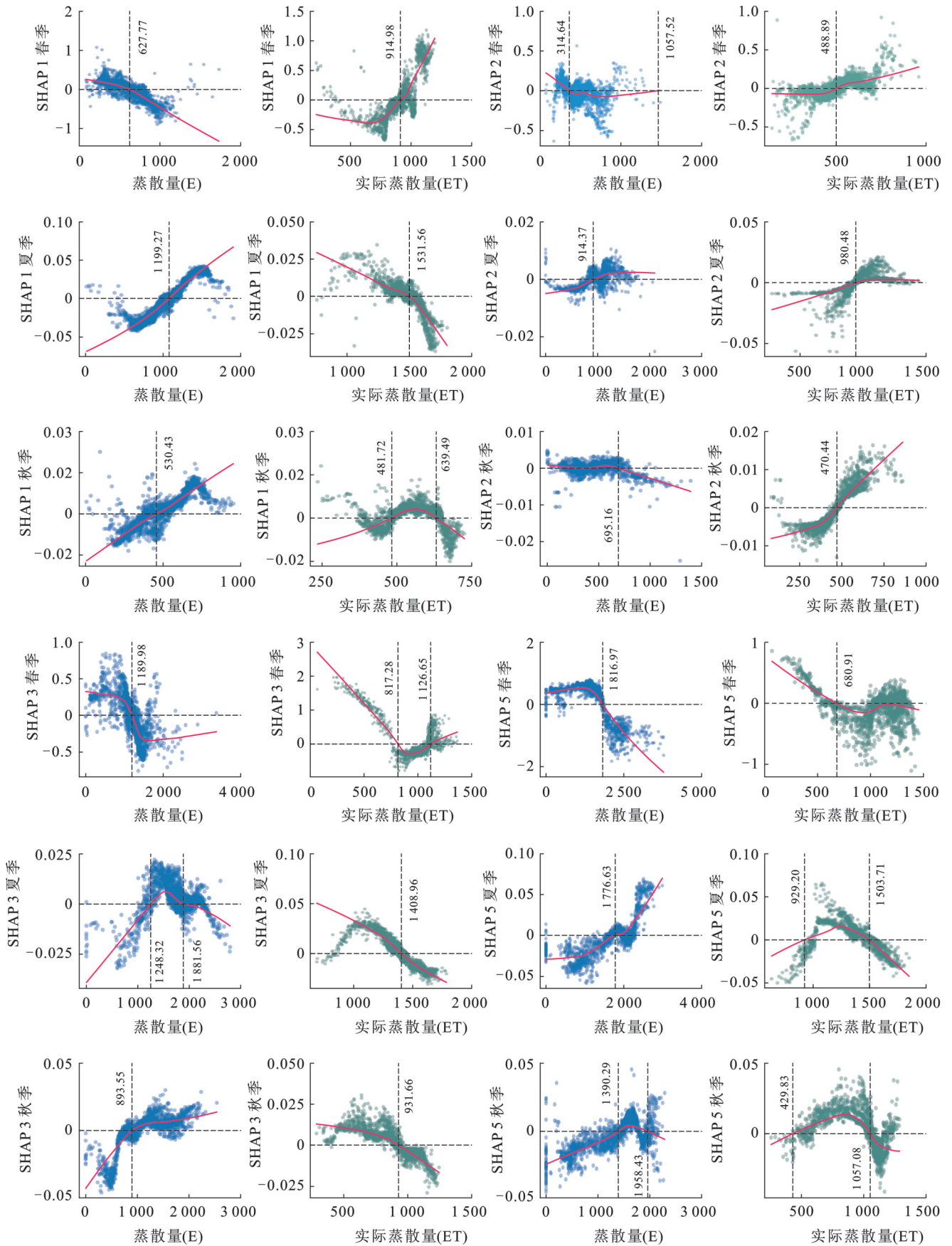


图 8 大气过程变量对不同植被水分利用效率 (WUE) 的阈值效应群系

Fig.8 Threshold effects of atmospheric process variables on water use efficiency (WUE) of different biomes (R)

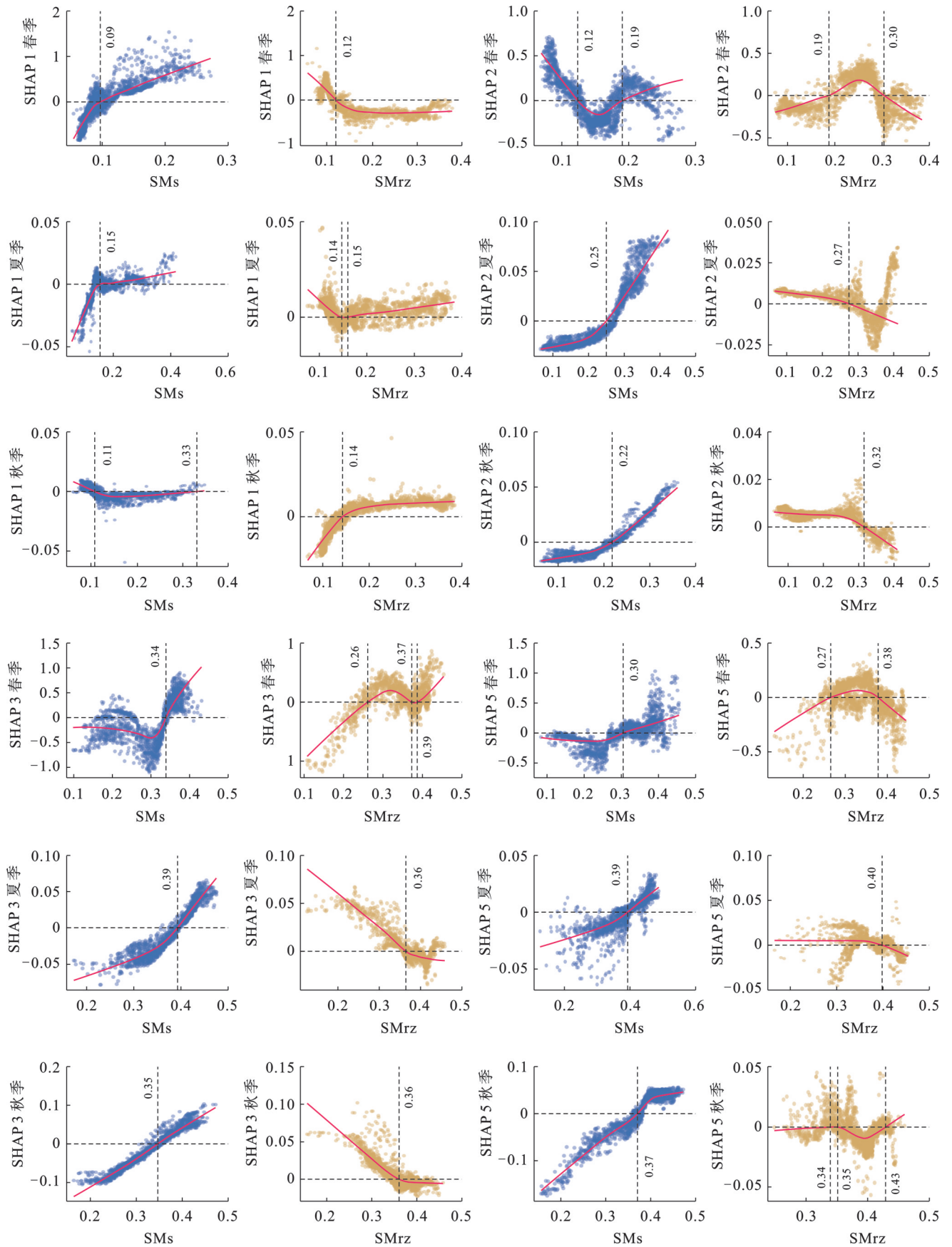


图 9 表层土壤水分变量 (SMrz) 对植被水分利用效率 (WUE) 的阈值效应

Fig.9 Threshold effects of surface soil moisture variables (SMrz) on vegetation water use efficiency (WUE)

3 讨论

3.1 陆地生态系统碳水耦合对季节性干旱的响应

近几十年来,气候变化加剧了全球干旱胁迫,预计到 2050 年全球气温升高将进一步增强干旱的频率和强度^[24]。已有研究表明,全球范围内春季 WUE 的上升主要源于北半球 GPP 对温度变化的高敏感性,使其增幅超过 ET^[25]。最近一项利用涡动相关观测的研究证实了北半球能量有限的生态系统在干旱期间光合作用的增加^[26]。

本研究发现,秋季 WUE 的增加主要受 GPP 驱动,尤其在中国高海拔地区。这一发现可以解释为秋季干旱期间降水不足与由于云层减少而增加的太阳辐射之间的频繁对应关系,从而增强了植被活动和 GPP。此外,干旱对 WUE 的影响不仅取决于不同生物群系的植物功能性状和水分利用策略,也受季节和地理环境的影响。温带地区夏季干旱对 WUE 的抑制效应更强,而热带和亚热带地区的植被则对春季干旱更为敏感,且这种影响随纬度下降而增强(图 5,图 6)。这与低纬地区植被普遍具有较高气孔导度和最大化生产力策略有关,使其对极端气候扰动的适应能力相对较弱。

此外,植被之间以及地区和生物群落类型之间对干旱胁迫因子的响应差异是理解植被 WUE 空间异质性的关键。例如,针叶林和阔叶林对干旱表现出截然不同的功能响应^[27]。本研究结果支持植被 WUE 存在高度的空间异质性:干旱和半干旱区占主导地位的草类和高寒植被在夏季 WUE 受干旱的影响程度比半湿润地区的阔叶林更显著,而半湿润地区阔叶林在春季对水分异常更敏感(图 6)。先前研究表明,森林生态系统比草地生态系统表现出更强的抗旱碳水耦合^[28],主要是由于森林中植物光合作用在缺水条件下比草地保持稳定的可能性^[29]。然而,本研究发现热带雨林夏季 WUE 与干旱呈负相关。这是由于热带季风雨林全年受土壤水分和蒸散发的共同影响(图 7),土壤水分并非该地区植被生长的主要限制因素,而降水的增加通常对应太阳辐射的减少,进而抑制了碳吸收,此外,茂密的冠层通过蒸腾损失更多的水分,进一步降低了 WUE。温带荒漠区和青藏高原区的 WUE 在夏秋季对低土壤水分条件更敏感(图 7),这与之前对季节性干旱的研究一致^[29]。

3.2 干旱胁迫下植被 WUE 的区域管理与优化策略

本研究结果凸显了干旱对植被 WUE 的区域依赖性和功能特异性,为制定差异化水分管理和生态

调控策略提供了科学依据。具体而言,不同生态区的管理重点应结合其水分限制因素、能量约束条件及植被功能现状。温带地区夏季 WUE 下降最为显著,应优先提升土壤持水能力,如采用保墒耕作、覆盖及退化草地深根化修复来削弱干旱对 GPP 的抑制作用。相反,热带与亚热带地区的植被在春季对干旱高度敏感,需通过提高森林结构的抗旱性(如适度疏伐、优化树种组合)来缓解因高气孔导度导致的蒸散损失。对于干旱与半干旱区,WUE 随干旱增强而上升的特征提示适度水分胁迫可激发节水型生理响应,因此管理重点应从“补水”转向“稳定可利用水分”,包括推广滴灌、调控灌溉时序以及基于深根系植被的区域生态重建。例如,甘肃张掖的滴灌与绿洲-荒漠过渡带防护林体系有效缓解了夏秋季低土壤水分对蒸散的限制。未来应针对各区域在水分可及性、气候季节性以及植被结构与生理调节能力上的差异,制定分区施策的调控方案,从而增强生态系统在气候变暖背景下的抗旱能力与系统稳定性。

3.3 局限性与前景

尽管本研究从大尺度上揭示了干旱对植被 WUE 的影响特征,但仍存在若干局限,有待后续研究进一步拓展。首先,分析主要聚焦于干旱事件的即时效应,未能系统刻画干旱持续、累积及其滞后影响所形成的“生态记忆”。未来有必要从多时间尺度出发,量化不同频率与连续性干旱对植被功能的叠加效应,以更准确评估其长期生态风险。其次,本研究未涉及干旱传播过程中多种胁迫因子的联合作用,后续工作可通过因果推断与过程模型相结合的方式,加强对干旱影响链条的解析,从而为区域综合调控与风险预警提供更具操作性的科学支撑。

4 结论

(1) 干旱呈显著季节差异,春季极端干旱的发生频率最高、影响面积最大。

(2) 夏季 WUE 最高,春季 WUE 增长由 GPP 与 ET 共同驱动,夏、秋季的 WUE 则以 GPP 主导,且呈现自南向北递减格局。

(3) 干旱对 WUE 的作用具有区域依赖性和季节敏感性。温带地区植被 WUE 对夏季干旱最为敏感,而热带和亚热带地区 WUE 主要在春季干旱条件下表现出更强的响应。

(4) 春季 WUE 受土壤水分和蒸散发的共同调节,夏、秋季则主要受土壤水分主导。温带荒漠区和青藏高原高寒植被区 WUE 对低土壤水分条件表现出更强的水分胁迫响应。

参考文献 (References)

- [1] Wang Yu, Zhou Li, Ping Xiaoyan, et al. Ten-year variability and environmental controls of ecosystem water use efficiency in a rainfed maize cropland in northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2018, 226: 48-55.
- [2] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. *Nature*, 2013, 496(7445): 347-350.
- [3] Krich C, Mahecha M D, Migliavacca M, et al. Decoupling between ecosystem photosynthesis and transpiration: A last resort against overheating [J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(4): 044013.
- [4] Feng J, Qin T, Lv X, et al. Frequent drought and flood events in the Yellow River basin, increasing future drought trends in the middle and upper reaches [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 139: 104511.
- [5] Beauclair Q, Heinesch B, Longdoz B. Non-stomatal processes are responsible for the decrease in gross primary production of a potato crop during edaphic drought [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 343: 109782.
- [6] Wang Jie, Xiao Xiangming, Zhang Yao, et al. Enhanced gross primary production and evapotranspiration in juniper-encroached grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5655-5667.
- [7] Huang Mengtian, Zhai Panmao, Piao Shilong. Divergent responses of ecosystem water use efficiency to drought timing over Northern Eurasia [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(4): 045016.
- [8] Wang Feiyu, Xia Jun, Zou Lei, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving mechanism of ecosystem water use efficiency in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: 102012.
- [9] Tian Ruikang, Li Jianhao, Zheng Jianghua, et al. Changes in vegetation phenology and its response to different layers of soil moisture in the dry zone of Central Asia, 1982—2022 [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 646: 132314.
- [10] 张巧凤, 于红博, 黄方. 蒙古高原干旱时空特征及对植被物候的累积影响 [J]. *干旱区研究*, 2024, 41(9): 1548-1559.
Zhang Qiaofeng, Yu Hongbo, Huang Fang. The spatio-temporal dynamics of drought and the cumulative impact on vegetation phenology in the Mongolian Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(9): 1548-1559.
- [11] Li Xiangyi, Li Yue, Chen Anping, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in southwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269: 239-248.
- [12] Wang Chenpeng, Huang Mengtian, Zhai Panmao, et al. Change of summer drought over China during 1961—2020 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, 153(1): 297-309.
- [13] Ding Yibo, Gong Xinglong, Xing Zhenxiang, et al. Attribution of meteorological, hydrological and agricultural drought propagation in different climatic regions of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 106996.
- [14] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 [J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 743-751.
Tian Zhihui, Ren Zuguang, Wei Haitao. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 743-751.
- [15] Zhang X, Liu J, Yang C, et al. Disentangling vegetation physiological responses under extreme drought in the Amazon Rainforest: A multispectral remote sensing approach with insights from ET, SIF, and VOD [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2025, 230: 599-615.
- [16] Ming Lei, Wang Yuandong, Liu Guangxu, et al. Analysis of vegetation dynamics from 2001 to 2020 in China's Ganzhou rare earth mining area using time series remote sensing and SHAP-enhanced machine learning [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 84: 102887.
- [17] Cao Dan, Zhang Jiahua, Han Jiaqi, et al. Projected increases in global terrestrial net primary productivity loss caused by drought under climate change [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(7): e2022EF002681.
- [18] 宋进喜, 齐贵增, 余敦先, 等. 中国植被生产力对干湿变化的响应 [J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1764-1778.
Song Jinxi, Qi Guizeng, She Dunxian, et al. Response of vegetation productivity to wet and dry changes in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1764-1778.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [20] Huang Mengtian, Zhai Panmao. Impacts of extreme droughts on ecosystem water use efficiency diverge between forest and grassland [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2023, 37(5): 710-721.
- [21] Niazzkar M, Menapace A, Brentan B, et al. Applications of XGBoost in water resources engineering: A systematic literature review (Dec., 2018—May., 2023) [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 174: 105971.