

骤旱胁迫下长江流域生态水分利用效率 滞后响应及恢复评估

武传号^{1,2}, 逯家宝³, 龚郑洁⁴, 许 凯⁵, 章跃芬⁶, 田济扬⁶, 李琼芳^{1,2}, 王文鹏⁷

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
3. 暨南大学环境与气候学院; 4. 暨南大学生命科学技术学院; 5. 贵阳学院生物与环境工程学院;
6. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室; 7. 河海大学水文水资源学院)

摘要:基于多源数据,以水分利用效率(WUE)作为植被生态系统碳吸收效率的关键指标,采用巧合分析、机器学习等方法,构建了骤旱胁迫下 WUE 响应与恢复的定量识别框架,评估了 1982—2019 年长江流域生长季(4—9 月)骤旱胁迫下 WUE 下降时间及恢复时间的空间分布格局,定量解析了骤旱发展过程中 WUE 变化的气象驱动机制。结果表明:长江流域大部分区域 WUE 对骤旱响应的滞后时间在 1 候以内,响应的敏感区主要分布于长江流域中部和东南部;骤旱胁迫下长江流域大部分地区 WUE 的恢复时间为 1.5~3.5 候,其中长江上游 WUE 的下降时间及恢复时间较长;骤旱爆发阶段蒸散发对 WUE 的影响最大,骤旱恢复阶段不同类型植被的 WUE 对气象因子的响应存在明显差异,其中短波辐射、降水量、蒸散发分别为森林、耕地、草地 WUE 变化的主控因子。

关键词:骤旱;水分利用效率;滞后响应;恢复时间;长江流域

Delayed response and restoration assessment of ecological water use efficiency in the Yangtze River Basin under flash drought stress//Wu Chuanhao^{1,2}, Lu Jiabao³, Gong Zhengjie⁴, Xu Kai⁵, Zhang Yuefen⁶, Tian Jiyang⁶, Li Qiongfang^{1,2}, Wang Wenpeng⁷(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 3. College of Environment and Climate, Jinan University; 4. College of Life Science and Technology, Jinan University; 5. School of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University; 6. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 7. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on multi-source data and using water use efficiency (WUE) as a key indicator of carbon absorption efficiency in vegetation ecosystems, a quantitative identification framework for WUE response and recovery under flash drought stress was constructed using methods such as coincidence analysis and machine learning. The spatial distribution pattern of WUE decline time and recovery time under flash drought stress during the growing season (April to September) in the Yangtze River Basin from 1982 to 2019 was evaluated, and the meteorological driving mechanism of WUE changes during the development of flash drought was quantitatively analyzed. The results indicate that the lag time of WUE response to flash drought in most areas of the Yangtze River Basin is within 1 pentad, and the sensitive areas of response are mainly distributed in the central and southeastern parts of the Yangtze River Basin. The recovery time of WUE in most areas of the Yangtze River Basin under flash drought stress is 1.5~3.5 pentads, with longer decline time and recovery time of WUE in the upper reaches of the Yangtze River. The evapotranspiration has the greatest impact on WUE during the flash drought outbreak stage, and there are significant differences in the response of WUE to meteorological factors among different types of vegetation during the flash drought recovery stage. Among them, shortwave radiation, precipitation, and evapotranspiration are the main controlling factors for WUE changes in forests, cultivated land, and grasslands, respectively.

Key words: flash drought; water use efficiency; lag response; recovery time; the Yangtze River Basin

近年来,受气候变化与人类活动的双重影响,以骤旱为代表的极端干旱事件频发,引起了社会的广泛关注^[1-5]。与缓旱相比,骤旱通常发生在作物生长

季,并伴随着热浪等高温天气,具有突发性强、发展迅速、强度高等特点,给农业生产和生态环境造成了严重影响^[3,6-7]。例如 2022 年 7 月长江流域上游爆发

了大范围的骤旱事件,并在数周内迅速发展至重度干旱状态,出现了罕见的主汛期反枯现象,导致农作物受灾面积 60 902 km²,直接经济损失 512.8 亿元^[8]。在全球气候变暖背景下,骤旱逐渐成为全球的新常态^[9-10],对植物生理生态过程、陆地碳水循环、生态系统结构和功能等诸多方面产生了深远影响^[11]。近几年关于骤旱的生态效应研究已逐步展开,在不同植被生态系统对骤旱的敏感性及其响应特征等方面取得了一系列进展^[12-13]。水分利用效率(water use efficiency, WUE)指生态系统中单位水分消耗(蒸散量)所生产的干物质,是量化陆地生态系统碳-水耦合效率的关键指标,在评估陆地生态系统对气候变化的响应规律的相关研究中发挥着重要作用^[14]。WUE 对干旱的响应研究是陆地生态系统碳水循环研究中的核心问题之一,涵盖从植物生理机制到全球尺度格局的多层次、多维度过程。然而,目前关于 WUE 对骤旱的响应研究尚处于起步探索阶段,仅有少量文献报道。例如, Kang 等^[15]以韩国为研究区,发现 WUE 的变化因骤旱严重程度和土地覆盖类型而异,其中农田 WUE 对骤旱的敏感性最高; Zhu 等^[16]针对中亚地区的研究发现,植被总初级生产力(GPP)随着骤旱强度增加呈减少趋势,而 WUE 随着骤旱强度的增加而上升。目前研究主要采用相关分析法构建骤旱与 WUE 之间的统计关系,重点关注骤旱对 WUE 的滞后(响应延迟)与累积(历史干旱的持续影响)效应^[17],普遍忽略了 WUE 对骤旱响应的阶段性差异,未能区分骤旱爆发阶段、恢复阶段的不同影响特征,难以全面揭示骤旱从爆发到恢复全过程对 WUE 的动态胁迫机制。

长江是亚洲第一大河流,受东南季风的影响,长江中下游地区干旱事件频繁发生,对当地的水资源、农业和生态系统造成了严重威胁^[18-21]。鉴于此,本文以长江流域为研究区,基于观测及模型数据,采用统计理论和机器学习相结合的方法,构建骤旱胁迫下 WUE 下降及恢复的定量识别框架,系统评估长江流域 1982—2019 年生长季(4—9 月)骤旱对 WUE 的胁迫影响及恢复时间的空间分异格局,并基于随机森林模型定量解析 WUE 对骤旱响应的气象驱动机制,以期为长江流域防灾减灾规划、灾害适应策略和生态管理提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域发源于青藏高原唐古拉山主峰各拉丹东雪西南部,长约 6 300 km,流域面积约 180 万 km²,包括雅砻江流域(I)、岷江流域(II)、

嘉陵江流域(III)、汉江流域(IV)、长江干流流域(V)、太湖流域(VI)、鄱阳湖流域(VII)、洞庭湖流域(VIII)、乌江流域(IX)。长江流域水资源丰富,但时空分布不均匀,全年约 75% 以上的降水集中在 4—9 月,且中游地区降水量最大,由东南向西北递减。蒸散发量总体上东部大于西部,平均气温东高西低、南高北低,中下游高于上游,江南高于北部,江源区气温最低^[22-25]。受季风气候和复杂地形的双重影响,流域内洪水、干旱等自然灾害频繁发生^[25-27]。从土地覆盖类型来看(图 1),第一大植被类型是森林,约占流域总面积的 47.2%;第二是耕地,约占流域总面积的 28.1%;草地约占流域总面积的 18.9%,主要集中在流域西北地区。

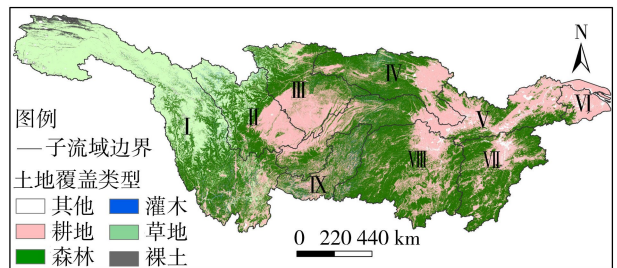


图 1 长江流域土地覆盖类型

Fig. 1 Land-cover types of the Yangtze River Basin

1.2 数据来源

本文数据包括观测数据、再分析数据和模型数据。观测数据包括日尺度的降水量(P)、相对湿度(R_H)、风速(w)、平均气温(T_a)、最高气温(T_{max}),来自中国科学院气候变化研究中心 CN05 格点化观测数据集(<https://ccrc.iap.ac.cn/>),该数据集是中国 2 400 余个国家级台站(基本、基准、一般站)的逐日观测数据使用距平逼近法由气候场和距平场插值后叠加得到^[28],空间分辨率为 0.25°。再分析数据包括短波辐射(SR)和土壤湿度(SM),来自 ERA5-land 数据集,空间分辨率为 0.25°,其中 SM 数据包含 3 个不同土壤层(0~7、>7~28、>28~100 cm),通过对 3 层土壤厚度加权处理获得深度为 100 cm 的土壤湿度数据^[29-31]。模型数据包括 GPP 和蒸散发(ET),GPP 来自国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>),该产品利用植被参数(叶面积指数、聚集度指数、地表覆盖)遥感数据、气象数据和大气 CO₂ 浓度数据等驱动北方生态系统生产力模拟器(BEPS)而生成,空间分辨率为 0.072 727°^[32]。蒸散发数据来自全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型(GLEAM)v3.8a 数据集,空间分辨率为 0.25°^[33-34],GLEAM 基于 Priestley-Taylor 方程以地面净辐射和地表气温观测数据为基础计算潜在蒸散发量,使用基于微波植被光学深度观测和根区土壤湿

度估计的乘法蒸发应力因子,将裸土、高冠层和矮冠层土地部分的潜在蒸发量估计值转换为实际蒸散发。

土地覆盖类型数据来自年度中国土地覆盖数据集 CLCD (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>)。该数据集基于谷歌地球引擎平台,使用 335 709 幅 Landsat 影像制作的第一个 Landsat 衍生的中国年度土地覆盖数据集,包含 1990—2019 年的土地覆盖类型及其动态,空间分辨率为 30 m,与其他产品相比分辨率和精度更高。本文采用 2019 年的土地覆盖类型数据对长江流域进行植被覆盖分类(图 1)。

由于国家生态科学数据中心的 GPP 数据时段为 1981—2019 年,且 1981 年存在数据缺失现象,所以本文的研究时段设为 1982—2019 年的生长季(4—9 月)。在开展分析前,采用线性插值方法把所有数据统一解集到 0.25° 的网格点上。

2 研究方法

2.1 骤旱事件识别

本文基于土壤湿度下降的方法^[9,35-36],在候(5 d)尺度上识别骤旱事件:①当土壤湿度首次降低到第 40 百分位数时,且土壤湿度百分位数下降速率超过 5%/候,骤旱开始进入爆发阶段,当土壤湿度低于第 20 百分位数时,骤旱爆发阶段终止;②当土壤湿度百分位数下降速率小于 5%/候或开始上升时,进入恢复阶段,当土壤湿度高于第 20 百分位数时,恢复阶段终止;③骤旱事件至少持续 4 候。将骤旱爆发阶段土壤湿度的平均下降速率定义为爆发速率(单位为%/候),骤旱爆发阶段的持续时间定义为爆发历时(单位为候),骤旱恢复阶段的持续时间定义为恢复历时(单位为候),骤旱从爆发到终止整体持续时间定义为骤旱历时(单位为候),一场骤旱事件中土壤湿度亏缺之和定义为骤旱烈度(单位为 mm)。

2.2 WUE 估算

WUE 是衡量生态系统碳水耦合关系的重要指标之一,反映不同时间尺度(秒、日、季节、年)和空间尺度(叶片、个体、生态系统、区域、全球)上植物固碳和耗水的比例^[37]。WUE 在生态系统尺度上的计算包括两部分:一是损耗生态系统水分的蒸散发过程;二是生态系统生产的干物质量,包括 GPP 和净初级生产量(NPP)。本文采用 GPP 与蒸散发的比值估算 WUE。

2.3 骤旱胁迫下 WUE 响应与恢复的定量评估框架

骤旱胁迫下 WUE 响应与恢复的定量评估框架

包括 WUE 对骤旱响应的共现率评估、WUE 下降时间与恢复时间估算、WUE 变化气象驱动机制解析 3 部分。主要研究思路为:①利用巧合分析法识别 WUE 对骤旱胁迫响应的敏感区;②基于非干旱影响下 WUE 基准值法,判别骤旱胁迫下 WUE 下降及恢复的过程,确定下降及恢复时间;③采用机器学习的方法量化主要气象因子对骤旱发展不同阶段 WUE 变化的相对贡献,解析 WUE 变化的气象驱动机制。

2.3.1 WUE 对骤旱响应的共现率评估

参考 Tang 等^[38]的研究,将小于研究时段内 WUE 第 10 百分位数且标准化异常值小于 0 的 WUE 定义为 WUE 极值,利用巧合分析量化骤旱与 WUE 极值的共现率:

$$C_R = N_{co} / N_{fd} \quad (1)$$

式中: C_R 为共现率,取值范围为 0~1; N_{co} 为研究时段内与 WUE 极值同时出现的骤旱事件次数; N_{fd} 为研究时段内发生骤旱事件的总次数。

考虑到植被对于干旱胁迫响应存在一定的滞后性^[39-42],统计 WUE 极值前 18 候发生的骤旱事件^[38],骤旱的 C_R 最大值首次出现时的候数定义为滞后时间。由于骤旱识别集中在 1982—2019 年生长季,因此滞后时间分年份进行识别。采用洗牌检验方法检验共现率的统计显著性^[38],显著性水平设为 0.01,通过洗牌检验的格点判定为骤旱敏感区。

2.3.2 WUE 下降时间及恢复时间估算

由于不同时期的植被覆盖状况和土壤水热状况有较大的差别,在分析因骤旱导致的 WUE 变化时,需要先确定非干旱影响下的 WUE 基准值。本文将非骤旱事件影响下(即剔除骤旱期间 WUE 数据)对应月份(4—9 月)的 WUE 多年平均值作为非干旱影响的 WUE 基准值。

图 2 为骤旱胁迫下 WUE 下降及恢复时间识别方法。由图 2 可见,在一场骤旱影响下,当 WUE 小于非干旱影响的 WUE 基准值时,表示骤旱导致 WUE 下降(如图 2(a)的骤旱 1 开始),随后 WUE 进入下降过程。当 WUE 开始上升并且首次大于前一候 WUE 值时,即认为 WUE 开始进入恢复阶段(如图 2(a)的恢复 1 开始),当 WUE 上升到大于非干旱影响的 WUE 基准值时(如图 2(a)的恢复 1 结束),则表示 WUE 恢复到非干旱影响的状态。由于本文关注作物生长季,若生长季结束之前 WUE 还未恢复到非干旱影响的状态,此种情景则不予考虑(如图 2(b))。对于连续骤旱事件,只要每场骤旱发生后出现 WUE 下降和恢复的过程,即认为是该骤旱事件造成的,WUE 变化只与当时发生的骤旱有关,与前一场骤旱无关(如图 2(c))。根据以上识别方

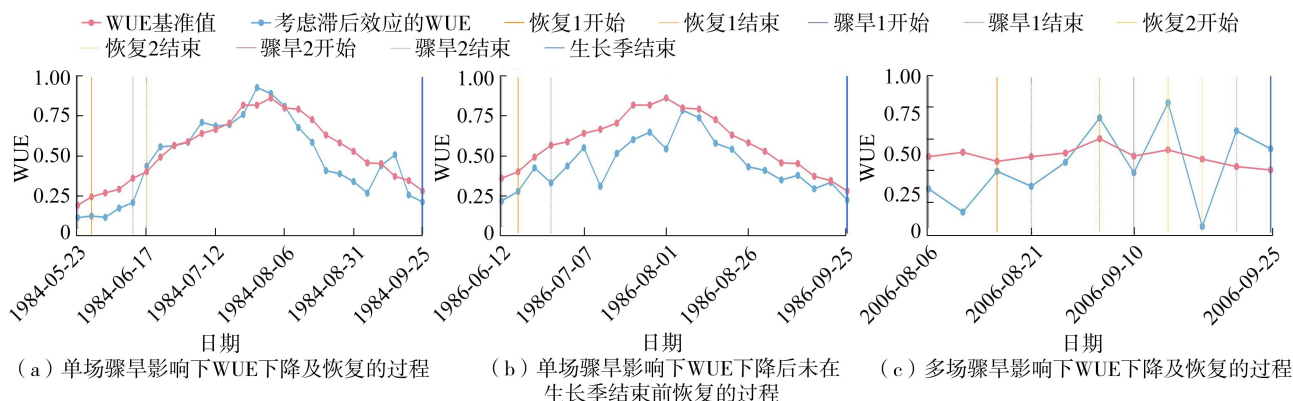


图2 骤旱胁迫下WUE的下降时间及恢复时间识别方法

Fig. 2 Decline time and recovery time identification method of WUE under flash drought stress

法,将WUE下降时间定义为WUE从开始下降到首次上升所持续的时间(单位为候),恢复时间定义为WUE开始上升到大于基准值所持续的时间(单位为候)。

2.3.3 WUE变化的气象驱动机制

随机森林模型是由Breiman^[43]提出的一种强大的集成学习方法,在分类和回归领域有广泛的应用,并表现出了良好的性能^[44-49]。本文采用随机森林回归(RFR)模型量化骤旱事件发展不同阶段WUE的气象驱动机制。具体来说,在骤旱爆发阶段、恢复阶段及整体阶段分别构建RFR模型。参考王秀英等^[50]的研究,选取土壤湿度和降水量、相对湿度、风速、平均气温、最高气温、蒸散发、短波辐射7个气象因子作为不同阶段模型的共同输入,除此之外,骤旱爆发阶段模型输入还包括爆发速率和爆发历时;骤旱恢复阶段模型输入还包括恢复历时;对于整体阶段,模型输入还包括骤旱烈度和骤旱历时。利用Python 3.12的'sklearn'包对RFR模型进行拟合。RFR从训练集中选择随机变量和随机样本,再使用确定性算法来构建大量决策树,之后平均这些决策树的结果来实现模型优化目标。具体的操作步骤为:①按照9:1的比例将原始数据随机分成训练集和测试集;②利用网格搜索交叉验证方法拟合最佳RFR模型参数,利用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)评估模型的拟合效果;③计算各因子的重要性占比。

3 结果与分析

3.1 WUE对骤旱的响应评估

图3为长江流域WUE对骤旱响应滞后时间的空间分布(图中空白表示未发生骤旱或未识别出骤旱与WUE极值的共现率,下同)。由图3可见,长江流域大部分区域WUE对骤旱响应的滞后时间在1候以内,主要集中于长江流域中部和东部。而长

江流域西北部,例如雅砻江流域北部地区、岷江流域西南部以及嘉陵江流域西南部等海拔草地覆盖区,WUE对骤旱响应的滞后时间普遍较长(>12候),同时可以看出WUE对骤旱响应的滞后时间呈现显著的空间异质性,这可能与长江流域的地形、植被类型以及人类活动有关。

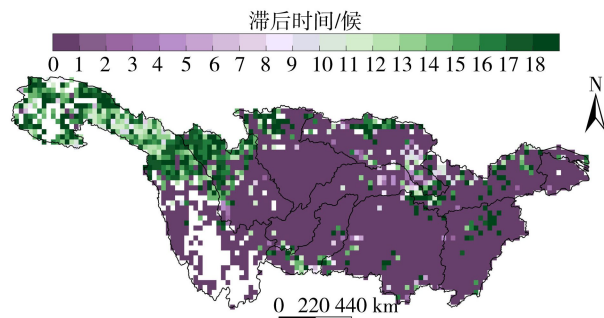


图3 长江流域WUE对骤旱响应的滞后时间空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of lag time of WUE response to flash drought in the Yangtze River Basin

图4为长江流域WUE极值与骤旱共现率的空间分布(图中“+”表示通过了显著性检验)。由图4可见,较大的共现率(>0.8)主要分布在岷江流域东南部、嘉陵江流域南部、汉江流域南部、太湖流域、乌江流域北部、洞庭湖流域以及鄱阳湖流域等地区,表

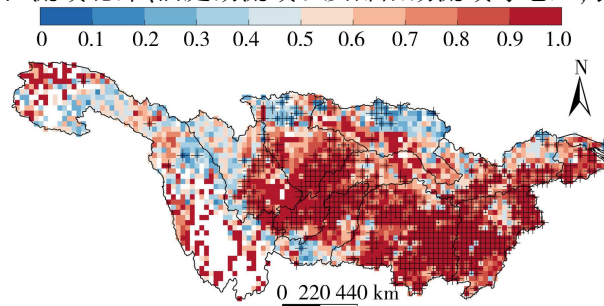


图4 长江流域WUE极值与骤旱共现率的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of co-occurrence rate between WUE extremum and flash drought in the Yangtze River Basin

明这些地区的 WUE 对骤旱较为敏感。而在嘉陵江流域西北部、汉江流域东北部以及乌江流域南部等高海拔地区,共现率相对较低(<0.4),表明这些地区 WUE 对骤旱的敏感性较低,这与高海拔地区 WUE 对骤旱响应滞时较长有关。通过洗牌检验发现,长江流域约 21.7% 的区域为骤旱敏感区,主要集中在流域中部和东南部(森林、耕地、草地分别占 66.8%、28.6%、1.2%)。

3.2 骤旱胁迫下 WUE 下降时间及恢复时间分布

图 5 为骤旱胁迫下长江流域 WUE 下降时间及恢复时间的空间分布。由图 5(a)可见,长江流域大部分地区 WUE 的下降时间为 1.0~2.5 候,雅砻江流域中部、岷江流域西北部、汉江流域东南部以及洞庭湖流域中部等少部分地区 WUE 的下降时间较长(≥ 3 候),其中雅砻江流域中部等高海拔地区 WUE 的下降时间最长可达 4.5 候,表明高海拔地区 WUE 对骤旱胁迫的响应时间通常更长。由图 5(b)可见,长江流域大部分地区 WUE 下降后的恢复时间为 1.5~3.5 候,其中雅砻江流域中部、岷江流域西北部和东南部、嘉陵江流域北部、汉江流域东部、长江干流流域东部、太湖流域以及洞庭湖流域南部等地区 WUE 所需要的恢复时间较长(≥ 4 候)。将图 5(a)与图 5(b)进行对比,可以发现在部分地区,如雅砻江流域中部,WUE 的下降时间及恢复时间均较长,整体表现出较弱的恢复力;而乌江流域、洞庭湖流

域、鄱阳湖流域大部分地区的 WUE 恢复时间相对较短,主要与其下降时间较短有关。

3.3 骤旱不同阶段的指标变化规律

对 WUE、GPP、土壤湿度、降水量、相对湿度、风速、平均气温、最高气温、蒸散发、短波辐射、土壤湿度等指标进行分析,得到骤旱发生前后指标异常值(指标值减去多年平均值再除以标准差)变化情况,如表 1 所示。由表 1 可见,WUE 从 $t-3$ 到 t 逐渐降低,在 t 和 $t-1$ 时为负异常;从 t 到 $t+1$ 短暂回升正异常后再度下降, $t+3$ 时接近 0。GPP 从 $t-3$ 到 $t-1$ 缓慢上升, t 时骤降为负异常,到 $t+2$ 上升为正异常后,于 $t+3$ 时为负且接近 0。降水量从 $t-3$ 到 $t-1$ 加速下降达到负异常,从 $t-1$ 到 $t+1$ 加速回升并达到峰值,从 $t+1$ 到 $t+3$ 再度下降至负异常且接近 0。降水量的变化驱动了土壤湿度的变化,土壤湿度从 $t-3$ 到 t 持续下降(降幅递增), t 时降为负异常,从 t 到 $t+3$ 缓慢回升但仍未回到正异常。随着降水量的变化,相对湿度也呈现相似的趋势,从 $t-3$ 到 t 为下降趋势, $t+1$ 时回升至正异常,之后再下降趋近于 0。风速从 $t-3$ 到 $t-1$ 上升至峰值,随后到 $t+1$ 时下降至负异常,之后又回升,但仍处于负异常状态。平均气温和最高气温从 $t-3$ 到 t 上升至峰值,表明骤旱爆发时通常伴随着高温热浪,随后从 t 到 $t+1$ 下降,且接近 0,之后从 $t+1$ 到 $t+3$ 减速回升。短波辐射从 $t-3$ 到 $t-1$ 加速上升至峰值,由于气温降低,短波辐

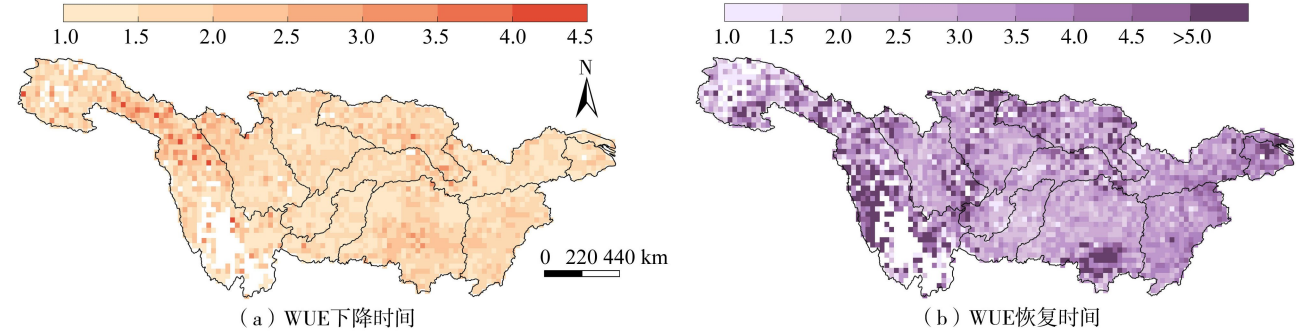


图 5 骤旱胁迫下长江流域 WUE 下降时间及恢复时间的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of WUE decline time and recovery time in the Yangtze River Basin under flash drought stress

表 1 骤旱发生前后的指标异常值

Table 1 Abnormal values of indexes before and after flash drought

阶段	WUE	GPP	ET	SM	P	R_H	T_a	T_{max}	w	SR
$t-3$	0.15	0.41	0.09	0.45	0.41	0.30	0.30	0.21	-0.09	-0.03
$t-2$	0.01	0.46	0.27	0.42	0.25	0.20	0.37	0.30	-0.06	0.13
$t-1$	-0.35	0.46	0.88	0.15	-0.39	-0.39	0.59	0.64	0.14	0.80
t	-0.46	-0.14	0.80	-1.23	-0.31	-0.56	0.83	0.89	0.13	0.56
$t+1$	0.48	0.01	-0.46	-0.55	0.66	0.65	0.15	-0.03	-0.30	-0.75
$t+2$	0.05	0.09	0.06	-0.31	-0.01	0.25	0.28	0.23	-0.26	-0.20
$t+3$	0.01	-0.03	0.06	-0.28	-0.07	0.20	0.32	0.28	-0.23	-0.21

注: t 为骤旱期间; $t-3$ 、 $t-2$ 、 $t-1$ 为骤旱发生前 3 候; $t+1$ 、 $t+2$ 、 $t+3$ 为骤旱结束后 3 候。

射在 $t+1$ 时下降,随后到 $t+3$ 时逐步回升,但仍为负异常。在降水量、相对湿度、风速、平均气温、最高气温的共同作用下,蒸散发从 $t-3$ 到 $t-1$ 快速上升(其中从 $t-2$ 到 $t-1$ 升幅显著),表明蒸散发增强是骤旱爆发的重要征兆,随着骤旱爆发,蒸散发到 $t+1$ 时急剧下降,骤旱结束后又缓慢上升。

3.4 骤旱不同阶段 WUE 变化的气象驱动机制

图 6 为骤旱不同阶段各因子对主要土地覆盖类型 WUE 的贡献率。由图 6 可见,对于林地来说,骤旱爆发阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率最大(30.6%),其次是最高气温(18.2%)、相对湿度(13.0%)、短波辐射(11.5%),其他因子对 WUE 的影响较小($\leq 6\%$)。骤旱恢复阶段,短波辐射对 WUE 的贡献率最大(34.1%),其次是蒸散发(29.0%)、相对湿度(13.4%),最高气温等其他因子影响有限($<6\%$)。以上对比表明,骤旱爆发阶段,蒸散发对林地 WUE 的影响最强,最高气温次之,而恢复阶段短波辐射对 WUE 的影响最强,蒸散发次之。整体阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率最大(33.5%),其次是最高气温(15.5%)、短波辐射(14.3%)、相对湿度(11.9%),其他因子的贡献率均不超过 6%。对于耕地,骤旱爆发阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率最大(43.7%),其次是最高气温(9.8%)、相对湿度(9.8%)、短波辐射(9.3%)、降水量(8.4%),其他因子的影响有限($<6\%$)。骤旱恢复阶段,降水量对 WUE 的贡献率最大(36.0%),其次是蒸散发(22.3%)、短波辐射(17.6%)、最高气温(7.4%),其他因子的贡献率均不超过 6%。以上对比表明,骤旱爆发阶段蒸散发对耕地 WUE 的影响最大,而在恢复阶段,降水量对 WUE 的影响最强,蒸散发次之。整体阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率最大(48.7%),其他因子的贡献均小于 10%。对

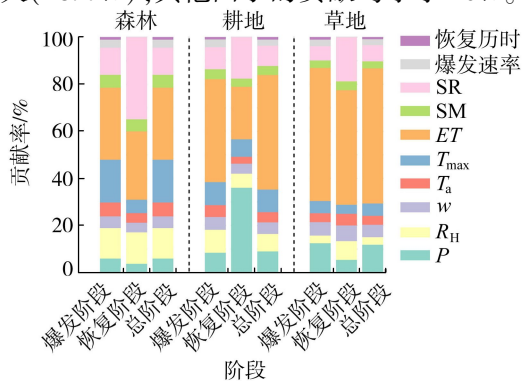


图 6 骤旱不同阶段各因子对主要土地覆被类型 WUE 的贡献率

Fig. 6 Contribution rates of various factors to WUE of major land cover types during different stages of flash drought

于草地,骤旱爆发阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率最大(56.5%),其次是降水量(12.5%),其他因子的贡献均不超过 7%。骤旱恢复阶段,蒸散发的贡献率依然最大(48.7%),其次是短波辐射(18.8%),其他因子的贡献率均不超过 8%。整体阶段,蒸散发对 WUE 的贡献率也是最大(57.4%),其次是降水量(11.8%)和短波辐射(6.9%)。

3.5 讨论

干旱会改变环境因子和生物因子对生态系统碳水通量的驱动过程,进而影响资源利用效率。本文的研究表明,长江流域森林、耕地、草地的 WUE 对骤旱的响应既存在一定的相似性也呈现出显著差异。WUE 对骤旱响应的敏感区主要分布于长江流域中部和东南部等湿润地区,其中森林生态系统占比达 66.8%,这与冀永泽等^[51]的发现一致,其研究指出南方湿润地区森林对骤旱的响应更脆弱,呈现低抵抗力-高恢复力的特点。这种现象的原因可能是南方湿润区森林长期适应多雨环境,树种水力结构偏高效输水、抗旱性弱,骤旱下易发生水力失调与生产力下降;同时,这类区域水热与土壤条件优越,旱后降水与养分恢复快,植被可快速修复生长,因此整体表现出对骤旱的高敏感性。

基于 RFR 模型的归因分析表明,在骤旱爆发阶段,蒸散发对长江流域主要土地覆盖类型 WUE 的贡献率均最大(森林 30.6%、耕地 43.7%、草地 56.5%),表明水分限制是该阶段 WUE 变化的主导因子。尤其在草地生态系统中,不同骤旱阶段蒸散发的贡献率均接近 50%,这与其独特的水分利用策略紧密相关。相关研究发现,面对土壤持续干旱化,草地倾向于采取更为“激进”的水分利用策略,通过强化水分竞争维持较高的蒸腾速率,进而对 WUE 产生显著调控作用^[52]。在骤旱恢复阶段,不同类型植被 WUE 对气象因子的响应存在明显差异,主要表现在短波辐射、降水量、蒸散发分别是森林(贡献率为 34.9%)、耕地(36.0%)、草地(48.7%)的 WUE 变化的主导因子,表明随着水分胁迫逐步缓解,不同生态系统 WUE 的气候驱动路径与调控机制呈现明显差异。3 种植被生态系统响应的差异可归因于其生存机制,森林冠层需通过光能捕获效率优化(如气孔动态调节、叶倾角调整)加速光合恢复,减少高温残余影响(最高气温贡献率仅为 5.7%)^[53-54],耕地农作物恢复则高度依赖外源水分补给,而草本植物由于根系较浅,在水分条件改善后仍需通过高蒸散策略维持代谢活性^[52]。

本文研究的核心意义在于识别了长江流域生态水分利用效率对骤旱胁迫响应的敏感区,深化了对

长江流域主要植被类型生态系统水分利用效率动态响应机制的理解。植被 WUE 的变化不仅受气候因素影响,同时还与下垫面条件(如海拔、土壤质地)密切相关^[55-57],未来需要考虑下垫面等静态特征以及土地利用变化等动态因素,并进一步扩展土地覆盖类型(如湿地),系统解析骤旱胁迫下流域下垫面特征对不同植被 WUE 恢复的调控机制。

4 结 论

a. 构建了长江流域骤旱胁迫下 WUE 下降及恢复的定量识别框架,发现流域上游高海拔草地 WUE 对骤旱响应的滞后性更为显著(滞后时间大于 12 候),其他大部分地区的滞后时间在 1 候以内,WUE 对骤旱响应的敏感区主要分布于长江流域中部和东南部。

b. 长江流域骤旱胁迫下大部分地区的 WUE 下降时间为 1.0~2.5 候,大部分地区的 WUE 恢复时间为 1.5~3.5 候,其中雅砻江流域中部、岷江流域西北部和东南部、汉江流域东部以及洞庭湖流域南部等地区的恢复时间较长(≥ 4 候)。

c. 气温升高与相对湿度下降所导致的蒸散发增强为骤旱爆发创造了有利条件,骤旱期间土壤水快速消耗导致 WUE 下降,后期降水补给促使骤旱结束与 WUE 恢复。骤旱爆发阶段蒸散发对所有类型植被 WUE 的影响均最大,而恢复阶段短波辐射、降水量、蒸散发分别是森林、耕地、草地 WUE 的主导因子。

参考文献:

[1] 武传号,黎梓涛,王赛赛,等. 1981—2021 年中国季节性干旱与骤发干旱的时空响应关系评估[J]. 水资源保护,2025,41(2):149-157. (Wu Chuanhao, Li Zitao, Wang Saisai, et al. Evaluation of spatiotemporal response relationship between seasonal drought and flash drought in China from 1981 to 2021[J]. Water Resources Protection, 2025,41(2):149-157. (in Chinese))

[2] Wang Yumiao, Yuan Xing. High temperature accelerates onset speed of the 2022 unprecedented flash drought over the Yangtze river Basin [J]. Geophysical Research Letters,2023,50(22):e2023GL105375.

[3] Yuan Xing, Wang Linying, Wu Peili, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China[J]. Nature Communications,2019,10(1):4661.

[4] Yuan Xing, Wang Linying, Wood E F. Anthropogenic intensification of southern African flash droughts as exemplified by the 2015/16 season [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2018,99(1):S86-S90.

[5] Wang Linying, Yuan Xing, Xie Zhenghui, et al. Increasing

flash droughts over China during the recent global warming hiatus [J]. Scientific Reports,2016,6(1):30571.

[6] Christian J I, Basara J B, Otkin J A, et al. A methodology for flash drought identification: application of flash drought frequency across the united states [J]. Journal of Hydrometeorology,2019,20(5):833-846.

[7] Christian J I, Basara J B, Hunt E D, et al. Flash drought development and cascading impacts associated with the 2010 Russian heatwave [J]. Environmental Research Letters,2020,15(9):094078.

[8] 郝增超,张璇,郝芳华,等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对 [J]. 水资源保护,2023,39(6):46-52. (Hao Zengchao, Zhang Xuan, Hao Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):46-52. (in Chinese))

[9] Yuan Xing, Wang Yumiao, Ji Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. Science,2023,380(6641):187-191.

[10] Christian J I, Martin E R, Basara J B, et al. Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate [J]. Communications Earth & Environment,2023,4(1):165.

[11] Jiang Yanmin, Shi Haijing, Wen Zhongming, et al. Monitoring of flash drought on the loess Plateau and its impact on vegetation ecosystems [J]. Forests, 2024, 15(8):1455.

[12] Zhao Yue, Xiong Lihua, Yin Jiabo, et al. Understanding the effects of flash drought on vegetation photosynthesis and potential drivers over China [J]. Science of The Total Environment,2024,931:172926.

[13] Yang Liyan, Wang Weiguang, Wei Jia. Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2023,339:109545.

[14] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应 [J]. 水资源保护,2023,39(4):32-41. (Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):32-41. (in Chinese))

[15] Kang Minsun, Hao Yuefeng, Choi M. The effects of flash drought on the terrestrial ecosystem in Korea [J]. Journal of Hydrology,2023,624:129874.

[16] Zhu Yanchao, Yang Peng, Xia Jun, et al. Differential impact of flash droughts on water use efficiency in terrestrial ecosystems in Central Asia [J]. Climatic Change,2025,178(3):53.

[17] Zhang Miao, Yuan Xing. Rapid reduction in ecosystem

- productivity caused by flash droughts based on decade-long FLUXNET observations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(11):5579-5593.
- [18] Hu Chen, She Dunxian, Wang Gangsheng, et al. Soil moisture and precipitation dominate the response and recovery times of ecosystems from different types of flash drought in the Yangtze River Basin [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 358:110236.
- [19] Song Zhihong, Xia Jun, She Dunxian, et al. The development of a Nonstationary Standardized Precipitation Index using climate covariates: a case study in the Middle and Lower reaches of Yangtze River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588:125115.
- [20] Tian Rong, Cao Chunxiang, Peng Ling, et al. The use of HJ-1A/B satellite data to detect changes in the size of wetlands in response in to a sudden turn from drought to flood in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River system in China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, 7(1):287-307.
- [21] 熊立华, 李姝仪, 查悉尼. 基于多源数据的长江流域 1982—2022 年骤旱事件时空演变 [J]. *水科学进展*, 2024, 35(1):24-37. (Xiong Lihua, Li Shuyi, Zha Xini. Temporal and spatial evolution of flash drought events in the Yangtze River Basin from 1982 to 2022 based on multi-source data [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1):24-37. (in Chinese))
- [22] Yang Hongfei, Zhong Xuanning, Deng Siqi, et al. Impact of LUCC on landscape pattern in the Yangtze River Basin during 2001-2019 [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 69:101631.
- [23] 黄长生, 周耘, 张胜男, 等. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状 [J]. *中国地质*, 2021, 48(4):979-1000. (Huang Changsheng, Zhou Yun, Zhang Shengnan, et al. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization [J]. *Geology in China*, 2021, 48(4):979-1000. (in Chinese))
- [24] Dai S B, Lu X X. Sediment load change in the Yangtze River (Changjiang): a review [J]. *Geomorphology*, 2014, 215:60-73.
- [25] Jia Huicong, Chen Fang, Pan Donghua, et al. Flood risk management in the Yangtze River Basin: Comparison of 1998 and 2020 events [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 68:102724.
- [26] Wang Wei, Lin Hui, Chen Nengcheng, et al. Evaluation of multi-source precipitation products over the Yangtze River Basin [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249:105287.
- [27] Chen Jing, Wu Xiaodan, Finlayson B L, et al. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513:403-412.
- [28] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4):1102-1111. (Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4):1102-1111. (in Chinese))
- [29] Ma Feng, Yuan Xing. The propagation from atmospheric flash drought to soil flash drought and its changes in a warmer climate [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 654:132877.
- [30] Wang Menghao, Menzel L, Jiang Shanhu, et al. Evaluation of flash drought under the impact of heat wave events in southwestern Germany [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 904:166815.
- [31] Zhang Erya, Wang Qingzheng, Guan Qingyu, et al. Re-intensification of flash drought in western China over the past decade: implications of fluctuating wetting trend [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 919:170878.
- [32] He Qiaoning, Ju Weimin, Dai Shengpei, et al. Drought risk of global terrestrial gross primary productivity over the last 40 years detected by a remote sensing-driven process model [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(6):e2020JG005944.
- [33] De Jeu R, Miralles D, Holmes T, et al. Estimating global land surface evaporation from satellite-based observations [J]. *Earth Observation and Water Cycle Science*, 2009, 674:25.
- [34] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5):1903-1925.
- [35] Wang Yumiao, Yuan Xing. Land-atmosphere coupling speeds up flash drought onset [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 851:158109.
- [36] Xi Xiazhen, Liang Miaoling, Yuan Xing. Increased atmospheric water stress on gross primary productivity during flash droughts over China from 1961 to 2022 [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2024, 44:100667.
- [37] 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 Xiaozheng, Zhao Xiang, Wang Haoyu, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23):8296-8305. (in Chinese))
- [38] Tang Jiwang, Niu Ben, Hu Zhigang, et al. Increasing susceptibility and shortening response time of vegetation productivity to drought from 2001 to 2021 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 352:110025.
- [39] Wu Chuanhao, Zhong Lulu, Yeh P J F, et al. An evaluation framework for quantifying vegetation loss and recovery in response to meteorological drought based on SPEI and

- NDVI[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167632.
- [40] Zhao Anzhou, Yu Qiuyan, Feng Lili, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110214.
- [41] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4): 23-30. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Liu Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4): 23-30. (in Chinese))
- [42] Zhang Ke, Li Zhilin, Shi Wuzhi, et al. Spatiotemporal changes and interconnections between meteorological and hydrological droughts in China over past 34 years[J]. *Water Science and Engineering*, 2025, 18(3): 274-287.
- [43] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [44] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomForest[J]. *R News*, 2002, 2(3): 18-22.
- [45] Youssef A M, Al-Kathery M, Pradhan B. Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models[J]. *Geosciences Journal*, 2015, 19(1): 113-134.
- [46] Al-Asadi M A, Tasdemir S. Predict the value of football players using FIFA video game data and machine learning techniques[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 22631-22645.
- [47] Nandy S, Saranya M, Srinet R. Spatio-temporal variability of water use efficiency and its drivers in major forest formations in India[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 269: 112791.
- [48] Speer M, Hartigan J, Leslie L M. Machine learning identification of attributes and predictors for a flash drought in eastern Australia[J]. *Climate*, 2024, 12(4): 49.
- [49] 钟加星, 董增川, 孟金玉, 等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in Upper reaches of Yellow River based on machine learning[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [50] 王秀英, 周秉荣, 苏淑兰, 等. 青藏高原高寒草甸和荒漠碳交换特征及其气象影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 1194-1208. (Wang Xiuying, Zhou Bingrong, Su Shulan, et al. Carbon exchange characteristics and meteorological influence mechanism of Alpine Meadow and Desert in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1194-1208. (in Chinese))
- [51] 冀永泽, 姜超, 朱丹, 等. 2001—2021年中国陆地生态系统对骤旱的响应[J/OL]. *生态学报*, 1-8 [2025-06-15]. <https://www.ecological.cn/stxb/article/abstract/stxb202508262218>. (Ji Yongze, Jiang Chao, Zhu Dan, et al. The responses of terrestrial ecosystems to flash droughts in China from 2001 to 2021 [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 1-8 [2025-06-15]. <https://www.ecological.cn/stxb/article/abstract/stxb202508262218>. (in Chinese))
- [52] Morgan B E, Araki R, Trugman A T, et al. Ecological and hydroclimatic determinants of vegetation water-use strategies[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2025, 9(10): 1791-1799.
- [53] Viallet-Chabrand S R M, Matthews J S A, Mcausland L, et al. Temporal dynamics of stomatal behavior: modeling and implications for photosynthesis and water use[J]. *Plant Physiology*, 2017, 174(2): 603-613.
- [54] Wieneke S, Pacheco-Labrador J, Mahecha M D, et al. Comparing the quantum use efficiency of red and far-red sun-induced fluorescence at leaf and canopy under heat-drought stress[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311: 114294.
- [55] 孙桂凯, 黄瑞, 王国帅, 等. 2001—2018年西江流域水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 327-335. (Sun Guikai, Huang Rui, Wang Guoshuai, et al. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its influencing factors in Xijiang River Basin from 2001 to 2018 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 327-335. (in Chinese))
- [56] Xue Baolin, Guo Qinghua, Otto A, et al. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-18.
- [57] Sun Xiangyang, Wang Genxu, Huang Mei, et al. The asynchronous response of carbon gain and water loss generate spatio-temporal pattern of WUE along elevation gradient in southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124389.

(收稿日期: 2025-08-21 编辑: 王芳)

