北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

塔里木河流域水分利用效率时空变化及其气候响应

潘雨 谭立佳 马榕 温玉杰 贾昕

Spatiotemporal dynamics of water use efficiency in the Tarim River Basin of western China and its response to climate change

Pan Yu, Tan Lijia, Ma Rong, Wen Yujie, Jia Xin

引用本文:
潘雨, 谭立佳, 马榕, 温玉杰, 贾昕. 塔里木河流域水分利用效率时空变化及其气候响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):173–183. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260054
Pan Yu, Tan Lijia, Ma Rong, Wen Yujie, Jia Xin. Spatiotemporal dynamics of water use efficiency in the Tarim River Basin of western China and its response to climate change[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):173–183. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260054

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260054

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

庐山日本柳杉水分利用效率对气候变化的响应
Response of water use efficiency of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, Jiangxi Province of eastern China
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 48–57. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220279

北京地区典型绿化树种水分利用效率及其影响因素
Water use efficiency and its influencing factors of typical greening tree species in Beijing region
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 44–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200293

基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应
Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250428

兴安落叶松林气候适宜性与生产力的关系
Relationship between climatic suitability and productivity of *Larix gmelinii* forest
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220361

荆条叶片最大水分利用效率的季节变化及其环境调控
Dynamics and environmental regulation of the maximum leaf water use efficiency of *Vitex negundo* var. *heterophylla* during growing season
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 52–61. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220347

鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素
Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 23–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250312

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260054

塔里木河流域水分利用效率时空变化及其气候响应

潘 雨[1] 谭立佳[1] 马 榕[1] 温玉杰[1] 贾 昕[1,2,3]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站，北京 100083；
3. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】全球气候变化下的旱区生态系统碳水循环地位日益凸显，生态系统水分利用效率作为衡量碳水耦合关键指标，其变化直接关系到生态系统功能的稳定性，因此明确旱区水分利用效率（WUE）的时空格局演变及其气候驱动因素是准确预测未来碳水循环对气候变化响应的重要前提。**【方法】**本研究以生态系统水分利用效率为对象，基于谷歌地球引擎平台调取 2001—2020 年 MODIS 遥感长时序数据，通过总初级生产力与蒸散发比值法计算并构建塔里木河流域 WUE 数据集；在此基础上，运用趋势分析和偏相关分析等方法，系统探究了 2001—2020 年塔里木河流域典型生态系统类型（农田、森林、草地）WUE 时空变化及其对气候因子的响应。**【结果】**（1）全流域及各生态系统年 WUE 均呈显著下降趋势。相对贡献率分析表明，ET 增长负向作用（59.12%）高于 GPP 增加的正向抵消作用（40.88%），是 WUE 下降的主导因素；（2）年 WUE 的时序变化及年际波动（去趋势后的时序变化）均与温度呈正相关、与降水呈负相关，其中长期趋势主要受降水调控，而年际波动则主要受温度驱动；（3）农田和森林 WUE 同样表现出与温度呈正相关、与降水呈负相关的特征，且农田 WUE 年际波动受温度调控明显；（4）月 WUE 对气候因子响应存在滞后性，滞后温度和降水分别为（2.37 ± 1.05）个月和（1.08 ± 1.25）个月，且农田对降水的滞后期显著短于森林，而对温度的响应滞后则显著长于森林。**【结论】**塔里木河流域 WUE 呈显著下降趋势，未来升温和降水增加可能通过加速蒸散发进一步抑制旱区 WUE，这意味着维持碳汇功能将面临更严峻的水资源压力，流域水资源配置与生态管理应考虑 WUE 气候响应的时间尺度差异及时滞特征。

关键词：水分利用效率（WUE）；气候变化；时滞效应；碳水循环；生产力

中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0173−11

引文格式：潘雨，谭立佳，马榕，等. 塔里木河流域水分利用效率时空变化及其气候响应［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：173−183. Pan Yu, Tan Lijia, Ma Rong, et al. Spatiotemporal dynamics of water use efficiency in the Tarim River Basin of western China and its response to climate change［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 173−183.

Spatiotemporal dynamics of water use efficiency in the Tarim River Basin of western China and its response to climate change

Pan Yu[1] Tan Lijia[1] Ma Rong[1] Wen Yujie[1] Jia Xin[1,2,3]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Yanchi Ecological Research Station of the Mu Us Sandy Land, Beijing 100083, China;
3. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］Under global climate change, the role of dryland ecosystems in the carbon-water cycle has become increasingly prominent. As a key indicator for measuring carbon-water coupling, changes in ecosystem water use efficiency (WUE) directly affect the stability of ecosystem functions. Therefore, clarifying the spatiotemporal pattern evolution of WUE in drylands and its climatic drivers is an important

收稿日期: 2026−01−30 **修回日期:** 2026−04−23

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目（2022xjkk0201），国家重点研发计划课题（2023YFF0805604），中央高校基本科研业务费专项资金项目（PTYX202526、PTYX202530、PTYX202533）。

第一作者: 潘雨。主要研究方向：生态系统碳水循环。Email：panyu@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 贾昕，博士，教授。主要研究方向：植物间相互作用、植物多样性和生态系统碳水循环。Email：xinjia@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

prerequisite for accurately predicting the response of the future carbon-water cycle to climate change. [**Method**] This study took ecosystem water use efficiency as the research object. Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, long-term MODIS remote sensing data from 2001 to 2020 were retrieved, and a WUE dataset for the Tarim River Basin was calculated and constructed using the ratio method of gross primary productivity (GPP) to evapotranspiration (ET). On this basis, methods such as trend analysis and partial correlation analysis were used to systematically investigate the spatiotemporal changes in WUE and its responses to climatic factors for typical ecosystem types (cropland, forest, and grassland) in the Tarim River Basin from 2001 to 2020. [**Result**] (1) Annual WUE showed a significant decreasing trend at both the basin and ecosystem scales. Relative contribution analysis indicated that the WUE decline was dominated by the negative impact of ET increase (59.12%), which offset the positive contribution of GPP growth (40.88%). (2) Both temporal variation and interannual variability of WUE were positively correlated with temperature and negatively correlated with precipitation. Specifically, long-term trends were mainly regulated by precipitation, while interannual variability was primarily driven by temperature. (3) Cropland and forest WUE also exhibited positive correlations with temperature and negative correlations with precipitation, with the interannual variability of cropland WUE being significantly regulated by temperature. (4) Monthly WUE showed a significant time-lag response to climatic factors, with lag times of (2.37 ± 1.05) months for temperature and (1.08 ± 1.25) months for precipitation. Notably, the lag time of cropland response to precipitation was significantly shorter than that of forests, whereas its response lag to temperature was significantly longer. [**Conclusion**] WUE in the Tarim River Basin showed a significant declining trend. Future warming and increasing precipitation may further suppress WUE in this arid region by accelerating evapotranspiration, implying greater water resource pressure for maintaining carbon sink functions. Therefore, water allocation and ecological management in the basin should account for the time-scale differences and lagged responses of WUE to climatic factors.

Key words: water use efficiency (WUE); climate change; time-lag effect; carbon and water cycles; productivity

包括干旱、半干旱地区的旱区占全球陆地面积 40% 以上，是全球陆地碳水循环中年际变率最大、对气候扰动最为敏感的区域之一[1−2]。在未来气候变暖、降水格局改变及极端气候频发的背景下，旱区碳水循环过程将受到显著影响[3]。生态系统水分利用效率（water use efficiency，WUE）通常定义为总初级生产力（gross primary productivity，GPP）与蒸散发（evapotranspiration，ET）的比值，是反映陆地生态系统碳水耦合循环的关键指标[4−5]。目前，获取区域尺度 WUE 的方法主要包括涡度相关通量观测、过程模型模拟和遥感反演等。尽管遥感产品凭借其长时序、全覆盖的优势，克服了传统通量观测空间代表性不足及过程模型参数化的难题，为大尺度监测提供了可能，但目前关于旱区 WUE 如何响应长期气候变化及其在不同时空尺度上的驱动机制，仍存在较大不确定性。

这种不确定性首先体现在区域尺度分异上。虽然全球尺度 WUE 总体呈上升或饱和状态[6−7]，但区域尺度研究尚未有一致结论。北半球温带森林 WUE 表现为显著上升[8]，而中国西北部分旱区则观察到下降趋势[9−10]。这种分异通常源于主导气候因子空间差异及生态系统生理响应不同：在北方森林和高寒草地，温度升高通过延长生长季促进 GPP，从而主导 WUE 变化[11−12]；而在水分受限的旱区，尽管降水增加可缓解水分胁迫并促进碳吸收，但强烈的蒸发需求往往导致 ET 增速超过 GPP，从而抵消了降水正效应，引发生态系统 WUE 下降[13−14]。目前，对于生态系统 WUE 变化方向及其主控因子的争议限制了我们对区域碳水耦合机制的准确理解。

关于主控因子的争议，很大程度上还源于对不同时间尺度驱动机制的混淆。生态系统 WUE 多年时间序列变化可剖分为长期趋势（long-term trends）和年际波动（interannual variability，IAV）2 个不同时间尺度组分。前者反映累积性变化，后者多由短期气候异常驱动。已有研究发现，大气 CO_2 浓度和温度分别主导了 3 个关键生态系统资源利用效率（碳、光和水分利用效率）的长期趋势和年际变化[11]，且中国北方植被的长期趋势与年际波动分别受控于气候

变暖和降水波动[15]。以上研究表明,仅依赖简单线性回归分析易掩盖多时间尺度的复杂性,需将生态系统 WUE 的时间序列剖分为长期趋势和年际波动 2 个独立组分进行解析,才能更准确识别其气候驱动机制。然而,目前针对旱区生态系统,尚缺乏关于这两个时间尺度上气候驱动因子一致性与差异性的系统评估。

除了响应的时间尺度依赖性外,气候因子对生态系统过程的驱动还表现出显著的时间非同步性(即时滞效应)。全球及中亚尺度的研究证实,GPP 对干旱存在 1 ~ 3 个月的滞后响应[16−17],且考虑时滞效应能显著增强降水对碳吸收解释的准确性[18]。这些研究结果强调了先前气候因素对生态系统过程的重要影响。然而,目前关于 WUE 对气候因素响应是否存在滞后,以及这种滞后在不同生态系统类型间有何差异的研究仍然较少,忽视这种季节尺度的动态反馈限制了对 WUE 动态变化的精准预测。

塔里木河流域位于新疆南部,是我国最大的内陆河流域,生态环境脆弱且对气候变化极度敏感[19−20]。作为典型的绿洲−荒漠复合生态系统,该区域不同植被类型水分利用策略存在本质差异。然而,目前该区域研究多聚焦于局部群落或特定工程(如生态输水)对气候变化的响应[21−22],缺乏对流域典型生态系统 WUE 气候响应机制的系统探究。基此,本研究利用 2001—2020 年 MODIS 遥感数据,旨在:(1)明确塔里木河流域 WUE 的时空格局演变;(2)剖析 WUE 长期趋势与年际波动对水热因子的差异化响应;(3)定量评估 WUE 对水热因子的时滞响应。研究结果将为旱区生态管理及碳水循环预测提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

塔里木河流域位于南疆,处于亚欧大陆中部(34°55′~43°08′N,73°10′~94°05′E),流域面积约为 102×10^4 km^2。流域地形复杂,四周被高山环绕,其中北部为天山山脉,西部为帕米尔高原,西南部为喀喇昆仑山脉,南部为昆仑山山脉,中部为塔里木盆地,海拔范围为 63 ~ 8 430 m。流域年降水稀少但蒸发十分强烈,年均降水量 116.8 mm,年潜在蒸发量 800 ~ 2 200 mm[23],平均温度 7 ~ 13 ℃。受气候变化影响,塔里木河流域呈现“暖湿化”趋势,近 50 年平均气温增幅为 0.28 ℃/10 a,降水增幅 6.05 mm/10 a[24]。不同区域气候条件差异显著,山区年降水量 100 ~ 500 mm,盆地边缘大部分区域 50 ~ 80 mm,但东南缘更为干旱(20 ~ 30 mm),而盆地中心仅低至 10 mm。流域主要生态系统类型包括灌丛、森林、农田、草地等(图 1b)。其中,草地广泛分布于山区,森林主要沿塔里木河河道两侧呈带状分布,农田主要集中在塔里木河干流及支流沿岸的绿洲灌区,并长期受人工灌溉影响。

1.2　数据来源

使用的所有研究数据均来自于公开可利用的数

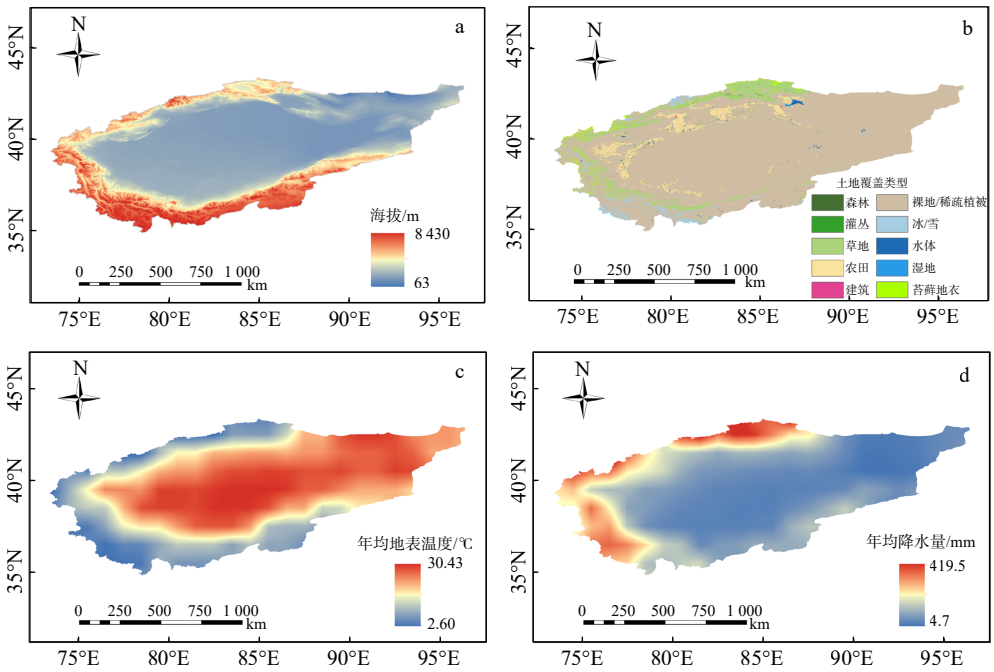


图 1　2001—2020 年塔里木河流域海拔(a)、土地覆盖类型(b)、年均地表温度(c)、年均降水量(d)的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of elevation (a), land cover types (b), annual mean surface temperature (c), and annual mean precipitation (d) in the Tarim River Basin in 2001–2020

据产品，包括总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)、降水量、地表温度、塔里木河流域矢量数据、土地覆盖类型数据，具体介绍见表 1。

塔里木河流域矢量数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心。所有数据产品均通过谷歌地球引擎(google earth engine，GEE)平台获取并完成前期预处理。为确保多源数据空间分辨率匹配，所有空间数据均统一至 500 m 分辨率，分辨率较低的气象数据(温度、降水等)采用双线性插值重采样。本研究使用遥感反演的地表温度(LST)而非空气温度，以更直接反映下垫面所处的热环境。GPP 和 ET 为 8 d 分辨率数据，产品已尽可能减弱云、雪等低质量输入的影响，因此本文直接基于产品数据开展月尺度和年尺度合成分析；CHIRPS 降水和 MOD11A1 地表温度均为日尺度数据，前者按月累加并进一步累加得到年值，后者按月取平均并进一步计算年平均值。

土地利用数据划分为森林、灌丛、草地、农田、建筑、裸地、冰/雪、水体以及湿地 9 类。考虑到灌丛及低覆盖度植被在 500 m 尺度下更易与裸地形成混合像元，分类不确定性较高，而森林、草地和农田在研究区内空间连续性较好，因此后续分析选取森林、草地和农田进行统计。

1.3 数据分析

观测数据年值的长时间序列可按时间尺度分为两部分：长期趋势和去趋势后的年际波动。本研究采用 Theil-Sen Median 斜率计算 WUE、GPP 和 ET 的长期变化趋势，并计算 GPP、ET 对 WUE 变化的相对贡献率。结合 Mann-Kendall(MK)非参数检验评估其显著性，基于斜率的正负与显著性检验结果，将变化趋势划分为显著增加、显著减少、不显著增加和不显著减少 4 类。

采用线性回归模型对长时间序列数据进行去趋势处理，以分离长期趋势与年际波动[25]。以年份为自变量，以 WUE 或气候变量时间序列为因变量，回归残差表示去除长期线性趋势后的年际波动，并采用变异系数(coefficient of variation，CV)表征年际波动大小。进一步采用逐像元偏相关分析分别探讨温度和降水对原始序列及去趋势序列的影响，旨在识别温度和降水对 WUE 变化的相对独立作用，并比较气候驱动因子在 WUE 长期趋势与年际波动中作用的差异性，相关系数显著性通过 t 检验进行评定($P < 0.05$)。

研究采用时滞偏相关分析，探究月 WUE 与降水量、温度之间的最大偏相关系数及相应的滞后时间。以往研究[26]通常采用单月气候因子进行时滞分析，但考虑到气候因子对生态系统的影响具有延续性或累积效应，单月气候因子往往难以越过中间月份而对 WUE 产生独立影响。因此，本研究分别构建当月值(t_0)、前 1 个月(t_1)、前 1～2 个月平均($t_{1,2}$)和前 1～3 个月平均($t_{1,2,3}$)4 组气候变量序列，其中多月组合均采用算术平均计算，随后分别计算 WUE 与上述不同时间组合气候变量间的偏相关系数，并对这 4 组偏相关系数进行最大像元值合成，滞后时间则为最大偏相关系数对应的滞后月数。

除整体分析外，进一步对森林、草地和农田生态系统类型分别进行上述统计分析，以探究不同生态系统类型 WUE 变化规律及其对温度、降水的响应。采用单因素方差分析检验不同生态系统间相关指标的整体差异，再通过多重比较进行两两比较，以识别不同生态系统之间的差异显著性($P < 0.05$)。

在 GEE 平台完成前期预处理并将栅格数据导出，利用 MATLAB R2023b 软件完成趋势分析、去趋势处理、逐像元偏相关分析、时滞偏相关分析等所有统计运算，最后使用 ArcMap 10.8 软件进行空间数据可视化。

2 结果与分析

2.1 WUE、GPP 和 ET 的空间分布特征

2001—2020 年，塔里木河流域生态系统 WUE 均值为 1.01 g/kg，并表现出显著的空间异质性(图 2a)。空间分布上，WUE 呈现由环盆地边缘绿洲向外围山区及高原递减的特征。高值区主要集中于

表 1 本文使用数据介绍

Tab. 1 Data introduction used in this study

数据	数据集名称	数据来源	时间分辨率	空间分辨率
GPP	MOD17A2H	https://modis.gsfc.nasa.gov	8 d	500 m
ET	MOD16A2	https://modis.gsfc.nasa.gov	8 d	500 m
降水量	CHIRPS Daily	https://www.chc.ucsb.edu	日	0.05°
地表温度	MOD11A1 V6	https://modis.gsfc.nasa.gov	日	1 km
土地覆盖类型	ESA World Cover 10 m 2020	https://worldcover2020.esa.int	年	10 m
矢量数据		https://www.ncdc.ac.cn		

绿洲农田区，多分布于塔里木河干支流沿岸，水分条件较好；而在天山及昆仑山腹地的草地生态系统 WUE 较低。方差分析结果表明，不同生态系统间的 WUE 均值存在显著差异（$P < 0.05$）：农田区域 WUE 最高（2.18 g/kg），显著高于森林（1.68 g/kg）与草地（1.11 g/kg）。

全流域平均 GPP 为 231.22 g/m^2，其高值区集中于生物量较大的农田（341.40 g/m^2）与森林（378.04 g/m^2），显著高于草地（240.44 g/m^2，$P < 0.05$）（图 2b）。与之相反，流域平均 ET 为 147.59 mm，高值区主要分布在降水较多、温度较低的高原及山区草地，森林（225.89 mm）与草地（216.90 mm）ET 显著高于农田（157.36 mm，$P < 0.05$）（图 2c）。

2.2　WUE、GPP、ET 的长期趋势

2001—2020 年，塔里木河流域 WUE 呈显著下降趋势，下降速率−0.009 g/(kg·a)（图 3a）。同期，GPP 和 ET 呈显著上升趋势，增长速率为 3.01 g/(m^2·a) 和 3.24 mm/a（图 3c、3e）。相对贡献率分析表明，ET 增长是导致 WUE 下降的主导因素，ET 增加对 WUE 下降的负向作用占 59.12%，高于 GPP 增加的正向抵消作用（40.88%）。

在不同生态系统类型中，农田、森林与草地的 GPP 和 ET 均呈显著增长态势（图 3d、f），但由于各系统中 ET 的增幅均超过 GPP，导致 WUE 均出现不同程度的显著下降（图 3b）。其中，农田 WUE 下降最快，草地则最慢。

逐像元趋势分析显示，2001—2020 年，塔里木河流域 WUE 整体以下降趋势为主，约 80.0% 的区域 WUE 呈下降趋势，而 GPP 和 ET 呈上升趋势的面积占比分别高达 96.0% 和 95.1%（图 4）。空间上，WUE 显著减少的区域主要集中于环塔里木盆地周边的绿洲农田区，占总植被覆盖面积的 28.5%；相比之下，WUE 增加区域仅占 20.0%，其中显著增加区域（2.2%）主要零星分布于天山北坡及昆仑山以北地区，多为天然植被分布区（图 4f）。

不同生态系统类型的 WUE 演变特征具有较好的一致性。具体而言，90.4% 的森林、86.0% 的农田以及 77.8% 的草地 WUE 呈现减小趋势。其中，农田 WUE 下降最为剧烈，其显著下降区域占比（46.7%）高于森林（31.8%）和草地（21.5%）（图 4f）。同时，GPP 和 ET 显著上升的区域分别占总植被面积的 59.6% 和 70.1%（图 4d，4e）。

2.3　年 WUE 与气候因素的关系

偏相关分析表明，2001—2020 年塔里木河流域年 WUE 时序总体上与降水呈负相关，而与温度呈正相关，且这种响应关系表现出显著的空间异质性（图 5a、5b）。在全流域尺度上，WUE 与降水呈负相关的区域占植被总面积的 65.4%，其中显著负相关区域（10.2%）主要集中于流域中部的农田及天山南脉以南地区；呈正相关的区域仅占 34.6%，显著正相关区域（3.5%）则零星分布于流域北部。与之相反，WUE 与温度主要表现为正相关（面积占比 69.0%），显著正相关区域（11.1%）广泛分布于流域西部和南部；而负相关区域占比为 31.0%，显著负相关面积仅为 2.0%，主要局限于流域北部地区。

农田与森林生态系统年 WUE 对水热因子的响应方向具有高度一致性（图 5c、5d）。具体而言，农田 WUE 表现出强烈的降水负效应与温度正效应：95.0% 的区域与降水呈负相关（显著占比 19.9%），而 73.8% 的区域与温度呈正相关（显著占比 10.6%）。森林 WUE 的响应特征相似，其与降水呈负相关、与温度呈正相关的面积占比分别为 65.6%（显著占比 5.7%）和 88.4%（显著占比 10.6%）。对于草地生态系统，空间响应格局存在明显分异：流域北部草地 WUE 主要与降水呈正相关、与温度呈负相关，而流域西南部山地草地则表现为与降水负相关、与温度正相关。

2001—2020 年，塔里木河流域 WUE 表现出剧烈的年际波动，全流域 CV 值达 1.33。偏相关分析显示，WUE 年际波动主要受温度正向驱动（60.3% 的区域呈正相关），并受降水负向调节（57.9% 的区域呈负相关）。对比去趋势前后的分析结果发现，虽然 WUE 与水热因子的响应方向基本保持一致，但去趋势后 WUE 与降水显著相关的区域面积大幅萎缩

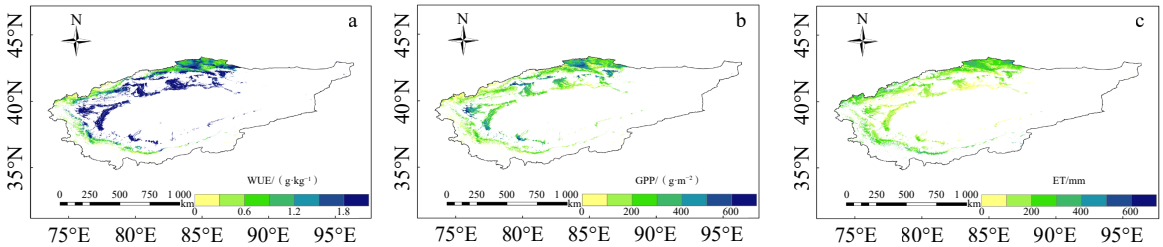


图 2　2001—2020 年塔里木河流域 WUE（a）、GPP（b）、ET（c）均值的空间格局

Fig. 2　Spatial patterns of mean values of WUE (a), GPP (b) and ET (c) in the Tarim River Basin in 2001–2020

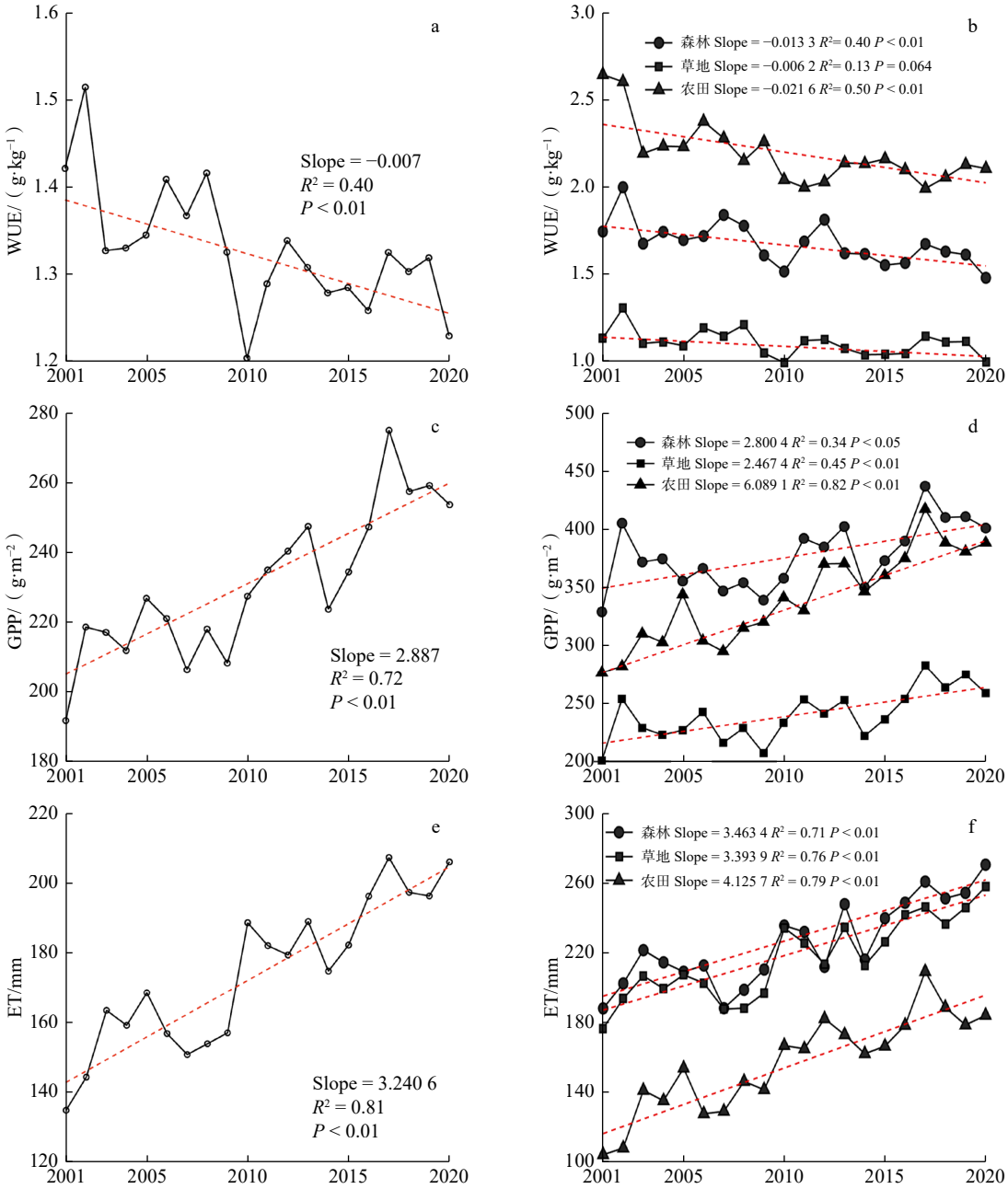


图 3 2001—2020 年塔里木河流域总体(a、c、e)及不同植被类型(b、d、f)WUE、GPP、ET 的长期趋势

Fig. 3 Long-term trends of WUE, GPP, and ET in the Tarim River Basin overall (a,c,e) and for different vegetation types (b,d,f) in 2001−2020

(图 5c、6c)。

在不同生态系统类型中，森林、农田及草地的 WUE 波动程度相近，CV 值分别为 1.25、1.26 和 1.20。进一步对比发现，去趋势处理改变了各植被类型对气候因子的响应程度：除农田生态系统 WUE 与温度的显著相关区域有所增加外，森林和草地 WUE 与水热因子的显著相关面积在去趋势后均出现大幅下降(图 5d、6d)。

2.4 月 WUE 对气候因素的时滞响应

时滞偏相关分析表明，WUE 对降水和温度的响应时间存在滞后效应，且温度较降水表现出更长滞后时间(图 7a、7b)。全流域约 50.6% 的区域 WUE 表现出对降水的滞后响应，平均滞后(1.08 ± 1.25)个月；相比之下，WUE 对温度的响应滞后更为普遍，涉及约 87.6% 的区域，平均滞后期达(2.37 ± 1.05)个月。

不同生态系统对气候因子的滞后时间存在显著差异。在降水因子上，农田和草地以即时响应(0 个月)为主，无滞后区域占比分别为 56.6% 和 44.1%；而森林表现出显著的长滞后特征，主导滞后期为 3 个月(占比 31.7%)。农田对降水的响应显著快于森林($P < 0.05$)，平均滞后时间依次为：森林(1.51 ± 1.21)个月 > 草地(1.24 ± 1.29)个月 > 农田(0.93 ± 1.22)个月。而在温度因子上，响应规律呈现反转态势：农田与草地表现出较强的滞后特征，主导滞后期

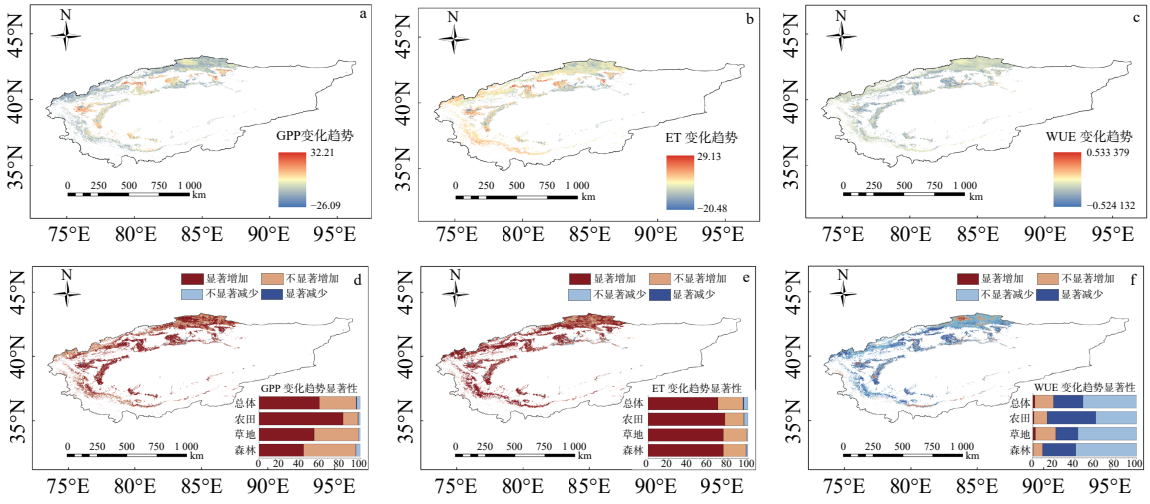


图 4　2001—2020 年塔里木河流域 GPP、ET、WUE 变化趋势(a、b、c)及显著性(d、e、f)

Fig. 4　Changing trends (a, b, c) and significance (d, e, f) of GPP, ET, and WUE in the Tarim River Basin in 2001−2020

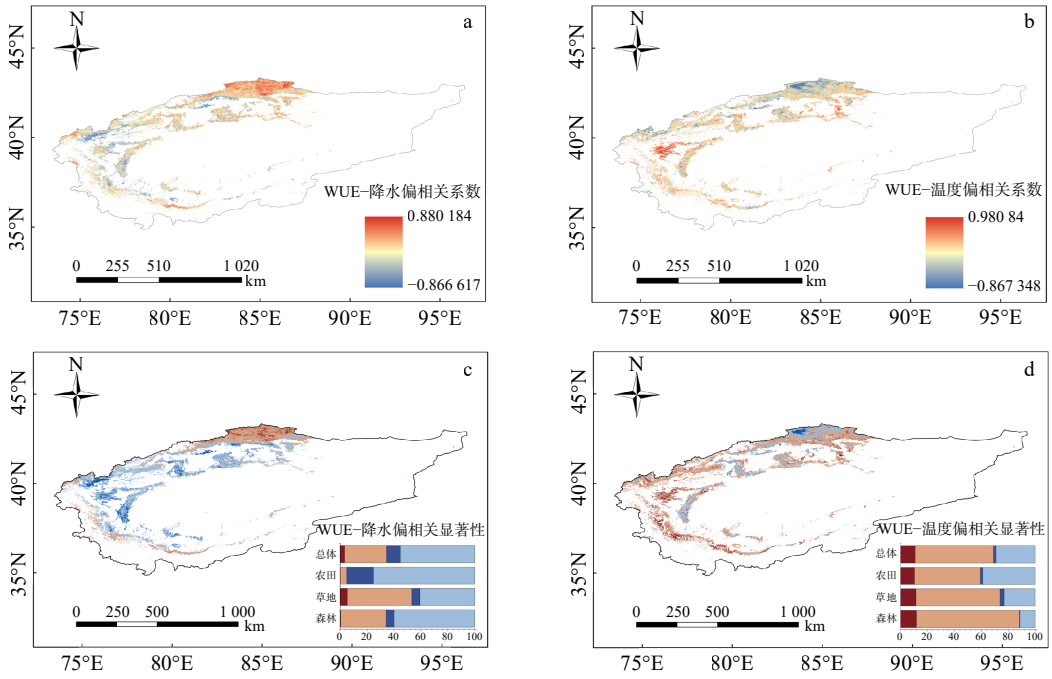


图 5　2001—2020 年塔里木河流域年 WUE 时序变化与降水(a)、温度(b)的偏相关系数及不同植被类型 WUE 与降水(c)、温度(d)的偏相关显著性

Fig. 5　Partial correlation coefficients of annual WUE time series changes with precipitation (a) and temperature (b), and partial correlation significance between WUE and precipitation (c) as well as temperature (d) for different vegetation types in the Tarim River Basin in 2001–2020

均为 3 个月(占比分别为 73.0% 和 61.7%);森林则以即时响应为主(无滞后占比 37.9%)。农田与草地对温度的滞后时间显著长于森林($P < 0.05$),均值大小依次为:农田(2.57 ± 0.84)个月 > 草地(2.13 ± 1.22)个月 > 森林(1.35 ± 1.23)个月。

3　讨　　论

3.1　WUE 的时空演变格局

塔里木河流域生态系统 WUE 呈现出显著的空间异质性,总体表现为由绿洲核心区向周边山地递减的分布特征(图 2)。这种空间格局主要受地表植被覆盖类型及其生理特性驱动:绿洲核心区以高 WUE 的农田生态系统为主,而周边山区及高原地带则多为低 WUE 的天然草地。

本研究发现,2001—2020 年间塔里木河流域 WUE 呈显著下降趋势(图 3)。这一结果虽与中国西北部分旱区的研究结果一致[9−10],但与全球尺度或部分温带森林地区 WUE 持续上升或趋于饱和的结果存在差异[4,11,27],这种差异可能与塔里木河流域特殊区域背景有关。全球尺度研究中通常强调 CO_2 施肥

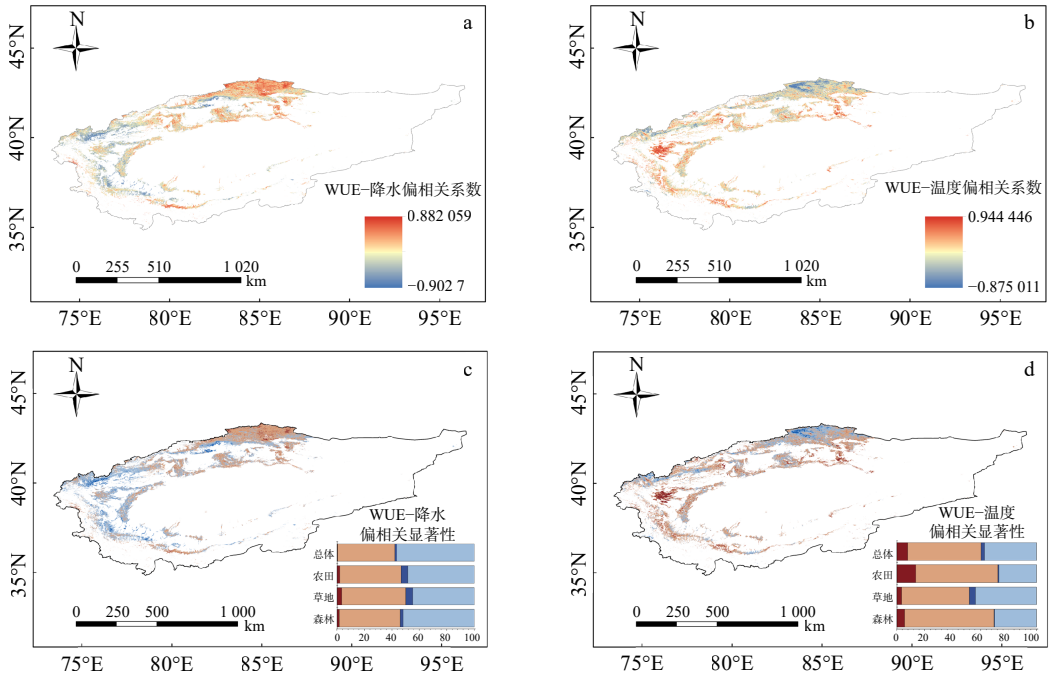


图 6 2001—2020 年塔里木河流域 WUE 年际波动与降水(a)、温度(b)的偏相关系数及不同植被类型 WUE 与降水(c)、温度(d)的偏相关显著性

Fig. 6 Partial correlation coefficients of interannual variability of WUE with precipitation (a) and temperature (b), and partial correlation significance of WUE with precipitation (c) and temperature (d) for different vegetation types in the Tarim River Basin in 2001–2020

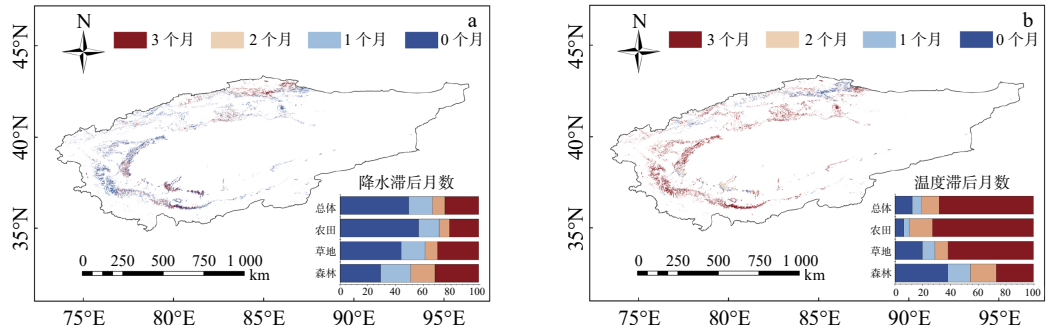


图 7 2001—2020 年塔里木河流域 WUE 对降水(a)、温度(b)的滞后月数

Fig. 7 Lag months of WUE to temperature (b) and precipitation (a) in the Tarim River Basin in 2001−2020

效应通过促进光合作用和提高气孔水分利用效率来提升 WUE，但在塔里木河流域这类干旱区，该效应可能受到较强水分约束和大气蒸发需求限制[28]。在区域暖湿化背景下，增加的水分输入并不一定提高 WUE，反而可能表现为蒸散发增强，使 ET 的相对增速超过 GPP，进而导致 WUE 下降。相对贡献率分析进一步表明，研究区 ET 变化对 WUE 下降的负向作用占 59.12%，高于 GPP 增加的正向抵消作用(40.88%)，说明 ET 增长是导致 WUE 下降的主导因素。我们的结果进一步揭示了旱区生态系统对暖湿化气候的非对称响应：尽管水分有效性增加激发了植被的光合潜力[29]，但在极端干旱环境下，持续升温与降水也引起土壤蒸发耗水的剧烈增加，导致水分消耗速率超过了碳吸收速率，最终引起 WUE 下降[30]。尽管 2001—2020 年间本研究区气候因子的线性趋势未达显著水平($P > 0.05$)，但本研究补充获取了 1991—2020 年的长序列数据，证实了该区域存在显著的长期暖湿化背景($P < 0.05$)。因此，这一长期气候过程可能通过改变区域水分平衡与植被动态，成为驱动 WUE 趋势性变化的关键背景因素。

3.2 WUE 长期趋势与年际波动对水热因子的差异化响应

本研究证实，WUE 对气候因子响应存在时间尺度差异。原始序列分析显示 WUE 与温度整体呈正相关(图 5d)，这与二者在长期趋势上的背离(温度上升而 WUE 下降)形成反差。去趋势分析表明，温度与 WUE 在年际波动尺度上呈正相关，且显著相关像元占比在去趋势前后变化较小(图 5d、6d)。这

表明温度对 WUE 的驱动作用主要通过年际波动实现，其短期正效应掩盖了长期趋势上的负反馈信号，从而主导原始序列的统计特征。

相比之下，降水对 WUE 的调控则呈现出长期趋势主导特征（图 5c）。原始序列中两者呈负相关，与长期趋势的演变方向（降水增加、WUE 下降）逻辑契合；而去趋势后显著相关区域的大幅缩减，表明降水并非年际波动的主要驱动因子。这种波动受温度主控、趋势由降水主导的规律，强调了在旱区生态系统评估中进行多时间尺度解耦的必要性。若仅依赖原始序列分析，极易造成归因偏差。

在生态系统差异方面，农田表现出独特的响应模式。去趋势后，农田 WUE 与温度显著相关面积未减反增，凸显了温度对农田 WUE 年际波动的控制作用。一方面，温度可以通过直接调节作物光合、呼吸及气孔导度等生理过程，主导碳水通量年际波动[31−32]；另一方面，农田生态系统受灌溉等人为管理措施影响，其 WUE 对自然降水波动的响应可能被削弱，从而使温度在年际尺度上的作用表现得更为突出。

3.3　WUE 对水热因子的时滞响应

本研究证实，塔里木河流域 WUE 对气候因子响应存在显著的时滞效应。总体而言，月 WUE 对温度平均滞后（2.37 ± 1.05）个月，显著长于降水（1.08 ± 1.25）个月（图 7）。这种差异反映了二者驱动机制的本质区别：在干旱区，降水作为直接且急需的水分来源，可迅速补充土壤有效水并缓解由 VPD 诱导的水分胁迫，从而诱发 ET 和 GPP 的即时响应[33]；相比之下，温度主要通过累积积温来调控酶活性与物候进程（如展叶与开花），其对碳水循环的驱动通常是一种累积性的渐进过程，因而表现出更长滞后期[34]。

在生态系统水平上，不同植被类型对水热因子的时滞响应存在显著差异。在降水响应方面，农田 WUE 滞后时间显著短于森林（图 7a）。这可能与植被根系策略有关[35]，农作物多为浅根系植物，相较于乔木能更灵敏地捕获表层土壤水分的变化，从而对降水做出较快响应[36−37]。相反，在温度响应方面，森林生态系统表现出比农田和草地更短滞后时间（图 7b）。这表明研究区木本植物对温度变化具有更快速的生理响应；而草地和农田生态系统的温度响应信号可能分别受到水分限制或人为调控的缓冲，从而延缓了 WUE 响应时间。这一规律表明，旱区水资源分配应充分考虑时滞效应。对于短时滞的浅根系植被，生态管理应重视对降水事件的快速响应和精准补灌；对于长时滞植被，则应更多关注地下水位维持和季节性生态输水。

4　结　　论

本研究基于 2001—2020 年 MODIS 遥感产品及气象数据，分析了塔里木河流域生态系统水分利用效率（WUE）的时空变化，对比了 WUE 长期趋势与年际波动的气候驱动差异，并评估了 WUE 对水热因子的时滞响应。主要结论如下。

（1）研究期间塔里木河流域生态系统 WUE 呈显著下降趋势。在区域暖湿化背景下，ET 增长对 WUE 下降的负向作用强于 GPP 增加的正向作用，ET 增强是驱动 WUE 下降的主导因素。

（2）水热因子对 WUE 的驱动具有明显时间尺度差异。降水主要影响 WUE 的长期趋势，而温度主要主导其年际波动。

（3）WUE 对气候因子响应存在明显时滞。总体上，对降水的响应快于温度；其中，农田对降水响应最快，森林对温度响应最快。

本研究从长期趋势、年际波动和时滞响应 3 个层面揭示了塔里木河流域 WUE 对气候变化的响应特征，可为干旱区生态系统碳水耦合机制研究及水资源管理提供参考。未来研究还应结合更高空间分辨率遥感数据和动态土地覆被数据，进一步评估生态转型对 WUE 影响，并量化人类活动与气候变化对旱区碳水通量的相对贡献。

参　考　文　献

[1] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, et al. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO_2 sink [J]. Science, 2015, 348: 895−899.

[2] Lian X, Piao S L, Chen A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world [J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(4): 232−250.

[3] Intergovernmental Panel on Climate Cange (IPCC). Climate change 2021: the physical science basis: working group I contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

[4] Huang M T, Piao S L, Sun Y, et al. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades [J]. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2366−2378.

[5] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498−1507.
Hu Z M, Yu G R, Wang Q F, et al. Progresses in ecosystem water use efficiency research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498−1507.

[6] Li F, Xiao J F, Chen J Q, et al. Global water use efficiency saturation due to increased vapor pressure deficit [J]. Science, 2023, 381: 672−677.

[7] Huang M T, Piao S L, Zeng Z Z, et al. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change [J]. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2165−2177.

[8] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise [J]. Nature, 2013, 499(7458): 324−327.

[9] Xu N, Dang G F, Yang T, et al. Spatial and temporal patterns of vegetation water use efficiency and its response to climatic and environmental factors in Gansu Province [J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8578.

[10] 宫菲, 杜灵通, 孟晨, 等. 宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子 [J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9068−9078.
Gong F, Du L T, Meng C, et al. Characteristics of water use efficiency and its influencing factors in Ningxia terrestrial ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9068−9078.

[11] Liu P, Black T A, Jassal R S, et al. Divergent long-term trends and interannual variation in ecosystem resource use efficiencies of a southern boreal old black spruce forest in 1999–2017 [J]. Global Change Biology, 2019, 25(9): 3056−3069.

[12] Liu X Y, Liu C, Fan B H, et al. Spatial responses of ecosystem water-use efficiency to hydrothermal and vegetative gradients in alpine grassland ecosystem in drylands [J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109064.

[13] Bai Y J, Zha T S, Bourque C P A, et al. Variation in ecosystem water use efficiency along a southwest-to-northeast aridity gradient in China [J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105932.

[14] Hou X, Zhang B, He Q Q, et al. Spatial-temporal variations in the climate, net ecosystem productivity, and efficiency of water and carbon use in the middle reaches of the Yellow River [J]. Remote Sensing, 2024, 16(17): 3312.

[15] 李卓忆, 杨庆, 马柱国, 等. 中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应 [J]. 大气科学, 2024, 48(3): 859−874.
Li Z Y, Yang Q, Ma Z G, et al. Response of vegetation to climate change and human activities in arid and semi-arid regions of northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(3): 859−874.

[16] Zhang L, Jia X, Zhao Y H, et al. Lagged and cumulative effects of drought on global vegetation greenness, coverage, and productivity [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 115: 108019.

[17] Yang M, Zou J, Ding J L, et al. Stronger cumulative than lagged effects of drought on vegetation in Central Asia [J]. Forests, 2023, 14(11): 2142.

[18] Gong H X, Wang G Y, Fan C Q, et al. Temporal accumulation and lag effects of precipitation on carbon fluxes in terrestrial ecosystems across semi-arid regions in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 356: 110189.

[19] 王让会, 樊自立. 干旱区内陆河流域生态脆弱性评价——以新疆塔里木河流域为例 [J]. 生态学杂志, 2001(3): 63−68.
Wang R H, Fan Z L. Ecological vulnerability evaluation in inland river basins of arid regions: a case study of Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(3): 63−68.

[20] 王顺德, 王彦国, 王进, 等. 塔里木河流域近 40a 来气候、水文变化及其影响 [J]. 冰川冻土, 2003(3): 315−320.
Wang S D, Wang Y G, Wang J, et al. Climate and hydrological changes in the Tarim River Basin during the past 40 years and their impacts [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003(3): 315−320.

[21] 美尔汗·黑扎特, 郝兴明. 塔里木河下游胡杨群落 CO_2 通量特征与水分利用效率.[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2048−2055.
Hezat M, Hao X M. Characteristics of CO_2 flux and water use efficiency of *Populus euphratica* communities in the lower reaches of the Tarim River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2048−2055.

[22] 郝海超, 郝兴明, 成晓丽, 等. 塔里木河下游输水对荒漠河岸林生态系统水分利用效率的影响 [J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 691−699.
Hao H C, Hao X M, Cheng X L, et al. Impacts of ecological water conveyance on the ecosystem water use efficiency of desert riparian forests in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 691−699.

[23] 魏泽锋, 官云兰, 王淑婷, 等. 基于 KNDVI 的塔里木河流域植被覆盖时空变化与归因分析 [J]. 环境科学, 2025, 46(12): 7853−7864.
Wei Z F, Guan Y L, Wang S T, et al. Spatiotemporal variation and attribution analysis of vegetation cover in the Tarim River Basin based on KNDVI [J]. Environmental Science, 2025, 46(12): 7853−7864.

[24] 张静萍, 包为民, 冯夏清, 等. 塔里木河流域近 50 年气象要素变化研究 [J]. 水力发电, 2020, 46(4): 28−34.
Zhang J P, Bao W M, Feng X Q, et al. Study on the changes of meteorological elements in the Tarim River Basin in the past 50 years [J]. Water Power, 2020, 46(4): 28−34.

[25] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China [J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR027019.

[26] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520−3531.

[27] Poppe T C, Naz B S, Graf A, et al. Rising water-use efficiency in European grasslands is driven by increased primary production [J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4: 95.

[28] Fatichi S, Leuzinger S, Paschalis A, et al. Partitioning direct and indirect effects reveals the response of water-limited ecosystems to elevated CO_2 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(45): 12757−12762.

[29] Sankaran M. Droughts and the ecological future of tropical savanna vegetation [J]. Journal of Ecology, 2019, 107: 1531−1549.

[30] Zou J, Ding J, Huang S, et al. Ecosystem resistance and resilience after dry and wet events across Central Asia based on remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2023, 15: 3165.

[31] 王鑫, 刘新月, 母艳梅, 等. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 61−75.
Wang X, Liu X Y, Mu Y M, et al. Vegetation phenology changes and their responses to climate in the Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 61−75.

[32] Shen M, Wang S, Jiang N, et al. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3: 633−651.

[33] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): 52−57.

[34] Piao S L, Wang X, Wang H K, et al. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: issues and perspectives [J]. Global Change Biology, 2020, 26(1): 300−318.

[35] Schwinning S, Ehleringer J. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems [J]. Journal of Ecology, 2001, 89: 464−480.

[36] Tello-García E, Huber L, Leitinger G, et al. Drought- and heat-induced shifts in vegetation composition impact biomass production and water use of alpine grasslands [J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 169: 103921.

[37] Ye C, Sun C J, Liu M, et al. Concurrent and lagged effects of extreme drought induce net reduction in vegetation carbon uptake on Tibetan Plateau [J]. Remote Sens, 2020, 12(15): 2347.

（责任编辑　李　契
责任编委　余新晓）