

黄土高原生态系统水分利用效率演变及 驱动因素空间分异规律

常晓格^{1,2}, 王志慧², 肖培青², 魏峰远¹, 张攀², 马力²

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003;

2.黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

摘要:生态系统水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是碳水耦合过程的关键因子,研究黄土高原 WUE 时空变化及其驱动因素有助于解释生态系统对气候和水资源变化的响应机制以及水资源管理和碳预算评估。论文基于总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、蒸散发(Evapotranspiration, ET)、地表覆盖遥感产品和气象观测数据,利用线性斜率和偏相关系数法分析了 2000—2018 年黄土高原不同植被类型 WUE 变化趋势及其与降雨(Precipitation, P)、温度(Temperature, Temp)、饱和水汽压差(Vapor Pressure Difference, VPD)、潜在蒸散发(Potential Evaporation, ET_0)和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的偏相关性随干旱指数变化的空间分异规律。结果表明:(1) 2000—2018 年黄土高原多年平均 WUE 为 $1.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$, 年际增长速率为 $0.02 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$, 其中显著增加区域占 47.36%。(2) 黄土高原地区各植被类型年均 WUE 均随干旱指数增加呈显著减小趋势, 草地 WUE 随干旱指数增加下降速率最快。同时, 各植被类型 WUE 的变化速率均为正, 但不同植被类型 WUE 增长速率随干旱指数的变化规律存在差异。受人类活动影响较大的农田 WUE 增长速率对于干旱指数敏感性较低, 而林草植被 WUE 增长速率随干旱指数增加呈先增加后减小的变化规律, 存在阈值效应。(3) LAI 对 WUE 的变化影响作用最大, 其变化主导的区域占 58.16%, 其他驱动因素的作用大小依次为 Temp, ET_0 , VPD 和 P 。在重度干旱条件下, 各植被 WUE 均与 P 均呈负相关。与农田和森林相比, 灌草植被的 WUE 与 Temp 相关性对于干旱指数更为敏感。另外, 灌草植被的 WUE 与 VPD 和 ET_0 的相关性随干旱指数增加也存在阈值效应。

关键词:水分利用效率; 空间分异; 黄土高原; 偏相关分析; 驱动因素

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)05-0244-09

Spatial Variation Patterns of Dynamics of Water Use Efficiency of Ecosystem and Its Drivers on the Chinese Loess Plateau

CHANG Xiaoge^{1,2}, WANG Zhihui², XIAO Peiqing², WEI Fengyuan¹, ZHANG Pan², MA Li²

(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University,

Jiaozuo, Henan 454003, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau,

Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Water Use Efficiency (WUE) is a key factor in the carbon-water coupling process. Study on the spatial and temporal variability of WUE on the China Loess Plateau (CLP) and its drivers can help explain the mechanisms of ecosystem response to climate and water resources changes, and also contributes to the management of water resources and the assessment of carbon budgets. Based on satellite remote sensing products, including Gross Primary Productivity (GPP), Evapotranspiration (ET), land cover and meteorological field observations, linear slope method was used to calculate the variation trend of WUE in different vegetation types from 2000 to 2018. Partial correlation coefficient method was employed to explore the variation characteristics of correlations between WUE and precipitation (P), temperature (Temp), vapor pressure difference (VPD), potential evapotranspiration (ET_0) and leaf area index (LAI) with drought index, respectively changes. The results showed that: (1) the annual mean WUE was $1.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ in the

收稿日期: 2021-07-03

修回日期: 2021-08-05

资助项目: 国家自然科学基金(41701509); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-09)

第一作者: 常晓格(1997—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 研究方向: 生态环境遥感。E-mail: changxg818@126.com

通信作者: 王志慧(1985—), 男, 河南郑州人, 博士, 高级工程师, 主要从事水循环与生态环境遥感研究。E-mail: wangzhihui@hky.yrcc.gov.cn

CLP from 2000 to 2018, and the growth rate of inter-annual WUE was $0.02 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$. Meanwhile, the area with significant increasing trend accounted for 47.36% of the CLP; (2) the annual mean WUE of all vegetation types on the CLP showed a significant decreasing trend with the increase of drought index, among which the decrease rate of WUE of grassland was the fastest with the increase of drought index. Although the variation rate of WUE was positive for all vegetation types, there were differences in the variation pattern of WUE growth rate with drought index for different vegetation types; the WUE growth rate of croplands which were significantly affected by human activities was less sensitive to the drought index, while the WUE growth rate of forest and grass vegetation showed a pattern that increased first and then decreased with the increase of drought index, and there was a threshold effect; (3) the LAI had the greatest effect on the change in WUE, with its change dominating 58.16% of the area, and the other drivers were Temp, ET_0 , VPD and P . Under the severe drought conditions, the WUE of all vegetation was negatively correlated with P ; compared with cropland and forest, the correlation between WUE and Temp of shrub-grass vegetation was more sensitive to the drought index; in addition, there was a threshold effect in the correlation of WUE of shrub-grass vegetation with VPD and ET_0 with the increase of drought index.

Keywords: water use efficiency; spatial variation pattern; Chinese Loess Plateau; partial correlation analysis; influential factors

生态系统水分利用效率(water use efficiency, WUE)是联系生态系统碳循环和水循环的关键因子^[1],是衡量生态系统对气候变化敏感性的重要指标^[2]。WUE 通常被定义为生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)与蒸散发(evapotranspiration, ET)的比值,表征了生态系统中植物光合作用碳同化与水消耗之间的权衡关系^[3]。因此,研究 WUE 时空变化特征及其影响因素有助于理解生态系统生态水文过程^[4],有助于解释生态系统对气候和水资源变化的响应机制^[2],有助于水资源管理和碳预算评估^[5]。

早期学者研究多采用田间测定法、气体交换法和稳定同位素技术等,在植物叶片和个体尺度上对 WUE 开展研究^[6-8]。随着涡度相关观测和遥感技术的快速发展,有关大尺度 WUE 的研究成为热点^[9]。遥感技术因其具有较强的地表信息获取能力以及能够大范围、长时序连续观测的特性,成为研究区域和全球 WUE 的一个有效的观测手段^[10]。目前,国内外学者已基于遥感技术开展了大量关于 WUE 的研究工作。如 Sharma 和 Goyal 分析了印度 WUE 时空演变,并指出降水、干旱等水文气候因子是影响该地区 WUE 时空演变的重要因素^[11-12]。邹杰等对新疆 WUE 进行研究,发现农田和草地的 WUE 变化最大^[13]。宫菲等探讨了净初级生产力和蒸散发两种因子对宁夏 WUE 的年际与年内变化的影响^[14]。赵安周等分析了降水、温度以及干旱对河海流域 WUE 的影响机制^[15]。

黄土高原是我国第二大高原,该地区降水量远不足植被需水量、蒸发量远大于降水量,是生态环境的脆弱区和气候变化的敏感区,水资源短缺是限制当地

生态和经济发展的重要因素^[16]。自 1999 年以来,黄土高原相继实施退耕还林草等生态修复工程,生态环境明显改善^[17]。然而大规模的生态工程已显著改变了区域生态水文过程^[18-20],黄土高原生态系统固碳能力显著增强导致蒸散发量剧增,从而严重影响了该地区碳水循环过程^[21]。因此研究黄土高原自退耕以来 WUE 的变化及其驱动因素,对预测植被耗水量与未来植被可持续性均具有十分重要的科学与现实意义。已有学者利用 GPP 和 ET 遥感产品对黄土高原 WUE 时空变化及其驱动因素开展了研究,研究表明黄土高原 WUE 沿东南—西北逐渐减小,降雨、温度、太阳辐射、相对湿度、日照时数、植被结构参数均是影响该地区 WUE 变化的重要环境因子^[22-26]。但目前已有研究并未对 WUE 变化及其与各环境因子相关性的空间分异性开展深入探讨,黄土高原 WUE 演变及驱动因素空间分异规律仍不明晰。为此,本文基于 GPP、ET、地表覆盖遥感产品和气象观测数据,利用线性斜率法和偏相关系数法分析 2000—2018 年黄土高原不同植被类型 WUE 变化趋势及其与降雨(Precipitation, P)、温度(Temperature, Temp)、饱和水汽压差(Vapor Pressure Difference, VPD)、潜在蒸散发(Potential Evaporation, ET_0)和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的偏相关性随干旱指数变化的空间分异规律,以期掌握更为精细的 WUE 时空变化分异规律,为维持黄土高原植被可持续制和水资源管理政策提供科学理论依据。

1 研究区概况

黄土高原位于 $100^{\circ} 54' - 113^{\circ} 33' \text{ E}$, $33^{\circ} 43' -$

41°16'N, 总面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。该地区属典型干旱/半干旱的大陆性季风气候区, 夏季暖热, 冬季严寒, 多年平均气温为 9.56℃, 年均降水量为 443.93 mm, 大部分降水以强侵蚀性暴雨的形式出现在夏季^[27-28], 年均 ET_0 高达 1 319.57 mm。历史上由于人类的剧烈活动导致黄土高原成为世界水土流失最严重地区。为改善区域生态环境, 自 1999 年开始经过近 20 年生态修复治理, 黄土高原植被恢复显著, 水土流失得到有效抑制^[13,25]。

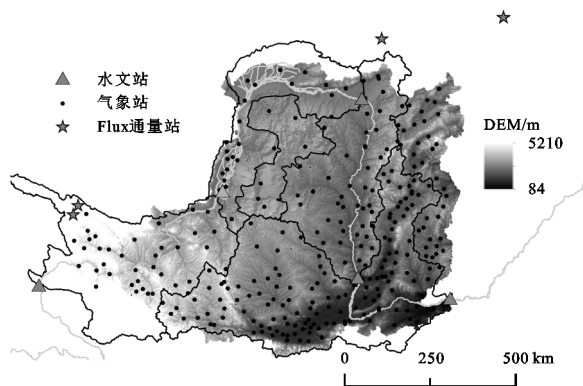


图 1 黄土高原与通量站点地理分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

在中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 收集了黄土高原 2000—2018 年 295 个气象站点的日尺度降雨量、平均气温、最高温度、最低温度、风速、相对湿度、日照时数等数据。目前, 中国通量观测网络 (<http://www.chinaflux.org/>) 仅共享发布了 8 个通量站特定年份的碳水通量数据, 因此收集研究区内及其附近区域的 4 个通量站 (Du2, Du3, HaM, Sw2) 的观测数据 (<http://www.chinaflux.org/>)。5 个黄河主河道水文站 (唐乃亥、青铜峡、头道拐、龙门、花园口) 年径流量实测数据来自黄河水利委员会水文局。GPP, ET 遥感数据采用澳大利亚联邦科学与研究组织 (CSIRO) 研发的 PML_V2 产品 (<https://developers.google.com/earthengine/datasets>)。在全球和局部区域验证结果均表明 PML_V2 产品精度较高^[29-34], 可作为大尺度生态系统水分效率分析数据源。LAI 采用北京师范大学 GLASS 产品 (<http://www.glass.umd.edu/>; <http://glass-product.bnu.edu.cn/>)。地表覆盖产品采用中国科学院空天信息创新研究院 GLC_FCS30 产品 (<http://data.casearth.cn>)。数字高程模型 (DEM) 采用 ASTER DEM_V2 产品 (<http://www.gscloud.cn/sources/accessdata>)。陆地水储量采用美国空间研究中心研发的 GRACE 重力卫星 mascon 产品 (<https://podaac.jpl.nasa.gov/>)。

本研究利用 AUSPLINE 气象专业插值软件和 ASTER DEM_V2 数据将所有气象站点数据均插值到 500 m 分辨率。利用最邻近重采样方法将 LAI 产品升尺度到 500 m。利用 Majority 滤波法将 GLC_FCS30 产品降尺度到 500 m。基于气象数据利用 FAO Penman-Monteith 公式^[22]和 Yuan 等^[23]的方法分别计算 ET_0 和 VPD。所有数据均处理为年尺度时间序列数据集。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感产品精度评价 为了与通量站点观测空间尺度匹配, 本研究提取通量站点坐标对应遥感产品像元邻近 3×3 像元 ($1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$) 空间平均值作为遥感估算值, 并将其与 4 个通量站点观测数据在站点尺度进行精度验证。同时, 为了与遥感产品时间尺度匹配, 将通量站点日观测数据整合到 8 天和年尺度。为验证 PML 模拟的 ET 产品在流域尺度的准确性, 本文将其与基于水量平衡方程^[24]估算的 ET 值分别在唐乃亥—青铜峡 (Tang-Qing)、青铜峡—头道拐 (Qing-Tou)、头道拐—龙门 (Tou-Long)、龙门—花园口 (Long-Hua) 4 个流域区间进行对比。文中利用的精度评价指标为拟合系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和纳什效率系数 (Nash)。

2.2.2 干旱指数区间划分 干旱指数是利用多年 (2000—2018) 平均 ET_0 与多年 (2000—2018) 平均 P 的比值计算得到^[35]。根据干旱指数在整个黄土高原地区的直方图分布特征将其平均划分为 10 个干旱区间。各干旱区间的分割值分别为 0.80, 2.03, 2.28, 2.41, 2.60, 2.79, 3.10, 3.67, 4.74, 6.70, 14.38。

2.2.3 线性斜率法 采用线性斜率^[36]和 F 检验计算黄土高原 2000—2018 年 WUE 年际时空变化趋势及其显著性水平。线性斜率的计算公式如下:

$$\text{Slop} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: X_i 为第 i 年对应的 WUE 的年均值; n 为总年数。当 $\text{Slop} > 0$ 时, 表示 WUE 呈增加趋势; 当 $\text{Slop} < 0$ 时, 表示 WUE 呈减小趋势。

2.2.4 偏相关系数法 根据前人研究经验, 将影响植被光合作用和蒸腾作用过程的 P , Temp, VPD, ET_0 和 LAI 作为驱动影响 WUE 的关键因素。由于不同影响因素之间可能存在一定相关性, 简单皮尔逊相关系数法无法真实客观反映各影响因素与 WUE 的相关性, 因此本研究采用偏相关系数法分析 WUE 与各影响因素的相关性。偏相关系数的计算公式为:

$$r_{i,j \cdot l_1 l_2 \dots l_g} = \frac{r_{i,j \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}} - r_{i,l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}} \cdot r_{j,l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}}{\sqrt{(1-r_{i,l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}^2) \cdot (1-r_{j,l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}^2)}}$$

(2)

式中: $r_{i,j \cdot l_1 l_2 \dots l_g}$ 代表变量 x_i 和 x_j 的 $n(n \leq k-2)$ 阶偏相关系数。等式的右侧的每一项则代表 $(n-1)$ 阶偏相关系数。

3 结果与分析

3.1 精度评定

图2A—2C表示8天和逐年平均的PML遥感产品(ET_{PML} , GPP_{PML})和通量站点观测数据(ET_{obs} ,

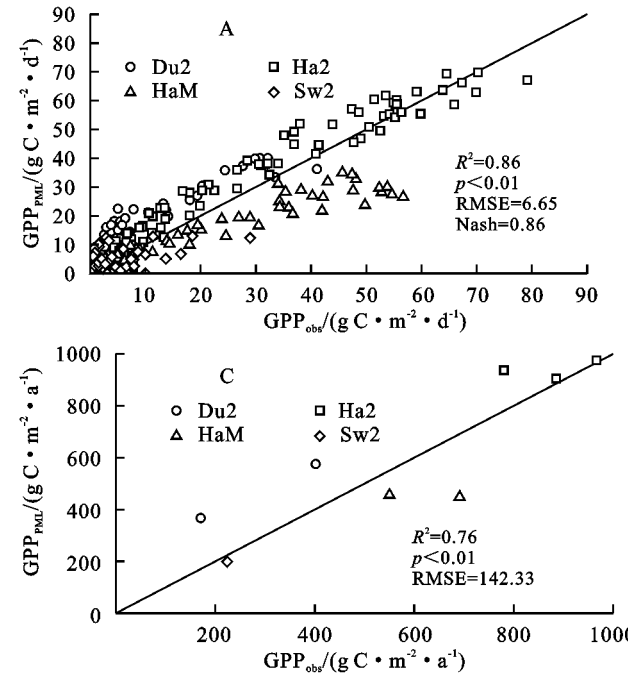


图2 PML的GPP,ET遥感产品在8天尺度(A,B)与年尺度(C,D)的验证图

3.2 干旱指数和植被类型的空间分布

黄土高原干旱指数2000—2018年的空间分布见图3A。整个黄土高原干旱指数多年平均值为3.49,低值区主要分布在研究区的西南部和东北部区域,高值区主要分布在研究区的西北部区域。本文将GLC

GPP_{obs})进行拟合,结果显示遥感产品与通量站点观测值表现出较好的一致性。对于8天尺度数据, ET_{PML} 的 R^2 为0.77, RMSE为4.60 mm/8 d。 GPP_{PML} 的 R^2 和RMSE分别为0.86, 6.65 gC/(m²·8 d)。对于年尺度数据, GPP_{PML} 的 R^2 和RMSE分别为0.76, 142.33 gC/(m²·a)。图2D表示在4个流域 ET_{PML} 逐年平均值与水量平衡公式计算的ET值(ET_{wb})对比结果。结果表明两者之间年际间的变化趋势拟合精度高, R^2 和RMSE分别为0.88, 34.27 mm/a。所以,PML遥感产品在黄土高原区域精度较高,用于黄土高原WUE时空变化与影响机制分析具有可行性。

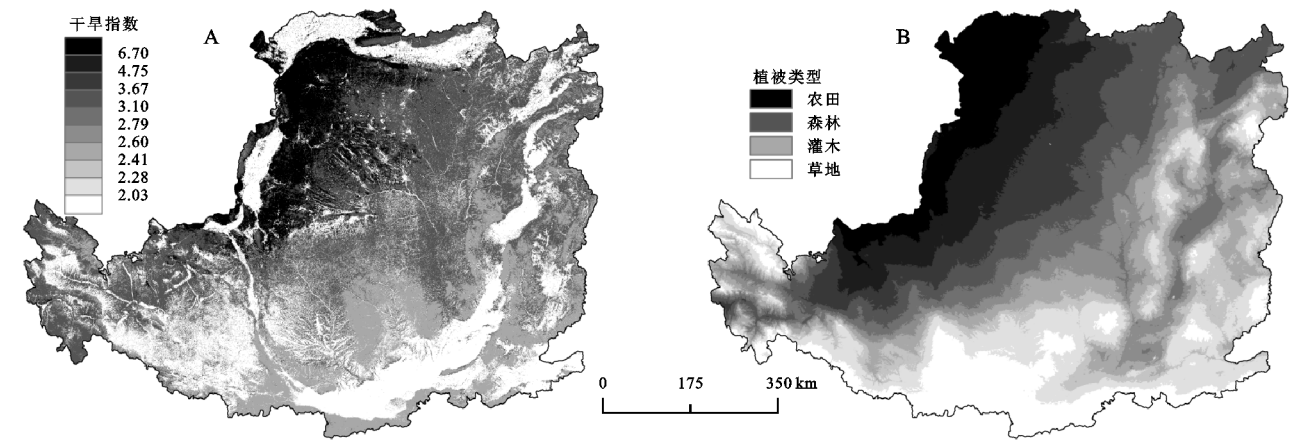
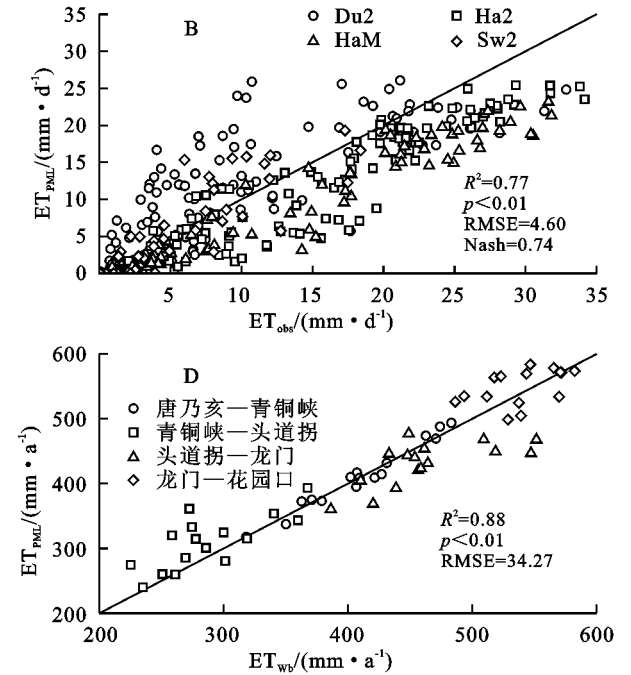
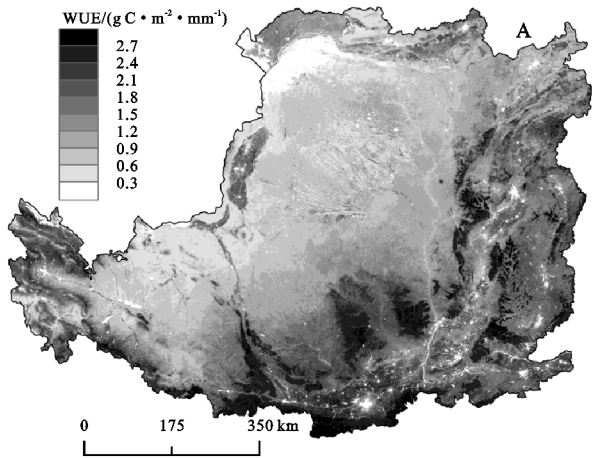


图3 干旱指数(A)和植被类型(B)空间分布格局

3.3 WUE 空间分异特征

2000—2018 年多年平均 WUE 的空间分布见图 4A。整个黄土高原的 WUE 多年平均值为 $1.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ ，空间分布整体上呈现东南偏高、西北偏低的格局，这与干旱指数格局基本一致，表明干旱指数是影响 WUE 地带性分布的重要环境因素。不同植被类型多年平均 WUE 排序为森林>农田>草地>灌木，其中



森林 WUE 达到 $1.70 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。不同植被类型多年平均 WUE 随干旱指数变化规律见图 4B。从图中可以看出，所有植被类型的 WUE 均随着干旱指数的增加呈显著减小趋势，各植被类型 WUE 对于干旱指数增加的响应速率排序为草地>森林>农田>灌木，草地 WUE 随干旱指数增加而下降速率最快，表明草地 WUE 对于干旱指数变化的响应最为敏感。

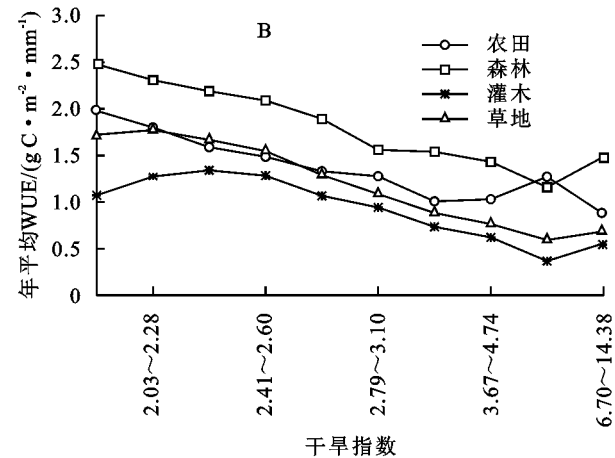
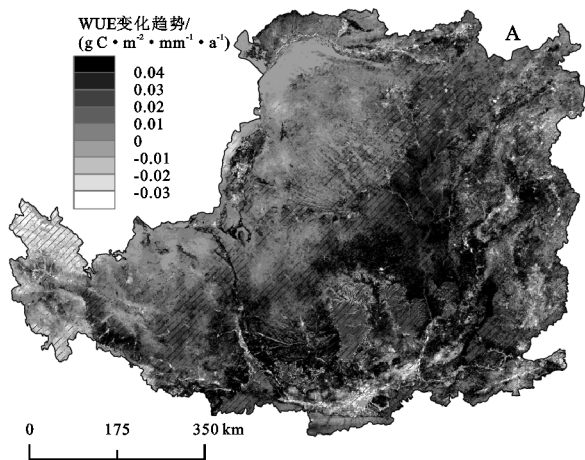


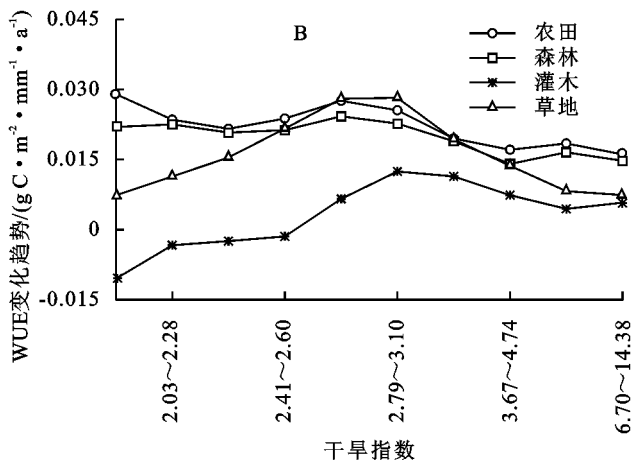
图 4 WUE 空间分布和不同植被类型年均 WUE

3.4 WUE 时间变化特征

黄土高原 2000—2018 年的 WUE 年际变化趋势及其显著性水平空间分布见图 5A。整个黄土高原 WUE 年增加速率为 $0.02 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$ ，其中 87.32% 的区域 WUE 呈增加趋势，47.36% 的区域显著增加。不同植被类型的 WUE 变化趋势随干旱指数的变化曲线见图 5B 所示，从图中可以看出，虽各



植被类型 WUE 均呈显著增加趋势，但不同植被类型 WUE 增长速率随干旱指数的变化规律存在差异。农田 WUE 增长速率随干旱指数增加呈减小趋势，而林草植被(森林、灌木、草地) WUE 增长速率随干旱指数程度增加呈先增加后减小变化规律，WUE 峰值出现在干旱指数为 2.79~3.1 的区间。



注:斜线标注的为通过 0.05 显著性检验的区域。

图 5 WUE 变化趋势空间分布和不同植被类型 WUE 变化趋势随干旱指数的变化曲线

3.5 WUE 与影响因素相关性的空间分异特征

WUE 与 P , Temp, VPD, ET_0 和 LAI 的偏相关系数空间分布见图 6。从图中可看出，不同影响因素与 WUE 相关性的空间格局存在显著差异。 P 与 WUE 呈负相关区域面积占比为 54.28%，主要分布于西北地区(图

6A)。Temp 与 WUE 呈正相关的区域面积占比达 68.77%(图 6B)。VPD 与 WUE 呈正相关的区域集中分布在黄土高原东南部，负相关区域主要分布在黄土高原西北部(图 6C)。 ET_0 与 WUE 呈负相关区域分别分布在研究区西南部和东北部(图 6D)。 LAI 与 WUE 在整个

黄土高原均呈现正相关关系且呈显著正相关($p<0.05$)的区域占黄土高原地区的 89.04%,相关系数大于 0.8 的高值主要分布在研究区中部地区(图 6E)。

通过比较同一像元的 WUE 与不同影响因素的偏相关系数,将最大偏相关系数值所对应的影响因素作为驱动该像元 WUE 变化的主导因素,结果见图 6F。从

图中可以看出,主导驱动因素为 LAI 的区域占到整个黄土高原地区的 58.16%,集中分布在研究区中部。Temp 和 ET_0 为主导因素的面积分别为 11.31% 和 10.20%。VPD 为主导因素的面积 9.32%,主要分布在研究区的东南部。主导因素为降雨的区域面积占比仅为 7.59%,主要分布在研究区的西北部。

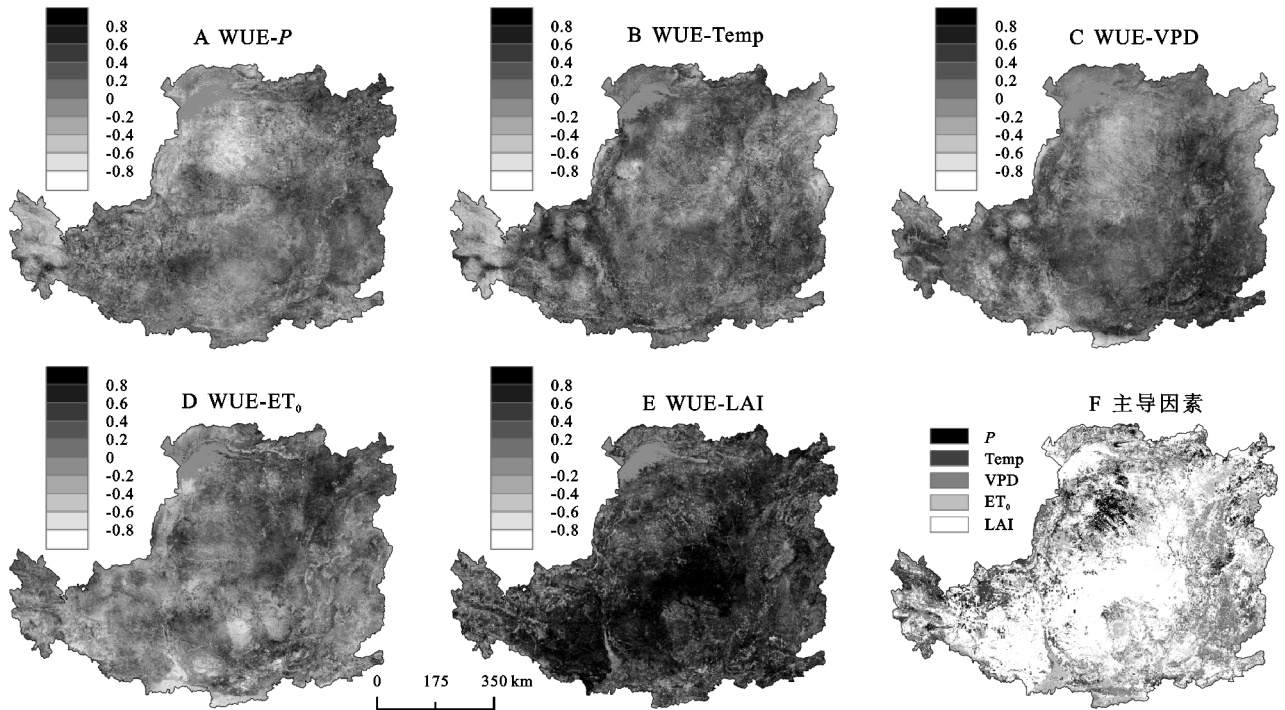


图 6 不同影响因素与 WUE 的偏相关系数空间分布及 WUE 变化主导因素

不同植被类型 WUE 与 5 种影响因素的偏相关系数随干旱指数的变化曲线见图 7。从图中可以看出,不同植被类型 WUE 与 LAI 的偏相关系数均为最大。农田 WUE 与各影响因素的相关性对干旱指数的敏感性较低。林草植被的 WUE 与 LAI 的相关系数随干旱指数增加呈先增加后减少变化特征,存在阈值效应,相关系数峰值出现在干旱指数为 2.79~3.10 的区间。森林 WUE 与 P , Temp, VPD, ET_0 的相关性在干旱指数 0~4.74 区间均为正值,当干旱指数大于 4.74 时,相关系数从正值骤变到负值,表明在极度干旱条件下,森林 WUE 与气象因素均为负相关关系。灌木和草地 WUE 与各因素的相关性空间分异规律相似,即随着干旱指数增加,WUE 与 P 相关性从负相关变化到正相关再到负相关,与温度相关性从负相关逐渐演变到正相关,与 VPD 和 ET_0 的相关系数呈现先增加后减少的变化趋势。

4 讨论

4.1 WUE 时空变化的空间分异特征

黄土高原 WUE 在空间上呈现明显的地带性分布特征,即由东南向西北方向逐渐递减(图 4A),与刘

宪峰^[16]、段艺芳^[37]、裴婷婷等^[22]结论一致。WUE 空间分布与干旱指数分布格局基本一致,这是因为湿润地区降水量供给充足且植被叶面积指数高,强烈的植被光合作用导致 GPP 较高^[38],同时,较高的植被覆盖对土壤的遮蔽作用可导致 ET 减小^[39],所以 WUE 较高。干旱地区降雨量少、植被稀疏且土壤蒸发较大,水分很难下渗用于植被生长^[40],所以 WUE 较低。因而不同植被类型 WUE 均呈现出随干旱指数增加而下降的变化趋势。

黄土高原植被 WUE 以森林最高,其次为农田、草地和灌木。其主要原因是森林多为高大乔木植被,其叶面积指数和冠层覆盖度均较高,叶片光合作用剧烈,且乔木根系发达,可吸收深层土壤水分作为乔木植被生长提供充足水分供应,使得其储存更多的有机物质^[41]。灌木植被是干旱/半干旱地区生态修复治理的主要植被类型,多分布在立地条件较差区域,局地土壤水分不足导致其覆盖度和叶面积指数均处于较低水平,生态系统耗水大多用于土壤蒸发而非植被光合作用,因而 WUE 呈现低水平。另外,典型灌木(沙棘、柠条等)植被叶片较小且叶绿素含量较低,遥感信号难以真实反映低矮灌木植被覆盖的情况,GPP 遥

感产品存在一定程度低估现象^[42-43],这也是灌木 WUE 较低的原因之一。前人研究中,刘福红^[36]、渠

春梅^[44]和宫菲等^[14]也发现林地比农田能产生更多的有机质且乔木 WUE 高于草本植物 WUE。

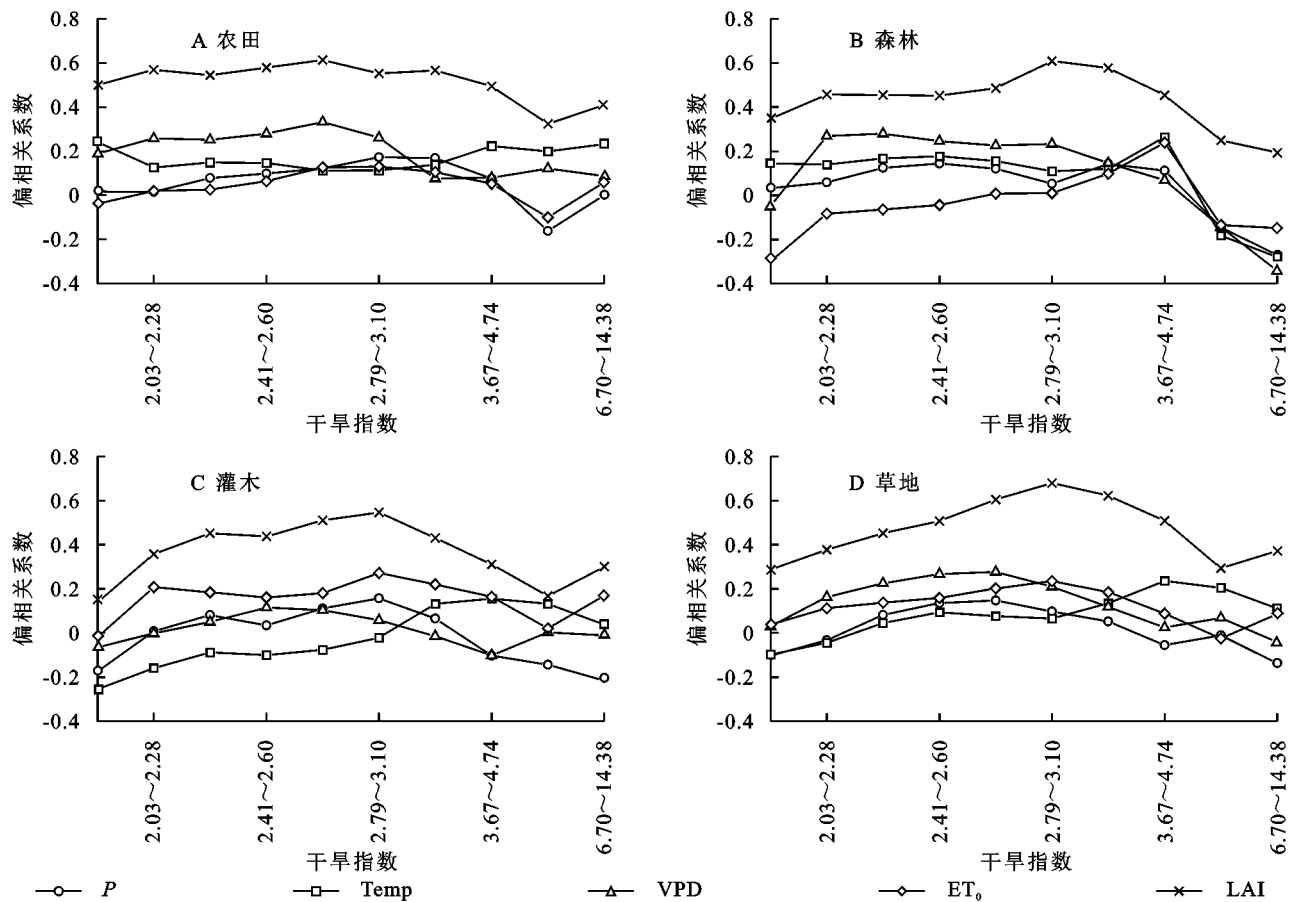


图 7 不同植被类型 WUE 与影响因素偏相关系数随干旱指数的变化曲线

随着干旱指数增加,农田 WUE 增速呈略微下降趋势,而林草的 WUE 增速呈先增加后减少变化特征。这主要是因为农田植被受人为灌溉活动影响较大^[45],其 GPP 年际变化较为稳定,而干旱地区的灌溉活动仍可满足农作物水分消耗需求,因此农田 WUE 增速对于干旱指数敏感性较低。退耕还林、植树造林等大面积生态保护工程的实施导致在不同立地条件下的林草植被 GPP 均发生显著增加^[46],而植被蒸腾作用对土壤水分更为敏感,然而在干旱地区能够被用于植被蒸散发的水分很少,ET 增速出现减缓,因而 WUE 增速提高。但是当干旱指数达到一定程度之后,土壤水分对光合作用的影响逐渐大于蒸腾作用,WUE 增速逐渐下降。

4.2 WUE 与影响因素的关系

林草植被的 WUE 与 LAI 相关性随干旱指数增加的变化规律与 WUE 增长速率一致,存在同样的阈值效应与峰值区间,这表明 LAI 主导了黄土高原 WUE 年际变化的空间格局。主要因为随着干旱指数增加,直接用于植被光合作用的耗水占总蒸散量的比例逐渐下降,因而 WUE 与植被 LAI 的相关性下

降。各植被类型 WUE 与降雨的相关性在重度干旱区域均为负值^[47],这主要是由于重度干旱区域 ET₀ 极高,降雨发生后土壤水分增加但会迅速蒸发,导致 ET 总量虽增加但植被却难以将土壤水分用于自身光合作用,因此 WUE 下降。由于 Temp, VPD 和 ET₀ 通过影响叶片气孔导度均会对植物光合作用和蒸腾作用产生影响,因此 WUE 与这 3 个参数的相关性较为复杂。与农田和森林相比,灌草植被 WUE 与温度相关性对于干旱指数更为敏感。各植被类型 WUE 与 VPD 的相关系数大多为正值,这与 Sun, Huang 等^[1,48]的研究结论一致。这是因为 VPD 升高会导致叶片气孔导度降低,与碳吸收速率相比,蒸腾速率减小程度更大,最终提高 WUE。灌草植被 WUE 与 VPD 和 ET₀ 相关性随干旱指数的变化规律相似,存在阈值效应。随着干旱指数增加,VPD 和 ET₀ 对 ET 的影响大于对 GPP 的影响,但达到严重干旱程度时,植被 GPP 的大幅度下降成为相关性下降的主要原因。

5 结论

(1) 2000—2018 年期间,黄土高原 WUE 多年平均

值为 $1.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$, 年均 WUE 空间分布格局与干旱指数格局一致。所有植被类型的 WUE 均随着干旱指数的增加呈减小趋势, 各植被类型 WUE 对干旱的响应速率大小排序为草地>森林>农田>灌木。

(2) 2000—2018 年期间, 黄土高原年均 WUE 增加速率为 $0.02 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$, 其中 87.32% 区域呈增加趋势, 47.36% 区域呈显著增加。由于退耕还林草、植树造林等生态工程的实施, 不同植被类型 WUE 均呈增加趋势, 但 WUE 增长速率随干旱指数变化规律存在差异。农田 WUE 增长速率随干旱指数增加呈减小趋势, 而林草植被 WUE 增长速率随干旱指数增加存在阈值效应且 WUE 峰值出现在干旱指数 2.60~2.79 之间。

(3) LAI 是影响黄土高原 WUE 时空变化的主导因素。在重度干旱区域, 各植被类型 WUE 与 P 均呈负相关, 森林 WUE 与所有气象因素均呈负相关。与农田和森林相比, 灌草植被的 WUE 与 Temp 相关性对干旱指数更为敏感。灌草植被的 WUE 与 VPD 和 ET_0 的相关性随干旱指数增加也存在阈值效应。对于整个黄土高原, WUE 变化的驱动因素依次为 LAI, Temp, ET_0 , VPD 和 P。

参考文献:

- [1] Sun Y, Piao S, Huang M, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 311-323.
- [2] Tian H, Chen G, Liu M, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. *ScienceDirect*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [3] Gao Y, Zhu X, Yu G, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198: 32-37.
- [4] Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. Spatial variability of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 129: 37-44.
- [5] Hu Z, Yu G, Zhou Y, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1410-1420.
- [6] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3255-3265.
- [7] Jiang G M, Dong M. A comparative study on photosynthesis and water use efficiency between clonal and non-clonal plant species along the Northeast China Transect (NECT)[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(8): 855-863.
- [8] 马利民, 刘禹, 赵建夫. 贺兰山油松年轮中稳定碳同位素含量和环境的关系[J]. *环境科学*, 2003, 24(5): 49-53.
- [9] Cai W, Ullah S, Yan L, et al. Remote sensing of ecosystem water use efficiency: A review of direct and indirect estimation methods[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12). DOI: 10.3390/rs131223932393.
- [10] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, et al. Comparison of ecosystem water-use efficiency among douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques[J]. *Global Change Biology*, 2010, 12(2): 294-310.
- [11] Sharma A, Goyal M K. Assessment of ecosystem resilience to hydroclimatic disturbances in India[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 432-441.
- [12] Sharma A, Goyal M K. District-level assessment of the ecohydrological resilience to hydroclimatic disturbances and its controlling factors in India[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1048-1057.
- [13] 邹杰, 丁建丽, 杨胜天. 近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(9): 1742-1754.
- [14] 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.
- [15] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 等. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(4): 1452-1462.
- [16] 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.
- [17] Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [18] Wang Y, Shao M A, Shao H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 381(1): 9-17.
- [19] 杨磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 87-95.
- [20] Liu Y, Zhao W, Zhang X, et al. Soil water storage changes within deep profiles under introduced shrubs during the growing season: Evidence from semiarid Loess Plateau, China[J]. *Water*, 2016, 8(10): 475.
- [21] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.

- [22] 裴婷婷,李小雁,吴华武,等.黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J].农业工程学报,2019,35(5):119-125,319.
- [23] Shahid N, Yongqiang Z, Xuanze Z, et al. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau[J]. Science Bulletin, 2021,66(12):1160-1163.
- [24] Bai M, Mo X, Liu S, et al. Contributions of climate change and vegetation greening to evapotranspiration trend in a typical hilly-gully basin on the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657:325-339.
- [25] Li J, Peng S, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017,247:260-270.
- [26] Zheng H, Lin H, Zhu X-J, et al. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau[J]. Global and Planetary Change, 2019,181. DOI:10.1016/j.gloplacha.2019.102995.
- [27] Fu B, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017,45(1):223-243.
- [28] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. Global and Planetary Change, 2013,101: 119-128.
- [29] Zhang Y, Kong D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017 [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,222:165-182.
- [30] Zhang Y, Peña-Arancibia J L, Mcvicar T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components [J]. Scientific Reports, 2016,6(1):19124.
- [31] 张永强,孔冬冬,张选泽,等.2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响[J].地理学报,2021,76(3): 584-594.
- [32] 何韶阳,田静,张永强.3种高分辨率地表蒸散发产品在华北地区的验证与对比[J].资源科学,2020,42(10): 2035-2046.
- [33] Li C, Zhang Y, Shen Y, et al. Decadal water storage decrease driven by vegetation changes in the Yellow River Basin[J]. Science Bulletin, 2020,65(22):1859-1861.
- [34] Li C, Zhang Y, Shen Y, et al. LUCC - Driven changes in gross primary production and actual evapotranspiration in northern China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2020,125(6):e2019JD031705.
- [35] 刘俊民,余新晓.水文与水资源学[M].北京:中国林业出版社,1999.
- [36] 刘福红,叶许春,郭强,等.鄱阳湖流域不同土地覆被碳水利用效率时空变化及其与气候因子的相关性[J].生态学报,2021,41(2):694-706.
- [37] 段艺芳,任志远,孙艺杰.陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应[J].生态学报,2020,40 (10):3408-3419.
- [38] 邵蕊,李垚,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测[J].科技导报,2020, 38(17):81-91.
- [39] 周志鹏,孙文义,穆兴民,等.2001—2017年黄土高原实际蒸散发的时空格局[J].人民黄河,2019,41(6):76-80,84.
- [40] 索立柱,黄明斌,段良霞,等.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J].生态学报, 2017,37(6):2045-2053.
- [41] 仇宽彪.中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D].北京:北京林业大学,2015.
- [42] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, et al. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,13:2031-2044.
- [43] Zhang L, Tian J, He H, et al. Evaluation of water use efficiency derived from MODIS products against eddy variance measurements in China[J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11183-11201.
- [44] 渠春梅.西双版纳片段化热带雨林植物水分利用效率的边缘效应[D].北京:中国科学院植物研究所,1999.
- [45] 张翀,白子怡,李学梅,等.2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J].干旱区地理, 2021,44(1):188-196.
- [46] 尤南山,金玮,肖桐,等.退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J].地理科学,2020,40(2): 315-323.
- [47] Yang Y, Guan H, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems[J]. Scientific Reports, 2016,6(1):23284.
- [48] Huang M, Piao S, 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.