

陕西省植被水分利用效率的时空变化特征及影响因素

路浩¹, 安志超², 王丽娜³, 周莹¹, 白静¹, 孙自杰⁴, 王炫迪², 唐亚坤¹

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为明确陕西省植被水分利用效率(water use efficiency, WUE)的时空变化特征及影响因素的单独影响机制。[方法] 基于MODIS数据产品和国家地球系统科学数据中心提供的数据, 分析陕西省不同植被类型2001—2022年WUE的时空变化特征, 并结合空气温度(T)、降水(P)、归一化植被指数(NDVI)、潜在蒸散发(ET_0)及饱和蒸汽压差(VPD)等因素明确WUE对环境及生物因子的响应机制。[结果] 陕西省植被WUE多年平均值为 $(2.1 \pm 0.4) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ (以C计), 在空间上表现为南高北低的变化特征, 年际间表现为不显著上升趋势($p=0.46$), 且在年内表现出单峰型变化特征。不同的植被类型WUE差异显著($p<0.05$), WUE多年平均值由大到小排序为森林>湿地>农田>灌木>草地。森林WUE在2001—2022年呈显著上升趋势($p<0.05$), 而农田与湿地WUE呈显著下降趋势($p<0.05$)。通过分析陕西省植被WUE与环境及生物因素的偏相关系数, 主导陕西省植被生态系统WUE影响因素面积占比由大到小依次为 $T(33.24\%)>NDVI(30.80\%)>VPD(27.70\%)>ET_0(6.07\%)>P(2.08\%)$ 。[结论] 陕西省植被WUE表现为不显著年际间上升趋势, 中北部和南部地区植被WUE的变化主要受环境因素和NDVI影响。研究结果可为陕西省生态建设过程中水资源高效利用评估和管理提供参考。

关键词: 陕西省; 植被水分利用效率; 总初级生产力; 蒸散发; MODIS; 影响因素

中图分类号: X24.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0091-09

Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of Vegetation Water Use Efficiency in Shaanxi Province

LU Hao¹, AN Zhichao², WANG Lina³, ZHOU Ying¹, BAI Jing¹, SUN Zijie⁴, WANG Xuandi², TANG Yakun¹

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the spatiotemporal variation characteristics of vegetation water use efficiency (WUE) in Shaanxi Province and the individual impact mechanisms of the influencing factors. [Methods] Based on MODIS data products and data provided by the National Earth System Science Data Center, we analyzed the spatiotemporal variations of WUE across different vegetation types from 2001 to 2022 in Shaanxi Province. We also examined the response mechanisms of WUE to environmental and biological factors, including air temperature (T), precipitation (P), normalized difference vegetation index (NDVI), potential evaporation (ET_0), and vapor pressure deficit (VPD). [Results] The multi-year average WUE of vegetation in Shaanxi Province was $(2.1 \pm 0.4) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ (calculated in C), exhibiting a spatial pattern of higher values in the south and lower values in the north. The multi-year average WUE showed a non-significant increasing trend ($p=0.46$) with a single peaked pattern within the

收稿日期: 2024-10-28

修回日期: 2025-04-10

录用日期: 2025-05-12

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 西北农林科技大学“大学生创新创业训练计划”项目(S202410712356); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBMS-221); 国家自然科学基金项目(41977425)

第一作者: 路浩(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事区域生态水文研究。E-mail: lh2020@nwfau.edu.cn

通信作者: 唐亚坤(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事流域水资源高效利用研究。E-mail: yktang@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

year. Significant differences in WUE were observed among different vegetation types ($p < 0.05$), with the multi-year average WUE ranked as forest > wetland > cropland > shrubland > grassland. Forests showed a significant increasing trend in WUE from 2001 to 2022 ($p < 0.05$), while cropland and wetland demonstrated significant decreasing trends in WUE ($p < 0.05$). Partial correlation analysis revealed that the relative importance of influencing factors on WUE ranked as T (33.24%) > NDVI (30.80%) > VPD (27.70%) > ET_0 (6.07%) > P (2.08%). [Conclusion] Vegetation WUE in Shaanxi Province showed a non-significant interannual increasing trend, and changes in vegetation WUE in the north-central and southern regions were mainly influenced by environmental factors and NDVI, respectively. The findings can provide references for the assessment and management of efficient water resource utilization during the ecological construction process in Shaanxi Province.

Keywords: Shaanxi Province; water use efficiency; gross primary productivity; evapotranspiration; MODIS; influencing factors

Received: 2024-10-28

Revised: 2025-04-10

Accepted: 2025-05-12

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

全球气候变化背景下,极端气候事件频率增加显著影响我国陆地生态系统的碳水循环过程^[1]。生态系统的碳循环和水循环间的耦合关系可通过水分利用效率(water use efficiency, WUE)进行量化, WUE一般被定义为生态系统尺度植被的总初级生产力(gross primary productivity, GPP)与蒸散发(evapotranspiration, ET)的比值^[2]。研究区域 WUE 的变化模式和驱动因素,可以为了解全球气候变化在区域上的响应提供参考,对评估区域尺度碳水循环耦合机制对生态系统的影响有重要意义。

随着遥感技术的进步,基于 MODIS 等遥感数据能够在大尺度植被 WUE 开展研究,此方法不仅提高数据获取的效率,还能克服传统田间测量方法的局限性^[3]。目前研究主要关注 WUE 的变化趋势及其主要影响因素。郭李迈^[4]采用 GLASS 数据产品研究中国陆地生态系统近 35 a 的 WUE 表明,全国陆地 77.1% 的区域 WUE 呈增加趋势;周雄等^[5]基于 MODIS 数据的研究表明,2000—2014 年中国西南高山亚高山区 85.84% 的植被 WUE 呈上升趋势;而李丽丽等^[6]同样基于 MODIS 数据研究发现,2000—2020 年祁连山地区植被 WUE 总体呈缓慢减少趋势,表明由于地理气候条件不同,不同地区 WUE 的影响因素也存在差异。探究区域尺度 WUE 的影响因素有助于明晰不同地区植被对气候变化的响应。另外,学者们^[4-6]已经从空气温度(T)、降水(P)、潜在蒸散发(ET_0)、饱和蒸汽压差(VPD)、归一化植被指数(NDVI)和 CO_2 浓度等多个角度对生态系统 WUE 的影响因素展开大量研究。多数研究已经阐述单个环境因素与 WUE 间的相关关系,如在一定温度范围内, WUE 随温度升高而增大, CO_2 浓度的上升也促进 WUE 增大^[4-6]。然而,由于各影响因素间通常存在相

互作用,因此,需要量化环境生物因素对 WUE 的单独影响,才能明确不同植被生态系统 WUE 的影响机制。

陕西省是我国西北地区重要的生态安全屏障,横跨 3 个气候带,南北气候差异较大且水资源分配不均匀^[7]。作为实施国家“生态恢复工程”战略的重点区域之一,陕西省开展一系列的如“退耕还林(草)”“天然林保护”等生态保护工程。然而,现有陕西省 WUE 影响因素分析方面的研究只考虑温度、降水等环境因素^[8],而对于 NDVI 等生物因素的考虑不足。需要综合考虑环境与生物因素,以期进一步明确在区域尺度上各影响因素对于 WUE 的单独影响机制。本研究以陕西省植被为研究对象,基于 MODIS 数据产品定量计算陕西省 2001—2022 年植被 WUE,明确不同植被类型 WUE 的时空分布特征。本研究选取 5 个环境和生物因素,全面分析植被 WUE 的主要影响机制。温度(T)与蒸散发、光合作用和呼吸作用相关,影响植物的水分需求和生理过程^[9]。降水(P)是植被水分供应的主要来源,直接影响植被的生长和水分利用能力^[10]。潜在蒸散发(ET_0)是衡量植物蒸发和蒸腾潜力的关键指标,受温度、湿度和风速等气候因素的影响,对水分利用效率有重要作用^[11]。饱和蒸汽压差(VPD)反映空气的干燥程度,影响蒸散发速率,从而间接影响植被水分压力和利用效率^[12]。归一化植被指数(NDVI)作为遥感数据中常用的植被指数,能够有效反映植被的生长状态和绿度,与植被的生产力和水分利用效率密切相关^[13]。然后,使用偏相关回归法量化 T 、 P 、 ET_0 、VPD 及 NDVI 等环境和生物因素对植被 WUE 的影响。通过研究陕西省生态系统 WUE 的时空分布规律及其关键影响因素,能够更全面地了解当地不同植被生态系统的碳-水循环过程和植被水分利用策略,有助于该地区的绿色发展和生态文明建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省位于我国西北内陆(31°42′~39°35′N, 105°29′~111°15′E),总面积20.58万km²。陕西省主要有高原、山地、平原和盆地等多种地形,依据地形可分为南部秦巴山区、中部关中平原、北部黄土高原三大自然地理区域(图1)。其中,黄土高原面积占比最大,约占全省总面积的40%,海拔199~3 665 m。陕北部长城沿线属中温带气候,南部秦巴山区属亚热带气候,关中及陕北大部分属暖温带气候。全省年平均气温为

13.3℃,自南向北、自东向西递减,全省年平均降水量为676 mm,降水量南多北少,南部秦巴山区为湿润区,关中为半湿润区,陕北为半干旱区。全省植被类型空间分布差异大,以林地、耕地和草地为主,林地约占全省面积的44%,耕地约占30%,草地约占20%,三者之和占全省面积的94%以上,也构成陕西省3类主要的植被生态系统。其中,陕北长城以北分布沙生植物,植被稀疏,长城以南的榆林南部及延安北部生长以灌木为主,植被覆盖较低。关中地区以耕地为主,秦岭主体及其以北以暖温带落叶阔叶林为主,巴山地区以常绿阔叶林和落叶阔叶林为主。

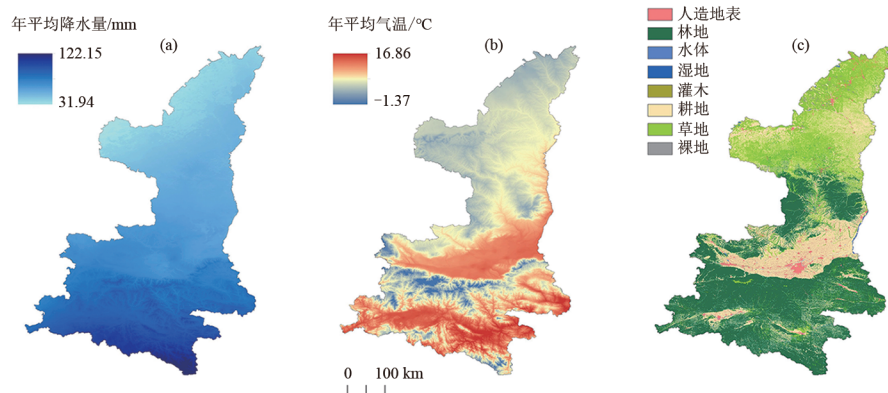


图1 陕西省年平均降水量、年平均气温及2020年土地利用情况

Fig. 1 Average annual precipitation, average annual temperature, and land use of Shaanxi Province in 2020

1.2 数据来源

研究所使用的数据见表1。基于Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>)平台获取2001—2022年的MODIS数据,包括MOD16A2蒸散发(evapotranspiration, ET)、MOD17A2总初级生产力(gross primary productivity, GPP)及MOD13A1归一化植被指数(NDVI)。其中,ET、GPP和NDVI数据空间分辨率均为500 m,ET和GPP时间分辨率为8 d,NDVI时间分辨率为16 d。TANG等^[3]利用全球32个FLUXNET站点的数据验证了基于MODIS数据产品估算WUE的可靠性和准确性。在GEE平台通过累加法合成月和年尺度的ET和GPP用于计算对应时间尺度的WUE,月和年尺度的NDVI使用平均值计算。月尺度饱和蒸汽压差(VPD)基于ERA5-Land数据集的月尺度地表温度和露点温度,采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的VPD计算方法得到,计算公式为:

$$VPD = 0.6108 \left[e^{\left(\frac{17.27T_a}{273.3 + T_a} \right)} - e^{\left(\frac{17.27T_d}{273.3 + T_d} \right)} \right] \quad (1)$$

式中: T_a 为月尺度气温,℃; T_d 为月尺度露点气温,℃;VPD为月尺度饱和蒸汽压差,kPa。

地表覆盖数据及气象数据均来源于国家科技基础条件平台国家地球系统科学数据中心([http://](http://www.geodata.cn)

www.geodata.cn)。数据主要包括30 m分辨率的GlobeLand30地表覆盖数据集(2020年)、2001—2022年1 km分辨率月尺度平均气温(T)数据集、潜在蒸散发(ET_0)数据集和降水量(P)数据集。在ArcGIS 10.8软件中通过陕西省边界矢量数据进行裁剪,最终得到陕西省DEM、土地覆盖及气象数据。

为保证数据空间统一性以方便后续计算与分析,以上栅格数据除地表覆盖数据以外,投影统一转换为WGC_1984坐标系统。空间分辨率重采样统一为1 km,同时,通过陕西省矢量边界掩膜提取得到相应的数据。

1.3 研究方法

1.3.1 WUE的计算 在本研究中,使用总初级生产力(GPP)与蒸散发(ET)的比值计算WUE^[3],计算公式为:

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (2)$$

式中:WUE为月尺度生态系统水分利用效率,g/(mm·m²);ET为月尺度生态系统蒸散发量,mm;GPP为月尺度生态系统总初级生产力,g/m²。年尺度WUE通过将月尺度GPP和ET按每年累加后计算得到。月尺度WUE用于年内趋势分析及偏相关系数计算,年尺度WUE用于年际间趋势分析。

表 1 数据源详情

Table 1 Details of data sources

数据类型	数据集名称	年份	空间分辨率/ km	时间分辨率	数据来源
ET	MOD16A2	2001—2022	0.5	8 d	https://earthengine.google.com
GPP	MOD17A2	2001—2022	0.5	8 d	https://earthengine.google.com
NDVI	MOD13A1	2001—2022	0.5	16 d	https://earthengine.google.com
VPD	ERA5-Land	2001—2022	10	月	https://earthengine.google.com
T	1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集	2001—2022	1	月	http://www.geodata.cn
P	1901—2022 年中国 km 分辨率逐月降水量数据集	2001—2022	1	月	http://www.geodata.cn
ET_0	1901—2022 年中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集	2001—2022	1	月	http://www.geodata.cn
土地利用	中国 GlobeLand 30 地表覆盖数据集	2020	0.03		http://www.geodata.cn

1.3.2 Theil-Sen 趋势分析及 Mann-Kendall 检验 对陕西省逐像元 2001—2022 年 WUE 进行 Theil-Sen 趋势分析, 该方法是稳定的非参数统计方法, 计算效率高且受异常值影响较小^[14]。以此分析各因素的变化趋势, 计算公式为:

$$\beta = \text{Median}(\frac{x_j - x_i}{j - i}), \forall j > i \tag{3}$$

式中: x_i 和 x_j 分别为 WUE 及各影响因素在第 i 年和第 j 年的像元值, 当 $\beta > 0$ 时, 表示增长趋势, $\beta < 0$ 时, 为减少趋势。

使用 Mann-Kendall 检验方法分析陕西省逐像元 2001—2022 年 WUE 变化趋势。该方法属于非参数统计检验方法, 不要求数据正态分布或呈线性变化趋势, 且不受缺失值与异常值的影响^[15]。统计检验方法为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{5}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{7}$$

式中: x_i 和 x_j 分别为变量在第 i 年和第 j 年的值; n 为时间序列长度; $Z = \pm 2.58$ 表示极显著性水平 $\alpha = 0.01$, $Z = \pm 1.96$ 表示显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。根据计算结果将变化趋势分为 5 个等级(表 2)。

1.3.3 偏相关系数 由于不同影响因素间可能存在相关性, 简单皮尔逊相关系数无法真实反映各因素对 WUE 的单独影响, 因此, 本研究采用偏相关系数量化各因素对 WUE 的单独影响。通过逐像元计算

得到陕西省 WUE 与 NDVI、 ET_0 、 P 、 T 、VPD 等 5 个环境生物因素的偏相关系数, 然后将 5 个偏相关系数结果进行逐像元叠加分析, 取系数绝对值最大的因素作为主导因素得到陕西省不同区域主导因素分布情况。偏相关系数计算公式为:

$$r_{i,j,l_1,l_2,\dots,l_n} = \frac{r_{i,j,l_1,l_2,\dots,l_{n-1}} - r_{i,l_n,l_1,l_2,\dots,l_{n-1}} r_{j,l_n,l_1,l_2,\dots,l_{n-1}}}{\sqrt{(1 - r_{i,l_n,l_1,l_2,\dots,l_{n-1}}^2)(1 - r_{j,l_n,l_1,l_2,\dots,l_{n-1}}^2)}} \tag{8}$$

式中: $r_{i,j,l_1,l_2,\dots,l_n}$ 为变量 x_i 和 x_j 的 n 阶偏相关系数; 等式右侧的每一项为 $(n - 1)$ 阶偏相关系数。

表 2 趋势特征分类

Table 2 Classification of trend characteristics

β	Z	趋势特征
$\beta > 0$	$ Z > 2.58$	极显著增加
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著增加
$\beta = 0$	Z	无变化
$\beta < 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著减少
	$ Z > 2.58$	极显著减少

1.3.4 数据分析 使用 ArcGIS 10.8 软件进行栅格数据计算与分析, 使用 Excel 2019 软件进行 GPP、ET、WUE 逐月及逐年数据的整理。使用 Matlab 2020b 软件进行 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验及偏相关分析。使用 SPSS 27.0.1 软件进行单因素方差分析及显著性检验, 文中绘图使用 Origin 2022 软件完成。

2 结果与分析

2.1 陕西省植被 WUE 的空间分布特征及变化趋势

陕西省 2001—2022 年平均植被 WUE 空间分布格局见图 2a。陕西省 WUE 多年平均值为 (2.1 ± 0.4) g/(mm·m²), 不同区域 WUE 为 0.87~6.74 g/(mm·m²)。总体来看, WUE 呈南高北低的空间差异特征, WUE 高值主要出现在南部秦巴山区, WUE 低值主要出现在陕北地区。从不同的植被类型来看, 南部秦巴山区的植被以森林为主, 靠近汉中地区则是农田的主要分布地, WUE 在该地区普遍较高, 全省森林

WUE 多年平均值为 $(2.32 \pm 0.11) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$, 农田 WUE 为 $(2.03 \pm 0.10) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。陕北地区受气候影响, 较为干旱, 以草地和灌木生态系统为主, WUE 低值主要出现在此地区, 草地和灌木的 WUE 多年平均值分别为 (1.79 ± 0.11) 、 $(1.90 \pm 0.10) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。

陕西省 2001—2022 年植被 WUE 变化率为 $-0.12 \sim 0.17 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 2b), 平均变化率为 $(0.002 \pm 0.02) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。WUE 变化率呈空间异质性, 南部秦巴山区的 WUE 变化率高于其他地

区, 其次为陕北地区, 汉中地区最小为负值。从 Mann-Kendall 检验结果 (图 2c) 来看, 陕西省 17.16% 的区域呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 11.29% 的区域呈极显著增加趋势 ($p < 0.01$), 且增加的植被 WUE 主要分布在南部秦巴山区及陕北部分地区。陕西省 22.58% 的区域呈显著减少趋势 ($p < 0.05$), 12.23% 的区域呈极显著减少趋势 ($p < 0.01$)。总体上, 陕西省 39.74% 的 WUE 区域显著的变化, 而其余区域 WUE 表现为无显著变化。

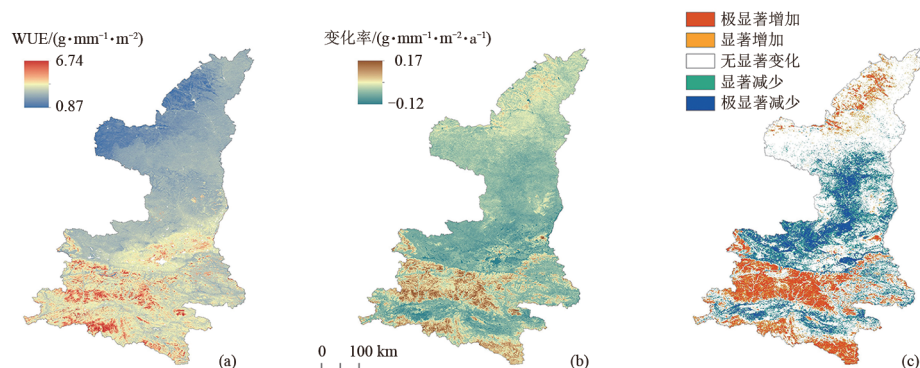


图2 陕西省 2001—2022 年平均 WUE 空间分布、变化率及 Mann-Kendall 检验

Fig. 2 Spatial distribution of average WUE, WUE change rate, and results of the Mann-Kendall test in Shaanxi Province from 2001 to 2022

2.2 陕西省 WUE 的时间变化特征

陕西省 2001—2022 年植被 WUE 年值为 $1.92 \sim 2.28 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$, 平均值为 $(2.1 \pm 0.4) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$, 2003 年出现最小值 $1.92 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$, 2012 年出现最大值 $2.28 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ (图 3a)。2001—2022 年 WUE 整体呈略微上升趋势, 增速为 $0.002 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$, 但增加趋势并不显著 ($p = 0.46$)。

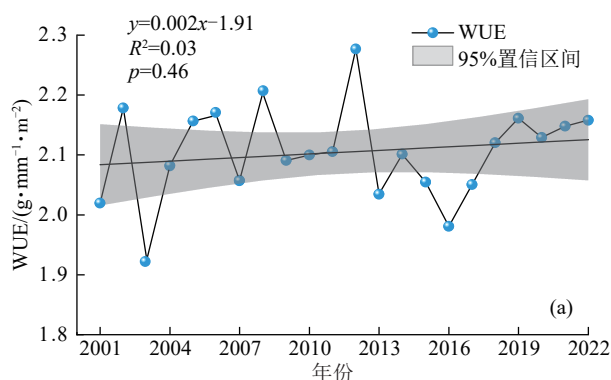


图 3b 反映陕西省 2001—2022 年 WUE 单峰型的年内变化特征, 1—5 月呈增加趋势, 变化率为 $1.36 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{month})$ 。5—9 月趋于稳定, 变化率仅为 $-0.04 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{month})$ 。从 10 月开始, 11 月、12 月均呈减少趋势, 变化率为 $-0.82 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{month})$ 。按季节分析, 春、夏、秋、冬 WUE 季值分别为 2.29 、 2.41 、 2.07 、 $0.55 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。

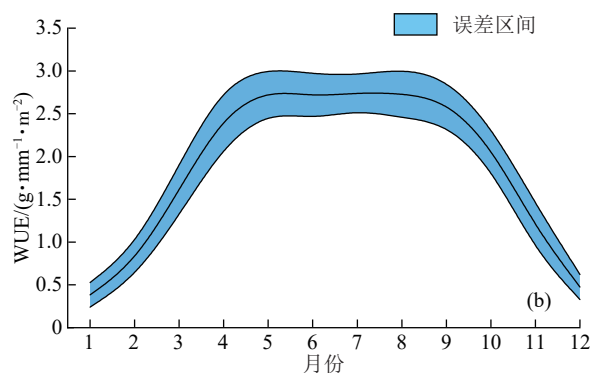


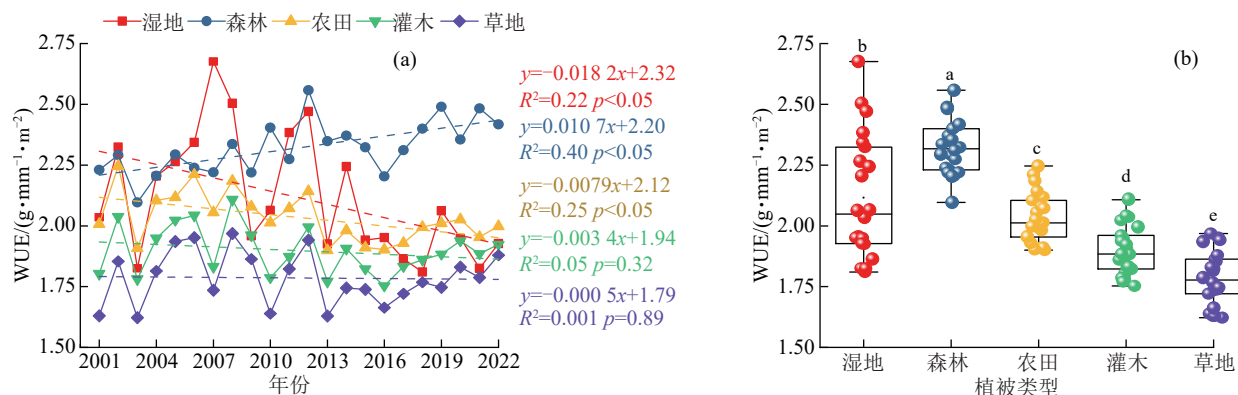
图3 陕西省 2001—2022 年 WUE 年际变化和年内变化

Fig. 3 Interannual variation and intra-annual variation of WUE in Shaanxi Province from 2001 to 2022

2.3 不同植被类型的 WUE

陕西省 2001—2020 年不同植被类型多年平均 WUE 见图 4, 由大到小依次为森林 $[(2.32 \pm 0.11) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 、湿地 $[(2.12 \pm 0.25) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 、农田 $[(2.03 \pm 0.10) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 、灌木 $[(1.90 \pm 0.10) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 、草地 $[(1.79 \pm 0.11) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 。

只有森林植被 WUE 呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 增加速率为 $0.0107 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$, 而农田与湿地 WUE 表现为显著降低趋势 ($p < 0.05$), 降低速率分别为 -0.0079 、 $-0.0182 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。灌木与草地 WUE 没有表现出显著增加 ($p = 0.32$) 或减低趋势 ($p = 0.89$)。



注: 箱体表示数据的中间 50% 分布范围(即四分位距, IQR), 箱体中间的横线表示数据的中位数(median), 箱体延伸出的直线(须线, whiskers)表示排除异常值后的数据范围。

图 4 陕西省 2001—2022 年不同植被类型 WUE 变化趋势及 WUE 平均值

Fig. 4 Trends of WUE changes and mean WUE of different vegetation types in Shaanxi Province from 2001 to 2022

2.4 环境和生物因素对陕西省植被 WUE 的影响

通过逐像元计算陕西省植被 WUE 与 5 个影响因素的偏相关系数显示, NDVI 和 VPD 在大部分地区表现出显著相关性(图 5a、图 5e), 分别覆盖 61.62% 和 67.06% 区域, 其中, NDVI 的偏相关系数为 $-0.62 \sim 0.72$ ($p < 0.05$), 正相关区域占 47.58%, 负相关区域为 14.04%; VPD 的偏相关系数为 $-0.25 \sim 0.61$ ($p < 0.05$), 正相关区域占 65.08%, 负相关仅 1.98%。T 与 ET_0

同样显示出显著相关性(图 5d、图 5b), 分别在 58.90% 和 40.38% 区域, T 的偏相关系数为 $-0.36 \sim 0.69$ ($p < 0.05$), 正相关占 56.78%, 负相关仅为 2.12%; ET_0 的偏相关系数为 $-0.46 \sim 0.58$ ($p < 0.05$), 正相关区域为 23.89%, 负相关区域为 16.49%; P 对 WUE 有显著性影响的区域面积占比相对较小(图 5c), 仅在 22.73% 的区域显著相关, 偏相关系数为 $-0.40 \sim 0.32$ ($p < 0.05$), 正相关区域仅占 1.71%, 负相关区域占 21.02%。

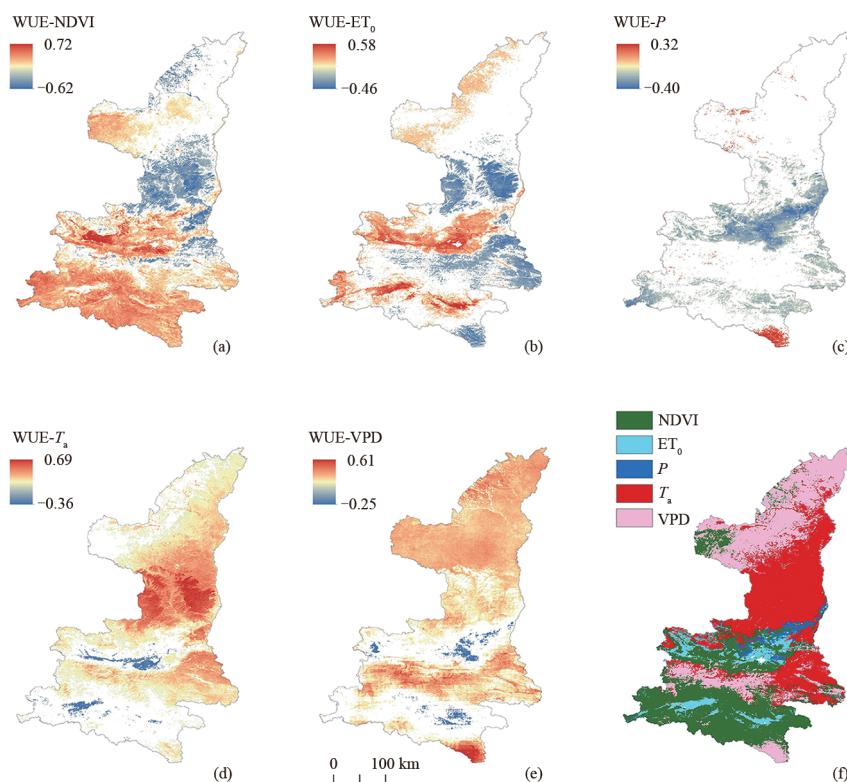


图 5 陕西省 2001—2022 年 WUE 与 NDVI、潜在蒸散发、降水、温度、饱和水汽压差的偏相关系数及主导因素空间分布

Fig. 5 Partial correlation coefficients between WUE and NDVI, potential evapotranspiration, precipitation, temperature, vapor pressure deficit in Shaanxi Province from 2001 to 2022, and spatial distribution of dominant factors

由图 5f 可知, 陕西各区域主导因素面积的占比 (27.70%)、 ET_0 (6.07)、P (2.08%)。表明陕西省区域内 WUE 的变化主要是由 T、NDVI、VPD 主导, 其中

T 主导变化区域占比最大,而 ET_0 与 P 主导变化的区域占比最低。从地域分布来看,陕北北部边界地区主要受VPD影响,部分区域与NDVI相关,陕北以南部分区域至汉中地区都主要受 T 变化的影响。而南部秦巴山区大部分地区WUE变化由NDVI主导。

3 讨论

3.1 陕西省WUE的时空变化特征分析

本研究结果显示,陕西省WUE的空间分布为由南向北递减,表现出明显的南北气候差异。此差异带来的水热条件分布不同,影响着全省区域内的植被分布及WUE^[16]。陕西南部区域的湿润条件有助于森林生态系统植被的生长,植被覆盖度高且生产力较强,进而提高WUE。北部地区气候干旱,以草地和灌木生态系统为主,植被覆盖度和生产力相对南部较低,因此,WUE低值主要分布在此地区。在本研究结果中,陕西省多年WUE平均值为 $(2.1 \pm 0.4) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$,与秦格霞等^[17]研究结果基本一致。与陕西省周边地区相比,本文结果在相同时间尺度上高于宫菲等^[18]在宁夏的研究结果 $[1.03 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 及尹超华^[19]在蒙古地区的研究结果 $[1.07 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)]$ 。由于陕西省开展一系列的生态环境修复工程,如退耕还林、流域治理和自然资源保护等^[20],植被覆盖度增加的同时也提升植被生产力。2022年相比2001年,陕西省年平均GPP的增加幅度(60%)高于ET(58%),因此增加WUE。

陕西省森林WUE显著高于其他生态系统,主要是由于该生态系统相比于其他生态系统叶面积指数和冠层覆盖度均较高,乔木植被的高叶片光合作用能力,且乔木根系发达,可吸收深层土壤水分,为乔木植被生长提供充足水分供应,因此,能够获得更高的植被生产力,即更高的GPP值,因此,森林的WUE最高^[12]。农田因人为管理,如灌溉施肥等措施都能够提高农田生产力,所以,WUE相较于灌木与草地更高^[21]。灌木与草地多分布于干旱半干旱地区,土壤水分低植被矮小,生态耗水多来自土壤蒸发而非植物蒸腾^[22],因此,WUE相对较低。对不同土地利用类型的年际变化趋势分析显示,森林WUE呈显著上升趋势,反映植被生态系统在生态修复工程中的恢复能力。然而,湿地和农田的WUE呈下降趋势,可能是由于研究时间段(2001—2022年)湿地所在地区降水量增加(年增加降水量 4.93 mm/a)和农田过量灌溉所致。李肖娟等^[23]研究表明,植被WUE通常随着降水量的增加而降低;徐晓宇^[24]研究发现,过量灌溉显著降低作物的水分利用效率表明,过量灌溉造成水资源浪费。尽管陕西省整体WUE略有上升,但

不同生态系统的WUE变化趋势不一致,反映不同类型植被对气候变化和人类活动的响应不同。

3.2 环境和生物因素对WUE的影响

陕西省不同地区WUE的主导因素存在较大差异,植被对气候因素与生物因素的响应机制具有区域差异。陕西北部干旱半干旱地区WUE主要受VPD影响,汉中地区WUE主要受温度影响,而南部秦巴山区主要受NDVI影响(图6f)。在陕西北部干旱半干旱地区,WUE与VPD呈显著正相关。VPD能够通过调节植物气孔的开合度,对植物的蒸腾作用和光合作用产生重要影响。在干旱环境中,随着VPD的增加,植物为避免过度失水,气孔关闭,从而减少蒸腾速率,但由于碳吸收速率下降较慢,WUE反而提高^[12]。而尹超华^[19]在蒙古高原植被WUE的研究中得到相反的结果,表明VPD的变化是各植被生态系统WUE减少的主要驱动因素。蒙古高原位于干旱半干旱区,该地区属于典型的温带大陆性气候,水资源相对匮乏。黄土高原同样处在干旱半干旱地区,却属于大陆性季风气候区,也面临水资源短缺问题,但可能由于不同的气候条件及黄土高原受人类活动的影响更多,使得VPD对WUE的影响不同于蒙古高原。

在陕西汉中地区,WUE与温度呈显著正相关。张永永等^[10]研究表明,云南省整体植被WUE受温度的影响最大,且北部植被WUE与温度呈正相关,本研究结果与之类似。表明温度在一定范围内对WUE具有促进作用,温度对植物大部分的生理过程都有着复杂的影响,温度可通过影响某些特定酶的活性来影响植物光合速率,也同样可影响植物叶片气孔的开合影响碳的吸收速率及蒸腾速率^[9]。

陕西南部秦巴山区相较于北部拥有更好的水热条件且植被茂密,该地区WUE的变化由NDVI主导。NDVI能够客观地反映地区的植被覆盖情况及植被生长状况,高NDVI值通常表明该地区植被生长状况良好^[13]。南部秦巴山区森林相较于其他地区有着更高的NDVI,说明该地的植被生命活动更加旺盛,而森林生态系统相较于其他生态系统有着更高的生产力,进而能够提高WUE。

3.3 不确定性因素分析

本研究主要使用MODIS遥感反演数据计算WUE,虽然有研究^[5]已经证明MODIS数据产品在WUE研究中的可靠性,然而GPP和ET数据在反演时,最大光能利用效率的确定或仅考虑气候参数等问题都能增加反演结果的不确定性^[25]。在未来研究中,可利用更高精度的遥感数据产品并结合地面站

点实测数据,以期得到更为准确的研究结果。本研究结果中,陕西省 WUE 年际间呈不显著上升趋势,需要使用更长时间及更多数量的样本分析 WUE 变化趋势;另一方面,陕西省内存在显著的地形和气候差异,植被类型分布广泛。从北部的草原和灌木到南部的森林,不同植被类型的水分利用策略各异。本研究未考虑到不同类型植被对不同影响因素的敏感度差异,后续的研究需要对上述差异进一步探索。

4 结 论

1) 陕西省 2001—2022 年 WUE 年平均值为 $(2.1 \pm 0.4) \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$, 在空间上呈南高北低趋势。

2) WUE 在年际间呈不显著波动上升趋势,变化率为 $0.002 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在年内表现出单峰变化特征, WUE 从 1 月开始上升,峰值在 5 月出现,持续到 9 月开始下降。

3) 陕西省不同生态系统 WUE 表现为森林 > 湿地 > 农田 > 灌木 > 草地。生态修复工程效果明显,森林 WUE 呈显著上升趋势。农田与湿地 WUE 呈显著下降趋势,需要注意农田灌溉策略的优化与湿地生态系统恢复的进一步强化。灌木与草地 WUE 没有显著变化。

4) 陕西各因素主导的区域面积占比从大到小依次为 $T(33.24\%)$ 、 $\text{NDVI}(30.80\%)$ 、 $\text{VPD}(27.70\%)$ 、 $\text{ET}_0(6.07\%)$ 、 $P(2.08\%)$ 。 T 主导变化的区域占比最大。

参考文献:

- [1] PAN S F, YANG J, TIAN H Q, et al. Climate extreme versus carbon extreme: Responses of terrestrial carbon fluxes to temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125, e2019JG005252.
- [2] 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. Ecosystem level water use efficiency: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [3] TANG X G, LI H P, DESAI A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on earth?[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: e7483.
- [4] 郭李迈. 近 35 年中国陆地生态系统水分利用效率时空格局及其对于干旱的响应[D]. 南京: 南京大学, 2020.
GUO L M. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency and its response to drought in recent 35 years in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [5] 周雄, 孙鹏森, 张明芳, 等. 西南高山亚高山区植被水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 628-641.
ZHOU X, SUN P S, ZHANG M F, et al. Spatio-temporal characteristics of vegetation water use efficiency and their relationships with climatic factors in alpine and subalpine area of southwestern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(6): 628-641.
- [6] 李丽丽, 杜军, 李亚徽, 等. 2000—2020 年祁连山冻土区植被水分利用效率变化特征及其对于干旱的响应[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 688-698.
LI L L, DU J, LI Y H, et al. Changes of vegetation water use efficiency and their responding to scPDSI in frozen ground area of the Qilian Mountains from 2000 to 2020[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 688-698.
- [7] 汪晓珍, 呼海涛, 吴建召, 等. 2000—2020 年陕西省陆地生态系统 NPP 时空变化与潜力[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 325-334.
WANG X Z, HU H T, WU J Z, et al. Spatial and temporal variation and potential of NPP in terrestrial ecosystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 325-334.
- [8] 仇宽彪, 成军锋. 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 256-260.
QIU K B, CHENG J F. Vegetation water use efficiency and its relationship with climate in Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 256-260.
- [9] 王强, 张欣薇, 黄英金, 等. 光环境和温度对商陆净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的协同影响[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(1): 187-194.
WANG Q, ZHANG X W, HUANG Y J, et al. Synergistic effects of light environment and temperature on net photosynthetic rate, transpiration rate and instant water-use efficiency of *Phytolacca americana*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(1): 187-194.
- [10] 张永永, 税伟, 孙晓瑞, 等. 云南省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2405-2417.
ZHANG Y Y, SHUI W, SUN X R, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation water use efficiency in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2405-2417.
- [11] 马亚丽, 牛最荣, 张芮, 等. 疏勒河流域潜在蒸散发时空演变及驱动因素量化分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 350-357.
MA Y L, NIU Z R, ZHANG R, et al. Temporal and

- spatial evolution and driving factors of potential evapotranspiration in Shule River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 350-357.
- [12] 常晓格. 黄土高原生态系统水分利用效率时空变化特征及其影响因素[D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2022.
- CHANG X G. Spatial and temporal characteristics of ecosystem water use efficiency and its influencing factors in the Loess Plateau [D]. Jiaozuo, Henan: Henan Polytechnic University, 2022.
- [13] WU X T, WANG S, FU B J, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after grain to green program [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 565-573.
- [14] YU H C, BIAN Z F, MU S G, et al. Effects of climate change on land cover change and vegetation dynamics in Xinjiang, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(13): e4865.
- [15] LIU Z Z, WANG H, LI N, et al. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River basin from 2003 to 2018 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): e2198.
- [16] 李媛媛. 地形和气候对陕西省植被覆盖时空变异的影响分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- LI Y Y. Influence of topography and climate on temporal and spatial variation of vegetation cover in Shaanxi Province [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [17] 秦格霞, 孟治元, 李妮. 黄土高原水分利用效率动态及其对干旱和地表温度的响应 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(11): 1887-1898.
- QIN G X, MENG Z Y, LI N. Dynamics of water use efficiency and its response to drought and land surface temperature on the Loess Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(11): 1887-1898.
- [18] 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 in terrestrial ecosystems and its influence factors in Ningxia Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9068-9078.
- [19] 尹超华. 蒙古高原植被水分利用效率时空变化特征及驱动因素研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023.
- YIN C H. Spatiotemporal evolution characteristics and drivers of vegetation water use efficiency in the Mongolian Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2023.
- [20] 黄娇, 陈海, 王佳宇, 等. 区域社会-生态系统恢复力协调发展时空演变研究: 以陕西省为例 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(2): 343-355.
- HUANG J, CHEN H, WANG J Y, et al. Spatiotemporal evolution of the coordinated development of regional socialecological system resilience: A case study of Shaanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(2): 343-355.
- [21] 徐同庆, 陶健, 王程栋, 等. 中国农田生态系统水分利用效率的格局与成因 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(16): 83-91.
- XU T Q, TAO J, WANG C D, et al. Pattern of agroecosystem water use efficiency and its formation causes in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(16): 83-91.
- [22] GAO G Y, SHEN Q, ZHANG Y, et al. Determining spatio-temporal variations of ecological water consumption by natural oases for sustainable water resources allocation in a hyper-arid endorheic basin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 1-13.
- [23] 李肖娟, 张福平, 王虎威, 等. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系 [J]. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 733-741.
- LI X J, ZHANG F P, WANG H W, et al. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation and its relationship with climate in the Heihe River basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4): 733-741.
- [24] 徐晓宇. 基于Meta分析的不同灌溉量对作物产量、水分利用效率及品质的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- XU X Y. Effects of irrigation amount on yield, water use efficiency and quality of several crops based on meta analysis [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [25] KIM H W, HWANG K, MU Q Z, et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 16(2): 229-238.