

清水河流域植被水分利用效率 时空变化及其影响因素

闫相梅, 于新花, 彭永庆

(宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750000)

摘要: [目的] 探究清水河流域植被水分利用效率的时空变化特征, 并深入分析影响植被 WUE 的主要因素, 为清水河流域植被保护和水资源持续利用提供科学依据。[方法] 以清水河流域为研究区域, 基于 MODIS 遥感数据、气象数据和土地利用等多源数据, 利用趋势分析、Hurst 指数、变异系数、相关性分析及偏导数等方法, 估算并分析 2001—2022 年清水河流域植被 WUE 的时空演变特征及其影响因素。[结果] ① 流域植被 WUE 总体呈现“南高北低”的空间格局, 年际变化趋势为 $0.005 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$; ② 流域植被水分利用效率(WUE)主要呈上升趋势, 其面积占流域总面积的 76.19%; ③ 流域植被 WUE 以比较稳定为主, 占流域总面积的 83.94%; Hurst 均值为 0.48, 说明该流域的植被 WUE 总体呈现出弱的反持续性; ④ 流域植被 WUE 与叶面积指数(LAI)的相关性最高, 其平均系数为 0.54; 研究区自然因子对 WUE 变化的贡献小于人类活动; WUE 变化主要受人类活动主导升高。[结论] 流域植被 WUE 呈现明显的空间异质性, 植被 WUE 主要受人类活动的影响。因此, 加大流域的生态保护力度, 对提高流域 WUE 至关重要。

关键词: 水分利用效率(WUE); 总初级生产力(GPP); 蒸散发; 时空变化; 影响因素; 清水河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0372-12 中图分类号: X171.1, S152.7⁺5

文献参数: 闫相梅, 于新花, 彭永庆. 清水河流域植被水分利用效率时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 372-383. Yan Xiangmei, Yu Xinhua, Peng Yongqing. Spatiotemporal variations and influencing factors of vegetation water use efficiency in Qingshui River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 372-383. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.036; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.036.

Spatiotemporal variations and influencing factors of vegetation water use efficiency in Qingshui River basin

Yan Xiangmei, Yu Xinhua, Peng Yongqing

(College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of vegetation water use efficiency (WUE) in the Qingshui River basin are explored, and the main factors affecting vegetation WUE were analyzed, so as to provide a scientific basis for vegetation conservation and the sustainable utilization of water resources in the river basin. [Methods] The Qingshui River basin was selected as the study area. Using multi-source data such as MODIS remote sensing data, meteorological data, and land use information, the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation WUE and its influencing factors in the Qingshui River basin from 2001 to 2022 were estimated and analyzed using the methods of trend analysis, Hurst index, coefficient of variation, correlation analysis, and partial derivatives. [Results] ① The overall spatial pattern of vegetation WUE in the river basin exhibited a “higher in the south and lower in the north” distribution, with an interannual variation trend of $0.005 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$. ② The vegetation WUE in the river basin mainly showed an increasing trend, with areas accounting for 76.19% of the total basin area. ③ The vegetation WUE in the river basin was relatively stable, covering 83.94% of the total basin area. The mean Hurst value was 0.48, indicating weak anti-persistence in vegetation

收稿日期: 2025-05-21

修回日期: 2025-07-12

采用日期: 2025-07-14

资助项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目“基于 WRF 中小尺度天气预报模式的风电功率预测技术研究”(2019AAC03021)

第一作者: 闫相梅(1999—), 女(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士研究生, 研究方向为水利遥感。Email: 2248946345@qq.com。

通信作者: 于新花(1976—), 女(汉族), 山东省青岛市人, 硕士, 副教授, 主要从事新能源开发与利用方面的研究。Email: 635895099@qq.com。

WUE across the basin. ④ The correlation between vegetation WUE and leaf area index (LAI) was the highest, with an average coefficient of 0.54. Natural factors contributed less to WUE variation than human activities which were the primary drivers of the WUE increase. [Conclusion] The vegetation WUE in the river basin shows spatial heterogeneity and is mainly influenced by human activities. Therefore, it is crucial to strengthen ecological protection to improve the vegetation WUE in the river basin.

Keywords: water use efficiency (WUE); gross primary productivity (GPP); evapotranspiration; spatio-temporal variation; influencing factors; Qingshui River basin

在全球气候变暖与水资源短缺的背景下,生态系统的碳水循环受到显著影响^[1]。作为反映碳水耦合及循环的重要生态指标^[2],水分利用效率(water use efficiency, WUE)通常指消耗单位质量水所固定的碳(或制造干物质)量^[3]。WUE不仅可以评价植物生长环境的适宜程度,还能揭示生态系统功能和过程对气候变化的响应^[4]。因此,探讨WUE的时空变化特征及其驱动机制,对深入理解生态系统碳增益和水损失之间的权衡关系以及改进区域水管理具有重要意义^[5]。随着遥感技术的广泛应用,基于总初级生产力(GPP)与蒸散发(ET)比值计算区域尺度WUE的方法日益成熟,在模拟碳水循环的过程中具有明显优势^[6]。因此,本文利用GPP与ET的比值来计算植被WUE。已有研究^[7]表明,WUE受多种因素驱动,主要包括水文气象因素(气温、降水、太阳辐射等)、植被因素(叶面积指数LAI,归一化植被指数NDVI等)和人类活动等。然而,不同的干旱半干旱地区WUE研究中,对这些影响因素的响应结论往往存在差异甚至相互矛盾^[8]。如Liu Xiaoyi等^[9]研究发现黄河源区WUE与气温和降水均呈显著正相关,而Zhao Anzhou等^[10]指出黄土高原WUE与气温呈正相关,与降水呈负相关。这些研究说明区分WUE变化的主要驱动因素的复杂性,因此,探究不同干旱半干旱地区WUE变化的影响因素至关重要。

清水河流域位于中国西北干旱地区,流域植被从上游的干草草原逐渐向下游荒漠草原过渡,其覆盖度低,生态调节功能薄弱^[11]。作为典型的半干旱区流域,对气候变化、植被变化以及人类活动极为敏感。近年来,流域被纳入“黄河流域生态保护与高质量发展”战略中的生态恢复重点示范区,实施了退耕还林还草等生态治理工程,在水土保持与碳汇方面显著提升。此外,学者对中国北方半干旱区水分利用效率的研究,多集中于宏观尺度或典型区域,尚未开展针对清水河流域水分利用效率的精细化研究。因此,本研究以清水河流域为研究区,利用遥感、气象和土地利用等多源数据,对2001—2022年清水河流域WUE时空变异特征进行分析,进而定量评估气候因子和植被因子对WUE的影响,并量化自然因子

和人类活动的相对贡献,研究结果弥补当前对典型半干旱区流域水分利用效率研究不足的情况,为中国半干旱区生态恢复成效评估和水资源政策制定提供科学依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

清水河流域是宁夏回族自治区黄河上游的一级支流(35°36′—37°37′N,105°00′—107°07′E),流域面积达到13 511 km²。流域地形以丘陵和阶地为主,涵盖土石山区、丘陵和风沙区等多种地貌。受温带大陆性气候的影响,流域主要为半干旱气候区,年平均降水量为335 mm,但时空分布不均匀,夏季(约占全年降水量的70%)降水量最多^[12]。该地区北部极为干旱,气温相对较高,使得年均降水量不足200 mm。而南部山区降水较多,年均降水量超过600 mm。因气候的影响,流域内水资源相对匮乏,蒸发强烈,多年平均蒸发量可达1 800 mm,水资源利用效率较低,极大制约了当地的经济的发展^[13]。且流域内植被较为稀少,主要植物包括禾草、芒草和茅草等。流域的主要土地利用类型为草地和林地。流域内土壤类型复杂多样,整体以黄绵土、灰褐土、黑垆土和灰钙土为主。其中,黄绵土主要分布在黄土丘陵区;灰钙土和灰褐土分布广泛,是主要的地带性土壤;黑垆土多出现在地势起伏较大的丘陵和低山地区。流域内天然径流量较小,导致水土流失现象严重,水土流失面积占流域总面积的70%,进而使流域的生态环境愈发脆弱^[14-15]。

1.2 数据来源

本研究使用的总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)、归一化植被指数(NDVI)和叶面积指数(LAI)来自美国国家航空航天局网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov>)提供的MODIS数据产品MOD17A2H,MOD16A2,MOD13A3和MOD15A2H,时间分辨率为8 d,空间分辨率为500 m。因MODIS数据量大,且处理过程中涉及重投影、重采样以及掩膜镶嵌等问题,对数据结果会产生影响,因此本研究利用Google Earth Engine(GEE)下载处理数据,得到年尺

度数据。气温和降水量数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)提供的 2001—2022 年中国逐月平均气温数据集和降水量数据集,时间分辨率为月,空间分辨率为 1 km。为与 MODIS 数据在时空尺度上保持一致,将其重采样至 500 m,并处理为年尺度数据。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m;构建土地利用转移矩阵及 WUE 对比分析时,重采样至 500 m。流域的土地利用一级类型有耕地(水田、旱地)、林地(有林地、灌木林地、疏林地、其他林地)和草地(高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)。数字高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的 ASTER GDEM 原始高程数据,空间分辨率为 30 m。行政区划数据来源于国家地理信息公共服务平台(<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision>)。为了后续研究的方便,将以上数据均统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2 研究方法

2.1 WUE 计算

WUE 通常表征生态系统固碳过程中的耗水程度,反映的是植被每消耗单位水分所固定的碳^[16],在本研究中 WUE 定义为 GPP 与 ET 的比值,计算公式为

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

式中:GPP 表示生态系统总初级生产力(g/m^2 ,以 C 计);ET 表示蒸散量(kg/m^2);WUE 表示水分利用效率(g/kg);

2.2 Theil-Sen median 斜率估计以及 Mann-Kendall 趋势分析

Theil-Sen 回归是一种非参数斜率估计方法,不受测量误差和异常值数据影响,通常在长时间序列数据的趋势分析中应用广泛^[17]。本文使用 Theil-Sen median (Sen) 计算 2001—2022 年流域 WUE 空间趋势,计算公式为

$$\beta = \text{median} \left(\frac{WUE_j - WUE_i}{j - i} \right) \quad (2)$$

式中: $1 < i < j < n$, n 为总年数; β 为时间序列数据中的变化趋势,当 $\beta > 0$ 时, WUE 呈增加趋势;当 $\beta < 0$ 时, WUE 呈现下降趋势。当 $\beta = 0$ 时,则表明 WUE 趋势稳定。

M-K 检验是一种非参数趋势检验方法,适用于分析长时间序列数据的显著性变化。相较于其他方

法, M-K 检验对数据分布没有特定要求,且具有较强的稳健性,能够有效应对缺失值、离群值和异常值的干扰,因此用于评估 WUE 变化趋势^[18]。计算公式为

$$WUE_i = WUE_1, WUE_2, WUE_i, WUE_j \cdots WUE_n \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(WUE_j - WUE_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn} = (x_j - x_i) = \begin{cases} -1 & (WUE_j - WUE_i > 0) \\ 0 & (WUE_j - WUE_i = 0) \\ -1 & (WUE_j - WUE_i < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为时间序列样本数;sgn 表示符号函数; WUE_j, WUE_i 分别表示在第 j 年和第 i 年的 WUE 数据,当 $n > 8$ 时,统计量 S 大致服从正态分布,其均值为 0, S 的方差 $\text{var}(S)$ 计算公式为

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (7)$$

其中,如果 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, 表示序列变化显著;当 $Z > 0$ 时,表示序列呈现显著的上升趋势;当 $Z < 0$ 时,表示序列呈现显著的下降趋势。本次趋势显著性的级分详见表 1。

表 1 Mann-Kendall 趋势分析的显著性分级
Table 1 Significance classification of Mann-Kendall trend analysis

β 值	Z 值	趋势特征
$\beta > 0$	$Z \geq 2.58$	极显著上升
	$1.96 \leq Z < 2.58$	显著上升
	$1.65 \leq Z < 1.96$	微显著上升
$\beta = 0$	$0 < Z < 1.65$	不显著上升
	$Z = 0$	无变化
$\beta < 0$	$-1.65 < Z < 0$	不显著下降
	$-1.96 \leq Z < -1.65$	微显著下降
	$-2.58 \leq Z < -1.96$	显著下降
	$Z \leq -2.58$	极显著下降

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数通常用于判断时间序列的可持续性。目前,该指数已经用于气象研究和植被监测等多个领域^[19]。本研究利用该指数衡量 WUE 变化趋势的稳定性,计算该指数的主要过程如下^[20]。

流域 WUE 时间序列为 $\{WUE_{(t)}\}$, 对于任何正整数, WUE 的时间序列均值计算方式为

$$\overline{WUE}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} WUE_{(t)} \quad (\tau = 1, 2, 3 \dots n) \quad (8)$$

累计离差计算方式为

$$V(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} [WUE_{(t)} - \overline{WUE}_{(t)}] \quad (9)$$

极差 R 计算方式为

$$R(\tau) = \max V_{(t, \tau)} - \min V_{(t, \tau)} \quad (1 \leq t \leq \tau; \tau = 1, 2, 3 \dots n) \quad (10)$$

S 的标准差级数计算方式为

$$S_\tau = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [WUE_{(t)} - \overline{WUE}_{(t)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Hurst 指数 (H) 计算方式为

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (12)$$

利用拟合方程, 得到 Hurst 指数

$$\lg\left(\frac{R}{S}\right) = a + H \times \lg(n) \quad (13)$$

式中: H 是 Hurst 指数, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。当 $0 < H < 0.5$ 时, WUE 变化表现出反持续性, 即未来变化趋势与过相反; 当 $H = 0.5$ 时, WUE 变化表现出随机性; 当 $0.5 < H < 1$ 时, WUE 变化表现出可持续性, 即未来变化趋势与过去相同。

$$\frac{dWUE}{dt} \approx \frac{\delta WUE}{\delta T} \times \frac{dT}{dt} + \frac{\delta WUE}{\delta P} \times \frac{dP}{dt} + \frac{\delta WUE}{\delta N} \times \frac{dN}{dt} + \frac{\delta WUE}{\delta L} \times \frac{dL}{dt} + H_{con} = Na_{con} + H_{con} \quad (16)$$

式中: T, P, N, L 分别表示气温、降水、NDVI 和 LAI; $T_{con}, P_{con}, N_{con}, L_{con}$ 分别表示气温、降水、NDVI, LAI 对 WUE 的贡献。 Na_{con}, H_{con} 分别表示自然因子和人类活动对 WUE 的影响。

贡献系数的正负分别表示影响因子对 WUE 的正向作用和负向作用, 其中正向作用对 WUE 具有积极影响, 有利于其提高; 而负向作用则表明影响因子不利于 WUE 提高。

3 结果与分析

3.1 WUE 时空变化分析

3.1.1 时间变化特征

通过分析清水河流域 2001—2022 年各年 WUE 均值得到研究区年际变化趋势 (图 1)。由图 1 可以看出, 研究区植被 WUE 年际变化呈波动上升趋势, 未达到显著性水平 ($p > 0.05$), 变化斜率为 $0.005 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, 最高值为 2022 年的 $1.07 \text{ g}/\text{kg}$, 最低值为 2011 年的 $0.70 \text{ g}/\text{kg}$ 。其中, 2005 年相较于上年度下降最多, 差值为 $0.27 \text{ g}/\text{kg}$; 2004 年相较于上年度增加最多, 差值为 $0.25 \text{ g}/\text{kg}$ 。

2.4 变异系数

变异系数 (C_v) 衡量随机变量的离散程度, 本文计算流域植被 WUE 的变异系数, 并分析 WUE 在时间序列中的稳定性^[21]。计算公式通常是标准差与平均值的比值:

$$C_v = \frac{S_D}{\sigma} \quad (14)$$

式中: C_v 表示变异系数; S_D 表示 WUE 的标准差; σ 表示 WUE 的均值。其中, 变异系数越小, 表示流域 WUE 的波动小且稳定; 反之则说明流域 WUE 变化的波动性大, 稳定性差。

2.5 相关性分析

本文基于 Pearson 相关系数分析植被 WUE 与影响因子的相关性, 计算公式为^[22]

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

式中: r_{xy} 表示 x, y 变量的相关系数; x_i, y_i 表示 x, y 两变量第 i 年的值; \bar{x}, \bar{y} 表示两个变量的平均值; n 为年数。

2.6 贡献分析

本研究利用偏导数方法分析自然因子和人类活动对 WUE 的贡献, 计算公式为^[23]

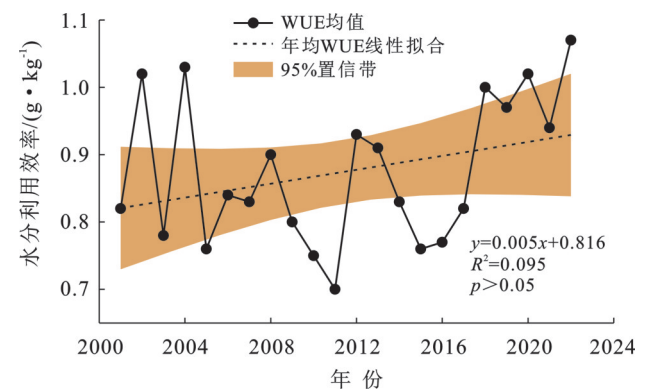


图 1 清水河流域 2001—2022 年 WUE 年际变化趋势
Fig.1 Interannual variation trend of WUE in Qingshui River basin during 2001—2022

3.1.2 空间变化特征

由图 2a 可知, 对研究期间的植被 WUE 数据进行分析, 得到研究区植被 WUE 多年均值为 $0.88 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, 多年均值介于 $0.43 \sim 1.72 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。

研究区域内植被 WUE 的空间分布表现出明显的差异性,相较于其他地区,流域北部 WUE 的年平均值明显偏低,流域南部 WUE 年均值较高。流域南部处于山区,六盘山林区气候湿润,适宜林木生长,并且流域的南部地区分布较多的农田、森林、灌木和草地, WUE 显著较高。此外,有窄细区域从流域南部延伸到北部,这部分区域主要以耕地为主,这说明耕地 WUE 普遍高。研究区植被 WUE 变化趋势如图 2b 所示, WUE 变化量值介于 $-0.03 \sim 0.04 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。植被 WUE 总体上呈增长趋势,其中呈增加趋势的区域占总面积的 76.19%, 主要分布在流域中南部地区,包括海原、同心的东南地区以及原州区;呈减少趋势的区域占总面积的 23.81%, 主要分布在流域北部地区的中宁县、沙坡头区、红寺堡区以及同心县的西北地区。如图 2c 所示,将流域植被 WUE 变化趋势显著

性结果分为 9 类。流域植被 WUE 极显著下降及显著下降区域比例分别为 0.45% 和 1.18%, 主要在未利用土地和城镇等建设用地周边;微显著下降区域占总面积的 1.10%, 主要分布在水体和荒地区域;不显著下降区域比例为 20.93%, 主要分布在流域北部区域,即沙坡头区、中宁县、红寺堡区及同心县北部地区。无变化区域像元比例最少,只有 0.60%, 零散分布在流域中部地区。流域 48.86% 区域的植被 WUE 呈不显著上升和微显著上升趋势,分布区域较广,主要在流域中南部地区,区域内土地利用类型主要有耕地、林地和草地等;呈显著上升和极显著上升区域比例分别为 15.20% 和 11.67%, 主要分布在流域的中部地区,即海原县和同心县的部分地区。总的来说,流域大部分植被 WUE 为不显著上升,因此还需要加大推动生态修复政策。

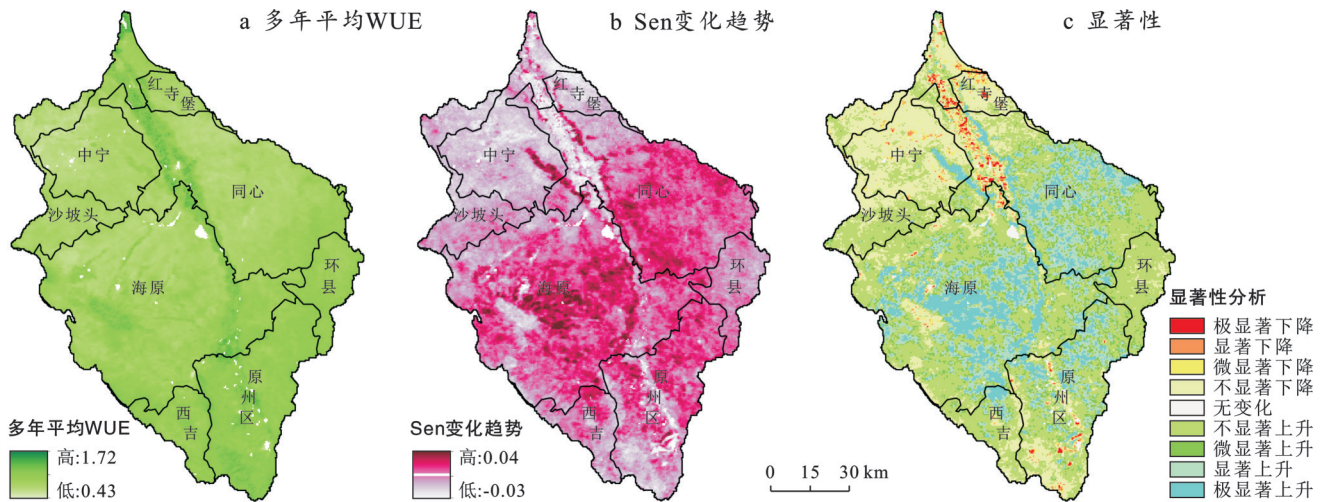


图 2 清水河流域多年平均 WUE 空间分布、趋势分析及趋势显著性检验分析
Fig.2 Spatial distribution, trend analysis, and trend significance test analysis of multi-year average WUE in Qingshui River basin

3.1.3 稳定性与持续性分析

对变异系数进行分析,得到研究时段内植被 WUE 变异系数值在 $0 \sim 0.42$ 。为评估 WUE 稳定性,将变异系数分成 4 个等级:非常稳定 (< 0.1)、稳定 ($0.1 \sim 0.2$)、不稳定 ($0.2 \sim 0.3$) 和极不稳定 (> 0.3)。结果如图 3a 所示,发现植被 WUE 处于非常稳定和稳定的区域面积比例为 92.26%, 其中非常稳定区域占流域总面积的 8.32%, 零散分布在流域南部、西部及中部地区,即主要位于原州区和西吉县,这两个地区降水量充足,为重要的水源涵养地;稳定的区域占流域的 83.94%, 覆盖研究区大部分区域。不稳定区域零散分布在流域中部地区,面积仅占总流域的 7.72%。极不稳定区域比例最少,仅为 0.02%。图 3b 表明流域植被 WUE 的 Hurst 的值域范围为 $0.26 \sim 0.79$, 均值

为 0.48, 标准差为 0.06, 说明该区域的植被 WUE 总体呈现出弱的反持续性,这说明过去植被 WUE 的增长趋势很可能在未来转为下降趋势,反之亦然。在空间上, H 大于 0.50 的区域占 40.26%, 主要分布在流域西南及东部地区,即主要位于原州区、同心县南部地区和海原县的西南地区;而 H 小于 0.50 的区域占总面积的 59.74%, 覆盖研究区大部分区域。

3.2 WUE 变化影响因素分析

3.2.1 土地利用变化对 WUE 的影响

2005—2020 年研究区土地利用类型发生了显著转移,各类型间存在结构性变动(见表 2)。耕地面积增长 244.48 km^2 , 主要由草地转化而来 ($1\,618.35 \text{ km}^2$), 也有部分耕地退化为草地 ($1\,728.58 \text{ km}^2$)。草地作为主导类型,向耕地、林地及未利用地等多方向转移。建

设用地显著减少 113.72 km²,其中部分被恢复为耕地。林地则整体退化,尽管草地转林地体现了退耕还林政策成效,但林地面积仍减少 107.65 km²。水体与未利用地变化相对较小。总体上,耕地扩张、草地转化频繁及林地退化构成了该阶段土地利用变化的主要特征。

将 2005 年与 2020 年的土地利用分类图叠加分析,得到土地利用类型变化区域和未变化区域(图 4a),主要以草地为主,占流域总面积的 38.50%,其次为土地利用变化区域(35.75%)、耕地(23.05%)和林地(1.34%),水域、建设用地和未利用土地所占面积较小。土地利用变化区域分布较为广泛,这可能是实施退耕还林政策的原因,部分耕地转化为林地,耕地和草地的大幅度变化,也是造成土地利用变化的原因。将图 4a 作为提取不同土地利用类型 WUE 的掩膜。对各土地利用类型年均 WUE 进行分析(图 4b),可以发现灌木林地的平均 WUE 值最大,接下来

依次为有林地、其他林地、疏林地、旱地、水田、中覆盖度草地、高覆盖度草地和低覆盖度草地。WUE 变化整体表现为:林地>耕地>草地。

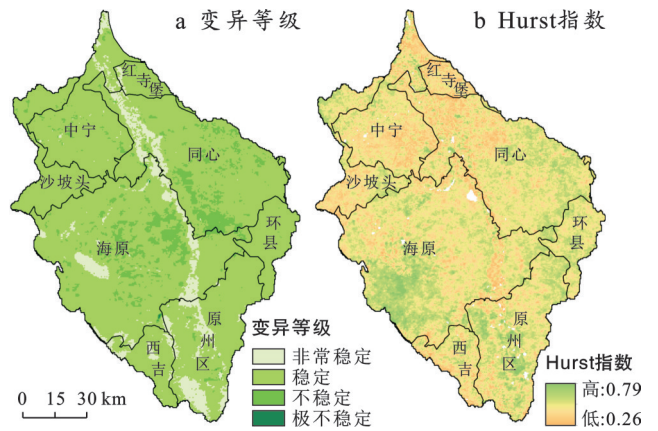


图 3 清水河流域植被 WUE 变异系数(C_v)及 Hurst 指数
Fig.3 Coefficient of variation (C_v) and Hurst index of vegetation WUE in Qingshui River basin

表 2 清水河流域 2005—2020 年土地利用转移矩阵
Table 2 Land use transition matrix of Qingshui River basin from 2005 to 2020

项目	2020 年						总计
	草地	耕地	建设用地	林地	水体	未利用	
2005 年							
草地	5 348.83	1 618.35	40.73	262.00	46.73	80.75	7 397.39
耕地	1 728.58	3 207.22	186.95	149.71	64.27	32.07	5 368.80
建设用地	32.07	90.19	51.04	8.21	4.39	1.16	187.05
林地	177.82	123.37	14.48	187.55	4.54	3.31	511.07
水体	40.33	50.24	3.96	6.16	44.37	2.18	147.23
未利用	98.91	34.95	3.61	5.09	4.44	96.86	243.86
总计	7 426.54	5 124.32	300.77	618.72	168.73	216.34	13 855.41

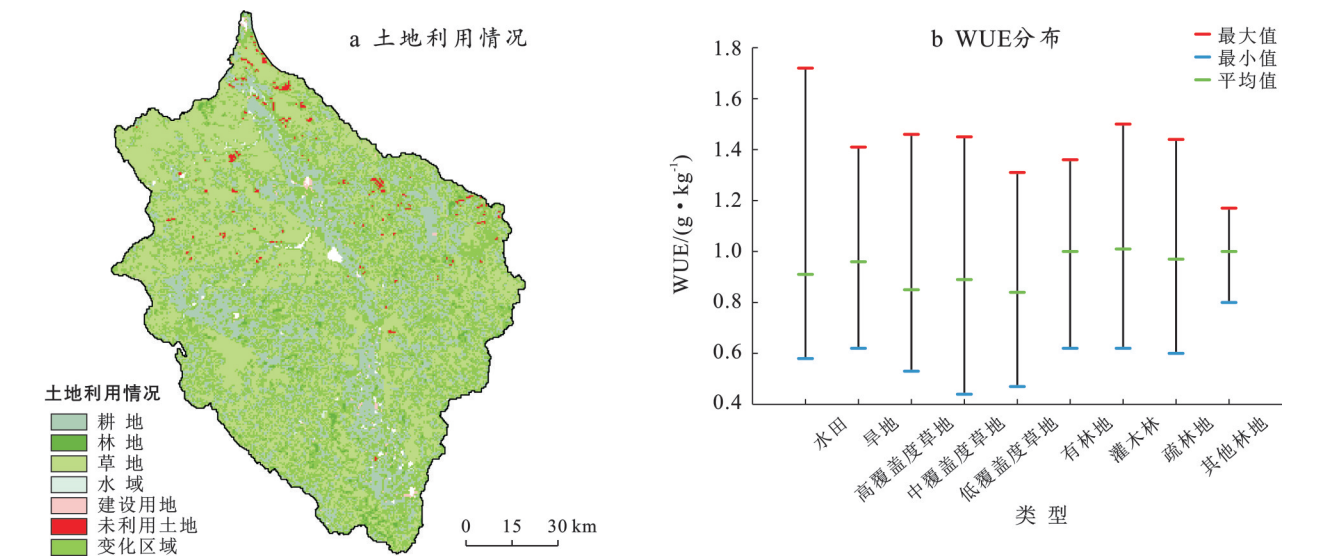


图 4 清水河流域土地利用情况及不同土地利用类型 WUE 的分布

Fig.4 Land use conditions and WUE distribution in different land use types in Qingshui River basin

3.2.2 气象及植被因子对 WUE 的影响
流域植被 WUE 与降水量相关系数值在 -0.6~0.61

(图 5a), 呈现正相关的地区占流域总面积的 72.87%, 其中呈现显著正相关区域的面积比例为

2.48% (图 5c), 主要分布在流域的东部, 这些区域降水增加会使植被 WUE 提高。流域植被 WUE 与气温相关系数值在 $-0.68 \sim 0.78$ (图 5b), 整体上以正相关

为主, 其中呈显著正相关的区域面积比例为 7.84% (图 5d), 零散分布在流域中南部。综上所述, 流域 WUE 变化主要受气温影响, 其相关性强于降水。

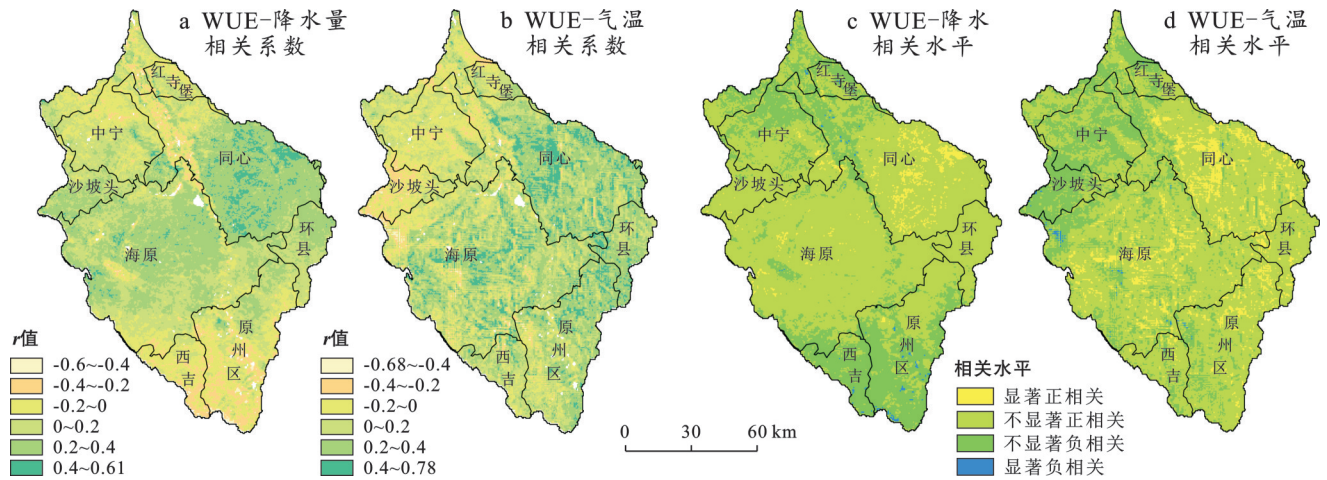


图 5 清水河流域气候因子相关性分析
Fig.5 Correlation analysis of climate factors in Qingshui River basin

WUE 与 LAI 相关系数分布在 $-0.81 \sim 0.97$ (图 6a), 呈正相关的面积占 95.50%, 其中呈显著正相关的面积比例为 72.30% (图 6c)。WUE 与 NDVI 相关系数分布在 $-0.81 \sim 0.95$ (图 6b), 呈正相关的面积占

92.71%, 其中呈现显著正相关区域的面积比例为 63.79% (图 6d); 呈负相关的面积仅占 7.29%, 主要分布在原州区南部和同心西北部。由上可知, 流域 WUE 变化主要受 LAI 影响, 其相关性强于 NDVI。

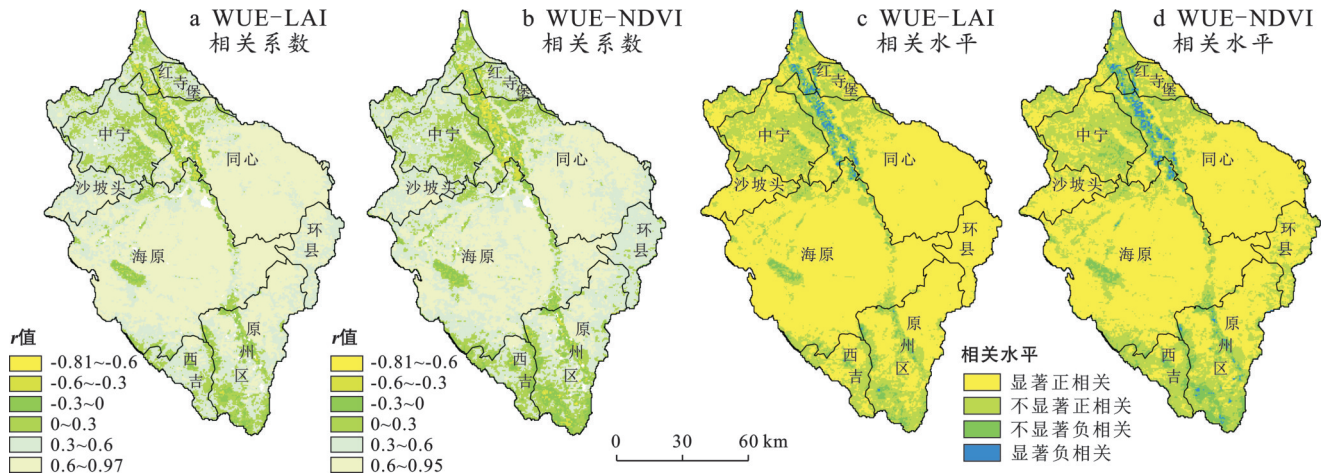


图 6 清水河流域植被因子相关性分析
Fig.6 Correlation analysis of vegetation factors in Qingshui River basin

流域气温呈显著性增加 ($p < 0.05$, 图 7b), 而降水量变化未达到显著性水平 ($p > 0.05$, 图 7a)。流域 LAI 和 NDVI 均呈显著性增加 ($p < 0.05$, 图 7c 和图 7d)。

3.2.3 自然因子及人类活动对 WUE 影响

利用偏导数方法计算影响因子对清水河流域 2001—2022 年植被 WUE 变化的贡献。由图 8a 可以看出, 植被 WUE 变化受自然因子的影响, 其中正向作用面积比例为 19.48%, 负向作用面积比例为

80.52%, 正向作用的区域主要分布在同心中南部、中宁南部、沙坡头南部以及零散分布在海原中北部; 负向作用的区域分布在流域大部分区域。由图 8b 可知, 人类活动对植被 WUE 变化的正、负向作用面积比例分别为 81.00% 和 19.00%, 正向作用的区域分布在流域大部分; 负向作用的区域主要分布在同心中南部地区, 以及零散分布在沙坡头南部、中宁南部及海原北部地区。整体而言, 人类活动对 WUE 变化的正向作用大于自然因素。

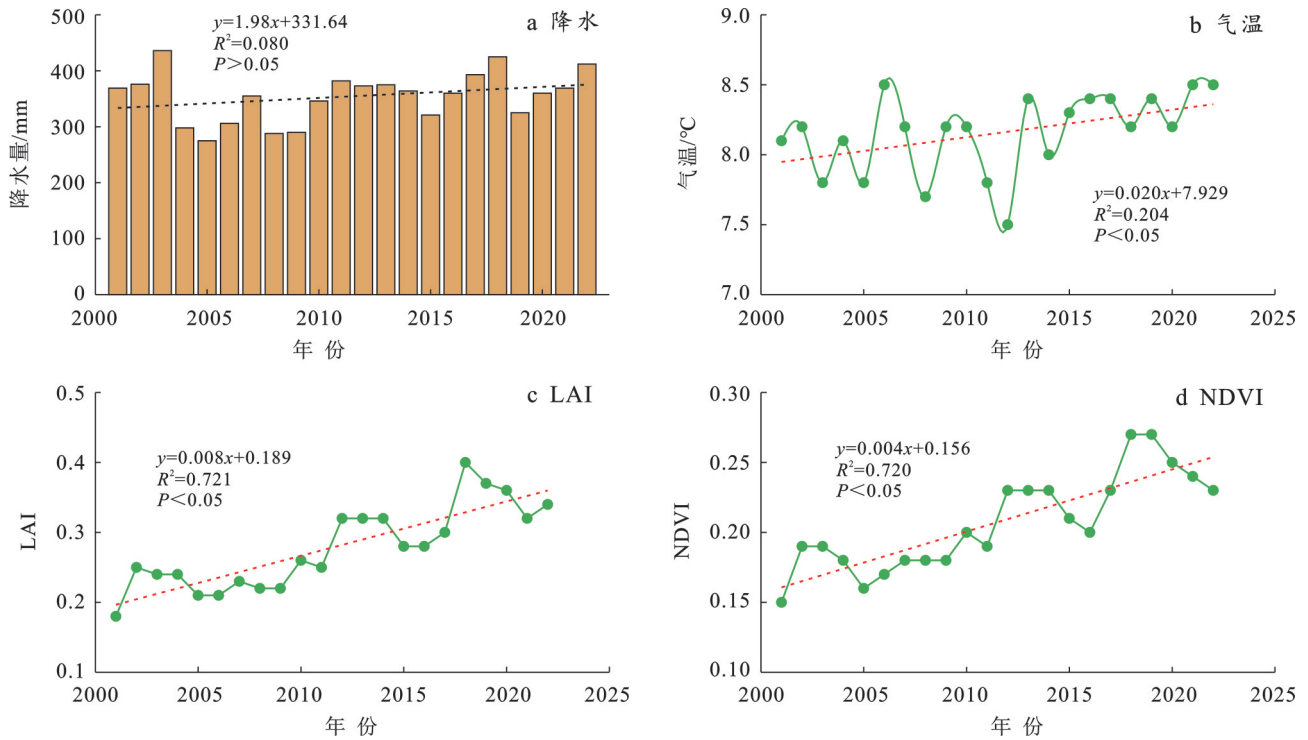


图 7 清水河流域降水、气温、LAI 和 NDVI 的年际变化

Fig.7 Interannual variations of precipitation, temperature, LAI, and NDVI in Qingshui River basin

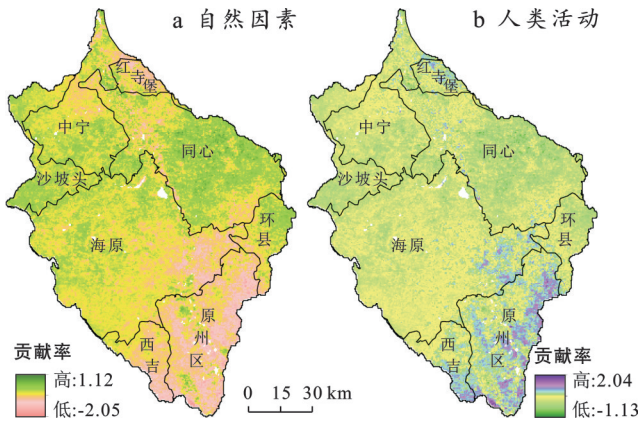


图 8 清水河流域自然因子和人类活动对 WUE 变化的贡献
Fig.8 Contributions of natural factors and human activities to WUE variations in Qingshui River basin

基于 2001—2022 年流域植被 WUE 的趋势分析和贡献分析,本文对流域植被 WUE 变化的主导因素进行探究。结果表明(图 9 和表 3),流域 WUE 变化主要受人类活动主导升高,占流域面积的 58.01%,主要集中在海原、西吉县北部、原州区中北部以及同心南部地区;受气候和植被共同主导升高的区域比例仅为 0.56%,零散分布在同心北部地区;受自然因子主导升高的区域占流域面积的 15.35%,主要分布在同心的中部地区;受气候和植被共同主导降低的区域比例仅仅为 0.08%,零散分布在沙坡头及中宁南部;受自然因子主导降低的区域占流域面积的

21.24%,主要分布在流域北部地区和南部地区,其中,南部地区为西吉县和原州区南部地区;受人类活动主导降低的区域占流域面积的 3.29%,主要分布在同心南部地区。整体来看,近 22 a 来流域植被 WUE 升高主要受人类活动的影响,而 WUE 的降低则很大程度上来自自然因子的影响。

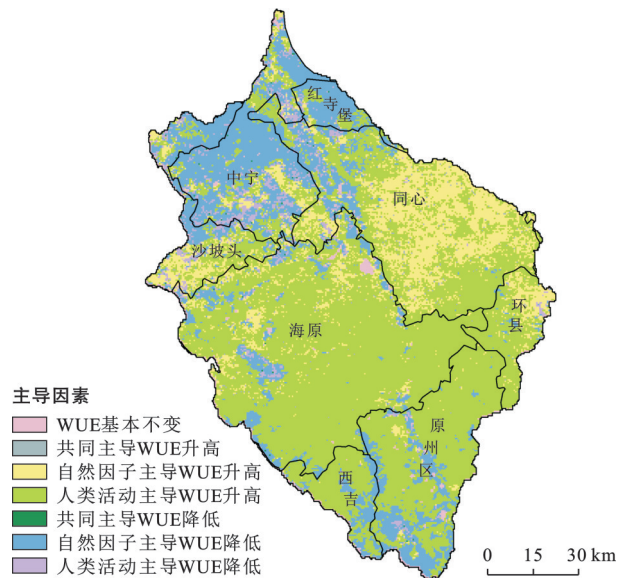


图 9 清水河流域 2001—2022 年植被 WUE 变化主导因素
Fig.9 Dominant factors of vegetation WUE variations in Qingshui River basin from 2001 to 2022

表 3 清水河流域 2001—2022 年植被 WUE 变化主导因素分类

Table 3 Classification of dominant factors of vegetation WUE variations in Qingshui River basin from 2001 to 2022

主导因素	变化趋势	自然因子	人类活动
共同主导 WUE 升高	升高	>0	>0
自然因子主导 WUE 升高	升高	>0	<0
人类活动主导 WUE 升高	升高	<0	>0
共同主导 WUE 降低	降低	<0	<0
自然因子主导 WUE 降低	降低	<0	>0
人类活动主导 WUE 降低	降低	>0	<0

4 讨论

4.1 植被 WUE 时空变化分析

本研究利用 MODIS 遥感数据、气象数据及其他数据等,分析探究 2001—2022 年清水河流域植被 WUE 的时空动态及其影响因素。从时间尺度上来看,22 a 间流域植被 WUE 为 0.82~1.07 g/(kg·a),总体上呈现增加趋势,但年变化趋势未达到显著性水平($p>0.05$)。22 a 间,WUE 呈现 4 个低值年份和 5 个高值年份,低值分别出现在 2003,2005,2011 和 2015 年,这可能与发生的极端干旱事件有关。长期缺水以及高温环境共同作用,会干扰光合作用与呼吸作用过程,降低植被的生理活性,导致植被生产力下降,进而使得 WUE 下降^[24]。干旱后降水有效补充植被所需的水分,使其生产力恢复到正常水平,与此同时,WUE 也随之显著提升^[25]。

从空间上来看,WUE 总体呈现南高北低的分布规律,西吉县和原州区植被 WUE 明显高于其他县区,这与宁夏的地形和水资源的分配具有密切关系。流域中北部地区位于宁夏中部干旱带,降水量少,土地荒漠化严重,植被 NPP 低,进而导致 WUE 较低。在流域南部地区,降水量较多,地势较高,是重要的水源涵养基地,生态环境明显优于其余地区^[26]。空间变化趋势上,植被 WUE 整体变化以上升趋势为主。这主要因为退耕还林还草、防沙治沙和“三北”防护林建设等生态工程的大力推行,使得流域生态环境状况显著改善。但在流域北部地区,植被 WUE 显著减少,表明此地区的生态环境有待改善。此外,利用 Hurst 指数法分析流域 WUE,得到流域大部分区域未来可能面临着 WUE 呈下降趋势的结论。清水河流域处于缺水地区,环境承载力低,因此需要长期且深入地推进生态保护。

4.2 植被 WUE 影响因素分析

降水量和温度是影响水分利用效率变化的重要

因素,流域植被 WUE 与降水主要呈正相关关系,其原因可能是降水量的增加,导致 GPP 的增加速度大于 ET 的增加速度,进而使该地区植被 WUE 增加^[27]。植被 WUE 与气温主要呈正相关,这可能是在有限的水资源下,植物为了应对干旱胁迫,在高温环境下会降低叶片的气孔导度,以此来提升水分利用效率^[28]。有许多研究表明,植被因子也会影响 WUE 的变化。本研究中植被 WUE 与 LAI 主要呈正相关关系,原因是 LAI 较高时,能有效减少土壤水分的消耗,使植被充分生长,因此植被 WUE 上升^[29];呈负相关区域较少,这可能是 LAI 增加时,植被以冠层截留等形式消耗的水分会增加,导致了 WUE 下降^[30]。植被 WUE 与 NDVI 呈正相关关系,这可能是该地区的植被覆盖增加,对土壤的遮蔽作用较大,导致 ET 减小,所以 WUE 较高^[31];极少地区呈负相关关系,其植被覆盖的增加导致了植被耗水量的增加,使得植被出现生态干旱状况,影响植被生产力,导致植被 WUE 下降^[32]。总的来说,植被因子是 WUE 变化的主要影响因素,而不是气候因子,这与 Ma Ruixue 等^[33]对黄土高原植被水分利用效率的影响因素分析结果一致。

从土地利用转移情况来看,耕地扩张与草地大规模转化是研究区土地利用演变的核心特征。这一变化既反映出农业用地需求的持续增长,也揭示了草地在开发与保护之间所承受的压力。同时,林地虽有一定恢复,但总体呈退化趋势,表明退耕还林政策效果有限,生态系统仍面临挑战。此外,建设用地的显著缩减可能与区域发展策略调整有关,值得深入探讨。土地利用变化对植被 WUE 的影响中,林地的 WUE 普遍高于耕地和草地,这一结论与前人的研究结果一致。这可能是因为森林生态系统的水热资源充足,在同等条件下光合效率高,储存的有机物质更多,保水能力更强^[34]。而草地 WUE 较小的原因可能是草地生态系统植被覆盖低,致使植被生产力较低并且地表蒸散发量大,这些因素综合作用使植被 WUE 较低。

从自然因子和人类活动对流域植被 WUE 变化的贡献分析可以看出,植被 WUE 变化的主要贡献因素是人类活动,这与赵浩然等^[35]的研究结果相似。整体上,人类活动促使研究区内植被 WUE 的积累,流域中北部大部分地区的植被 WUE 因人类活动主导而增加。

受篇幅的限制,本文仅讨论降水、气温、NDVI 和 LAI 等因素对 WUE 的影响,未讨论太阳辐射、人口密度等对 WUE 的影响,已有研究表明,这些因素也会影响 WUE 变化;此外,不同土地利用类型的 WUE

差异较大,未来研究将深入分析自然因子和人类活动对不同土地利用类型 WUE 的影响。同时,不同植被类型的 WUE 变化,也值得探讨。

5 结论

(1) 2001—2022 年清水河流域整体植被 WUE 呈波动上升趋势,平均每年增加 $0.005 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$ 。空间分布上,近 22 a 来流域植被 WUE 均值空间差异性较大,变化范围在 $-0.03\sim 0.04 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,整体呈现“南高北低”的空间特征。

(2) 从变化趋势来看,近 22 a 来,研究区植被 WUE 整体以上升趋势为主,占流域总面积的 76.19%,呈下降趋势的地区占总流域的 23.81%;其中,不显著上升的区域面积比例最大,为 40.80%,主要分布在流域的中南部地区。从稳定性来看,植被 WUE 稳定性以稳定为主,占研究区总面积的 83.94%。从持续性来看,Hurst 指数均值为 0.48,这说明过去植被 WUE 的增长趋势很可能在未来转为下降趋势。

(3) 研究时段内,植被 WUE 与 LAI 因子的相关系数均值最高,为 0.54;影响因子中,自然因子对 WUE 的负向作用大,占研究区面积的 80.52%,人类活动对 WUE 的正向作用较大,面积比例为 81.00%。主导因素分析结果表明,近 22 a 来,流域植被 WUE 变化主要受人类活动主导升高,占流域面积的 58.01%。其次为气候主导降低 WUE 的区域,面积比例为 21.24%。

参考文献 (References)

- [1] Green J K, Konings A G, Alemohammad S H, et al. Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10 (6):410-414.
- [2] 利辉,刘铁军,王少慧,等.2001—2021 年内蒙古荒漠草原水分利用效率时空变化特征及影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(6):993-1003.
Li Hui, Liu Tiejun, Wang Shaohui, et al. Spatial and temporal variation of water use efficiency and its influencing factors in desert steppe of Inner Mongolia from 2001 to 2021 [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6):993-1003.
- [3] 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.
- [4] 张发,祝小梅,张红,等.伊犁河谷草地水分利用效率时空变化及其对气候因子的响应[J]. *环境生态学*, 2024, 6 (4):57-64.
Zhang Fa, Zhu Xiaomei, Zhang Hong, et al. Spatial-temporal variation of water use efficiency and its response with climate factors in Ili River valley, China [J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(4):57-64.
- [5] Liu Yibo, Xiao Jingfeng, Ju Weimin, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1):13799.
- [6] Zhu Shihua, Zhang Chi, Fang Xia, et al. Interactive and individual effects of multi-factor controls on water use efficiency in central Asian ecosystems [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8):084025.
- [7] Tang Xuguang, Li Hengpeng, Desai A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4 (1):7483.
- [8] Li Yue, Shi Hao, Zhou Lei, et al. Disentangling climate and LAI effects on seasonal variability in water use efficiency across terrestrial ecosystems in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(8):2429-2443.
- [9] Liu Xiaoyi, Liu Chao, Fan Bihang, 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.
- [10] Zhao Anzhou, Yu Qiuyan, Wang Dongli, et al. Spatio-temporal dynamics of ecosystem water use efficiency over the Chinese Loess Plateau base on long-time satellite data [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(2):2298-2310.
- [11] 付思佳.宁夏清水河流域水沙关系变化及其关键驱动因素分析[D].北京:北京林业大学,2023.
Fu Sijia. Analysis on the change of water-sediment relationship and its key driving factors in Qingshui River basin of Ningxia [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.
- [12] 马文静,潘张榕,刘振路.基于 PRECIS 区域气候模式的清水河流域水文预测研究[J]. *人民珠江*, 2023, 44 (2):96-104.
Ma Wenjing, Pan Zhangrong, Liu Zhenlu. Study on hydrological prediction of Qingshui River basin based on PRECIS regional climate model [J]. *Pearl River*, 2023, 44(2):96-104.
- [13] 傅彦超,王友胜,魏天兴,等.黄土高原清水河流域降水-径流的响应关系[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1):17-22.
Fu Yanchao, Wang Yousheng, Wei Tianxing, et al. Response relationship between precipitation and runoff in Qingshui River basin on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):17-22.

- [14] 赵雨,杨帆,刘蕊蕊,等.清水河上游流域植被覆盖时空演化特征分析[J].西北水电,2022(1):22-27.
Zhao Yu, Yang Fan, Liu Ruirui, et al. Analysis on the temporal-spatial evolution characteristics of vegetation coverage in Qingshui River upstream basin [J]. Northwest Water Power, 2022(1):22-27.
- [15] 和志国,张华,暴路敏,等.宁夏清水河流域生态水量确定及保障措施浅析[J].中国水利,2019,(3):25-27.
He Zhiguo, Zhang Hua, Bao Lumin, et al. An analysis of ecological water quantity determination and safeguard measures in Ningxia Qingshui River basin [J]. China Water Resources, 2019,(3):25-27.
- [16] Yang Yuting, Guan Huade, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems [J]. Scientific Reports, 2016,6(11):23284.
- [17] 吴楠,陈凝,程鹏,等.安徽省各生态分区的NDVI年际变化特征及归因分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(6):1200-1207.
Wu Nan, Chen Ning, Cheng Peng, et al. Analysis on characteristics and attribution of NDVI interannual change in different ecological divisions in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1200-1207.
- [18] 肖强松,王昱之.粮食主产区(河南省)耕地NPP时空分异特征及影响因素分析[J].环境科学,2025,46(6):3632-3644.
Xiao Qiangsong, Wang Yuzhi. Spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land NPP in major grain producing areas (Henan Province) [J]. Environmental Science, 2025,46(6):3632-3644.
- [19] Xu Guoce, Zhang Jiabin, Li Peng, et al. Vegetation restoration projects and their influence on runoff and sediment in China [J]. Ecological Indicators, 2018,95:233-241.
- [20] 饶雨晨,孙承志.多源数据的湖南省植被覆盖度时空变化研究[J].测绘科学,2024,49(7):153-163.
Rao Yuchen, Sun Chengzhi. Spatial and temporal variation of vegetation cover in Hunan Province with multi-source data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2024,49(7):153-163.
- [21] Tang Yuanyuan, Chen Jianping, Zhang Feng, et al. Spatiotemporal analysis of evapotranspiration and effects of water and heat on water use efficiency [J]. Water, 2021,13(21):3019.
- [22] 刘健,张泽中,冯凯,等.内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素[J].生态学报,2024,44(22):10055-10067.
Liu Jian, Zhang Zezhong, Feng Kai, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River basin of the Inner Mongolia Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(22):10055-10067.
- [23] 谢慧君,谢亚巍,曹聪,等.重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(12):2581-2597.
Xie Huijun, Xie Yawei, Cao Cong, et al. Spatial-temporal variation characteristics and driving forces of vegetation net primary productivity in Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(12):2581-2597.
- [24] 籍健勋,新,段利民,等.内蒙古河套灌区所在流域植被NPP时空动态特征及其驱动力分析[J].环境科学,2025,46(7):4392-4402.
Ji Jianxun, Tong Xin, Duan Limin, et al. Spatio-temporal dynamic characteristics and driving factors of vegetation NPP in Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Environmental Science, 2025,46(7):4392-4402.
- [25] 马龙龙,易志远,魏采用,等.宁夏盐池县生态系统水利用效率时空特征及其影响因素[J].干旱区研究,2024,41(4):650-660.
Ma Longlong, Yi Zhiyuan, Wei Caiyong, et al. Temporal and spatial characteristics of ecosystem water use efficiency and its influencing factors in Yanchi County, Ningxia [J]. Arid Zone Research, 2024,41(4):650-660.
- [26] 赵卓文,张连蓬,李行,等.基于MOD13Q1数据的宁夏生长季植被动态监测[J].地理科学进展,2017,36(6):741-752.
Zhao Zhuowen, Zhang Lianpeng, Li Xing, et al. Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data [J]. Progress in Geography, 2017,36(6):741-752.
- [27] 尹超华,罗敏,孟凡浩,等.蒙古高原植被碳水利用效率时空变化特征及其影响因素[J].生态学杂志,2022,41(6):1079-1089.
Yin Chaohua, Luo Min, Meng Fanhao, et al. The spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation carbon and water use efficiency in the Mongolian Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(6):1079-1089.
- [28] Zhao Fubo, Wu Yiping, Yao Yingying, et al. Predicting the climate change impacts on water-carbon coupling cycles for a loess hilly-gully watershed [J]. Journal of Hydrology, 2020,581:124388.
- [29] Hungate B A, Reichstein M, Dijkstra P, et al. Evapotranspiration and soil water content in a scrub-oak wood-

- land under carbon dioxide enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2002,8(3):289-298.
- [30] 梁家凤,赵银兵,栾军伟,等.2000—2019年中国南方竹林区水分利用效率时空特征及驱动机制[J].*生态学报*,2023,43(12):5150-5161.
Liang Jiafeng, Zhao Yinbing, Luan Junwei, et al. Spatiotemporal patterns and driving mechanisms of water use efficiency in bamboo forest areas in southern China from 2000 to 2019 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(12):5150-5161.
- [31] 常晓格,王志慧,肖培青,等.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[J].*水土保持研究*,2022,29(5):244-252.
Chang Xiaoge, Wang Zhihui, Xiao Peiqing, et al. Spatial variation patterns of dynamics of water use efficiency of ecosystem and its drivers on the Chinese Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):244-252.
- [32] 刘轩,粟晓玲,姜田亮,等.基于水分利用效率的生态干旱敏感性评估[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2023,51(6):81-90.
Liu Xuan, Su Xiaoling, Jiang Tianliang, et al. Assessment of ecological drought sensitivity based on water use efficiency [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2023,51(6):81-90.
- [33] Ma Ruixue, Wang Dacheng, Cui Ximin, et al. Distribution and driving force of water use efficiency under vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(18):4513.
- [34] 李玉露,吴雪晴,袁野,等.黑龙江省植被碳-水利用效率时空演变及其驱动机制[J].*应用生态学报*,2024,35(12):3349-3358.
Li Yulu, Wu Xueqing, Yuan Ye, et al. Spatial-temporal variation and driving mechanism of vegetation carbon and water use efficiency in Heilongjiang Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(12):3349-3358.
- [35] 赵浩然,曹生奎,雷义珍,等.青海湖流域生态系统水分利用效率时空特征及驱动分析[J].*草地学报*,2024,32(11):3554-3566.
Zhao Haoran, Cao Shengkui, Lei Yizhen, et al. Spatial and temporal characteristics and driving analysis of ecosystem water use efficiency in the Qinghai Lake basin [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024,32(11):3554-3566.
-
- (上接第284页)
- [30] 王坤,张严硕,宁洋,等.徐州市湿地生态系统服务价值评估研究[J].*科技创新与应用*,2024,14(35):121-124.
Wang Kun, Zhang Yanshuo, Ning Yang, et al. Research on the valuation of wetland ecosystem services in Xuzhou City [J]. *Technology Innovation and Application*, 2024,14(35):121-124.
- [31] 陈春阳,戴君虎,王焕炯,等.基于土地利用数据集的三江源地区生态系统服务价值变化[J].*地理科学进展*,2012,31(7):970-977.
Chen Chunyang, Dai Junhu, Wang Huanjiong, et al. Changes of the value of ecosystem services in the Sanjiangyuan Region based on land use data [J]. *Progress in Geography*, 2012,31(7):970-977.
- [32] 姚俊飞,吴发亮,魏国良,等.基于格网尺度的三江源土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J].*青海科技*,2025,32(1):7-19.
Yao Junfei, Wu Faliang, Wei Guoliang, et al. Analysis of the spatiotemporal correlation of land use change and ecosystem service value in the Sanjiangyuan Region based on grid scale [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2025,32(1):7-19.
- [33] 李文静,李文龙,熊有才,等.基于MODIS NPP的2000—2023年三江源地区植被NPP时空演变及影响因素研究[J/OL] (2025-03-19).*草地学报*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.s.20250318.2057.024.html>.
- [34] 王守兴,周翼,杨明新,等.三江源地区生态承载力时空动态评价及分区研究[J].*中国农业大学学报*,2025,30(3):218-231.
Wang Shouxing, Zhou Yi, Yang Mingxin, et al. Spatiotemporal dynamic evaluation and regional division research of ecological carrying capacity in the three rivers source region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(3):218-231.