

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.012 CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.012

袁伏麒,刘廷玺,籍健勋,等.河套灌区所在流域水分利用效率演变及其对生态系统服务功能的响应[J].水土保持学报,2026,40(3):339-350.

YUAN Fuqi, LIU Tingxi, JI Jianxun, et al. Evolution of water use efficiency in Hetao irrigation area watershed and its response to ecosystem services [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 339-350.

河套灌区所在流域水分利用效率演变及其对 生态系统服务功能的响应

袁伏麒^{1,2,3,4}, 刘廷玺^{1,2,3,4}, 籍健勋⁵, 周晓龙^{1,2,3,4},
冯玉广^{1,2,3,4}, 童新^{1,2,3,4}, 段利民^{1,2,3,4}, 张义强⁶

(1.内蒙古农业大学旱区水利工程生态环境全国重点实验室,呼和浩特 010018; 2.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018; 3.内蒙古自治区生态水文与水资源高效利用重点实验室,呼和浩特 010018; 4.黄河流域内蒙古段水资源与水环境综合治理协同创新中心,呼和浩特 010018; 5.山西省地质调查院有限公司,太原 030006; 6.巴彦淖尔市水文水资源勘测中心,内蒙古 临河 015000)

摘要: [目的] 在干旱半干旱地区,厘清植被水分利用效率(water use efficiency, WUE)与生态系统服务功能(ecosystem services, ESs)的时空响应关系及其影响机制,是推进水-碳管理与灌区高质量发展的关键所在。[方法] 以内蒙古河套灌区所在流域为研究区,整合2001—2020年多源遥感与气象数据,系统分析WUE时空演变特征,并综合运用多元线性回归、随机森林与地理加权回归模型,揭示其驱动机制的非线性与空间异质性。基于InVEST模型获取碳储量、产水量与粮食产量3类生态功能,构建WUE-ESs耦合度指数,并以Getis-Ord G_i^* 热点分析判别耦合强度的空间集聚态势。[结果] 2001—2020年WUE整体呈现波动下降趋势,下降速率为 $0.003 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O}\cdot\text{a})$ (以C计);空间上耕地与乌梁素海边缘为高值区,草地与河套边缘为低值区。驱动机制分析表明,NPP与VPD对WUE具有持续显著正向影响,随机森林进一步识别出VPD在早期(2001—2005年)为WUE主导因子(重要性0.40),而根区土壤湿度在后期(2015—2020年)影响显著增强(重要性0.93)。地理加权回归揭示各因子影响存在显著空间异质,如降水在东南部为负效应、西南部为正效应。耦合分析显示,WUE与ESs在灌溉农田区呈高耦合热点聚集,草地系统则以低耦合冷点为主,2001年为全域耦合程度最高年份。建议在农田区强化以水定产的精准管理以增强服务协同,在草地系统则需优化植被结构以提升系统韧性。[结论] 研究结果为干旱区灌区水资源高效利用与生态协同管理提供多方法融合的科学依据。

关键词: 水分利用效率; 驱动因素; 生态系统服务; 热点分析; 河套灌区所在流域

中图分类号: X171.1; P467 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0339-12

Evolution of Water Use Efficiency in Hetao Irrigation Area Watershed and Its Response to Ecosystem Services

YUAN Fuqi^{1,2,3,4}, LIU Tingxi^{1,2,3,4}, JI Jianxun⁵, ZHOU Xiaolong^{1,2,3,4},
FENG Yuguang^{1,2,3,4}, TONG Xin^{1,2,3,4}, DUAN Limin^{1,2,3,4}, ZHANG Yiqiang⁶

(1.State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3.Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High-Efficient Utilization of Water Resources, Hohhot 010018, China; 4.Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, China; 5.Shanxi Institute of Geological Survey

收稿日期:2025-11-05 修回日期:2025-12-09 录用日期:2025-12-15 网络首发日期(www.cnki.net):2026-03-12
资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201203);国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-国家电力投资集团有限公司黄河水科学研究联合基金项(U2243234);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSH0105);内蒙古自治区科技领军人才团队项目(2022LJRC0007);教育部创新团队发展计划项目(IRT17R60);内蒙古农业大学基本科研业务费专项(BR22-12-04)

第一作者:袁伏麒(1999—),男,硕士研究生,主要从事流域生态水文研究。E-mail:1712983053@qq.com

通信作者:刘廷玺(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事寒旱区生态水文研究。E-mail:txliu1966@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

Company Limited, Taiyuan 030006, China; 6.Bayannur Hydrological and Water Resources Survey Center, Linhe, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: [Objective] In arid and semi-arid regions, clarifying the spatiotemporal response relationship between vegetation water use efficiency (WUE) and ecosystem services (ESs) and its influencing mechanisms is crucial for promoting water-carbon management and high-quality development of irrigation areas. [Methods] Taking the Hetao Irrigation Area watershed in Inner Mongolia as the study area, this study integrated multi-source remote sensing and meteorological data from 2001 to 2020 to systematically analyze the spatiotemporal evolution characteristics of WUE. Multiple linear regression, random forest, and geographically weighted regression models were comprehensively employed to reveal the nonlinearity and spatial heterogeneity of its driving mechanisms. Based on the InVEST model, three ecosystem services-carbon storage, water yield, and grain production-were quantified. A WUE-ESs coupling degree index was constructed, and the Getis-Ord G_i^* hotspot analysis was applied to identify the spatial agglomeration pattern of coupling intensity. [Results] From 2001 to 2020, WUE showed an overall fluctuating downward trend, with a decline rate of $0.003 \text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O yr})$ (measured in C). Spatially, high-value areas were found in cultivated land and the periphery of Wuliangshuai Lake, while low-value areas were located in grassland and the periphery of the Hetao Irrigation Area. The analysis of driving mechanisms indicated that net primary productivity (NPP) and vapor pressure deficit (VPD) had a continuous and significant positive impact on WUE. The random forest model further identified VPD as the dominant factor for WUE in the early period (2001—2005) (importance 0.40), while the influence of root-zone soil moisture significantly increased in the later period (2015—2020) (importance 0.93). Geographically weighted regression (GWR) revealed significant spatial heterogeneity in the effects of different factors. For instance, precipitation had negative effects in the southeast and positive effects in the southwest. Coupling analysis showed that WUE and ESs exhibited high coupling hotspots concentrated in irrigated farmland areas, while grassland systems were mainly characterized by low coupling coldspots. The highest coupling degree across the entire area was observed in 2001. This study recommended that in farmland areas, precise management based on water availability should be strengthened to enhance service synergy, while vegetation structure should be optimized in the grassland systems to improve system resilience. [Conclusion] This study provides a scientific basis for the efficient utilization of water resources and ecological coordinated management in arid irrigation districts through the integration of multiple methods.

Keywords: water use efficiency; driving factors; ecosystem services; hotspot analysis; Hetao Irrigation Area watershed

Received: 2025-11-05

Revised: 2025-12-09

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-03-12

黄河流域是我国至关重要的生态屏障与粮食生产区,其生态系统服务供给、调节等功能对于区域生态稳定和国家粮食安全具有重要意义^[1-3]。作为黄河上游典型特大型灌溉农业区,河套灌区所在流域长期依赖引黄水资源维持大规模农业发展,在保障农业产出的同时,也面临着水资源紧张、生态系统服务功能衰退、水分利用效率低等多重挑战^[4]。在当前气候变化和人类活动频繁背景下,深入分析灌区水分利用效率(water use efficiency, WUE)的时空演变特征及其影响机制,同时探究其与生态服务功能的响应关系,对实现灌区水资源合理优化配置和生态系统协调稳定具有重要社会价值和实践意义^[5]。

WUE作为承接碳循环与水循环的关键生态指

标,反映单位水分消耗所产生的植被生产力,已成为评估生态系统功能演变和气候响应机制的重要参数^[6-7]。近年来,WUE在气候变化、水资源管理与生态服务功能评估等领域的研究逐渐深入^[8-9]。陆凌伟等^[10]研究揭示黄河流域 WUE 对于温度、植被干旱指数、太阳辐射和风速的响应存在显著的空间异质性;薛联青等^[7]进一步指出,黄河流域干旱对 WUE 存在多时间尺度的累积效应,其影响周期因植被类型与干湿条件而异。此外,陈祖亮等^[11]研究强调人类活动对 WUE 变化的贡献率高达 70.49%,显著超过气候因子的影响;而有学者^[12]在宁蒙灌区发现,降水蒸散指数是 WUE 最敏感的环境因子,且不同类型 WUE 指标的主导控制因子存在差异。综上可知,WUE 受气候、土

壤、植被与人类活动的综合调控,且其驱动关系具有明显的空间非平稳性。

然而,当前研究在因子的系统性与驱动关系的空间异质性解析上仍存在明显局限^[13-14]。多数研究侧重于气温、降水等常规气候因子,而对地表能量平衡(如感热通量、净辐射)、深层土壤水分动态及近地表水汽压差等关键生物物理过程因子的综合研究不充分^[15-16]。其次,尽管前述研究揭示驱动关系的空间差异性,但在农业干预活动频繁的河套灌区所在流域的农业生态系统中,针对多因子影响的空间非平稳性格局及其局部作用强度,仍缺乏精细化的定量刻画。传统全局模型难以揭示同一驱动因子在不同地理空间中的差异化影响^[17],而这恰恰是制定分区调控策略的关键^[18]。为改进现有研究在影响机制中的要素刻画及空间异质性研究存在的局限性,本研究构建涵盖气候、水分、植被与地表能量多要素的驱动因子,并引入多模型融合识别框架,可精准解析WUE在非线性过程中的影响机制及刻画空间异质特征。通过模型融合,使多元线性回归模型获取全局线性关系、随机森林算法识别非线性驱动因子的影响、地理加权回归则揭示局部空间非平稳性,实现对WUE驱动机制从整体-非线性-空间细尺度的多层解析。同时结合WUE-ESs空间耦合分析,从驱动、过程到生态响应构建完整的分析框架,为灌区水分管理与生态系统功能的分区调控提供更具针对性的科学依据。

生态系统服务功能的动态变化与WUE密切相关^[19]。生态系统服务功能不仅表现在生态系统对人类社会的贡献程度,也反映生态系统稳定性状况。当前关于灌区的农业生态系统服务功能评估多从土地利用或生产力视角出发,缺乏与水分利用效率响应关系的系统性研究^[20-21]。从生态系统的稳定调节作用出发,同时考虑河套灌区碳固存功能反映植被固碳与生态系统稳定性;产水量体现水文过程调节能力,是灌区水资源胁迫指标的重要依据;而粮食产量则直接衡量灌区农业生态系统生产力,是生态系统服务的重要供给。因此,研究选取碳储量、产水量和粮食产量3个生态功能作为分析切入点,明晰WUE演变特征与生态系统服务功能之间的响应关系,有助于构建基于水资源—生态系统服务功能协同的评估框架,为区域生态安全提供科学可靠依据。

综上,当前研究存在3个关键空白:1)在高强度人类活动干扰下,哪些是驱动河套灌区WUE时空演变的主导因子? 2)各驱动因子对WUE的影响是否存在显著的空间非平稳性? 其空间分异规律如何? 3)WUE的空间格局动态如何进一步影响关键生态系统服务功能的供给? 针对上述问题,本研究以河

套灌区所在流域为研究对象,基于遥感监测技术,综合运用多元线性回归、随机森林和地理加权回归(GWR)模型,系统解析WUE的时空格局及其影响机制,同时整合InVEST模型评估生态系统服务功能及其对WUE的响应关系,为灌区的生态管理、水资源调配及可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区(40°19'~41°18'N,106°20'~109°19'E)所在流域位于黄河流域的上游(图1),包含乌梁素海、以耕地为主的河套灌区及山脉等地貌类型,是我国的三大灌区之一。该地区海拔985~2 351 m,在空间上呈“西北高,中间低”的特征。在气候条件中,年平均蒸发量较大,其蒸发量(20 cm蒸发皿)为1 276~2 799 mm。年平均降水量仅有140~220 mm,在空间上呈自东向西递减的特征^[16]。同时,年平均气温8℃,属于典型的干旱半干旱气候区。河套灌区所在流域是我国重要的粮食生产基地、无毛绒分梳基地和农畜产品出口基地。研究区行政范围主要包括巴彦淖尔市南部,以及鄂尔多斯市、阿拉善盟和包头市的局部区域。截至2023年,区域内常住人口超过150万,城镇化率达60.39%。该地区经济保持稳定发展,产业结构涵盖第一产业(农业)、第二产业(工业与建筑业)和第三产业(服务业)^[22]。

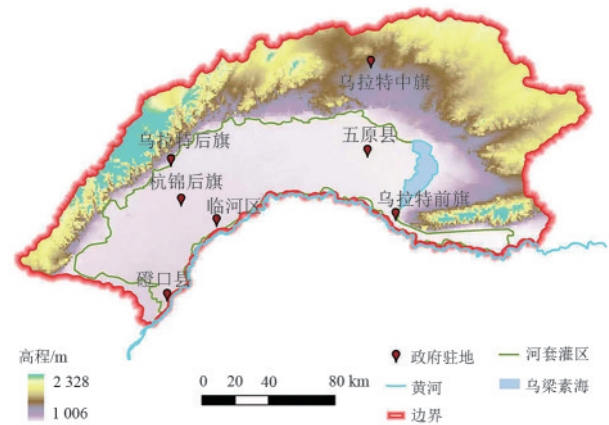


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源与处理

WUE是通过植被净初级生产力(gross primary productivity, GPP)与蒸散发量(evapotranspiration, ET)数据直接计算获取。GPP和ET数据是获取于MODIS的数据产品,具有500 m及8 d的时空分辨率特征,使其计算WUE更加精准。数据处理基于Google Earth Engine(GEE)平台完成,按照研究区矢量边界进行影像筛选,通过合成与校正等处理步骤

获取年尺度的 GPP 与 ET 数据,为后续时空演化及影响机制路径分析提供可靠数据支撑。

研究选取降水量(Prec)、平均气温(Temp)、地表气压(Pres)、蒸发压力(S)、饱和水汽压差(VPD)、风速(Wind)相对湿度(Rhu)、表层土壤湿度(SM_s)、根区土壤湿度(SM_rz)、太阳辐射(Srad)、地表净辐射(Rn)、地表感热通量(H)、净初级生产量(NPP),共 13 个因子作为输入数据进行回归模型构建,从而识别 WUE 的关键影响因素。其中,NPP 作为植被碳汇能力的代表性指标,被纳入驱动因子,以捕捉生态系统净碳固定过程对水分利用效率的调控作用^[23]。尽管 WUE 基于 GPP 计算,但 NPP(NPP=GPP-Ra,其中 Ra 为自养呼吸)更直接反映扣除呼吸消耗后的净碳收益,有助于分离 Ra 在环境和管理因素(如灌溉制度)下的变异对 WUE 的影响。选取的要素包括了水热条件、能量交换、植被碳汇能力及土壤水分供给等全面指标,能够有效且综合地反映生态系统对水分吸收、蒸散损耗及碳固定阶段的不同变化过程。各类型数据将通过资源环境科学与数据平台(<http://www.resdc.cn/>)、国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<https://www.ncdc.ac.cn/>)及 GLEAM 官方平台(<https://www.gleam.eu/>)进行获取^[24],并利用 QGIS 设置统一空间分辨率与投影坐标系,为后续模型构建提供可靠数据输入。

1.3 WUE 计算

本研究基于 MODIS 数据,从碳-水耦合视角进行研究,采用光合生产效率法(GPP/ET)构建并计算水分利用效率(WUE)指标^[25]。WUE 的计算公式为:

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

式中:WUE 为水分利用效率,g/(mm H₂O)(以 C 计);GPP 为植被年净初级生产力,g/(m²·a)(以 C 计);ET 为年蒸散量,mm/a。

1.4 水分利用效率影响因素的模型构建

为量化不同要素对区域 WUE 的影响程度,构建多元线性回归模型(multiple linear regression, MLR),通过逐步回归方法系统识别影响要素,并获取定量的影响度及显著性。基本公式为:

$$WUE = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \epsilon \quad (2)$$

式中:WUE 为响应变量; X_i 为第 i 个解释变量(如降水、气温、NPP 等); β_i 为回归系数; ϵ 为随机误差项。

模型构建过程中,首先对变量间多重共线性进行分析判断,剔除方差较大的变量,以减少信息冗余干扰;随后采用逐步回归法筛选对 WUE 变化影响较大的因子,最终模型的拟合优度通过决定系数、残差分布及显著性检验进行模型准确性评估。

1.5 生态系统服务功能计算

生态系统服务功能表征的是生态系统为人类社会提供的自然资源与调节能力,是评价区域环境资源生态协调水平的重要指标^[26]。本研究从供给服务与调节服务 2 个视角出发,选取粮食产量、产水量与碳储量 3 个核心指标,基于 INVEST 模型计算生态系统服务功能空间格局,为分析其与 WUE 之间的耦合关系提供量化基础。

碳储量模拟基于 InVEST 碳储存模块,整合地上生物量、地下生物量、枯落物及土壤碳库获取的总储量。产水量的计算,输入数据包括年降水量、根系深度、流域参数及潜在蒸散发等变量。粮食产量通过区域粮食总产量、主栽作物空间分布及耕地类型估算后进行空间化处理,反映供给服务在不同区域的差异特征。

为科学评估河套灌区所在流域的生态系统服务,并精准揭示其与 WUE 的耦合关系,本研究基于 Millennium Ecosystem Assessment 的分类框架^[27],选取碳储量、产水量和粮食产量 3 项核心指标。该选择的依据为:1) 专注碳水耦合核心过程,WUE 是生态系统碳循环与水循环的关键纽带。碳储量直接响应 WUE 分子项(GPP/NPP)的长期累积;产水量则与 WUE 分母项(蒸散发,ET)存在直接的水量平衡关系;粮食产量是农业生态系统(河套灌区)中 WUE 调控的经济产出体现。三者共同构成“碳固定-水消耗-食物生产”的完整分析框架。2) 契合区域核心生态问题:河套灌区所在流域作为干旱半干旱区典型灌溉农业系统,其最核心的生态矛盾与可持续发展问题集中于碳汇功能、水资源安全与粮食安全 3 个方面。该指标集合避免因追求全面而导致的重点稀释,实现对研究区关键“碳-水-粮”协同与权衡关系的精准刻画。

1.6 热点冷点分析

为进一步深入解析 WUE 与生态系统服务的空间关系,在 ArcGIS 中计算空间权重矩阵,从而基于局部空间自相关的 Getis-Ord G_i^* 指数进行冷热点分析。其计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (3)$$

式中: x_j 为 j 栅格的观测值; w_{ij} 为空间权重矩阵; \bar{X} 、 S 分别为样本数据的平均值和标准差; n 为栅格总数; G_i^* 为 Getis-Ord G_i^* 指数,其正负值分别代表高低值的聚集程度。

1.7 随机森林模型

WUE受多种因素影响,这些因素间通常存在复杂的相互关联和非线性关系。为识别影响WUE变化的主导因子,本研究采用随机森林(random forest, RF)算法对各因子的重要性进行排序。此方法是基于分类与回归树(CART),通过构建大量决策树进行集成学习,具有无需预先设定函数形式、对变量间多重共线性不敏感等优势^[28]。

在本研究中,利用随机森林模型探究不同因子对区域WUE的相对重要性。其模型的参数设置包含500棵决策树,每棵树的叶节点最小样本数设为5,以确保模型的稳定性及计算精度。同时选用IncMSE用于最终各因子的重要性排序依据,主要由于该指标能够更真实地反映变量的重要性,同时能够在复杂生态驱动因子评估中具有更高的解释力,以描述各因子对模型预测精度的实际影响程度。

1.8 地理加权回归模型

地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)是由BRUNSDON等^[29]提出的一种简单而实用的局域空间分析方法,有助于揭示研究区域内部空间关系的变化。GWR模型是对普通线性回归的拓展,该方法的参数是空间位置的函数,通过获取局部参数来评估自变量与因变量关系在空间尺度上的

变异。该模型的表达形式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: y_i 、 x_{ij} 、 ϵ_i 分别为空间上*i*点的因变量、自变量和随机误差; (u_i, v_i) 为*i*点的空间位置; j 为自变量的个数; β_j 为*i*点上的回归系数; β_0 为截距。

带宽选择是GWR技术的核心参数,对模型平滑效果及结果稳定性具有显著影响。本研究利用AICc(校正赤池信息量准则)自动优化带宽,该方法适用于样本量较小的场景,可有效避免带宽过大造成的过度平滑或带宽过小所带来的局部过拟合问题。研究中所采用的带宽由GWR模型通过AICc最小化准则方法所确定,以保证空间准确性和模型稳定性。

2 结果与分析

2.1 水分利用效率的时空演变特征

从空间格局(图2)分析,河套灌区所在流域WUE的高值区域主要分布在中部耕地和乌梁素海周边,其值均 $>2.0 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O})$ (以C计),局部最高可达 $3.9 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O})$ (以C计);而东北部林草地表现为低值区域,WUE值主要分布在 $0.8\sim 1.5 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O})$ (以C计)。同时2001年高值区占比较大,主要集中于中西部农业灌溉区。此种空间分布格局反映土地利用类型与灌溉耗用水资源对区域WUE的主导作用。

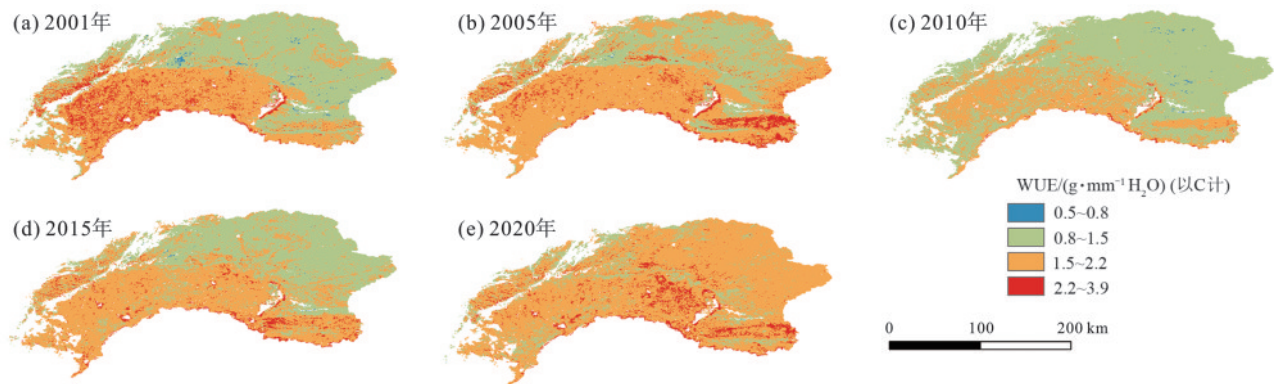


图2 河套灌区所在流域2001—2020年水分利用效率空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of water use efficiency in Hetiao Irrigation Area watershed (2001—2020)

通过对WUE时间序列进行线性回归分析,并绘制时序趋势变化图。由图3可知,2001—2020年WUE整体呈极微弱下降趋势,下降速率为 $0.003 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O} \cdot \text{a})$ (以C计)。

从人类活动驱动要素分析,WUE的小幅下降与灌溉制度与作物结构调整密切相关。在研究期内灌区经历多轮节水改造工程的实施与完善,虽在输配水效率方面得到改善,但也造成水分消耗与作物需水峰值表现出较大差异性,从而降低水分效率^[30]。在作物结构中,玉米等高耗水作物的种植面

积不断扩张,进一步加剧单位生产所需的耗水量,从而致使WUE整体呈下降趋势^[3, 31]。此外,农业用地的扩张、地下水补给量的缩减等因素同样可通过改变区域水热条件,间接导致WUE的下降趋势^[32]。

同时WUE的时序分析还表现出显著的年际波动,主要与气候因子的年际变化、作物结构调整及灌溉管理制度的周期性调控有关^[22, 33]。对峰值年深入分析,2010年与2016年为干旱年份,致使WUE分别为 1.4 、 $1.3 \text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O})$ (以C计);2013年尽管气象

因子无明显异常,但由于灌溉规模扩大,导致水资源消耗增加,WUE出现下降。

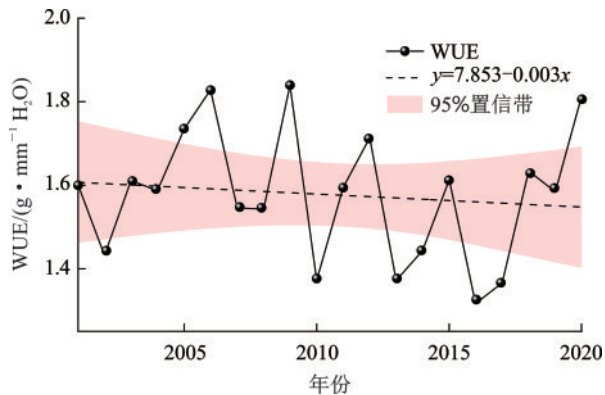


图 3 河套灌区所在流域 2001—2020 年水分利用效率变化趋势
Fig. 3 Variation trends of water use efficiency in Hetao Irrigation Area watershed (2001—2020)

进一步对 2001—2020 年 WUE 空间演变稳定性进行分析,通过计算变异系数进行评估,WUE 稳定性空间分布见图 4。结果表明,在近 20 a 区域 WUE 总体稳定性较高,中部农田区与北部部分草地处于“非常稳定”或“稳定”状态,“不稳定”态势占比极少,表明水资源供给的相对稳定性和农业管理措施在维持 WUE 稳定方面发挥关键作用。

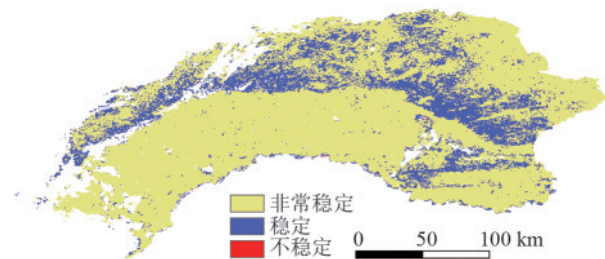


图 4 河套灌区所在流域 2001—2020 年水分利用效率变异程度空间格局
Fig. 4 Spatial pattern of variation degree of water use efficiency in Hetao Irrigation Area watershed (2001—2020)

2.2 水分利用效率的影响因素分析

为验证构建的回归模型对数据的模型效果与数据分布条件,对不同年份模型的残差进行系统分析(图 5)。结果表明,2001—2020 年模型残差分布均匀且合理,未表现出显著的偏差。从正态分布可以发现,历年的残差分布均形成 45° 直线,表明模型输入数据符合正态性假设,且回归模型受到异常值的影响较小,表明模型拟合效果较好且稳定性较高。

各因素对 WUE 的影响和显著性的多元线性回归分析结果见图 6。结果揭示影响 WUE 的线性驱动机制。结果显示,NPP 与 WUE 间存在非常显著正相关($p < 0.001$),其回归系数为 0.2~0.4,仅在 2020 年不受

NPP 的影响。高 NPP 值通常出现在农业灌溉区与草地水热适宜区,反映出光合作用产能对水分利用效率的直接增强作用。VPD 对 WUE 也表现为显著正向作用($p < 0.05$),其在 2001 年、2010 年与 2015 年的回归系数分别为 0.63、0.72 与 0.94。VPD 升高促使植被关闭气孔,减少水分损失,同时提高单位水分的光合产出,表明植被对干旱胁迫的适应性调节机制^[34]。Pres 与 WUE 之间呈负相关($p < 0.05$),主要是通过 2 种机制产生抑制效应:一是较高气压通常对应大气稳定条件,不利于水汽交换;二是逆温现象减少地表-大气之间的辐射与能量通量,进而降低蒸散强度,影响水碳耦合效率。

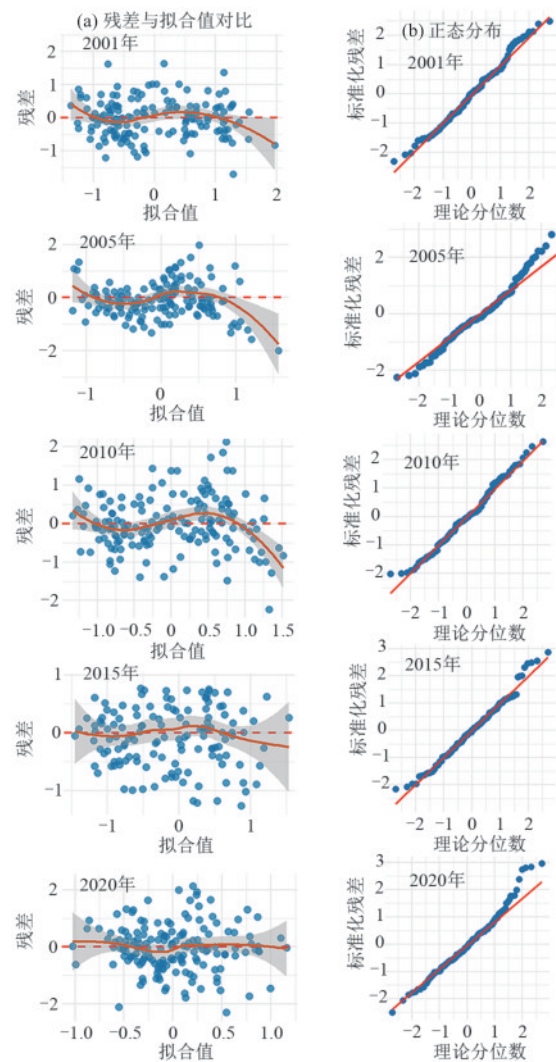


图 5 河套灌区所在流域 2001—2020 年 WUE 回归模型残差诊断
Fig. 5 Residual diagnostic of WUE regression model for Hetao Irrigation Area watershed (2001—2020)

本研究运用随机森林模型通过重要性得分评估 WUE 的非线性解释(图 6)。RF 结果与 MLR 模型的结论较相似,再次验证 VPD 作为 WUE 的主要控制因素的地位。2001 年和 2005 年,VPD 的重要

发压力对 WUE 影响的局部特征。SM_{rz} 整体上对 WUE 呈正向作用,但在西南部存在显著的负相关区域(图 7m)。S 与 SM_s 对 WUE 的影响则表现出相反

的空间分异格局:S 在北部表现为正向效应,而在南部则以负向为主(图 7n);SM_s 的空间模式则恰好相反,即南部为正相关,北部为负相关(图 7o)。

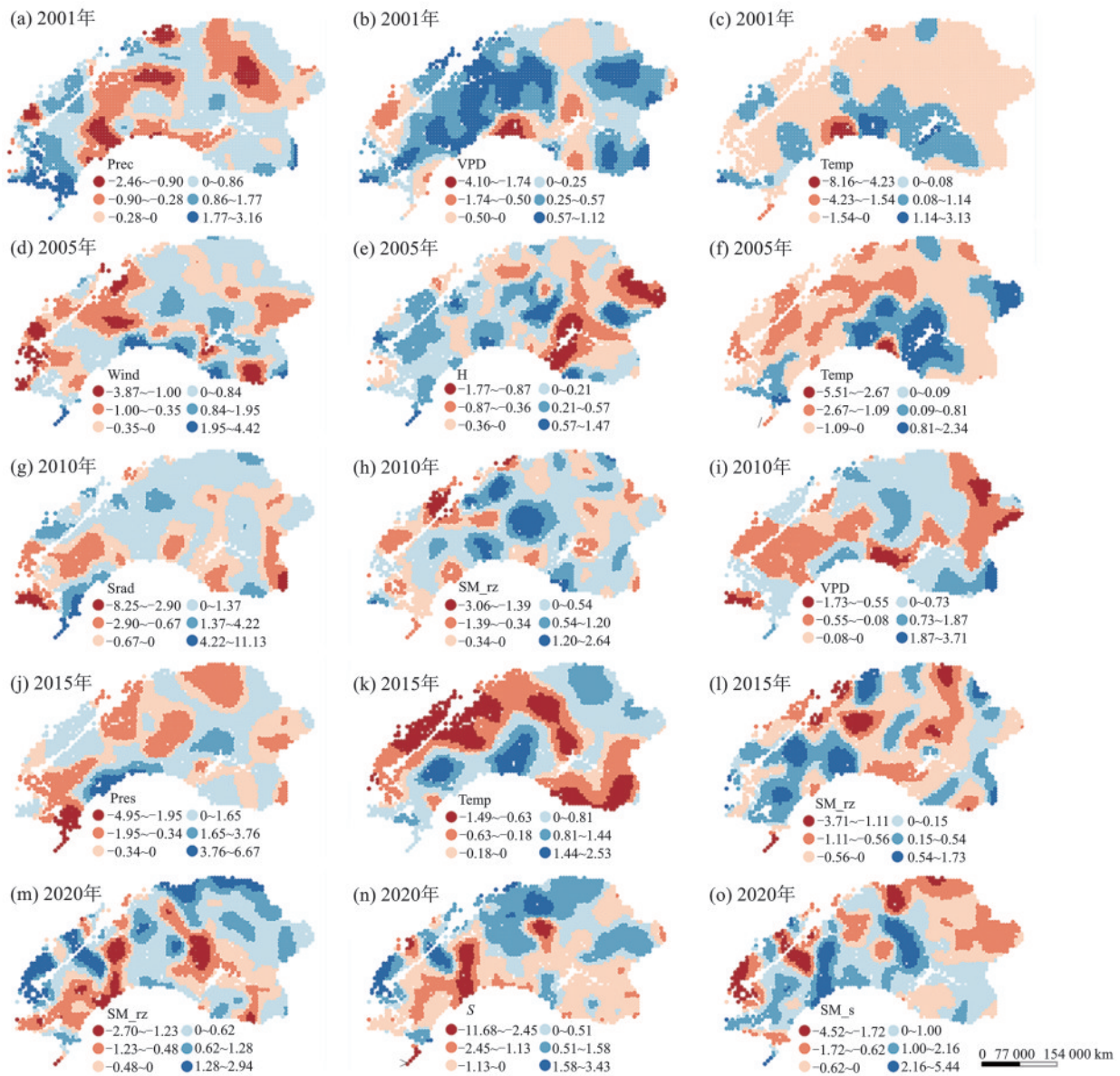


图 7 河套灌区所在流域 2001—2020 年水分利用效率影响要素的空间异质性

Fig. 7 Spatial heterogeneity of influencing factors of water use efficiency in Hetao Irrigation Area watershed (2001-2020)

2.3 水分利用效率与生态系统服务功能的耦合关系

基于前述 WUE 格局与碳储量、产水量、粮食产量 3 项服务的空间数据集直接运算得出,其目的是为量化 WUE 与 ESs 在空间上的协同程度,并通过空间格局可视化呈现(图 8)。结果显示,高度耦合区域(耦合度值 >0.2)主要集中于引黄灌区耕地及乌梁素海周边,其耦合指数均值达 0.25 以上,反映水分高效利用与碳-水-粮服务协同的“净收益”最大化机制;低耦合区(耦合度值 <0.2)则分布于北部草地及少数林地,指数平均值不足 0.15,暗示

水分胁迫下碳固定滞后与服务输出的解耦风险。从 2001—2020 年时间序列分析,2001 年耦合程度最高,全域耦合度值均超过 0.2(平均值 0.28),与该年 WUE 高值区占比达 65% 高度一致;2015 年则为最低谷期,耕地及草地耦合度值均低于 0.18,整体下降幅度达 35%。

进一步的热点分析(图 9)揭示,高耦合显著区(热点)主要聚集于农田灌溉核心区,仅 2020 年西部耕地转为不显著;低耦合显著区(冷点)则集中于草地生态系统,量化了土地利用类型对水-碳耦合的调控差异。

总体而言,农田系统内 ES 供给功能(粮食产量)与 WUE 呈强正相关,而草地系统则存在显著解耦,反映人为干预强度对耦合动态的决定性影响。时间序列上,热点区域面积呈递减趋势,东部残留热点区与局

部灌溉优化相关。河套灌区 WUE-ESs 耦合冷热点空间集聚特征,与区域生态环境保护政策(如节水工程)和水分利用模式密切耦合。这些格局变化提示,应优先提升耕地 WUE 以强化整体耦合协调度。

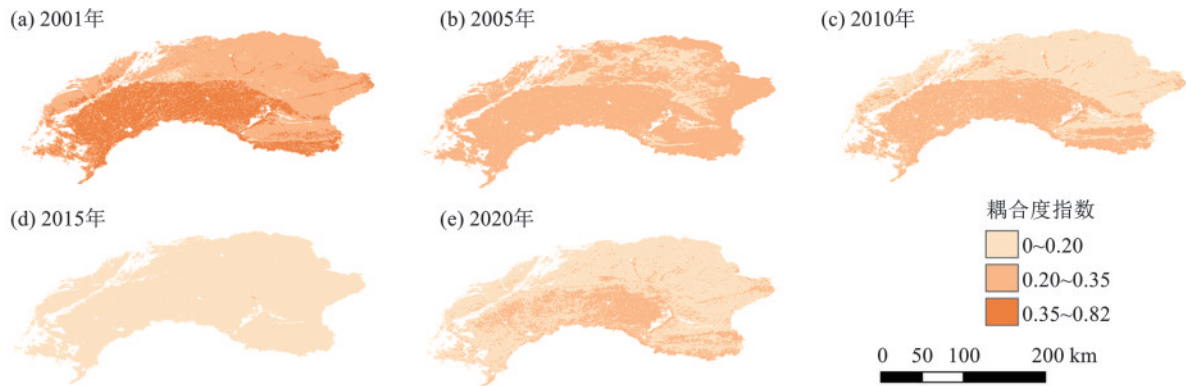


图 8 河套灌区所在流域 2001—2020 年水分利用效率与生态服务功能耦合度指数

Fig. 8 Coupling degree index of water use efficiency and ecosystem services in Hetao irrigation area watershed (2001–2020)

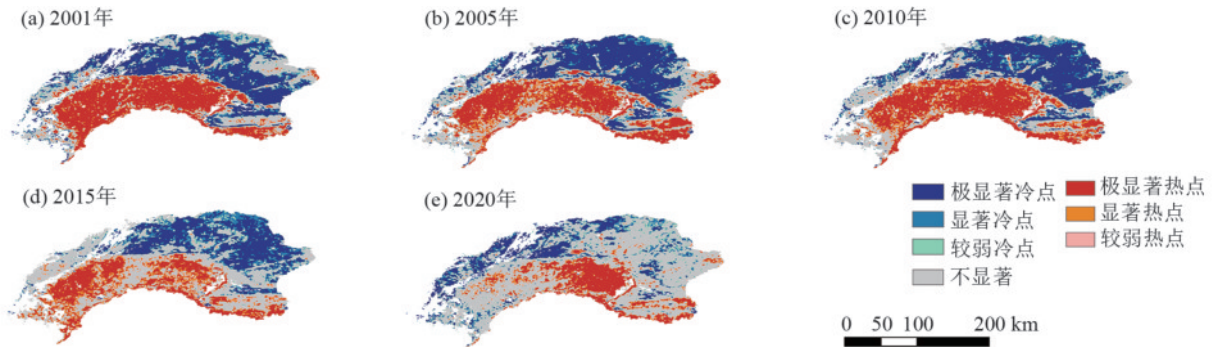


图 9 WUE 与生态系统服务功能耦合度指数的热点冷点分布

Fig. 9 Hotspot and coldspot distribution of coupling degree index between WUE and ecosystem services

3 讨论

3.1 河套灌区所在流域水分利用效率提升的主导机制

本研究综合运用多元线性回归(MLR)、随机森林(RF)和地理加权回归(GWR)等多种模型,系统揭示河套灌区所在流域 WUE 的复杂驱动机制。结果表明,WUE 时空格局的形成是植被生理过程、土壤水文条件与局地气候因子共同作用的结果,且其驱动机制表现出显著的空间异质性与时序动态特征。

本研究发现,NPP 和 VPD 是调控 WUE 变化的 2 个最关键驱动因子(图 6),主导河套灌区所在流域“水-碳”耦合的变化过程。NPP 与 WUE 呈现稳定的正向关联(MLR 回归系数 0.2~0.4, $p < 0.001$),说明光合产物积累是提升水分利用效率的核心生物生理路径。此机制在农田生态系统中尤为突出(图 9),灌溉管理为作物生长提供稳定的水分供给^[35],促使光合作用与蒸腾过程协同优化^[33]。RF 模型进一步量化 NPP 的相对重要性(0.16~0.24),验证其在 2005—2015 年的非线性主导作用(贡献率~20%),此规律在其他农业主导区域(如黄河上游的宁蒙大型灌区)亦

得到实证支持,进一步强调合理配置水资源与优化土地利用结构是提升区域 WUE 的关键策略^[35-36]。

VPD 对 WUE 的影响则表明植被对大气干旱的生理适应与胁迫响应的双重特征。MLR 结果显示,VPD 在多个年份(2001 年、2010 年、2015 年)均表现为显著正向驱动(回归系数 0.63~0.94, $p < 0.001 \sim 0.05$),说明在一定范围内,植物通过气孔调节机制可在维持光合效率的同时降低水分损失,从而提升单位耗水的碳同化效率^[37]。然而,GWR 模型结果(图 7)揭示该关系强烈的空间非平稳性,进一步放大不同土地利用类型(如农田与草地)对 VPD 响应的差异。例如,在 2010 年,VPD 与 WUE 在研究区东北部和西南部呈负相关特征(图 7i),表明当大气干燥度超过某一生态阈值时,VPD 可能由促进因子转为抑制因子,加剧水分胁迫并限制光合作用^[22]。此发现深化对于干旱半干旱区植被水碳耦合机制的理解,并已在多个干旱区域的相关研究中得到广泛验证^[37]。因此,VPD 对 WUE 的影响并非单调线性,而是存在明显的生态阈值效应。在开展灌溉区的动态水分管理

时,需统筹考虑蒸散胁迫强度与根区土壤可利用水分的平衡。

3.2 水分利用效率与生态系统服务功能的响应特征

WUE-ESs耦合机制分析揭示该流域生态系统在碳-水耦合框架下呈现显著的空间-时间异质性。耦合指数定量表征不同生态系统中水分利用效率与生态系统功能之间的协调程度,高耦合度(>0.2)表明河套灌区所在流域生态系统内部各个功能要素的良性互反馈,而低耦合度(<0.2)则说明系统内部存在功能失衡或资源利用低效。

本研究采用的0.2作为耦合度阈值主要基于2方面综合考虑:1)参考相关耦合协调模型中常用的“弱耦合-中度耦合”分界点,以此为区间能够区分生态系统功能之间由较弱互馈向协同关系转变的变化特征^[38];2)依据研究中耦合度值的频率数据呈双峰特征,而0.2刚好处于2个峰值之间,具有明确的数据驱动分割意义。因此,该阈值兼顾理论基础与数据支撑,同时适用于河套灌区耦合特征的判别。

在此判别标准下,高耦合区主要分布于农业管理水平较高且灌溉保障充分的地块,与粮食产量、碳储量及产水量等供给与调节类ES高值区高度重合,验证了农田系统中水资源调控与生态供给的协同优化机制^[39]。此格局的形成主要得益于人类活动的强干预作用^[21]。系统的灌溉保障有效提升根区土壤湿度,优化作物气孔导度与光合-蒸腾过程^[19],促使GPP与ET协同变化,从而实现WUE的提升;这一现象与随机森林模型识别的SM_{rz}为关键驱动因子的结论相互印证(图6i)。在灌溉保障下,根区土壤湿度的提升不仅直接促进WUE增长(如2015年SM_{rz}对WUE的相对重要性达0.93),还通过优化作物光合-蒸腾过程,同步提升碳固定与粮食产出,形成“水-碳-粮”协同增益的良性循环^[40-41]。该机制揭示在人为调控背景下,农田系统能够实现水分高效利用与生态服务功能提升的协同发展。

相较于灌溉条件良好的农田系统,低耦合区主要分布在草地生态系统,其弱耦合特征主要是由于水资源量较少、人为调控较差。草地植被的根系较浅,在降水偏少、VPD增大等水分胁迫下更易出现气孔关闭,导致GPP下降幅度远大于ET,使WUE与碳储量、产水量的响应关系具有一定的差异性,从而出现生态解耦现象(图8、图9)。此机制也解释了2015年草地系统中出现低耦合现象的原因:干旱条件下ET减少可导致产水量功能在短期升高,但与碳固存过程相反,进一步削弱生态系统协调性。本研究识别的耦合冷点区与GWR模型中降水、VPD和太阳辐射等自然因子在草地的高解释力(图7)一致,表明自

然水分胁迫是低耦合格局的主要驱动。

综上,WUE与生态系统服务耦合关系的本质是系统内部水、碳、人类管理等多要素互馈的结果。在农田系统,耦合强度受灌溉管理等人类活动主导;而在自然系统,则受水分可获得性等自然因子控制。此认知不仅深化对干旱区生态系统碳水耦合机制的理解,也为区域差异化的生态管理提供科学基础:在河套灌区,应侧重农田WUE优化(如精准灌溉,目标效率 $>70\%$),同时通过结构调整(如草地恢复植被)提升天然生态系统功能,推动多类型土地利用下WUE-ESs协调^[42]。

4 结论

1)河套灌区所在流域在2001—2020年WUE且具有显著的年际波动特征,整体呈极微弱下降趋势,下降速率为 $0.003\text{ g}/(\text{mm H}_2\text{O}\cdot\text{a})$ (以C计)。空间上呈现“高中低周”的分布格局,高值区集中分布于灌溉耕地与乌梁素海周边区域,草地区域WUE普遍偏低。

2)WUE变化受气候、生态与土壤因子的共同驱动,且作用机制呈明显的非线性与空间异平稳性。多元线性回归与随机森林模型共同表明,NPP与VPD对WUE具有持续显著的正向影响,而Pres则表现为稳定的负向关系。值得注意的是,WUE的主导驱动因子随时间发生显著转变:2001—2005年VPD为首要驱动因子(重要性0.40),而2015—2020年SM_{rz}与Rn的影响显著增强(2015年SM_{rz}重要性达0.93)。地理加权回归结果进一步揭示各驱动因素影响强度的空间异质性,凸显局地环境条件对WUE调控的关键作用。

3)WUE与生态系统服务功能之间存在显著的空间耦合特征。耦合指数显示,高度耦合区域集中于灌溉条件良好的农业区,低耦合区主要分布于北部草地生态系统。冷热点分析进一步识别出高耦合热点在农田区稳定聚集,而冷点区在草地区持续存在,反映不同土地利用类型下WUE与生态服务功能协同程度的系统性差异。

本研究从多方法、多维度揭示河套灌区WUE的驱动机制及其与生态系统服务的耦合关系,为理解干旱区农业灌区碳水循环的协同调控提供科学依据,也为区域水资源高效管理与生态功能提升提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].生态学报,2018,38(23):8296-8305. DU X Z, ZHAO X, WANG H Y, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8296-8305.

- [2] 王赟博,孙宇,赵清格,等.阴山北麓农牧交错区退耕地草地生态系统碳交换及水分利用效率[J].生态学报,2022,42(12):4922-4932.
WANG B B, SUN Y, ZHAO Q G, et al. Effects of natural restoration on the ecosystem carbon exchange and water use efficiency in the abandoned cropland in the Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4922-4932.
- [3] 张圣微,杨林,叶德成,等.基于深度学习的内蒙古河套灌区2000—2021年种植结构提取与动态[J].农业工程学报,2023,39(18):142-150.
ZHANG S W, YANG L, YE D C, et al. Extraction and dynamics of planting structure in Hetao irrigation district of Inner Mongolia from 2000 to 2021 using deep learning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 142-150.
- [4] XIONG L Y, XU X, ENGEL B, et al. Modeling agro-hydrological processes and analyzing water use in a super-large irrigation district (Hetao) of arid upper Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127014.
- [5] 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: e109064.
- [6] HAN T, FENG Q, YU T F, et al. Contrasting response of water use efficiency to soil moisture availability: From leaf to ecosystem in an arid oasis [J]. Ecological Indicators, 2023, 147: e109964.
- [7] 薛联青,肖颖,刘远洪,等.黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J].水资源保护,2023,39(4):32-41.
XUE L Q, XIAO Y, LIU Y H, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 32-41.
- [8] CHENG L, ZHANG L, WANG Y P, et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle [J]. Nature Communications, 2017, 8: e110.
- [9] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.生态水文双向耦合模型的研发与应用: II. 模型应用 [J]. 水利学报, 2020, 51(4): 439-447.
ZENG S D, XIA J, DU H, et al. Development and application of bidirectional coupled ecohydrological model: II. Model application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 439-447.
- [10] 陈凌伟. 2001—2020年黄河流域水分利用效率时空变化及其对环境因素的响应 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 222-230.
CHEN L W. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River basin during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 222-230.
- [11] 陈祖亮,肖林颖,王丽娜,等.西南高山峡谷区水分利用效率时空变化及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. 生态学报, 2025, 45(14): 6756-6769.
CHEN Z L, XIAO L Y, WANG L N, et al. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its response to climate change and human activities in the southwest Alpine canyon area of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(14): 6756-6769.
- [12] 钱佳霖,冯雄,卜灵心,等.宁蒙灌区气象,土壤干旱和水分利用效率的时空动态及滞后效应 [J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(12): 82-92.
QIAN J L, FENG X, BU L X, et al. Spatiotemporal dynamics of meteorological and soil droughts and their effects on water use efficiency in the Ningxia-Inner Mongolia irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(12): 82-92.
- [13] SONG M L, WANG R, ZENG X Q. Water resources utilization efficiency and influence factors under environmental restrictions [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 611-621.
- [14] 王乐,朱求安,张江,等.黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3103-3115.
WANG L, ZHU Q A, ZHANG J, et al. Characteristics of water use efficiency during the changing process of vegetation in the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3103-3115.
- [15] 籍健勋,童新,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 J X, TONG X, DUAN L M, 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.
- [16] 张俊华,黄华雨,丁启东,等.河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断 [J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2325-2336.
ZHANG J H, HUANG H Y, DING Q D, et al. Soil quality evaluation and obstacle diagnosis of saline-alkali cultivated land in the Hetao Plain [J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 2325-2336.
- [17] 王晓蕾,石守海.基于GEE的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1087-1098.
WANG X L, SHI S H. Spatio-temporal changes of vegetation in the Yellow River basin and related effect of landform based on GEE [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(6): 1087-1098.
- [18] SHI S H, WANG X L, HU Z R, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling [J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 42: e02398.
- [19] 卢鑫,徐启云,兰水荣,等.仿生草垫对高原矿山生态修复应用效果评价 [J]. 草地学报, 2025, 33(8): 2721-2727.
LU X, XU Q Y, LAN S R, et al. Evaluation of the application effect of bionic turf on the ecological restoration of high-altitude mines [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(8): 2721-2727.
- [20] LIU J M, PEI X T, ZHU W Y, et al. Water-related ecosystem services interactions and their natural-human

- activity drivers: Implications for ecological protection and restoration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 352: e120101.
- [21] LU Y L, LIU M Y, ZENG S Y, et al. Screening and mitigating major threats of regional development to water ecosystems using ecosystem services as endpoints[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: e112787.
- [22] 籍健勋. 河套灌区所在流域气象水文-生态要素时空变化与互作关系[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- JI J X. Temporal and spatial changes and interaction of meteorological, hydrological and ecological factors in the basin where Hetao irrigation area is located[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [23] KANG W P, KANG S. On the use of alternative water use efficiency parameters in dryland ecosystems: A review[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2019, 43(1): e24.
- [24] ZHANG L, LI X, ZHENG D H, et al. Merging multiple satellite-based precipitation products and gauge observations using a novel double machine learning approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: e125969.
- [25] LIU Y, CHEN C, CHEN Q W, et al. Widespread sensitivity of grassland water use efficiency to deep soil moisture on the Tibetan Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2025, 61(6): e2024WR038645.
- [26] YANG L, ZHANG S W, LUO M, et al. Impacts of land use and crop structure change on the value of ecosystem services in Hetao irrigation district of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 480: e144113.
- [27] REID W, MOONEY H, CROPPER A, et al. Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [28] WANG Z Y, ZHANG S T, ZHAO Y Y, et al. Risk prediction and credibility detection of network public opinion using blockchain technology[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 187: e122177.
- [29] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [30] 蒋磊. 干旱区灌区尺度灌溉及作物水分利用效率遥感评价方法[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- JIANG L. Remote sensing-based evaluation of irrigation efficiency and crop water use efficiency over irrigation district in arid region[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [31] LIU Y Q, SONG W. Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agro-ecosystem management [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: e119940.
- [32] 路浩, 安志超, 王丽娜, 等. 陕西省植被水分利用效率的时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 91-99.
- LU H, AN Z C, WANG L N, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of vegetation water use efficiency in Shaanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4): 91-99.
- [33] 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 H R, CAO S K, LEI Y Z, 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.
- [34] NAEEM S, ZHANG Y Q, ZHANG X Z, et al. Recent change in ecosystem water use efficiency in China mainly dominated by vegetation greening and increased CO₂[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 298: e113811.
- [35] AI Z P, WANG Q X, YANG Y H, et al. Variation of gross primary production, evapotranspiration and water use efficiency for global croplands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 287: e107935.
- [36] 王芳, 汪左, 黄静, 等. 安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6268-6279.
- WANG F, WANG Z, HUANG J, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6268-6279.
- [37] 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(6658): 672-677.
- [38] YU Z, WANG J X, LIU S R, et al. Global gross primary productivity and water use efficiency changes under drought stress[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(1): e014016.
- [39] 王介勇, 吴建寨. 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4861-4868.
- WANG J Y, WU J Z. Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4861-4868.
- [40] YIN J L, LI X, ENGEL B A, et al. Inter-regional food-water-income synergy through bi-level crop redistribution model coupled with virtual water: A case study of China's Hetao irrigation district [J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(7): e2023WR036572.
- [41] 李振恺, 李洋, 董世德, 等. 夏季覆盖种植对黄河三角洲盐碱耕地冬小麦耗水特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(7): 2064-2072.
- LI Z K, LI Y, DONG S D, et al. Effects of summer cover cropping on water consumption characteristics of winter wheat in saline-alkali land of Yellow River delta[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(7): 2064-2072.
- [42] TAN M H, ZHENG L Q. Increase in economic efficiency of water use caused by crop structure adjustment in arid areas [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 386-391.