

生态恢复背景下黄河流域绿水资源时空演变及分异机理

贾磊¹, 蓝菁^{1,2}

(1. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学中国资源环境与发展研究院, 南京 210095)

摘要: [目的] 绿水资源是农业生产和生态环境的重要支撑, 明晰变化环境下的绿水资源时空格局及驱动机制, 对区域生态保护与高质量发展的实现具有重要意义。[方法] 基于多源遥感数据测算黄河流域2000—2023年的绿水资源量, 利用 Theil-Sen 趋势和 Mann-Kendall 检验分析其时空演变格局, 并采用时空地理探测器定量分析其分异机理。[结果] 2000—2023年, 黄河流域绿水量显著增加, 由 323.2 mm 增加至 442.3 mm, 绿水增加量的 99.70% 由绿水流贡献, 绿水储量的增加量仅占 0.30%。流域绿水资源在空间上呈“南多北少”的分布特征, 绿水量极显著增加区域占比为 64.44%, 广泛分布于宁夏平原、汾渭谷地及陕北高原等地区, 尤以陕北高原表现最为明显。生态恢复是黄河流域绿水变化的主导因素, 且因其实现从“面积扩张”到“质量提升”的阶段转变, 导致作用在不同时段内存在明显差异; 草地恢复区和森林恢复区为绿水变化的主要正响应区, 但其效果受其他因子影响, 表明黄河流域绿水时空分异格局是生态恢复、气候变化及下垫面条件等要素非线性叠加的结果。[结论] 黄河流域未来生态恢复工程规划需充分考虑其生态水文效应, 重点关注植被恢复对水文的影响与阈值优化, 研究结果为区域人水地系统综合管理提供科学支撑。

关键词: 黄河流域; 绿水资源; 生态恢复; 时空分异; 地理探测器

中图分类号: P966

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0390-12

Spatiotemporal Evolution and Differentiation Mechanisms of Green Water Resources in the Yellow River Basin under Ecological Restoration

Jia Lei¹, Lan Jing^{1,2}

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. China Resources, Environment and Development Academy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: [Objective] Green water resources serve as a crucial support for agricultural production and the ecological environment. Clarifying the spatiotemporal patterns and driving mechanisms of green water under changing conditions is of great significance for achieving regional ecological protection and high-quality development. [Methods] Based on multi-source remote sensing data, this study estimated the green water resources in the Yellow River basin from 2000 to 2023. The Theil-Sen trend analysis and Mann-Kendall test were employed to examine its spatiotemporal evolution, and the spatiotemporal geographical detector was applied to quantitatively analyze its differentiation mechanisms. [Results] From 2000 to 2023, green water in the Yellow River basin increased significantly, from 323.2 mm to 442.3 mm. Green water flow contributed 99.70% of the increase, while the increase in green water storage accounted for only 0.30%. Spatially, green water resources showed a pattern of "more in the south, less in the north". Areas with a highly significant increase in green water accounted for 64.44% of the basin, widely distributed in regions such as the Ningxia plain, Fenwei valley, and the northern Shaanxi plateau, with the northern Shaanxi plateau being the most pronounced. Ecological restoration was the dominant factor driving changes in green water. Due to its transition from "area expansion" to "quality enhancement", its effect varied noticeably

收稿日期: 2026-03-23

修回日期: 2026-04-17

录用日期: 2026-04-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-03

资助项目: 国家自然科学基金项目 (72074114)

第一作者: 贾磊 (1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水土资源管理研究。E-mail: yuyuwuyu@stu.njau.edu.cn

通信作者: 蓝菁 (1983—), 女, 博士, 教授, 主要从事资源经济与环境管理研究。E-mail: lanjing@njau.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

across different periods. Grassland and forest restoration zones were the main positive response areas for green water changes, but their effectiveness was influenced by other factors, indicating that the spatiotemporal differentiation pattern of green water in the Yellow River basin resulted from the nonlinear interaction of ecological restoration, climate change, and underlying surface conditions. [Conclusion] Future ecological restoration projects in the Yellow River basin should fully consider their eco-hydrological effects, with a focus on the hydrological impacts and threshold optimization of vegetation restoration. The findings provide scientific support for the integrated management of the regional human-water-land system.

Keywords: Yellow River basin; green water; ecological restoration; spatiotemporal differentiation; geographic detector

Received: 2026-03-23

Revised: 2026-04-17

Accepted: 2026-04-25

Online(www.cnki.net): 2026-07-03

水资源不仅是维持自然生态系统功能的关键要素,也是人类经济社会系统发展的重要支撑^[1-2]。宏观意义上的淡水资源可分为蓝水(blue water)和绿水(green water)两部分,其中蓝水是指流经地表和地下介质的自由液态水(如河流、湖泊和地下水),直接支撑农业灌溉、工业生产和城市生活用水^[3];绿水是指来源于降水,储存于土壤非饱和带并最终通过蒸散发返回大气的水资源。根据其在循环中的存在形式,可分为储存在土壤中的绿水储和以蒸散发形式返回大气的绿水流。根据消耗途径与生态功能,绿水流又可分为被植被吸收用于蒸腾作用的生产性绿水和在土壤或水体表面直接蒸发的非生产性绿水^[4-5]。从全球尺度来看,绿水约占淡水总量的2/3,对调节区域水循环过程和维持生态系统稳定具有重要作用^[6]。但相较于实体存赋的蓝水资源,绿水通常被传统水资源管理所忽视。近年来,全球气候变化与人类活动的双重影响不断加剧,在一定程度上改变区域水文过程及绿水资源时空分布,也深刻影响着区域生态安全 and 经济发展^[7-8]。因此,探究变化环境下绿水资源的时空变化特征及分异机理,对于保障区域生态安全及实现水资源可持续利用管理等方面具有重要意义。

自绿水概念提出以来,相关模拟测算研究快速发展,诸多学者^[9-11]采用水量平衡方法、生物学方法及水文模型等技术来评估绿水资源。其中应用较为广泛的水文模型均按照水量平衡原理将绿水定义为实际蒸散发ET(evapotranspiration)和土壤水SW(soil water)之和,得到国内外学者^[12-13]的普遍认可。在实际模拟过程中,通过遥感反演估算得到蒸散发与土壤水,可显著降低绿水模拟结果的不确定性,其量化结果实用性也在不同流域得到验证^[14-15]。对于变化环境下绿水资源响应机制,已有研究多集中在降水、气温等气候要素变化及人类活动对区域水循

环的影响上,尤其关注人为导致的陆地表层格局转变对绿水的影响^[16-17]。作为下垫面的直接载体,土地覆被直接参与绿水的产生和循环过程,同时改变降水转化为蓝绿水资源的时空分配结构^[18]。例如,Wu等^[19]研究发现,2000年生态恢复后长江流域的绿水流显著增强,且部分区域出现蓝水短缺。而旱区绿水资源对土地覆被变化的响应则更为敏感,Lan等^[20]研究发现,黄河流域退耕还林工程的实施显著增加绿水流,但也加剧区域干旱强度,威胁着已恢复植被的生态成效。由此可见,厘清绿水资源时空演变规律及其对变化环境的响应机制,是解决旱区水资源短缺问题和实现可持续发展的关键。

黄河是中华文明的发源地,推动黄河流域生态保护和高质量发展战略实施,对维护中国生态安全和促进社会经济发展具有重要意义^[21-22]。然而,由于地处干旱半干旱区,黄河流域长期面临资源性缺水问题,人均水资源量仅为全国平均水平的44.30%,不到长江流域的7.00%。流域生态环境脆弱,水土流失严重。新世纪以来,随着退耕还林还草等植被恢复工程的实施,其水土流失得到有效控制,但植被大规模绿化可能导致蓝水向绿水的转化。黄河流域出现“绿水”上天、“蓝水”断流的现象,对区域水文循环和社会经济用水保障造成不利影响^[23]。水资源是黄河流域发展的重要承载与刚性约束,随着生态恢复导致的蓝绿水资源竞争加剧,黄河流域生态保护与经济发展的矛盾也将进一步凸显。因此,明晰生态恢复背景下黄河流域绿水资源时空变化特征及分异机制,对科学高效配置黄河流域水资源、支撑新阶段流域生态保护和高质量发展具有重大意义。针对黄河流域生态恢复后的绿水资源时空变化特征及归因分析,已有研究多聚焦在流域内特定生态系统或小流域,缺乏流域尺度上全局性和系统性的研究^[24-26];流域水资源变动格局是降水、气温、蒸发、地形地貌和

土地覆被变化等多种因素共同作用下所形成的非平稳过程,具有复杂的时空分异特征,现有研究多使用传统空间分析方法,无法满足该类复杂地理时空数据的分析要求,而充分考虑长时间序列绿水资源时空分异机制的研究仍鲜见^[27]。基于此,通过整合多源遥感数据模拟计算黄河流域2000—2023年绿水资源变化,并利用空间分析和地理探测器模型探究变化环境下黄河流域绿水资源的时空变化格局及驱动机制,为黄河流域生态保护和高质量发展战略实施提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°~42°N, 96°~119°E)总面积约79.5万km²,涉及内蒙古、山西、青海、甘肃、四川、宁夏、陕西、河南和山东9个省份(图1)。黄河流域自西向东呈青藏高原—黄土高原—黄淮海平原的阶梯式地貌过渡,地形分异显著。受地形阶梯与季风环流的共同影响,流域包括半湿润、半干旱及干旱气候区,气温呈南高北低、东高西低的分布格局,多年平均气温为12~14℃;流域降水时空分布不均,主要由东南向西北递减,多年平均值为450mm^[23]。作为生态敏感区,黄河流域生态本底脆弱,水土流失严重。为改善生态环境,国家自1999年开始在该

区域实施以退耕还林还草为代表的生态恢复工程,流域生态质量显著提升^[21]。但大规模的生态恢复也同时消耗较多水资源,显著改变流域水循环和水资源分布格局,加剧水资源短缺,带来一定程度的生态环境压力和社会经济发展阻碍。因此,厘清变化环境下黄河流域绿水资源时空变化规律与分异机制,对促进黄河流域生态和社会经济可持续发展具有重要现实意义。

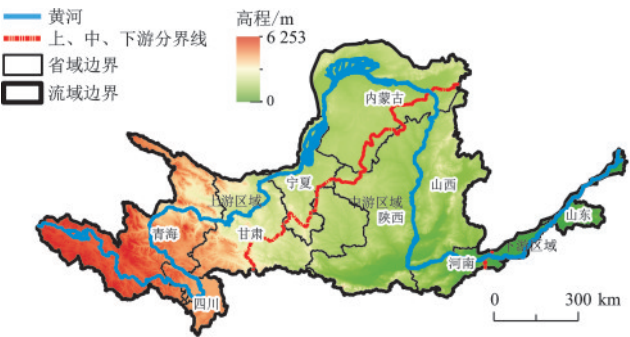


图1 黄河流域区位
Fig.1 Location map of the Yellow River basin

1.2 数据来源与预处理

本研究所使用的数据主要包括实际蒸散发、土壤水分、DEM高程、土壤类型、土地利用、植被净初级生产力、气象及研究区基础地理数据等。各类数据的时序年份、空间分辨率和来源见表1。

表1 研究所用数据概况
Table 1 Summary of the data used in the study

数据名称	年份	空间分辨率	格式	来源
实际蒸散发	2000—2023	500 m	栅格	NASA的MOD16A2GF产品(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/) 中国科学院资源环境科学数据平台(http://www.resdc.cn/Default.aspx)
数字高程	—	90 m	栅格	
土壤类型	—	1 km	栅格	
植被NPP	2000—2023	500 m	栅格	NASA的MOD17A3HGF产品(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)
土地利用	2000—2023	30 m	栅格	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)
土壤水分	2000—2023	1 km	栅格	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
年降水量	2000—2023	1 km	栅格	
年平均气温	2000—2023	1 km	栅格	
基础地理	2015	1:100万	矢量	全国地理信息资源目录(http://www.webmap.cn/main.do?method=index)

2000—2023年度的实际蒸散发和植被净初级生产力数据分别来源于NASA提供的MOD16A2GF和MOD17A3HGF数据产品,空间分辨率为500m;土壤水数据来源于青藏高原科学数据中心提供的中国1km土壤湿度数据集(SMCI1.0),时间尺度为每日,在ArcGIS中将其整合为年度数据;DEM高程和土壤类型空间分布数据均由中国科学院资源环境科学数据平台提供,其中DEM数据源于SRTM90m产品,在ArcGIS中计算得到研究区坡度数据。土壤

数据为中国1:1000000土壤类型空间分布数据集,空间分辨率为1km;本研究所使用的土地利用数据源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心提供的中国年度土地覆被数据集(CLCD),其包括农田、森林、灌木、草地、水体、冰雪、荒地、不透水面和湿地9个一级地类,根据研究需要在ArcGIS中将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;降水和气温数据源于青藏高原科学数据中心提供的中国逐月降水量和气温数据集,分辨率为1km。为确保各

类数据在尺度与空间参考的一致性,本研究将各原始数据的坐标系统均转换为 WGS_1984_UTM_Zone_49N,分辨率统一重采样至 250 m。

1.3 研究方法

1.3.1 绿水测算方法 绿水资源由绿水储(GWS)和绿水流(GWF)构成,其中绿水储是指赋存于土壤非饱和层的土壤水分(SW);绿水流则表示地表下垫面通过蒸散发进入大气并以水汽、云等形式赋存的绿水,即实际蒸散发(ET)^[4,28]。根据水量平衡方程,一个闭合流域的水分收支可表述为:降水(P)在扣除地表径流(R)和地下水(D)之后,其剩余部分转化为实际蒸散发(ET)和土壤水(SW),计算公式为:

$$P = R + D + ET + SW \quad (1)$$

地表径流(R)和实际蒸散发(ET)为流量,地下水(D)和土壤水(SW)为存量,故在单位时间内,流域水量平衡方程可表达为:

$$P = R + \Delta D + ET + \Delta SW \quad (2)$$

式中: P 为单位时间降水量,mm; R 为单位时间产流量,mm; ΔD 为单位时间内地下水的相对变幅,mm;ET为单位时间流域实际蒸散发量,mm; ΔSW 为单位时间内土壤水的相对变化量,mm; $R + \Delta D$ 为流域单位时间的蓝水量,mm;ET + ΔSW 为流域单位时间内的绿水量,mm。

根据绿水定义,计算公式为:

$$GW = ET + \Delta SW \quad (3)$$

式中:GW为黄河流域模拟时间段内的年绿水量,mm;ET为模拟时间段内的年实际蒸散发,mm; ΔSW 为模拟时间段内土壤水分变化量,mm。

1.3.2 变化趋势分析及显著性检验 本研究采用 Theil-Sen Median 斜率法分析黄河流域 2000—2023 年绿水资源及植被 NPP 的时空变化趋势,用斜率 β 表示:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right) \quad \forall i > j \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为绿水和植被 NPP 的第 i 个和第 j 个序列值,利用 ArcGIS 软件将二者的时空变化趋势分为 4 类:二者同时增加($\beta_{GW} > 0, \beta_{NPP} > 0$)、绿水增加而植被 NPP 减少($\beta_{GW} > 0, \beta_{NPP} < 0$)、绿水减少而植被 NPP 增加($\beta_{GW} < 0, \beta_{NPP} > 0$)和二者均减少($\beta_{GW} < 0, \beta_{NPP} < 0$)。并采用 Mann-Kendall(简称“M-K”)趋势检验方法,检验二者变化趋势及显著性,其基于标准正态统计变量(Z)进行显著性检验,若通过 0.05 显著性水平检验则为显著变化,进一步根据变化方向和 Z 值分为极显著增加($\beta > 0, p < 0.01$)、显著增加($\beta > 0, 0.01 < p < 0.05$)、显著减少($\beta < 0, 0.01 < p < 0.05$)、极显著减少($\beta < 0, p < 0.01$)和无显著变化($p > 0.05$)5 类,具体公式参考罗敏等^[29]。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是基于空间数据分层异质性来探测其背后驱动力的统计方法,在地理归因与分异机制解析等方面具有较好的稳健性与精确性^[30-31]。地理探测器主要包括因子、交互、风险和生态探测器,本研究选用因子探测器和交互探测器来探究黄河流域绿水资源的时空分异机制。因子探测的核心假设为:若自变量在一定程度上决定因变量的空间分布,则代表该自变量解释因变量的空间分异,其作用大小用 q 值来表征,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为绿水变化驱动因素的空间分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数量; σ_h^2 为层 h 内绿水变化的方差; σ^2 为全区绿水变化的方差; q 的值域为 $[0, 1]$,表示驱动因素解释 $q \times 100\%$ 的绿水变化时空分异。交互作用探测可探究 2 个驱动因素叠加后对因变量(Y)的解释程度,并通过比较双因子交互作用的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$ 与 2 个因子独立解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 的大小来识别交互作用强度和类型(表 2)。

表 2 不同影响因子的交互作用类型
Table 2 Interaction types of different influencing factors

判断依据	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

绿水产生过程受到自然环境与人类活动的双重影响,其中降水、气温等气候因素的变化是区域绿水资源变化最直接的驱动因素;而地形地貌、土壤等下垫面条件决定绿水产汇流过程进而影响其时空分布。同时大规模人类活动引起的土地覆被变化直接改变了地表植被类型、空间格局及生长状况,多种因素共同引起黄河流域绿水资源时空格局发生改变^[32]。针对绿水资源变化的自然人文交互性,本研究从静态格局塑造和动态时空变化 2 个视角分别选择基础下垫面条件、人文驱动和自然驱动 3 大类共 7 个驱动因子,使用地理探测器模型对黄河流域 2000—2010 年和 2010—2023 年 2 个时期的绿水资源变化进行时空分异解析(表 3)。1)将 2 个时期的绿水资源变化量作为地理探测器模型的因变量。2)将研究区高程、坡度和土壤类型作为静态格局塑造因子,表征区域绿水产生过程的基础下垫面条件;根据各时期土

地利用转移情况重新分类为森林恢复、草地恢复、生态退化和其他共 4 种类型,用于表征生态恢复工程措施。同时计算 2 个时期植被 NPP 的变化量,作为生态恢复工程实施效果的表征;分别计算各研究时段

内年降水与年气温的变化量,作为自然驱动因素。3)使用 ArcGIS 软件生成覆盖黄河流域的 3 km×3 km 格网数据,逐格网提取上述因变量与自变量因子,作为地理探测器模型的输入数据。

表 3 黄河流域绿水时空变化分异解析因子选择
Table 3 Selection of driving factors for spatial heterogeneity in green water of the Yellow River basin

类别		名称	数据类型	变量符号
因变量		绿水时空变化量	空间栅格(250 m)	GW _Δ
静态格局 塑造因子	基础下垫面条件	高程	空间栅格(250 m)	DEM
		坡度	空间栅格(250 m)	Slope
		土壤类型	空间栅格(250 m)	Soil
动态时空 变化因子	人文驱动	生态恢复措施	空间栅格(250 m)	ERM
		生态恢复效果	空间栅格(250 m)	ERE
	气候驱动	年降水变化量	空间栅格(250 m)	Per _Δ
		年气温变化量	空间栅格(250 m)	Tem _Δ

2 结果与分析

2.1 黄河流域绿水时空分异格局

2.1.1 2000—2023 年绿水年际变化趋势 通过公式(3)计算得出黄河流域 2000—2023 年的绿水资源量,其年际变化趋势见图 2。

由图 2 可知,黄河流域 2000—2023 年多年平均绿水资源量为 420.7 mm。从时序变化来看,2000—

2023 年绿水量呈明显增加趋势,由 323.2 mm 增加至 442.3 mm,年平均增长率为 1.50%。将整个时间序列分为 3 个时间段来进行分析:2000—2003 年,流域绿水量显著增加,变化速率为 31.9 mm/a;2004—2018 年,流域绿水量呈波动上升态势,在 2018 年达到最高值 484.8 mm;2019—2023 年,流域绿水量逐渐减少,变化速率为−5.8 mm/a(图 2a)。

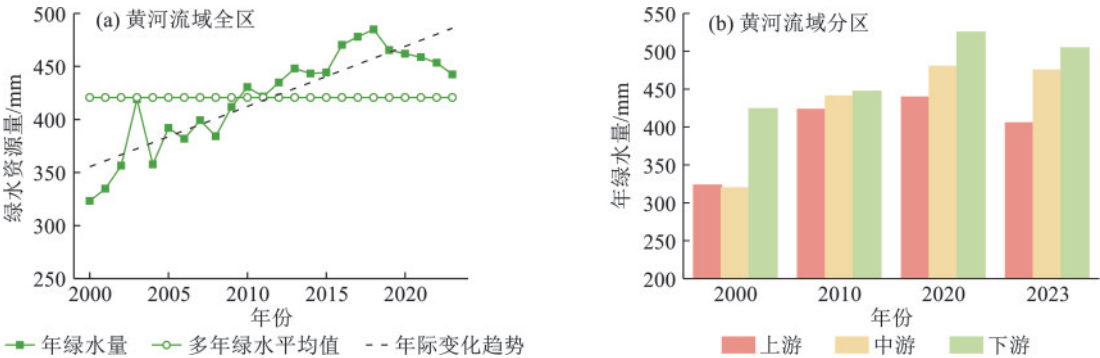


图 2 2000—2023 年黄河流域及分区绿水年际变化趋势
Fig. 2 Interannual variation trend of green water in the Yellow River basin and its sub-regions from 2000 to 2023

从绿水各分量变化来看,黄河流域绿水流量的增加更为显著,由 2000 年的 325.7 mm 增加至 2023 年的 439.5 mm;而绿水储量年际变化较小,多年平均变化量仅为 0.3 mm,研究期内黄河流域绿水增加量的 99.70% 由绿水流贡献。分别统计黄河流域上、中、下游的绿水量,可知各分区的绿水量及变化速率存在较大差异。下游地区的绿水量最高,多年平均值为 470.8 mm,中游和上游地区的绿水量多年平均值分别为 431.7、410.6 mm。从各区绿水变化速率来看,中游地区绿水增加速度最快,变化速率为 6.8 mm/a,上游和下游的绿水变化速率较为接近,分别为 3.6、3.5 mm/a(图 2b)。

2.1.2 2000—2023 年绿水时空分异格局 2000—2023 年,黄河流域绿水资源在空间分布上表现出较

大差异,整体呈“南多北少”的分布特征(图 3),高值多集中在流域中下游南部区域,适宜的自然气候条件导致该区域植被生长状况良好,叠加降水充沛和气温较高等因素,地表植被蒸散发量较大,更多的降水被转化为绿水流,代表区域为陕南秦岭山脉,绿水最高值可达 894.3 mm;流域绿水高值区还广泛分布于上游青藏高原和三江源地区,该区域虽然水热条件较差,但下垫面类型属于高山针叶林和高寒草甸区,植被与土壤储水能力较强,因此,绿水量较高(图 3)。低值多分布在黄土高原西北部和鄂尔多斯高原等地,由于地处于干旱半干旱区,年平均降水量低于 400 mm,叠加黄土与沙地的下垫面类型,该区域绿水量明显低于其他区域。

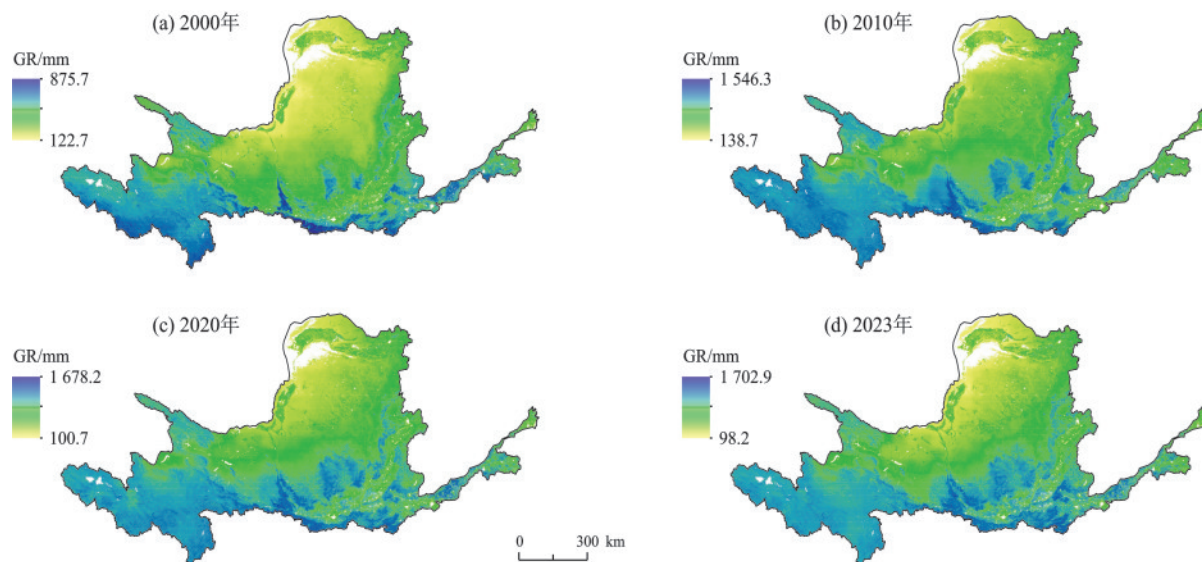


图3 2000—2023年黄河流域绿水空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of green water in the Yellow River basin from 2000 to 2023

为进一步分析黄河流域2000—2023年绿水时空变化格局,采用Sen斜率分析与M-K检验分析绿水变化速率与变化趋势(图4)。结果表明,2000—2023年,黄河流域绿水变化速率在 $-10.7\sim 82.8$ mm/a, 88.10%的像元通过0.05显著性水平检验,绝大部分区域绿水量呈增加趋势。其中,绿水量极显著增加的区域面积占比为64.44%($p<0.01$),广泛分布于宁夏平原、汾渭谷地及陕北高原等地区,尤以陕北高原表现最为明显,其部分区域的绿水变化速率可达82.8 mm/a,与该区退耕还林工程的快速实施密不可分(图4a)。

绿水量显著增加区域的面积占比为14.01%($p<0.05$),多分布于宁夏中北部及陕西北部等地。绿水量显著减少的区域面积仅占整个流域的8.65%($p<0.05$),且零星分布于内蒙古高原中部的毛乌素沙地区域,其可能与该区域近20 a来的降水减少有关。绿水量极显著减少的区域面积为1 893.9 km²($p<0.01$),集中分布在关中平原的西安城市群周边,该区近年来快速的城镇化进程导致不透水面替代植被,植被蒸腾与土壤持水过程受到影响,绿水量显著降低(图4b)。

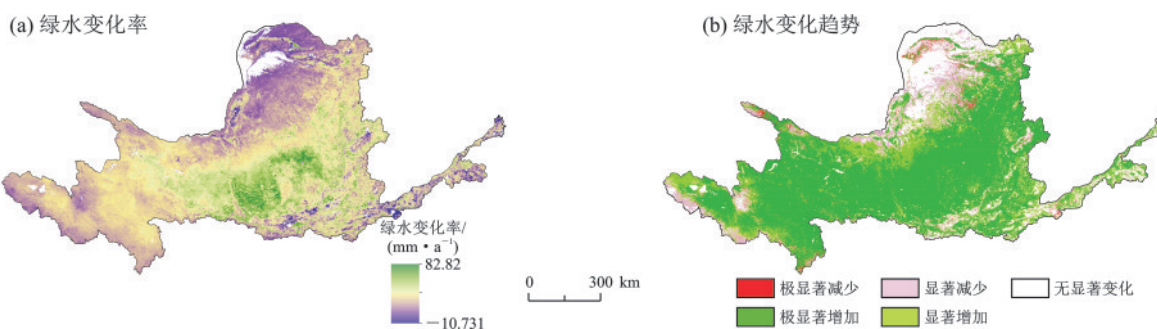


图4 2000—2023年黄河流域绿水变化率及变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of green water change rate and trend in the Yellow River basin from 2000 to 2023

2.1.3 不同生态系统绿水变化趋势 从不同生态系统对绿水量的贡献来看,黄河流域绿水主要来源于耕地、林地和草地生态系统(表4)。2000—2023年各生态系统年平均绿水量为林地(558.4 mm)>耕地(408.0 mm)>草地(398.5 mm)>水域(385.6 mm)>建设用地(376.7 mm)>未利用地(275.0 mm);绿水总量为草地(1 838.3亿m³)>耕地(778.2亿m³)>林地(507.1亿m³)>建设用地(62.3亿m³)>未利用地(46.3亿m³)>水域(13.7亿m³),其中草地、耕地和林地提供高达96.20%的绿水量。从各生态系统绿水量变化趋

势来看,2000—2023年各生态系统绿水量均呈增长态势,其中耕地绿水量增加较为显著,由316.0 mm增加至449.1 mm,年平均增长率为1.80%;林地和草地的绿水增加也较为明显,年平均增长率分别为1.50%和1.30%,其中草地绿水量共增加444.1亿m³,是研究期内黄河流域绿水增量最大的生态系统。建设用地的绿水增速最慢,年平均增长率仅为0.70%,但由于其面积扩张,绿水总量也增加44.2亿m³。而未利用地的绿水量从199.7 mm增加至291.2 mm,但因其面积缩减绿水总量也随之减少1.7亿m³。

表 4 黄河流域不同生态系统的绿水变化
Table 4 Variation in green water across different ecosystems of the Yellow River basin

年份	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³	平均值/ mm	总量/ 亿 m ³
2000	316.0	644.5	445.5	374.0	313.9	1 428.7	325.0	9.2	341.5	37.2	199.7	46.2
2005	371.4	727.7	519.8	445.8	385.3	1 785.3	366.6	10.9	358.7	45.6	241.9	46.6
2010	413.8	787.9	561.0	498.0	421.5	1 964.1	409.2	14.9	366.7	56.5	297.2	47.2
2015	441.0	819.6	608.1	557.8	424.7	1 979.0	399.1	14.2	387.6	70.4	303.3	44.8
2020	456.7	851.9	616.0	591.3	436.8	2 000.2	418.3	16.9	405.4	82.4	316.9	48.4
2023	449.1	837.6	600.1	576.0	409.0	1 872.8	395.5	16.0	400.4	81.4	291.2	44.5

2.2 黄河流域绿水变化驱动机制

2.2.1 2000—2023 年绿水时空分异因子探测 运用地理探测器对黄河流域 2000—2023 年的绿水时空变化进行分异机制探究因子探测。全区因子探测结果显示,各因子解释力均通过显著性检验($p<0.01$)(表 5)。

在下垫面条件因子方面,高程(Dem)和土壤类型(Soil)对绿水变化的解释力较强,2000—2010 年的 q 值分别为 0.111 和 0.178;坡度(Slope)的解释力相对较低,2 期 q 值分别为 0.057 和 0.001。在人文驱动因子方面,生态恢复措施(ERM)与效果(ERE)的作用

在不同时段内存在明显差异:2000—2010 年,生态恢复措施(ERM)的 q 值为 0.379,解释力约为生态恢复效果(ERE)的 18 倍;与此相反,2010—2023 年生态恢复效果(ERE)的 q 值为 0.195,生态恢复措施(ERM)的 q 值仅为 0.067,可能是由于黄河流域生态恢复实现从“面积扩张”到“质量提升”的阶段转变。气候驱动因子在 2 个时期内也存在明显差异,2000—2010 年降水变化(Per_{Δ})和气温变化(Tem_{Δ})的 q 值分别为 0.178 和 0.125,对该时期的绿水变化具有较高的解释力;而在 2010—2023 年,降水变化(Per_{Δ})和气温变化(Tem_{Δ})的解释力均较低。

表 5 各因子对黄河流域绿水时空变化的解释力
Table 5 Factor explanatory power for green water spatiotemporal variation in the Yellow River basin

年份	分区	下垫面条件因子			人文驱动因子		气候驱动因子	
		Dem	Slope	Soil	ERM	ERE	Per_{Δ}	Tem_{Δ}
2000—2010	全区	0.111*	0.057*	0.178*	0.379*	0.021*	0.178*	0.125*
	上游	0.081*	0.024*	0.142*	0.116*	0.010*	0.132*	0.101*
	中游	0.168*	0.038*	0.193*	0.018*	0.041*	0.205*	0.125*
	下游	0.152*	0.071*	0.234*	0.002	0.151*	0.230*	0.176*
2010—2023	全区	0.052*	0.001*	0.064*	0.067*	0.195*	0.030*	0.038*
	上游	0.032*	0.001	0.055*	0.018*	0.115*	0.011*	0.025*
	中游	0.042*	0.002*	0.082*	0.003*	0.157*	0.073*	0.037*
	下游	0.138*	0.003	0.149*	0.001	0.357*	0.190*	0.137*

注:*表示因子在 0.01 水平上统计显著。

鉴于流域全区绿水时空分异性较强,利用地理探测器分别对流域上、中、下游进行因子探测,进一步识别各因子对绿水时空分异影响机制的差异性(表 5)。结果表明,各因子在不同分区的解释力及排序均存在较大差异。在流域上游,2 个时期主导因子分别为土壤类型(Soil)和生态恢复效果(ERE), q 值分别为 0.142 和 0.115。与全区尺度不同,2000—2010 年中游地区的主导驱动因子为降水变化(Per_{Δ});而 2010—2023 年中游地区的主导因子仍为生态恢复效果(ERE),且解释力明显高于其他驱动因子。在黄

河流域下游,生态恢复效果(ERE)的解释力在 2 个时期均保持较高水平,表明生态恢复深刻影响下游绿水变化的时空分异格局。值得注意的是,2000—2010 年下游地区的生态恢复措施因子(ERM)并未通过显著性检验,而生态恢复效果因子(ERE)的 q 值为 0.151,具有较强的解释力,表明该时期下游地区绿水时空分异由植被质量提升所主导。

2.2.2 2000—2023 年绿水时空分异交互探测 由于各因子的叠加与交互,绿水在时空分布上多呈现出非线性特征。为进一步分析各因子间的交互影响机

制,本研究利用地理探测器中的交互探测模块对其进行评估(图5)。结果表明,各因子交互作用均表现为非线性增强或双因子增强2种作用方式。2000—2010年,生态恢复措施(ERM)与各因子的交互作用 q 值普遍大于其他交互组合,其与降水变化(Per_{Δ})交互探测类型属于双因子增强, q 值增加至0.50。同时,生态恢复措施(ERM)与坡度(Slope)的交互使其对绿水变化的解释力出现非线性增强。主要归因于

该时期生态恢复措施的空间选择偏好,例如,优先在坡耕地上进行退耕还林。2010—2023年,生态恢复措施(ERM)与效果因子(ERE)的叠加 q 值为0.38,超过二者单因子 q 值之和(0.26),表明生态恢复区域内的植被NPP增长主导了绿水时空变化。各下垫面因子的交互组合 q 值均较低,原因可能是这些因素更多起到绿水静态格局塑造的作用,而对绿水时空变化格局的解释力不足。

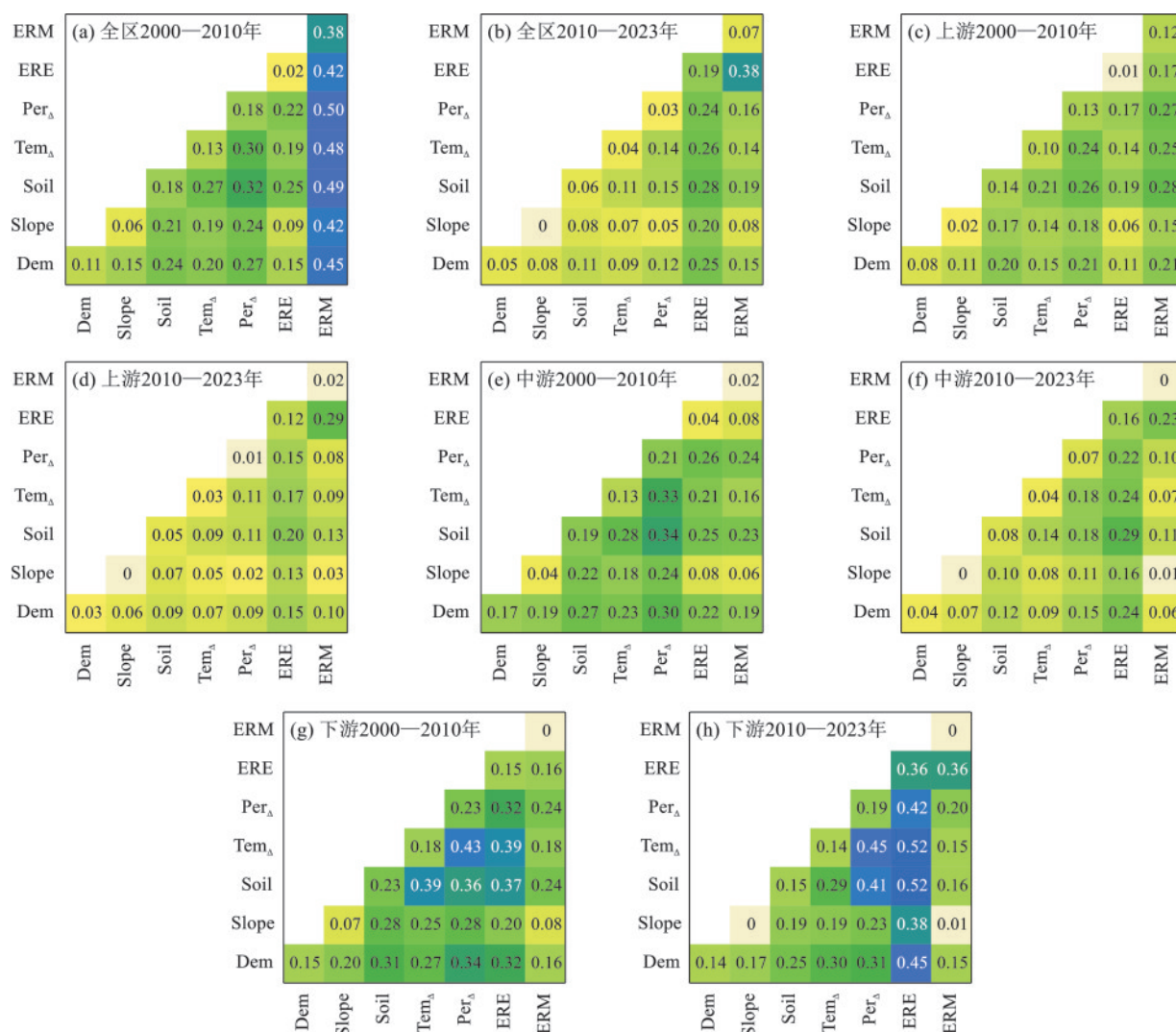


图5 黄河流域绿水变化各因子交互作用解释力

Fig. 5 Explanatory power of interactive effects among factors on green water variation in the Yellow River basin

流域不同分区的主导交互因子及其作用强度也存在较大差异,上游地区的主导机制是降水(Per_{Δ})、气温变化(Tem_{Δ})和生态恢复措施(ERM)之间的交互作用。中游地区的主导因子为降水变化(Per_{Δ}),其与各因子的交互 q 值较高(图5e)。在下游地区,各因子交互作用均处于较高水平,尤其是生态恢复效果(ERE)与气候变化因素之间的交互作用,表明生态恢复效果取决于区域地形地貌和气候变化,多因子共同作用塑造了下游地区绿水时空变化的分异格局(图5g~图h)。

2.2.3 黄河流域绿水时空分异关键响应区识别分析 因子与交互探测可判断出各要素对绿水时空分异是否存在作用及识别作用强度,但难以分析出作用方向^[30]。为进一步分析其作用方向及响应分区,统计2000—2010年和2010—2023年各驱动因子分区绿水变化均值,并将最大值的分区定义为强正响应区,将最小值的分区定义为强负响应区(表6)。在气候变化因素方面,降水(Per_{Δ})和气温(Tem_{Δ})均对绿水变化产生正向驱动作用,但却导致不同的绿水

增加效果。具体来看,2000—2010 年降水强正响应区的绿水增加量为 94.2 mm,而在降水增多的背景下,2010—2023 年的绿水增加量却降低至 39.9 mm,表明绿水量并不简单地随降水增加而增大,还受植被截留比例的影响。在下垫面因子中,坡度(Slope)表现出对绿水变化的分级响应。15°~25°坡度是坡耕地

转化为林地的核心区域,其 2000—2010 年绿水增加量高达 89.2 mm(表 6)。同样地,当处于 0°~3°地区时,绿水增加量最少。值得注意的是,2010 年后黄河流域干旱地区对绿水呈强负响应,绿水变化平均值为 -33.3 mm。原因可能是干旱土壤持水能力较差,难以维持地表植被生长,导致产生的绿水减少。

表 6 黄河流域绿水变化关键响应区识别
Table 6 Key response regions identified for green water variation in the Yellow River basin

驱动因子	响应类型	2000—2010 年			2010—2023 年		
		分区定义	绿水变化/mm	作用方向	分区定义	绿水变化/mm	作用方向
Dem	强正响应区	1 500~3 000 m	90.5	+	500~1 000 m	67.4	+
	强负响应区	<500 m	5.8	+	1 500~3 000 m	-9.3	-
Slope	强正响应区	15°~25°	89.2	+	>45°	23.5	+
	强负响应区	0°~3°	56.7	+	0°~3°	10.7	+
Soil	强正响应区	初育土	91.0	+	半淋溶土	49.7	+
	强负响应区	半水成土	32.2	+	干旱土	-33.3	-
ERM	强正响应区	草地恢复	89.6	+	森林恢复	62.4	+
	强负响应区	生态退化	72.2	+	草地恢复	-4.4	-
ERE	强正响应区	170~240 g/m ²	111.8	+	>160 g/m ²	93.8	+
	强负响应区	<0 g/m ²	39.6	+	<-30 g/m ²	-11.9	-
Per _Δ	强正响应区	106~170 mm	94.2	+	121~235 mm	39.9	+
	强负响应区	-192~-98 mm	-26.4	-	0~27 mm	0.3	+
Tem _Δ	强正响应区	0.30~0.48 ℃	99.0	+	0.24~0.47 ℃	32.9	+
	强负响应区	-0.4~0 ℃	35.1	+	0.02~0.24 ℃	-4.5	-

由图 6 可知,2000—2010 年,黄河流域的草地恢复贡献最多的是绿水增加,平均值为 89.6 mm,该时期生态退化成为绿水变化的强负响应区;在 2010—2023 年,森林恢复区成为绿水变化的强正响应区,绿水变化量为 62.4 mm,表明绿水增加在很大程度上得益于生态恢复工程的实施。此外,2000—2023 年,黄河流域植被 NPP 与绿水呈现出较为明显的协同变化规律。植被 NPP 增加高值区亦是绿水增加的高值区,2 期绿水变化平均值分别为 111.8、93.8 mm,远高于同期其他因子的作用。进一步统计二者协同变化规律发现,NPP 和绿水同时增加的区域面积占比最大(78.56%),且广泛分布于黄河流域上、中、下游的大部分地区,表明植被恢复能显著促进绿水增加。

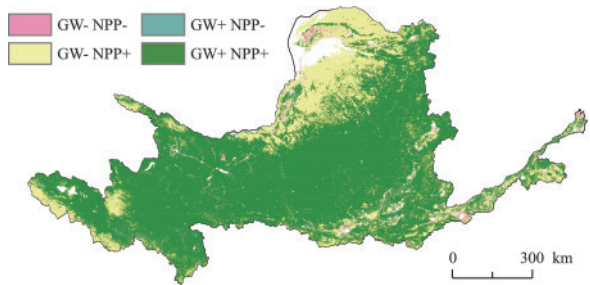


图 6 2000—2023 年黄河流域绿水和植被 NPP 协同变化趋势
Fig.6 Synergistic change of green water and vegetation NPP in the Yellow River basin from 2000 to 2023

3 讨论

作为生态系统水热平衡的重要纽带,绿水资源受到气候变化和人类活动的影响,因此,揭示其时空变化特征和驱动机制已成为流域可持续发展的研究热点^[23]。本研究发现,2000 年以来,黄河流域的绿水量明显提升,与已有研究^[24,33]结果一致。从绿水分量变化来看,流域绿水增加量的 99.70% 由绿水流贡献,而绿水储量变化较小,是由于生态恢复工程驱动的植被扩张,显著增强植被蒸腾,从而主导绿水流的生长。具体来看,研究期内黄河流域林草生态系统的绿水增加量高达 646.1 亿 m³,表明流域绿水的增加主要为生产性绿水,而非来自水体、建设用地和裸地的非生产性绿水。同时由于生态恢复实施阶段、方式及效果的不同,其对绿水时空变化的作用亦存在明显差异。地理探测器结果显示,2000—2010 年,流域绿水时空分异主要由生态恢复工程的实施所主导;2010—2023 年,其主导因素转变为生态恢复效果的提升,反映植被恢复从“面积扩张”到“质量提升”的阶段转变,以及植被截留降水能力增强的滞后效应^[34]。而从单位面积绿水增加量来看,森林恢复明显高于草地恢复。总体而言,黄河流域绿水时空变化过程是由于生态恢复、气候变化与基础下垫面条

件等多要素交互作用的结果,其中生态恢复主导其时空分异格局。但根据流域水量平衡原理,降水一定的情况下绿水量的增加必然导致蓝水量的减少。根据本研究测算的绿水结果,2023年黄河流域绿水系数已达85.10%,远高于南方地区,蓝绿水竞争持续加剧^[35]。因此,流域未来生态恢复应严格落实“以水定绿、因地制宜”原则。具体来说,在水资源禀赋较差的区域,需从追求面积扩张转向优化植被结构,对林草进行空间合理配置,提升其水分利用效率。在流域绿水资源大幅增加的背景下,应对绿水资源进行系统化利用,优先开发农业绿水资源潜力。通过保护性耕作、覆盖作物等措施提升绿水利用效率,减少对灌溉蓝水的依赖,以支撑流域生态保护和高质量发展。

探究事物的空间分异模式及规律是地理学的基础性问题,选择合适的空间归因分析方法是探究黄河流域绿水时空分异格局及定量归因的重要前提^[27]。本研究尝试使用地理探测器模型来分析驱动因素与绿水之间的关系,并进一步基于静态和动态2个视角探讨黄河流域绿水变化呈现时空分异性的潜在原因。而多数研究^[36]通常仅使用地理探测器对单一时间截面进行空间格局归因,有助于厘清地理现象空间分布模式的成因,但却难以揭示是何种要素导致其时空变化的分层异质性。本研究对地理探测器的运用有益于促进地理要素定量归因研究从单一性和静态性拓展至交互性和时空变化动态性,对同类研究的方法完善与思路设计具有一定的启示性。

本研究仍存在一些局限与不足,亟须未来进一步开展研究。首先,本研究利用多源遥感数据构建具有较高时空精度的长时序绿水栅格数据集,但相较于水文模型缺乏基于实测数据的参数率定过程,因此绿水估算结果可能存在一定的误差,未来可考虑使用时空精度更高的分布式水文模型测算绿水,提高绿水模拟结果的精度。其次,人类活动对绿水的影响较为复杂,既直接改变水循环过程,又间接通过改变地表覆被和下垫面影响绿水资源的时空分布。而本研究仅在模型中纳入了生态恢复这一主要的人类活动,并未考虑如水利工程、农业灌区建设及水资源开发等人类活动对绿水空间配置的影响,可能增加结果的不确定性。最后,本研究为把握生态恢复背景下黄河流域的绿水变化时空格局提供一定的参考意义,但囿于文章篇幅部分话题有待展开:1)本研究重点关注生态恢复对黄河流域绿水的影响,但基于水量平衡原理,其也深刻影响蓝水的时空分异,而在气候暖干化、径流急剧减少和人类用水需求不断增加的背景下,生态恢复引致的蓝水变化需

要被纳入到黄河流域“以水定产”战略中统筹考虑;2)针对干旱区的生态恢复工程,其政策评估与未来工程规划需要充分考虑其生态水文效应,亟待深化黄河流域各分区植被恢复阈值及生态恢复空间格局优化方案等问题的研究,为黄河流域人水地系统综合管理提供科学支撑。

4 结论

1)2000—2023年,黄河流域绿水量显著增加,由323.2 mm增加至442.3 mm,年平均增长率约1.50%。绿水储量和绿水流量的变化趋势及速率也存在一定差异,绿水增加量的99.70%由绿水流贡献,绿水储量的增加量仅占0.30%。就不同分区而言,流域上、中、下游的绿水量均值分别为410.6、431.7、470.8 mm。

2)2000—2023年,黄河流域绿水资源在空间分布上表现出较大差异,整体呈“南多北少”的分布特征,且草地、耕地和林地提供黄河流域高达96.20%的绿水量。趋势分析结果显示,24 a绿水量极显著增加区域占比为64.44%,广泛分布于宁夏平原、汾渭谷地及陕北高原等地区,尤以陕北高原表现最为明显。

3)黄河流域绿水时空分异格局是生态恢复、气候变化及下垫面条件等要素非线性叠加的结果,且其变化特征与生态恢复实施阶段、方式及效果密切相关。2000—2010年,绿水时空分异主要由生态恢复工程的实施主导;2010—2023年,主导因素转变为生态恢复效果的提升,反映生态工程从“面积扩张”到“质量提升”的转变。同时驱动机制也存在空间异质性,不同流域分区的主导因子不同,上游地区受土壤类型和生态恢复效果影响较大,而下游地区在2个时期均对生态恢复效果响应敏感。2000—2023年,草地恢复区和森林恢复区为绿水变化的主要正响应区,是生态恢复水文效应的关键空间载体,但效果受其他因子影响。

4)生态恢复工程是黄河流域绿水量大幅增加的主导驱动力,导致2023年黄河流域绿水系数升至85.10%,远高于南方地区,蓝绿水竞争关系日趋凸显。因此,黄河流域未来的生态恢复规划亟须重视林草空间布局与植被恢复的水文阈值,并将绿水资源纳入流域水资源系统化管理利用体系。

参考文献:

- [1] Zhao Meng, Geruo A, Zhang Jien, et al. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 56-62.
- [2] 谢花林, 罗世龙, 陈倩茹. 水资源生态产品价值实现的多中心治理体系探讨[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(11): 2554-2569.

- Xie Hualin, Luo Shilong, Chen Qianru. Study on the multi-center governance system for realizing the value of water resources ecological products[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(11): 2554-2569.
- [3] Wu Mingyan, Ni Fuquan, Deng Yu, et al. Examining future spatiotemporal changes in blue and green water using an enhanced SWAT model: A Jialing River basin case study[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: e112941.
- [4] 王光谦, 张宇, 谢笛, 等. 中国绿水格局及其战略意义[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1641-1658.
- Wang Guangqian, Zhang Yu, Xie Di, et al. Green water in China: Geological structure and its significance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1641-1658.
- [5] 许炯心. 黄河中游绿水系数变化及其生态环境意义[J]. *生态学报*, 2015, 35(22): 7298-7307.
- Xu Jiongxin. Increasing trend of green water coefficient in the middle Yellow River basin and the eco-environmental implications[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7298-7307.
- [6] Bareille F, Chakir R, Regnacq C. Rainwater shocks and economic growth: The role of the water cycle partition[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2024, 128: e103047.
- [7] Scanlon B R, Fakhreddine S, Rateb A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2023, 4(2): 87-101.
- [8] Dell'Angelo J, Rulli M C, D'Odorico P. The global water grabbing syndrome[J]. *Ecological Economics*, 2018, 143: 276-285.
- [9] Wang Ai, Wang Jiangyu, Luan Benjie, et al. Quantifying the impact of land use changes on surface runoff in the Loess Plateau area of Northwest China by SWAT[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 377: e124641.
- [10] Tibangayuka N, Mulungu D M M, Izdori F. Evaluating future climate-driven changes in agricultural water resilience: Insights from CMIP6 model simulations for the Kagera River sub-basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 378: e124745.
- [11] Guo Chenyu, Liu Tie, Huang Yue, et al. Sustainable groundwater regulation in typical irrigation areas of inland river basins based on ecological indicators and the MIKE-SHE hydrological model[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: e102000.
- [12] Song Zhihong, Zhang Xiaoqi, Xu Jijun, et al. Vegetation greening promotes the conversion of blue water to green water by enhancing transpiration[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 658: e133181.
- [13] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567.
- Guo Juntao, Zhang Zhiqiang, Wang Shengping. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a watershed of Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [14] Wang Lu, Jie Feilong, He Bing. Changes of blue and green water in arid inland dissipation area based on coupled surface water and groundwater model[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: e102010.
- [15] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2307-2318.
- Tian Jing, Guo Shenglian, Liu Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [16] Luan Jinkai, Ma Ning. Responses of seasonal hydrological processes to vegetation change in the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 660: e133449.
- [17] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 23-31.
- Zhang Kun, Lü Yihe, Fu Bojie. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the Loess Plateau[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(1): 23-31.
- [18] 冯畅, 毛德华, 杨柳, 等. 绿水资源研究进展及评述[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(1): 173-184.
- Feng Chang, Mao Dehua, Yang Liu, et al. Research progress and commentary of green water resources[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(1): 173-184.
- [19] Wu Fan, Yang Xiaoli, Cui Zhouyu, et al. The impact of human activities on blue-green water resources and quantification of water resource scarcity in the Yangtze River basin[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 909: e168550.
- [20] Lan Xin, Xie Yuying, Liu Zhiyong, et al. Vegetation greening accelerated hydrological drought in two-thirds of river basins over China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: e131436.
- [21] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(8): 1110-1117.
- Fu Bojie, Liu Yansui, Cao Zhi, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(8): 1110-1117.
- [22] 苗长虹, 夏成, 金凤君, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展战略实施成效与推进策略[J]. *自然资源学报*, 2025, 40(3): 569-583.
- Miao Changhong, Xia Cheng, Jin Fengjun, et al. Imple-

- mentation effectiveness and promotion strategies of ecological protection and high-quality development strategy in the Yellow River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(3): 569-583.
- [23] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 520-528.
Wang Yanfen, Chen Yiping, Wang Houjie, et al. Ecosystem change and its ecohydrological effect in the Yellow River basin [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4): 520-528.
- [24] Yu D X. Patterns of blue and green water in the Yellow River basin from 1998 to 2020: Influence of climate change and human activity [EB/OL]. ESS Open Archive, (2024-08-28). <https://essopenarchive.org/users/821664/articles/1221283-patterns-of-blue-and-green-waters-in-the-yellow-river-basin-from-1998-to-2020-influence-of-climate-change-and-human-activity>.
- [25] 杨明楠, 朱亮, 刘景涛, 等. 植被恢复影响下河川基流的广义水资源效应变化研究: 以黄河上游北川河流域为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 108-115.
Yang Mingnan, Zhu Liang, Liu Jingtao, et al. Variation in generalized water resources effect of river base stream under the influence of vegetation recovery: Case of Beichuan river basin in upstream of Yellow River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 108-115.
- [26] 高海东, 吴翌. 黄河头道拐—潼关区间植被恢复及其对水沙过程影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1206-1217.
Gao Haidong, Wu Zhao. Vegetation restoration and its effect on runoff and sediment processes in the Toudaoguai-Tongguan section of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1206-1217.
- [27] 郭浩, 董磊, 郭伦, 等. 空间异质性建模方法[J]. *地理学报*, 2025, 80(3): 567-585.
Guo Hao, Dong Lei, Wu Lun, et al. Tackling spatial heterogeneity in geographical analysis: An overview [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(3): 567-585.
- [28] Cui Jiangpeng, Lian Xu, Huntingford C, et al. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport [J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(12): 982-988.
- [29] 罗敏, 孟凡浩, 王云倩, 等. 气候变化下中国植被 GPP 与土壤水的互馈关系[J]. *地理学报*, 2024, 79(1): 218-239.
Luo Min, Meng Fanhao, Wang Yunqian, et al. Mutual feedback relationship between vegetation GPP and soil moisture in China under climate change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 218-239.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 张少尧, 邓伟, 胡茂桂, 等. 山区过渡性地理空间人文自然交互性识别与分异解析[J]. *地理学报*, 2022, 77(5): 1225-1243.
Zhang Shaoyao, Deng Wei, Hu Maogui, et al. Identification and differentiation of human-nature interaction in mountainous transitional geospace of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1225-1243.
- [32] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 1-8.
Wang Guoqing, Zhang Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 1-8.
- [33] 李文婷, 杨肖丽, 任立良, 等. 基于 SWAT 模型的黄河源区蓝/绿水资源时空分布特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(8): 59-66.
Li Wenting, Yang Xiaoli, Ren Liliang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of blue and green water resources in the Yellow River source region based on SWAT model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(8): 59-66.
- [34] 蔡依霏, 陈琳舒, 吕世轩, 等. 基于 Google Earth Engine 的黄土高原植被变化对蒸散发分量影响研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(9): 1649-1658.
Cai Yifei, Chen Linshu, Lyu Shixuan, et al. Impact of vegetation change on evapotranspiration components in the Loess Plateau based on Google Earth Engine [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(9): 1649-1658.
- [35] 熊鹰, 陈斯玄, 喻卓钦, 等. 浏阳河流域绿水资源变化及其丰枯年响应特征[J]. *经济地理*, 2025, 45(3): 150-159.
Xiong Ying, Chen Sixuan, Yu Zhuoqin, et al. Evolution characteristics of blue-green water resources and their response in flood and drought years in Liuyang River basin [J]. *Economic Geography*, 2025, 45(3): 150-159.
- [36] 王楠, 程维明, 赵瀚, 等. 中国山洪灾害时空分异特征及驱动因素[J]. *地理学报*, 2025, 80(7): 1801-1824.
Wang Nan, Cheng Weiming, Zhao Han, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving mechanisms of flash floods in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(7): 1801-1824.