

DOI: 10.20103/j.stxb.202501080060

刘静宜, 戈文艳, 炎艺霖, 焦菊英, 王飞. 2000—2023 年延河流域需水量时空分布特征研究. 生态学报, 2026, 46(6): - .

Liu J Y, Ge W Y, Yan Y L, Jiao J Y, Wang F. Spatiotemporal distribution characteristics of water demand in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023.

Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6): - .

2000—2023 年延河流域需水量时空分布特征研究

刘静宜^{1,2}, 戈文艳^{1,2,*}, 炎艺霖^{1,2}, 焦菊英^{1,2}, 王 飞^{1,2}

1 西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治国家重点实验室, 水土保持科学与工程学院, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 基于 2000—2023 年延河流域的气象资料、遥感影像和人口密度等数据, 本研究定量估算了流域的生态需水量、生活需水量, 解释了两类需水的时空演变特征, 讨论了植被生态水的供需格局。结果表明延河流域需水总量显著上升, 年均增速为 0.73 亿 m³, 其中植被生态需水占主导; 生态需水增长速率呈现“南低北高”的空间差异, 主要受降雨分布及退耕还林引致的草地覆盖度提升驱动。由于降水时空分布不均且土壤蓄水能力有限, 流域生态缺水现象逐渐加剧, 尤以中部区域最为突出, 且在植被生长期(4—10 月)呈现“先减后增”的季节性波动。与此同时, 受人口密度上升和牲畜养殖扩张影响, 生活需水量显著增加, 年均增速为 8.41 万 m³。总体来看, 退耕还林虽改善了植被覆盖, 但在有限降水条件下加剧了生态水资源紧张, 而社会经济发展带来的生活需水增长进一步放大了供需矛盾。本研究可为延河流域水资源调配与生态恢复政策的优化提供科学依据。

关键词: 延河流域; 生态需水; 生活需水; 供需平衡; 退耕还林还草工程

Spatiotemporal distribution characteristics of water demand in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

LIU Jingyi^{1,2}, GE Wenyan^{1,2,*}, YAN Yilin^{1,2}, JIAO Juying^{1,2}, WANG Fei^{1,2}

1 State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100

Abstract: Based on meteorological data, remote sensing data, and population density statistics from 2000 to 2023 in the Yanhe River Basin, the ecological water demand and domestic water demand in the basin were calculated. It also analyzed the spatiotemporal evolution characteristics of the basin's water demands and explores the relationship between vegetation ecological water supply and demand. Besides, the ecological water demand and domestic water demand in the basin exhibited a significant upward trend, with an annual growth rate of 73 million. The growth rate of vegetation ecological water demand exhibits a spatial distribution pattern with lower values in the south and higher values in the north, primarily driven by precipitation and the increase in grassland vegetation cover due to the policy of converting farmland to forest. However, due to the uneven spatiotemporal distribution of precipitation and the limited water storage capacity of the soil have exacerbated ecological water shortages as ecological water demand increased. This issue was particularly severe in the central part of the basin. Moreover, during the vegetation growing period (April to October), ecological water shortages displayed a seasonal pattern of initial reduction followed by an increase. Additionally, the increasing trend was also reflected in the domestic water requirement, primarily driven by rising population density and livestock breeding, with an average annual growth rate of 84,100 m³. In summary, although ecological restoration has significantly improved vegetation coverage in the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2243213)

收稿日期: 2025-01-08; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gewenyan@nwfau.edu.cn

Yanhe River Basin, the limited precipitation exacerbates the supply-demand conflict of water resources due to ecological restoration. Simultaneously, socio-economic development has led to a gradual increase in domestic water demand, further compounding this contradiction. These findings provide scientific evidence for optimizing watershed water resource management and ecological restoration policies in the Yanhe River Basin.

Key Words: Yanhe River Basin; ecological water requirement; domestic water requirement; supply and demand balance; Grain for Green Project

黄土高原长期受到不合理土地利用和高强度人类活动的扰动,生态功能显著退化^[1]。为改善区域生态环境,自 1999 年起,国家启动了包括“退耕还林”“天然林保护工程”等在内的一系列大规模生态建设项目^[2]。经过多年的恢复与治理,黄土高原水土流失状况得到了有效缓解,植被覆盖度显著提升,整体生态环境明显改善^[3-4],成为我国典型的生态修复示范区之一。

黄土高原属典型干旱—半干旱区,区域水资源高度依赖降水补给,自然供给能力脆弱且时空分布不均^[5]。持续大规模的退耕还林等生态建设工程显著提升了区域植被覆盖。伴随生态工程推进,植被生物量持续增加,植被蒸腾与整体蒸散发强度显著增强,尤其在生长季,水分消耗达到高峰^[6],进一步加剧了区域水资源的供需矛盾^[7]。土地利用结构的持续调整亦带来明显的“双重效应”:一方面,林草植被扩张显著提升生态系统需水;另一方面,耕地面积减少使农业用水呈现下降趋势^[8]。在林草与农田用地发生动态演替的背景下,若将农业需水与生态需水割裂处理,易导致水分需求估算偏离实际。因此,将农业需水统一纳入生态需水核算体系,有助于从复合生态系统角度更准确地反映植被恢复对区域水资源格局的综合影响。与此同时,随着人口增长和经济发展,生活用水需求亦稳步上升^[9],生态、农业与生活用水之间的资源竞争日益加剧。系统揭示生态与生活需水的时空演变规律,评估水资源的供需平衡状态,是在资源约束背景下实现区域生态修复与经济社会协调发展的关键前提。

延河流域作为黄土高原生态建设的核心区域,其生态环境质量在治理过程中显著改善。然而,随着大面积植被恢复和经济活动增强,延河流域也逐渐成为黄土高原水资源紧张问题的典型区域。林草与农田系统之间在水分需求上的协同与竞争关系更加复杂,需对其时空动态变化进行深入识别和量化分析。因此,本文选取延河流域为研究对象,基于遥感与气象长期序列数据,评估 2000—2023 年生态需水与生活需水的时空变化特征,并进一步探讨降水变化对植被生态需水的驱动作用,为黄土高原典型流域的水资源调控与生态恢复策略优化提供科学依据。

1 研究区与数据方法

1.1 研究区概况

延河流域(108°46′32″—109°24′48″E, 36°55′44″—37°19′28″N)位于黄土高原中部,属于黄河第一支流,是延安市第二大河,全长约 286.9km,流域面积达 7321km²。延河源头位于靖边县,由西北向东南流向,途经靖边县、志丹县等 5 个县区^[10]。流域是典型的丘陵沟壑区,地势西北高、东南低,沟壑纵横、地表破碎。该区域属于半干旱大陆性季风气候区,年平均温度为 8.8℃,年降雨量为 505 mm。流域土壤类型以黄绵土为主,土质疏松,抗侵蚀能力较差。流域内降雨量自东南向西北方向递减,植被呈地带性分布,主要是人工种植形成的次生植被和干旱草本植物,常见有杠柳、狼牙刺、柠条、鸡爪槭、辽东栎等植被类型^[11]。

1.2 数据

本研究所用气象数据来源于 TerraClimate 数据集,覆盖时间为 2000—2023 年,空间分辨率为 4km,时间分辨率为月尺度,包含降水量、最高气温、最低气温及太阳辐射等关键气象因子。叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)数据来自 MODIS 遥感产品,由美国国家航空航天局(NASA)提供,空间分辨率为 500m,时间分辨率为

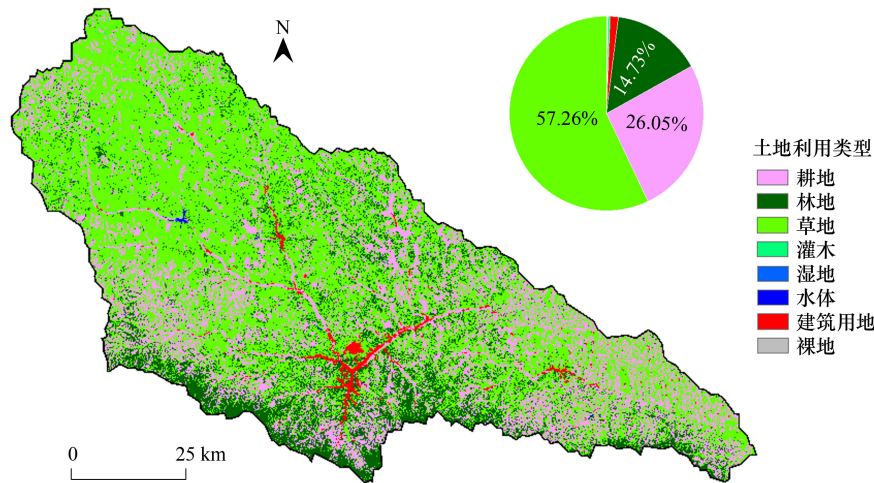


图 1 延河流域土地利用概况图

Fig.1 Land Use Overview Map of the Yanhe River Basin

8d。土地利用与覆盖类型数据采用 GlobeLand30 数据集,来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>),空间分辨率为 30m。土壤水分数据来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),数据产品为中国区域 1km 分辨率的逐月土壤水分栅格数据(2000—2023 年),反映浅层(0—10 cm)土壤水分的时空变化特征,主要用于辅助评估生态系统对水分供需的响应差异^[12]。延河流域 2000—2023 年的人口密度、畜牧生产情况及牲畜数量等社会经济数据来自延安市统计局发布的历年统计年鉴;人口与畜牧需水量相关系数参考陕西省地方标准文件执行。

1.3 方法

1.3.1 流域需水量计算

(1) 需水量

本文对延河流域需水量 SW_{total} 的计算主要为植被生态需水(ET_K)与生活需水(W_{live})^[13—14]:

$$SW_{total} = ET_K \times A_p + W_{live} \quad (1)$$

(2) 植被生态需水

植被生态需水(ET_K)的计算如下^[15—16]:

$$ET_K = ET_0 \times K_c \times K_s \quad (2)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸散发, K_c 为植被修正系数,与植被类型和生长条件有关; K_s 为土壤水分限制系数,与土壤质地、土壤水分有关。

延河流域作物蒸散发 ET_0 采用改进后的 Ritchie 公式^[17—18]来计算:

$$ET_0 = \beta [3.87 \times 10^{-3} R_s (0.6 T_{max} + 0.4 T_{min}) + 29] \quad (3)$$

式中 β 为经验系数,当 $T_{max} \geq 35^\circ\text{C}$ 时, $\beta = 1.1 + 0.05(T_{max} - 35)$; 当 $5 < T_{max} < 35^\circ\text{C}$ 时, β 取 1.1; 当 $T_{max} \leq 5^\circ\text{C}$ 时, $\beta = 0.1 \exp[0.18(T_{max} + 20)]$ 。 R_s 为太阳辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

植被修正系数是关于植被覆盖度、植被高度以及叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的函数,其随着植被的生长变化而变化^[19]。延河流域作为典型的退耕还林区,植被覆盖度及叶面积指数在过去二十年间发生了剧烈变化。因此,本研究植被修正系数不仅考虑植被年内变化特征,也通过长期 LAI 数据考虑年际变化特征,月植被修正系数 $K_{c,i}$ 具体公式如下:

$$K_{c,i} = \frac{\text{LAI}_i}{\text{LAI}_{max}} \quad (4)$$

式中, LAI_i 为 2000—2023 年月均 LAI, i 为月份, LAI_{\max} 为 2000—2023 年的 LAI 最大值。

当土壤水分供应不足时,可采用土壤实际含水量、田间持水量和土壤凋萎系数等土壤水分数据来计算土壤水分限制系数 K_s , 延河流域的田间持水量 (S^*) 参考已有文献设定为 $0.222 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 凋萎系数 (S_w) 设定为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ [20]。获取植被的实际蒸散量随土壤水分含量的变化情况, 当 $S_w \leq S \leq S^*$ 时, 即 $0.05 \leq S \leq 0.222$ 时, 满足公式 [21—22]:

$$K_s = \frac{\ln\left(\frac{S-S_w}{S^*-S_w} \times 100 + 1\right)}{\ln 101} \quad (5)$$

式中 S 为土壤实际含水量, S^* 为土壤田间持水量值, S_w 为土壤凋萎系数。

(3) 生活需水

生活需水 W_{live} 则按以下公式进行计算:

$$W_{\text{live}} = \text{Pop} \times W_{\text{pop}} + \text{livestock} \times W_{\text{animal}} \quad (6)$$

式中, Pop 为人口数量, W_{pop} 为人均生活需水量, livestock 为牲畜数量, W_{animal} 为牲畜平均需水量。人均需水量和牲畜平均需水量参照陕西省地方标准 (表 1)。

表 1 延河流域人均需水量和牲畜平均需水量

人均生活需水量 Per capita domestic water demand		95	
	牲畜养殖方式 livestock husbandry practices	普通饲养 conventional feeding	一般养殖场 typical livestock farm
牲畜 livestock	大型牲畜		
	牛	115	125
	猪	25	30
	羊	8	10
	其它大型牲畜 (马、驴等)	135	150
	小型牲畜		
	家禽	3	4.5
	兔	1	1.5

(4) 流域植被生态水量供需关系

基于延河流域降水量数据和植被生态需水量数据分析 2000—2023 年延河流域植被生态水量供需关系 [23]:

$$QEW_{\text{total}} = QEW_p \times A_p \quad (7)$$

$$QEW_p = P_e - ET_k \quad (8)$$

$$P_e = \alpha \times P \quad (9)$$

式中 ET_k 为植被生态需水量 (mm); QEW_{total} 为流域内植被生态缺水总量 (m^3); QEW_p 为植被单位生态缺水水量 (mm); P_e 为可利用降雨量; α 为降雨入渗系数, 当月降雨量 $> 50\text{mm}$ 时, $\alpha = 0.7-0.8$; 当月降雨量介于 $5-50\text{mm}$ 之间时, $\alpha = 1$; 当月降雨量 $< 5\text{mm}$ 时, $\alpha = 0$ 。

1.3.2 数据分析

利用基于最小二乘法的线性回归模型分析 2000—2023 年延河流域生态需水量与生活需水量的时空变化特征 [24]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n i x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (10)$$

式中 n 是研究年份数, x 是第 i 年的生态需水量与生活需水量, θ_{slope} 是其需水量变化的长期趋势。2000—2023 年延河流域生态需水量与生活需水量斜率的显著性用 t 检验, 其中 $P < 0.05$ 代表具有统计学意义。

2 结果

2.1 植被生态水量供需关系

延河流域自西北向东南逐渐降低的地形趋势对流域内的气候条件、植被分布及土地利用产生了显著影响,从而影响了作物参考蒸散发量(ET_0)的空间格局和变化趋势(图 2)。整体而言,流域 2000—2023 年作物参考蒸散发量年月均值在 77.54—89.92mm 之间,呈现出明显的空间异质性。海拔较高的西北部区域,受限于较低气温和稀疏植被覆盖,作物参考蒸散发量相对较低;而随着地形逐渐下降,东南部地区气温升高、植被生长条件改善,作物参考蒸散发量显著提升,呈现出由西北向东南递增的空间分布格局。整体而言,该期间流域作物参考蒸散发量呈现出缓慢上升趋势,尽管其线性增长趋势不显著,但在空间上仍存在明显差异。以流域中部为界,延长县与宝塔区的作物参考蒸散发量变化幅度较小;而在靖边县、志丹县和安塞县等西北部区域,作物参考蒸散发量增长幅度相对较大。这一差异主要受区域气温升高与土地利用变化的共同影响,反映出该区域在气候变化与生态恢复背景下的水分消耗特征。

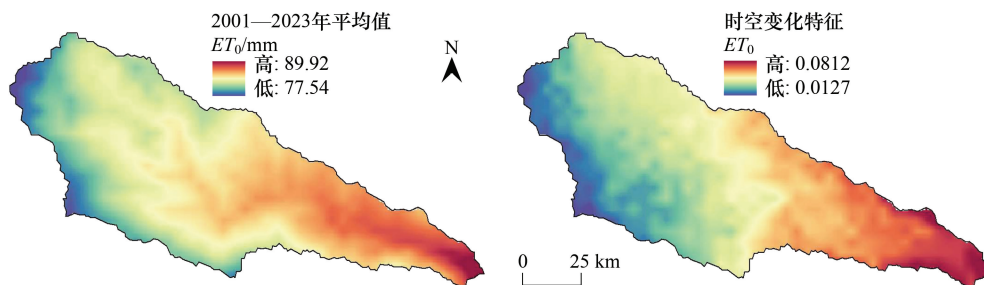


图 2 延河流域 2000—2023 年作物参考蒸散发量 ET_0 年均值与时空变化特征

Fig.2 Crop reference evapotranspiration (ET_0) in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023: annual average values and spatiotemporal variation characteristics

土壤水分限制系数 K_s 反映了植被实际蒸散发量随土壤水分含量变化的情况,因此具有显著的季节性变化和区域差异(图 3)。春季由于降水量较少且气温逐渐回升,土壤水分限制系数普遍较低,尤其在高海拔和降水较少的地区,系数保持在 0.70—0.93 之间。夏秋季节,随着降水量的增加和温度升高,土壤水分限制系数整体较高,范围在 0.80 至 0.99 之间,尤其在土壤水分供应充足的低海拔和降水丰富的地区。冬季由于气温低且降水量有限,土壤水分限制系数呈现降低趋势(0.45—0.82),在流域西北部高海拔地区尤为明显。总体而言,延河流域土壤水分限制系数的空间变化受降水、气温、地形和季节等因素的共同影响,呈现南高北低、夏秋季高冬季低的趋势。

延河流域 2000—2023 年植被修正系数 K_e 表现出显著的空间异质性(图 4)。流域内的植被修正系数与退耕还林(草)生态工程密切相关。流域中北部地区为典型的植被恢复区,植被在生长发育的过程中叶面积指数显著增加,导致其需水量也将显著增加,从而使植被修正系数随着植被生长呈现显著的上升趋势。相比之下,流域南部地区的植被类型相对稳定,生态建设活动干预较少,且多数植被处于成熟阶段,叶面积指数变化幅度较小,因此植被修正系数的变化趋势相对平缓。此外,在流域北部海拔较高的区域,由于气温偏低、降水偏少,植被生长受限,叶面积指数长期变化不显著,从而使得该区域植被修正系数整体处于较低水平,变化速率亦相对缓慢。

基于作物参考蒸散发量、植被修正系数和土壤水分修正系数获得了延河流域 2000—2023 年植被生态需水量(ET_k)时空变化特征(图 5)。结果表明,2000—2023 年间,流域总体生态需水量呈显著上升趋势,年均增长速率为 0.73 亿 m^3 。其中,农作物和林地生态需水变化速率较为平缓,分别为 0.14 亿 m^3/a 和 0.01 亿 m^3/a ;相比之下,草地生态需水增长最为显著,年均增加 0.58 亿 m^3 ,表明草地作为生态恢复的主要对象,其水分需

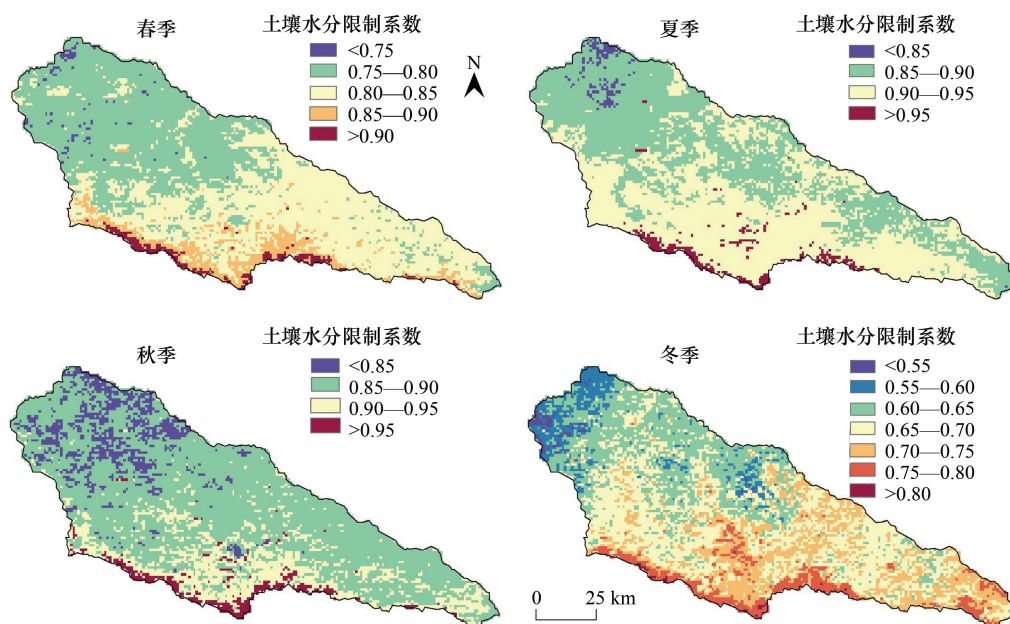


图3 延河流域 2000—2023 年土壤水分限制系数季节变化特征

Fig.3 Seasonal variation characteristics of soil moisture limitation factor in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

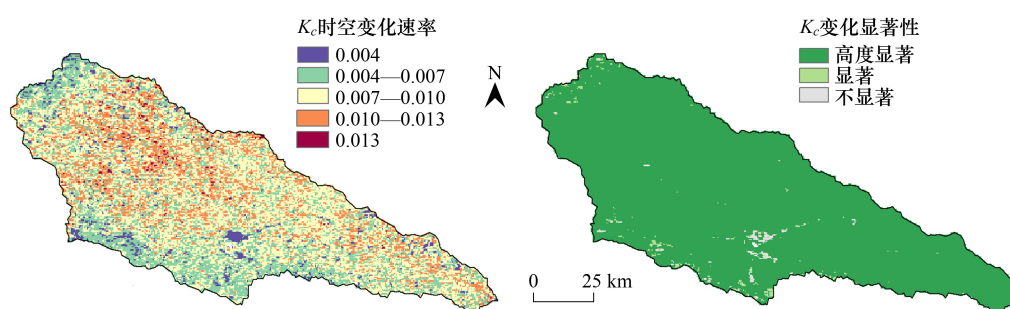


图4 延河流域植被修正系数时空变化特征

Fig.4 Spatiotemporal variation characteristics of vegetation adjustment factor in the Yanhe River Basin

求提升是流域生态需水上升的主导驱动因素。从空间分布特征来看,延河流域大部分草地生态需水量呈现明显增加趋势,变化速率多集中在 $0.05-0.15 \text{ mm/a}$ 之间。北部高海拔地区生态需水增长幅度相对较小 ($<0.05 \text{ mm/a}$),可能与当地气温较低、植被稀疏等生长受限因素有关。总体来看,退耕还林(草)所恢复的草地在植被生长过程中生态需水逐年上升,是当前生态需水结构演变的核心组成。

在生态需水总量呈现持续增长的同时,年际间亦表现出一定波动性。基于 2001—2023 年的逐年统计,流域生态需水总量在约 $127-237 \text{ 亿 m}^3$ 之间波动,反映出区域植被对气候条件变化,尤其是年降水状况的敏感响应。该区间的显著差异揭示了干旱-半干旱区不同水文年型(如丰水年与枯水年)中植被水分需求的波动特征,体现出生态系统在应对气候不稳定性过程中的水分适应性机制。综上,延河流域生态需水在长期呈增长趋势的同时,亦显著受年际气候波动影响,其动态变化特征对流域水资源管理与生态调控具有重要参考价值。

2000—2023 年延河流域降雨数据表明(图 6),延河流域内年均降雨量均值在 $438.75-533.75 \text{ mm}$ 之间,地区间的空间差异较小。降雨量随海拔高度的变化呈现一定规律,海拔较高的区域降雨相对较少,随着海拔降低,降雨量逐渐增多。整体来看,年降水量呈缓慢上升态势,但其线性变化幅度较小,未达到统计显著性水平。

基于 2000—2023 年间植被生态需水量与降水数据的对比分析,本研究揭示了延河流域水资源供需关系

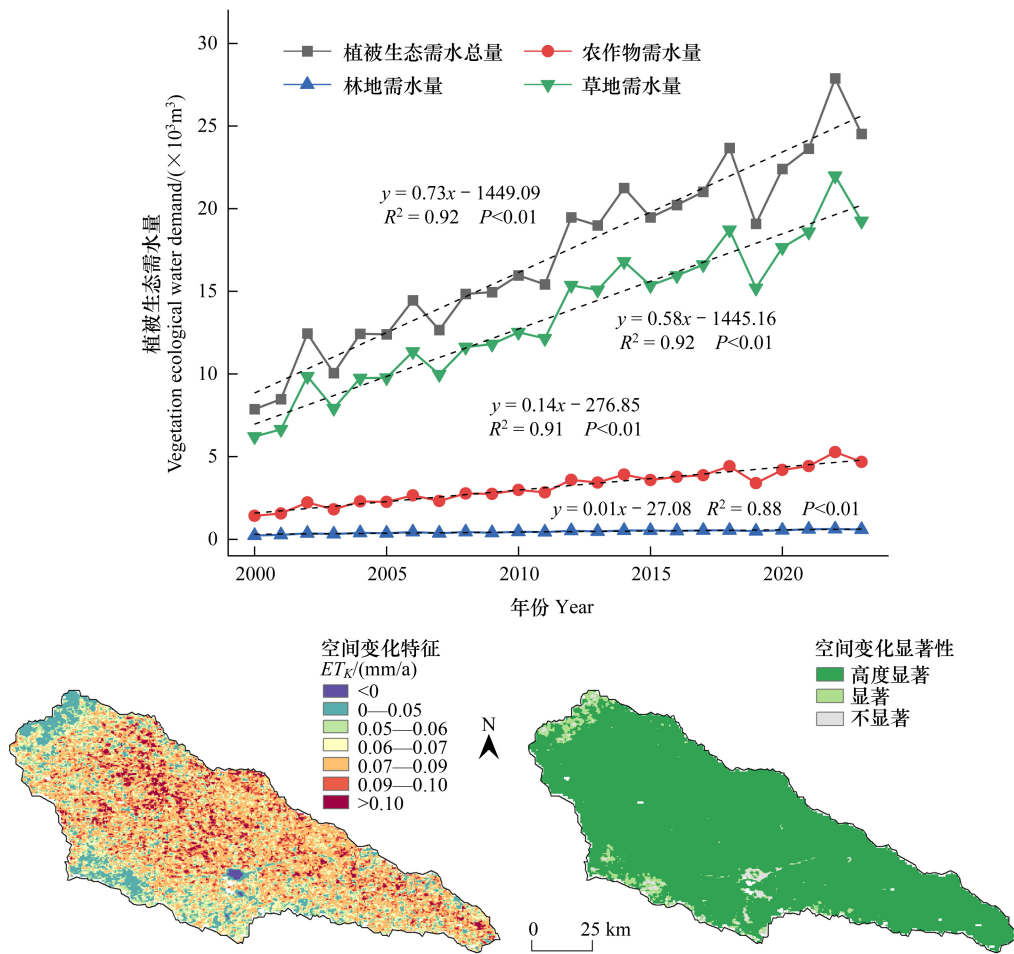


图 5 延河流域 2000—2023 年植被生态需水时间变化特征与空间变化特征

Fig.5 Temporal and spatial variation characteristics of vegetation ecological water demand in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

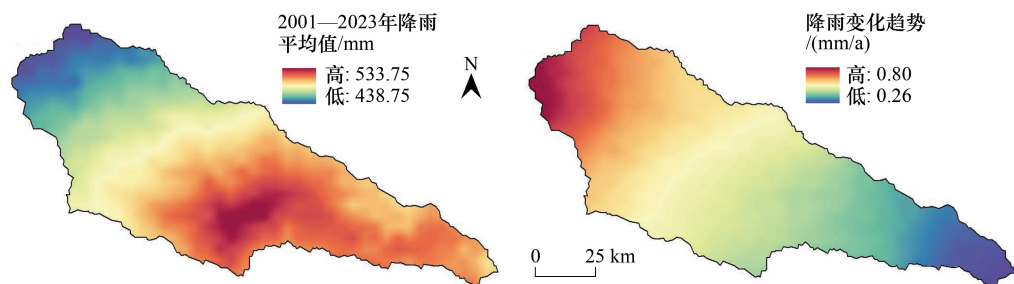


图 6 延河流域 2000—2023 降雨量年均值与时空变化特征

Fig.6 Rainfall in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023; annual average and spatiotemporal variation characteristics

的时空演变特征(图 7)。总体来看,流域植被生态缺水状况呈逐年加剧趋势,尤以流域中部地区最为显著,表明该区域水资源供需平衡正逐步向紧张状态转变。在年际尺度上,水文年型对供需关系的影响表现出显著差异。典型丰水年(如 2002 年、2006 年、2016 年)降水量显著高于生态需水量,流域多数区域出现“水多植被少”的相对盈余状态,生态缺水问题较弱;而在枯水年(如 2015 年、2019 年、2022 年),降水显著偏少,整体生态需水量普遍超过同期降水量,形成明显的水分亏缺,缺水压力显著增强。平水年份(如 2020 年、2021 年)中,供需关系相对均衡,部分区域维持在基本满足生态需水的水平。值得注意的是,自 2016 年起,流域中部区

域生态缺水态势持续显现,并呈逐年加重趋势。该变化并非由降水减少所致,而更可能受到退耕还林等生态工程推进所引发的生态需水快速增长的影响。尤其是在植被恢复强度较大的区域,如新增草地及耕地退化带,其需水量显著上升,在年降水量变化不大的背景下,进一步拉大了供需缺口,导致生态缺水状况更为突出。

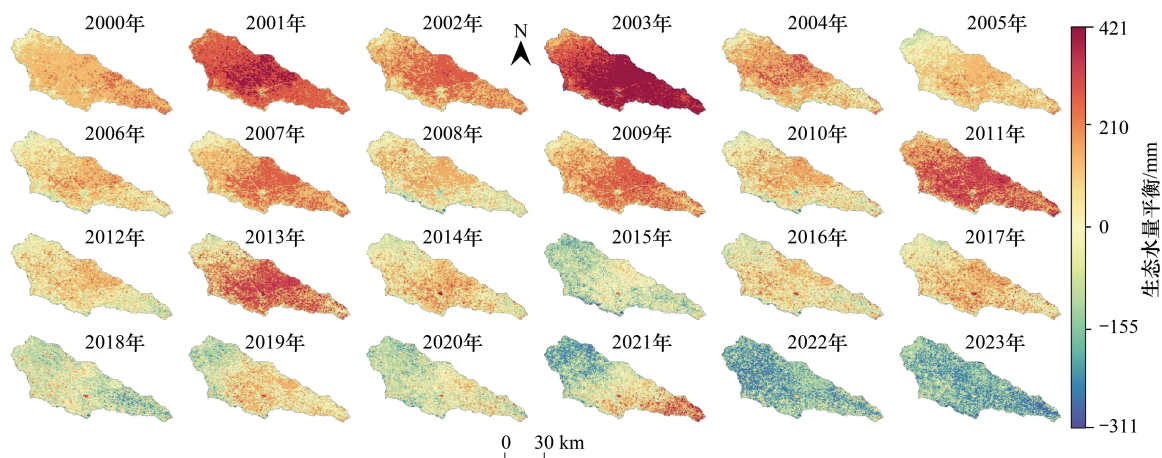


图7 延河流域 2000—2023 年植被生态需水供需平衡状态

Fig.7 Vegetation ecological water demand-supply balance status in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

2000—2023 年延河流域植被生长期(4 月—10 月)生态需水供需平衡状况的分析结果(图 8)显示,流域年际间生态缺水量整体呈上升趋势,且年内变化呈现出“先减后增”的典型阶段性特征。该变化规律反映出生态系统对季节性气候变化的敏感响应,尤其在干旱半干旱区表现尤为明显。具体而言,春季(4 月—6 月)为植被快速生长期初期,土壤水分尚处于较高水平,降水亦呈逐月增加趋势,且蒸腾强度尚未达到高峰,供水能力相对可满足需水需求,生态缺水状况逐步缓解。进入夏季(6 月—8 月),虽然气温升高使蒸腾作用显著增强,但同时降水处于全年高值期,有效补充土壤水分并支撑植被需水,因此生态缺水量降至全年最低水平。秋季(8 月—10 月)则表现出显著的缺水反弹:随着降水量迅速减少、土壤蓄水能力减弱,而植被仍处于需水期后段,水分供需矛盾逐步加剧,生态缺水量呈现快速上升态势。在全年降水量偏低的背景下,生态恢复政策

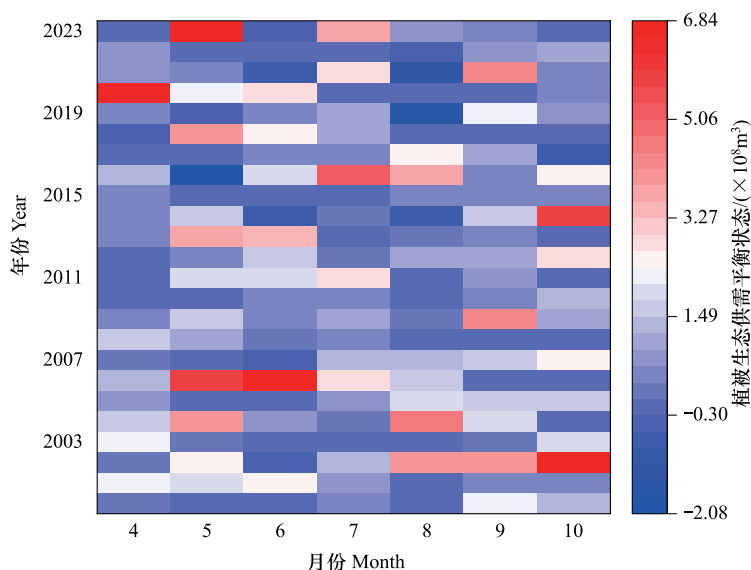


图8 延河流域植被生态缺水总额时间变化

Fig.8 Time variation of total vegetation ecological water shortage in the Yanhe River Basin

(如退耕还林)的持续实施显著推动了植被覆盖度提升,导致生态系统需水需求持续上升,进一步扩大了水分供需缺口。这一趋势表明,在当前区域气候背景和生态恢复措施并行的条件下,生态需水增长对水资源供给能力构成了持续挑战,特别是在气候极端年份更易诱发生态系统水分胁迫风险。

2.2 生活需水量

图 9 整体展示了延河流域在 2000—2023 年间的人口与畜牧业变动及其对生活需水的综合影响。2000—2023 年间,延河流域人口密度呈持续上升趋势,年均增长速率为 $0.39 \text{ 人 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,表明区域人口集聚趋势显著。同期牲畜养殖数量则表现出阶段性波动特征,其中 2006—2013 年间牲畜总量波动幅度较大。按牲畜类型划分,小型牲畜(如羊)整体变化趋势不显著,年均增长速率约为 0.03 万只/a;而大型牲畜(如牛、马等)数量则呈显著下降趋势,年均减少 0.68 万头/a,反映出养殖结构调整与集约化发展趋势。

结合人口密度与牲畜数量数据,并依据陕西省地方标准用水定额,进一步估算了延河流域 2000—2023 年居民生活需水量、牲畜需水量及其合计的总生活需水量。结果显示,居民生活需水量显著上升,年均增长速率达 9.71 万 m^3 ,成为流域生活需水增长的主要驱动力;相比之下,牲畜需水量则受养殖规模波动影响,呈现年均减少 1.3 万 m^3 的趋势。总体来看,流域生活需水总量年均增长速率为 8.41 万 m^3 ,自 2000 年起呈上升趋势,并在 2016 年达到峰值。在 2006—2008 年期间,受牲畜数量下降影响,生活需水总量出现短期回落;而 2016 年后,随着人口密度的趋缓甚至略有下降,生活需水量亦出现小幅回落。总体而言,流域生活需水变化与人口增长和畜牧结构调整密切相关,其中人口因子的主导作用更为显著,牲畜需水对总体变化的影响相对有限。

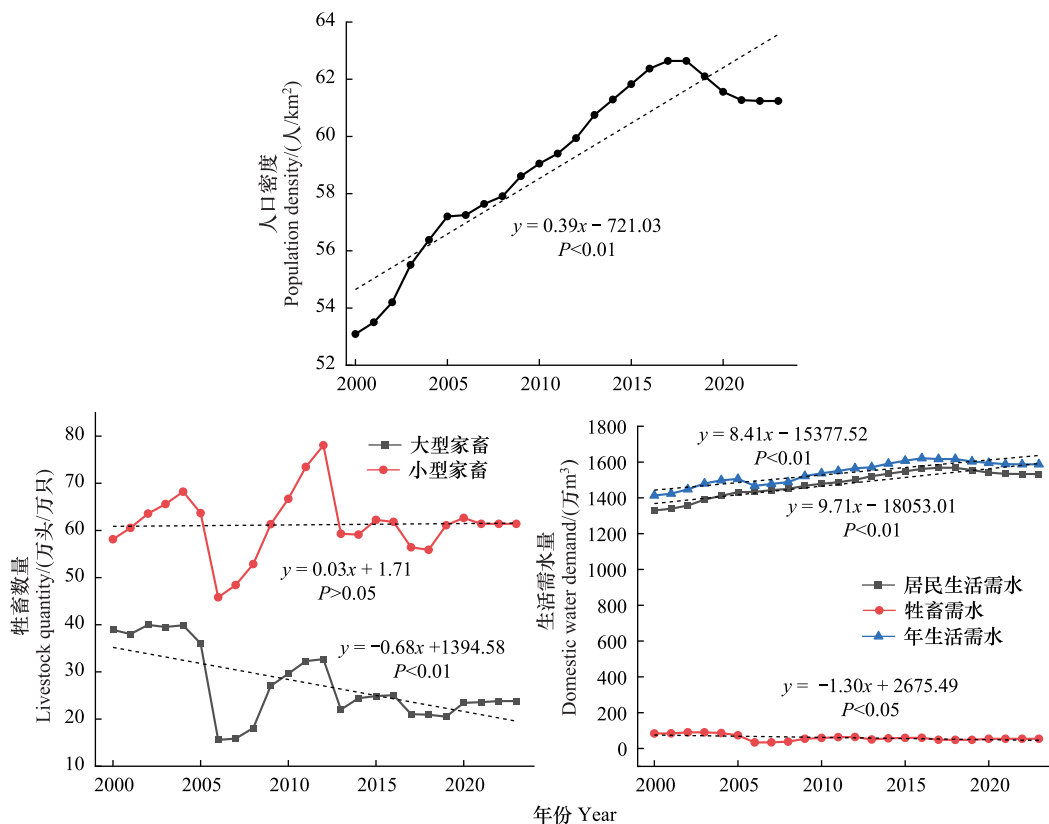


图 9 2000—2023 年延河流域人口密度、牲畜数量和生活需水量时间变化特征

Fig.9 Time variation characteristics of population density, livestock numbers, and domestic water demand in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

2.3 生态与生活需水总量

2000—2023 年,延河流域的需水量呈现显著增加趋势,年均增长率为 $0.73 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ (图 10),体现出区域水资源需求的不断上升。总体趋势之下,年际波动亦较为明显,2002 年、2018 年及 2022 年前后波幅尤为突出,表明短期内气候条件或土地利用变化对需水动态具有重要影响。从组成结构来看,需水量增长主要受生态需水,特别是植被生态需水的显著提升所驱动;而生活需水虽然呈现增长趋势,但其在总量中的占比较小,对整体需水变动的影响有限。随着退耕还林等生态恢复政策的深入推进,草地和林地面积逐年增加,导致生态系统蒸散发量持续上升,成为需水总量增长的核心因素。此外,流域人口密度的稳步上升亦对生活需水产生推力,进一步强化了人类活动对水资源的需求响应。综合来看,延河流域 2000—2023 年需水总量的持续增长反映了生态系统恢复和社会经济发展双重背景下,区域水资源需求格局的深刻变化,也凸显出水资源保障对未来生态与社会协调发展的关键性支撑作用。

3 讨论

延河流域生态与生活需水量的时空变化特征,主要受气候变化、土地利用变迁及水文条件等多重因素驱动^[25]。其中,气候变化是影响生态需水的直接主因^[26–27]。近年来,气温升高导致流域蒸散发增强,尤其在夏秋季节,植被蒸腾作用显著加剧,使生态需水持续上升^[28–29]。与此同时,降水的季节性波动亦显著影响生态需水格局:夏季降水丰沛,有助于缓解水分胁迫;而秋季降水减少,常引发水分供需失衡。这一季节性矛盾在退耕还林等生态恢复政策实施后更趋显著,特别是在流域中部植被扩张显著区域,水分需求上升尤为突出^[30]。

土地利用格局的演变则是生态需水变化的关键人为因素^[31]。自 1999 年起实施的大规模退耕还林工程显著提高了植被覆盖率,改善了生态环境^[32]。然而,新恢复的草地和林地早期阶段需水强度高、水分利用效率相对较低,导致流域生态需水总量显著增加^[33–35]。尽管随着植被逐渐成熟,其水分利用效率有所提升,但由于流域中部植被扩张迅速,加之降水量并无显著增加,区域水资源供需矛盾持续加剧^[36]。再者,降水的时空分布不均与土壤蓄水能力不足等因素叠加,进一步削弱了生态系统的水文调节能力,限制了生态工程的长期稳定效益^[37]。

生态与生活需水之间的相互作用也在不断强化。尽管生态恢复提升了植被覆盖率,但因降水增长有限,区域水资源供需关系出现明显的空间异质性^[38]。流域中部植被恢复带和人口密集区高度重叠,水资源竞争尤为激烈;而在西北部和东南部,生活需水压力虽较低,但受降水偏少、土壤水分保持能力弱等因素影响,生态系统可利用水资源有限,生态缺水问题依然较为突出。此外,不同水文年型间的生态需水差异明显:丰水年中生态系统水分胁迫缓解,枯水年则水量缺口显著扩大,进一步凸显了区域生态系统对气候波动的敏感响应^[39]。因此,针对枯水年份水量缺口显著扩大的特点,可参考“最低生态水量”标准,优先调减高敏感性草地生态系统等区域的生态需水,以保障整体水资源系统稳定;而在丰水年水分胁迫缓解时,则应合理恢复生态供水,以维持生态系统的韧性。这种基于水文年型的差异化管理策略,为生态调度、农业灌溉配水以及流域水资源综合调配提供了更具弹性和科学依据的决策参考。

相较生态需水的主导地位,生活需水在总需水结构中占比较小,且增长趋势更为平稳^[40]。其中,居民生

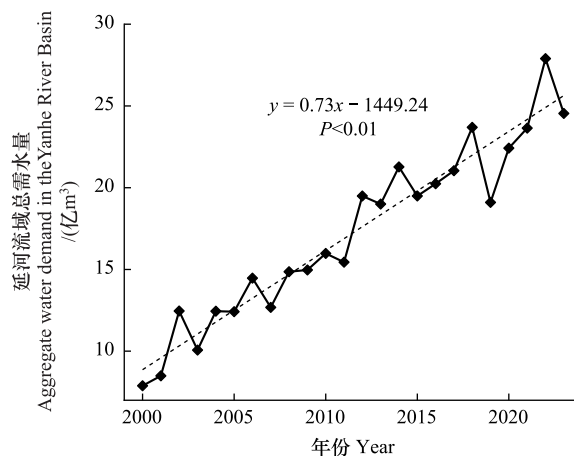


图 10 2000—2023 年延河流域总需水量变化特征

Fig.10 Variation characteristics of total water demand in the Yanhe River Basin from 2000 to 2023

活需水主导生活需水总量(图 9),其增长主要受人口密度推动;而牲畜需水受养殖结构调整影响波动较大,近年来呈下降趋势^[41]。

在现有研究基础上,本研究从生态-生活需水双重视角出发,系统分析了延河流域水资源供需关系。相较于以往聚焦农业水资源与气候变化的研究^[42-43],本研究通过引入年型划分(丰水年、枯水年、平水年),更细致地揭示了年际气候波动对生态需水的调控机制。然而,研究仍存在若干不足。一方面,受限于高精度土地利用时序数据,尚无法准确量化退耕还林背景下农业需水的减少幅度;未来应整合多源遥感及实地调查数据,提升土地利用变化监测能力。另一方面,本研究未覆盖工业需水部分,尽管其总体占比较低(<0.2%),但在局部区域可能形成需水热点,应结合企业用水台账开展补充分析。因此,未来应拓展数据维度,构建生态、农业、工业、生活等多类型需水的协调管理框架,以支撑干旱区水资源高效利用与生态系统可持续恢复。

4 结论

本文基于气象资料、遥感数据和人口密度等多源数据,分析了延河流域植被生态需水和生活需水的时空变化特征,评估了区域水资源供需关系,并探讨了生态恢复政策对流域水资源格局的影响。通过引入丰水年、平水年与枯水年年型划分,研究得出以下主要结论:

(1)2000—2023 年,延河流域作物参考蒸散发量 ET_0 整体呈增长趋势,年均值在 77.54 至 89.92 mm 之间,空间分布上东南部(延长县、宝塔区)增幅较小,西北部(靖边县、志丹县等)增幅显著。土壤水分限制系数(K_s)呈现明显的季节性变化和南高北低的空间格局,冬季最低、夏季最高;植被修正系数(K_c)则因退耕还林(草)生态工程的实施在流域中北部呈显著增加。

(2)生态恢复植被的扩张显著推动了生态需水增长,年均增加速率为 0.73 亿 m^3 ,年生态需水总量在 127—237 亿 m^3 之间。其中草地是生态需水增长的主要贡献类型。生长季(4—10 月)内,生态缺水量表现出“先减少后增加”的变化趋势,反映出降水季节分布对生态需水平衡的主导影响。

(3)生活需水总量呈持续上升趋势,年均增长 8.41 万 m^3 ,主要由人口密度增加驱动。牲畜需水波动较小,整体对生活需水增长贡献有限。生活需水空间上集中于人口密集区域,呈现明显的人为驱动特征。

(4)在植被恢复与人口增长的双重驱动下,延河流域总需水量以年均 0.73 亿 m^3 的速率增长,生态需水占主导地位,成为流域水资源格局演变的核心驱动。从空间分布看,生态需水主要集中于中部植被恢复带,呈现出明显的季节性波动;生活需水则分布于城镇与聚居区,两类需水空间上高度叠加,加剧了局地水资源的竞争压力。

综上所述,生态恢复政策在提升流域植被覆盖、改善生态状况的同时,也显著加剧了生态系统对水资源的需求,尤其在降水时空分布不均、水文承载能力有限的背景下,生态与生活需水的竞争关系日益突出。本研究可为延河流域未来植被类型优化、水资源高效配置及生态恢复路径选择提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] Naeem S, Zhang YQ, Zhang XZ, Tian J, Abbas S, Luo LL, Meresa HK. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. *Science Bulletin*, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [2] Xu H, Yue C, Zhang Y, Liu D, Piao S L. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(41): e2304988120.
- [3] 韩磊, 曹鑫鑫, 朱会利, 陈芮, 赵永华, 刘钊, 赵子林, 常钰卿, 杨梅丽, 高毅丰. 基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素. *生态学报*, 2023, 43(20): 8564-8577.
- [4] Shi P, Li P, Li Z B, Sun J M, Wang D J, Min Z Q. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 107231.
- [5] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 梁康, 白鹏. 黄河近百年径流量变化分析与认识. *人民黄河*, 2019, 41(10): 11-15.
- [6] 周志鹏, 孙文义, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 宋小燕. 2001—2017 年黄土高原实际蒸散发的时空格局. *人民黄河*, 2019, 41(6): 76-80, 84.
- [7] Zhang K X, Pan S M, Zhang W, Xu Y H, Cao L G, Hao Y P, Wang Y. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012. *Quaternary International*, 2015, 380/381: 75-82.

- [8] 汪滨, 张志强. 黄土高原典型流域退耕还林土地利用变化及其合理性评价. 农业工程学报, 2017, 33(7): 235-245, F0004.
- [9] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 刘翠善, 王国庆, 金君良. 关于中国北方水资源问题的再认识. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310.
- [10] 龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238.
- [11] Zhang H, He Q F, Pandey S P, Jiang K, Wang C. Can overgrazing responses be disentangled by above- and below-ground traits? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 573948.
- [12] 李威洋, 史海静, 聂玮廷, 杨鑫源. 基于地表参数变化的延河流域地表温度时空演变分析. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 229-238.
- [13] 宋炳煜, 杨斌. 关于生态用水研究的讨论. 自然资源学报, 2003, 18(5): 617-625.
- [14] 刘苏峡, 莫兴国, 朱永华, 黄浩. 基于水量平衡的流域生态耗水量计算——以海河为例. 自然资源学报, 2004, 19(5): 662-671.
- [15] 闵庆文, 何永涛, 李文华, 李贵才. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算——以泾河流域为例. 生态学报, 2004, 24(10): 2130-2135.
- [16] 储蓓. 干旱区河谷林生态需水与耗水的计算与预测[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [17] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [18] Ritchie J T, Porter C H, Judge J, Jones J W, Suleiman A A. Extension of an existing model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 792-801.
- [19] 胡金虎, 丁建丽, 张子鹏, 王娇, 刘景明. 近 30 年吐鲁番哈密地区植被生态需水估算. 生态学报, 2024, 44(19): 8699-8715.
- [20] 张泽凡, 张学珍. 黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响——基于已发表数据的荟萃分析. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1012-1025.
- [21] Jensen E. *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*. New York: ASCE, 1973.
- [22] Xu Z Q, Zhang N X, Wang R, Yang X, Sun S J, Yan T F. The ecological water demand of different vegetation types in the Bashang area, northwest Hebei Province. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 113-119.
- [23] 周晓东. 基于 GIS 的云南小江流域植被生态需水量时空分布规律[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
- [24] Mao D H, Wang Z M, Luo L, Ren C Y. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 528-536.
- [25] 程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 肖笃宁, 郑春苗, 康绍忠, 延晓冬, 王毅, 安黎哲, 李秀彬, 陈宜瑜, 冷疏影, 王彦辉, 杨大文, 李小雁, 张甘霖, 郑元润, 柳钦火, 邹松兵. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(4): 431-437.
- [26] 张强, 张存杰, 白虎志, 李林, 孙兰东, 刘德祥, 王劲松, 赵红岩. 西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响——总体暖干化, 局部出现暖湿迹象. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7.
- [27] Tietjen B, Jeltsch F, Zehe E, Classen N, Groengroeft A, Schiffrers K, Oldeland J. Effects of climate change on the coupled dynamics of water and vegetation in drylands. *Ecohydrology*, 2010, 3(2): 226-237.
- [28] 张强, 韩兰英, 张立阳, 王劲松. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80-91.
- [29] Zhu Y N, Lin Z H, Wang J H, Zhao Y, He F. Impacts of climate changes on water resources in Yellow River Basin, China. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 687-695.
- [30] 罗宇, 尹殿胜, 穆兴民, 高鹏, 赵广举. 延河流域实际蒸散发时空特征及影响因素分析. 中国水土保持科学: 中英文, 2021, 19(4): 51-59.
- [31] 丰华丽, 王超, 朱光灿. 土地利用变化对流域生态需水的影响分析. 水科学进展, 2002, 13(6): 757-762.
- [32] 张文帅, 王飞, 穆兴民, 李锐, 何毅. 近 25 年延河流域土地利用/覆盖变化的时空特征. 水土保持研究, 2012, 19(5): 148-152, 157.
- [33] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 李静, 梁伟. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.
- [34] 刘强, 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 孙文义, 南岭. 延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 129-135.
- [35] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [36] 孙思琦, 陈永喆, 王聪, 胡庆芳, 吕一河. 华北地区生态保护与恢复的水资源效应研究. 中国工程科学, 2022, 24(5): 97-106.
- [37] 焦峰, 温仲明, 陈云明, 杨勤科, 李锐. 基于 GIS 的安塞县土壤水分制图及其数量分析. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 75-80.
- [38] 刘国彬, 胡维银, 许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价. 自然资源学报, 2003, 18(1): 44-49.
- [39] 熊鹰, 陈斯玄, 喻卓钦, 苏培钧. 浏阳河流域蓝绿水资源变化及其丰枯年响应特征. 经济地理, 2025, 45(3): 150-159.
- [40] 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向. 水利学报, 2002, 33(9): 27-31.
- [41] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
- [42] Cai X M, Zhang X, Noël P H, Shafiee-Jood M. Impacts of climate change on agricultural water management: a review. *WIREs Water*, 2015, 2(5): 439-455.
- [43] Backlund P, Janetos A, Schimel D, editors. *The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity in the United States*. New York: Nova Science, 2009.