

陈姝晗, 何新林, 史金红. 玛纳斯河流域植被生态需水量动态评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 205-215. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.015

CHEN Shuhan, HE Xinlin, SHI Jinhong. Dynamic assessment of vegetation ecological water demand in Manas River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 205-215. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.015

玛纳斯河流域植被生态需水量动态评估

陈姝晗¹, 何新林^{1,2}, 史金红¹

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 寒旱区生态水利工程兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要:【目的】针对西北干旱区内陆河流域生态用水短缺问题, 以玛纳斯河流域为研究区, 评估植被生态需水量的时空动态变化, 揭示自然与人文驱动因子的交互机制, 为区域水资源优化配置提供科学依据。【方法】基于玛纳斯河流域的土地利用数据, 提取植被面积, 利用改进的 Penman-Monteith 模型, 耦合植被系数、土壤水分限制系数, 构建植被生态需水量的计算框架, 并结合地理探测器, 分析气候和人为因素对植被生态需水量的影响。【结果】2000—2020 年植被面积以 $1\,047.9\text{ km}^2/10\text{ a}$ 的速率下降, 植被生态需水量以 $8.88\times 10^4\text{ 万 m}^3/10\text{ a}$ 的速率下降。土地利用是研究区植被生态需水量变化的核心驱动因子, q 值持续稳定在 $0.93\sim 0.96$ 的高水平范围, 其与气候因子存在非线性增强效应。【结论】研究表明, 玛纳斯河流域植被生态需水量的变化主要受土地利用与气候因子的耦合驱动, 草地面积变化主导总需水量趋势, 该结论可为干旱区类似流域的植被生态需水管理提供参考。

关键词: 植被生态需水量; 改进的 Penman-Monteith 模型; 地理探测器; 玛纳斯河流域; 土地利用; 植被面积; 时空分布; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.015

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0205-11



Dynamic assessment of vegetation ecological water demand in Manas River Basin

CHEN Shuhan¹, HE Xinlin^{1,2}, SHI Jinhong¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;

2. Key Laboratory of Cold and Arid Regions Eco-Hydraulic Engineering of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of ecological water shortage in inland river basins within the arid regions of northwestern China, the Manas River Basin is selected as the study area to assess the spatiotemporal dynamic changes of vegetation ecological water demand and to reveal the interaction mechanism of natural and human-driven factors, thereby

收稿日期: 2025-07-25; 修回日期: 2025-10-27; 录用日期: 2025-11-10; 网络出版日期: 2025-12-22

基金项目: 中华人民共和国科学技术部-第三次新疆综合科学考察(2021xjkk0804); 新疆生产建设兵团重点科技攻关计划项目(2021DB012, 2023AB059)

作者简介: 陈姝晗(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: 1902896640@qq.com

通信作者: 何新林(1966—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事干旱区水文水资源、节水灌溉理论与技术、生态水文研究。Email: hexinlin@shzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

providing a scientific basis for the optimal allocation of regional water resources. [Methods] Based on the land use data of the Manas River Basin, the vegetation area was extracted. An improved Penman-Monteith model, coupled with vegetation coefficients and soil moisture limitation coefficients, was employed to construct a calculation framework for vegetation ecological water demand. Combined with the geodetector, the influence of climatic and human factors on vegetation ecological water demand was analyzed. [Results] From 2000 to 2020, the vegetation coverage area decreased at a rate of 1 047.9 km² per decade, and the vegetation ecological water demand declined at a rate of 8.88×10⁸ m³ per decade. Land use was identified as the core driving factor of the changes in the ecological water demand of vegetation in the study area. The *q* value remained consistently stable within a high level ranging from 0.93 to 0.96. A nonlinear enhancement effect was observed between land use and climatic factors. [Conclusion] The study shows that the changes in vegetation ecological water demand in the Manas River Basin are mainly driven by the coupling of land use and climatic factors, and the changes in grassland area dominate the trend of total water demand. The conclusion can provide a reference for the management of vegetation ecological water demand in similar river basins in arid regions.

Keywords: vegetation ecological water demand; improved Penman-Monteith model; geodetector; Manas River Basin; land utilization; vegetation area; spatial and temporal distribution; influencing factors

0 引 言

作为西北干旱区典型的内陆河流域^[1], 玛纳斯河流域独特的山地-绿洲-荒漠复合生态系统对水资源的分配异常敏感^[2]。近年来, 在气候变化与人类社会经济发展的共同作用下, 流域水资源分配格局发生改变, 生态用水与生产生活用水的矛盾逐步显现^[3]。在此背景下, 研究玛纳斯河流域天然植被时空变化格局下的生态需水量, 科学解析植被生态需水量的驱动机制, 对于协调流域生态保护与经济发展至关重要。

植被作为生态系统结构与功能的关键载体, 其正常生长必然消耗一定的水资源, 水资源是生态系统的重要组成部分^[4], 对于维持生态平衡和生物多样性具有至关重要的作用^[5], 特别是干旱区内陆河流域, 水资源稀缺性与生态系统脆弱性的协同作用, 使得植被生态需水研究不仅关乎生物多样性保育, 更直接制约社会可持续性发展^[6]。所以植被生态需水一直是干旱区水资源管理与生态保护领域的核心议题, 更是整个生态系统需水研究的基础^[7]。生态需水理念最早由 GLEICK 等^[8]提出, 强调生态需水量是维持生态系统结构完整、功能健康及生物多样性的最小水资源阈值。在量化方法上, TENNANT^[9]于 1976 年开创性地提出了一种基于历史流量统计的水文学方法, 通过设定年平均流量的固定百分比来推荐河流的生态流量, 为河流生态需水的快速评估与初步管理奠定了实践基础。然而, 在国际生态水文学研究领域, 生态需水的研究范畴存在明显侧重, 现有成果多聚焦于河流生态需水这一核心方向, 而针对植被生态需水等其他非河流型生态系统的需水研究相对较少^[10]。1995

年, 汤奇成^[11]基于新疆地区的实证研究, 系统阐述了生态环境用水的必要性, 并首创性地提出了生态用水的概念。贾宝全等^[12]在明确干旱区生态用水概念的基础上, 通过直接计算法与间接推求模型法确定各类植被的生态用水定额, 为新疆干旱区植被生态需水的研究提供了方法与案例支撑。王化齐等^[13]利用卫星影像获取植被覆盖信息, 基于生态适宜性理论构建模型, 实现了天然植被生态需水量的定量估算。2010 年叶朝霞等^[14]以塔里木河下游为研究区, 通过潜水蒸发法测算出该区域天然植被总生态需水量, 揭示了生长季需水量的季节分布特征, 为深入理解干旱区植被生态需水量的时空变化规律提供了重要的科学依据。但这些方法大多存在一定的局限性。面积配额法需测量植被蒸散量和灌溉量, 主要用于人工植被需水量计算; 水分平衡法未考虑植被的生态特性; 潜水蒸发法适用于干旱区植被生存主要依赖于地下水的情况; 生物量法可用于估算较大区域内的植被生态需水量, 但需要实测数据来校正^[15]; 改进的 Penman-Monteith 方法以植被潜在蒸散量为基础, 结合土壤和植被因素, 具有很好的操作性^[16], 是目前最为常用的方法, 其广泛应用于农田、沙漠、草地、森林等地表覆盖类型, 适用于人工植被与天然植被的生态需水量计算^[17-18]。然而, 现有研究多聚焦于需水量估算本身, 对驱动植被生态需水时空格局形成与演变的多维因子及其交互作用机制的系统解析相对薄弱。深入探究气候及人类活动等关键驱动因子的综合影响, 对于揭示区域生态需水变化的深层动因、预测未来情景下的需水响应、制定更具针对性的水资源优化配置策略至关重要。

在此背景下,本文以玛纳斯河流域为研究区域,针对上述研究的不足,通过改进的 Penman-Monteith 公式构建干旱区内陆河流域植被生态需水的动态评估范式,系统分析 2000—2020 年植被面积与生态需水量的时空变化特征;同时采用地理探测器进行多维度驱动力解析,综合气候、人类活动、地形等 8 类因子,深入解析各因子对植被生态需水的独立影响与交互作用,阐明人类活动对气候效应的非线性放大机制,揭示“自然-人文”耦合驱动是生态需水空间异质性的根源,以期为玛纳斯河流域建立预报、预警系统提供科学依据,缓解区域水资源供需矛盾,促进区域水资源的可持续利用,同时也为我国西北干旱区类似流域的植被生态需水管理提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域(84°42'E—86°33'E, 43°50'N—45°58'N)位于新疆维吾尔自治区北部、准噶尔盆地南缘^[19]。流域内空间分异显著,自北向南依次为荒漠生态区、绿洲农业区及山地水源涵养区。研究区属于典型的温带大陆性气候,冬冷夏热,降水稀缺,蒸发强烈,年均蒸发量为 1 300~2 500 mm^[20]。流域内植被类型丰富多样,形成从高寒草甸、典型草原延伸至温带森林及旱生荒漠植被的连续生态序列。流域内水资源依赖南部山区冰川融雪补给,绿洲农业区(石河子市、沙湾市等)为耗水主体,随着耕地扩张与灌溉需求增长^[21],导致水资源时空分配失衡,生态-生产-生活用水矛盾持续激化。

1.2 数据来源

1.2.1 地理空间数据

归一化植被指数(NDVI)数据源自 MOD13Q1 产品,空间分辨率 30 m,通过 Google Earth Engine (GEE)云端平台调用代码处理生成。土地利用数据采用 YANG 等^[22]基于 Google Earth Engine 平台融合 Landsat 影像发布的中国逐年土地覆盖数据集(CLCD)。CLCD 数据将全国土地覆盖划分为九大类,空间分辨率为 30 m。针对玛纳斯河流域植被生态需水研究需求,将原始分类中的林地、灌木和草地归并为植被覆盖类型,形成适用于干旱区内陆河研究的土地覆被体系。选用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年共 5 期数据,用于分析植被面积变化。高程数据来源于“地理空间数据云”(http://www.gscloud.cn),空间分辨率为 30 m。

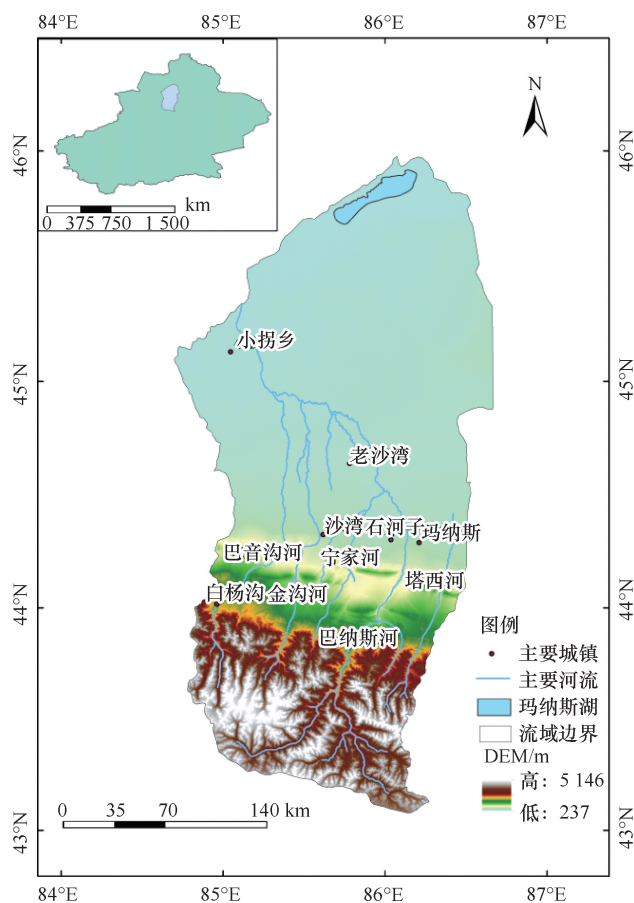


图1 玛纳斯河流域分布

Fig. 1 Distribution map of Manas River Basin

1.2.2 水文气象数据

研究所采用的气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),下载统计了 2000—2020 年每 5 a 共 5 个代表年份的玛纳斯河流域及临近地区的 15 个气象站点的日气象数据。

2 研究方法

2.1 植被面积统计

以玛纳斯河流域边界的矢量数据作为空间掩膜,利用 Arcgis 对研究区进行裁剪,运用分区统计功能按植被类型(草地、林地、灌木)分别计算各像元面积,汇总生成 2000—2020 年 5 期(2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年)植被面积统计表。

2.2 植被生态需水量计算

植被生态需水量指维持特定生态系统结构与功能健康稳定所需消耗的水量。本文采用联合国粮农组织(FAO-56)提出的非标准条件下植被生态需水量计算框架,当植被受土壤水分亏缺、盐碱胁迫或管理条件限制时,实际腾发量偏离标准值^[23],通过引入土壤水分限制系数(K_s)与植被系数(K_c)量化植被蒸腾量,

表达式为

$$ET = K_c \times K_s \times ET_0 \tag{1}$$

式中, ET 为非标准条件下的植被蒸腾量 (mm); K_c 为植被系数; K_s 为土壤水分限制系数; ET_0 为参考作物蒸腾量 (mm)。

考虑不同种类植被覆盖面积 A_p ^[24], 其植被生态需水量 (EWR) 计算公式为

$$EWR = A_p \times K_c \times K_s \times ET_0 \times 10^{-3} \tag{2}$$

式中, EWR 为植被生态需水量 (万 m^3); A_p 为植被覆盖面积 (m^2)。

2.2.1 参考作物蒸腾量

参考作物蒸腾量的计算采用 FAO-56 推荐的修订后的 Penman-Monteith 模型^[25], 使用实测气象数据计算参考作物蒸腾量, 即为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{3}$$

式中, Δ 为饱和水汽压曲线的斜率 (kPa/°C); R_n 为净辐射量 ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G 为土壤热通量 ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); γ 为湿度计常数 (kPa/°C); T 为平均气温 (°C); u_2 为 2 m 高处的平均风速 (m/s); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa)。

2.2.2 植被系数

植被系数受植被种类与生育期动态调控。本研究依据联合国粮农组织 FAO-56 技术文件提出的单作物系数法, 结合玛纳斯河流域植被物候特征, 并参考相关学者研究^[26], 将植被完整生育周期划分为三个阶段: 生长初期 (3—5 月)、生长中期 (6—8 月)、生长末期 (9—11 月)。植被生长初期土壤蒸发为主导因素, 根据土壤湿润频率和 ET_0 参考 FAO-56 的标准确定生长初期系数 $K_{c,ini}$ 。植被生长中期包含植被发育期, 此阶段植被蒸腾达到峰值, 植被生长中期系数 $K_{c,mid}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} K_{c, mid} = K_{c, min} + [K_{c, full} - K_{c, min}] \\ \min[1, 2, f_p, (f_{p, eff})^{\frac{1}{1+h}}] \end{cases} \tag{4}$$

式中, $K_{c,min}$ 为缺少植被情况下的最小植被系数, 取值范围是 0.15 到 0.2; $K_{c,full}$ 为全覆盖条件下的植被系数; f_p 为地表实际覆盖度; $f_{p,eff}$ 为有效植被覆盖度; h 为植被高度 (m)。

植被生长末期系数 $K_{c,end}$ 的计算公式为

$$K_{c, end} = K_{c, end(table)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{5}$$

式中, $K_{c,end(table)}$ 为不同植被的计算初值, 在 FAO-56 中查得; u_2 为 2 m 高处的平均风速 (m/s); RH_{min} 为日最小相对湿度 (%); h 为植被高度 (m)。

2.2.3 土壤水分限制系数

土壤水分限制系数的计算公式^[27]为

$$K_s = \begin{cases} 1, & \theta > \theta_c \\ \frac{\theta - \theta_z}{\theta_c - \theta_z}, & \theta_z \leq \theta \leq \theta_c \\ 0, & \theta < \theta_z \end{cases} \tag{6}$$

式中, θ 为土壤实际含水量 (m^3/m^3); θ_c 为土壤临界含水量 (m^3/m^3), 一般为土壤田间持水量的 70% ~ 80%; θ_z 表示土壤凋萎系数 (m^3/m^3)。

2.3 地理探测器

地理探测器是一种探测空间分异性以及揭示背后驱动因素的统计方法^[28]。本研究采用地理探测器中的因子探测模块和交互作用探测模块。因子探测模块通过 q 值量化单因子对生态需水量的独立贡献率, 以此筛选植被生态需水量的关键驱动因子^[29]。其中, q 值的计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{7}$$

$h = 1, 2, \dots, L,$

式中, L 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和、全区总方差。

交互探测模块通过量化多因子协同作用下植被生态需水量的响应强度变化, 判定其交互作用类型, 揭示因子间的耦合机制^[30]。

表 1 交互探测判断依据和交互结果

Table 1 Interaction detection criteria and interaction results	
交互作用	判断依据
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

基于植被生态需水量计算框架, 并综合考虑区域水资源管理的关键人文要素与自然基底条件, 共选取 8 类驱动因子进行地理探测器分析, 具体包括: 气候因子 (平均气温、降水、日照时数、风速、相对湿度)、人类活动因子 (土地利用、人口密度) 和地形因

子(高程)。

3 结果与分析

3.1 玛纳斯河流域植被面积的时空变化规律

3.1.1 植被面积随时间的变化规律

玛纳斯河流域 2000—2020 年植被面积如表 2 所列。由表可知, 2000—2020 年植被面积整体呈下降趋势。在各种植被类型中, 草地的面积最大, 2000—2005 年草地面积呈小幅增长趋势, 在 2005 年达到最大值, 较 2000 年增长比例约为 1.8 %; 2005—2020 年草地面积呈下降趋势, 2020 年较 2005 年减少 2 808.2 km², 下降比例约为 12.5 %。2000—2020 年林地面积整体呈增加趋势, 在 2020 年林地面积最大。各种植被类型中, 灌木面积占比最小, 2000—2020 年灌木面积整体呈先下降后上升的趋势。

3.1.2 植被面积随空间的变化规律

基于玛纳斯河流域土地利用数据, 统计2000年、

表 2 玛纳斯河流域 2000—2020 年不同植被类型面积

Table 2 Areas of different vegetation types in Manas River Basin (2000—2020)

年 份	草地/km ²	林地/km ²	灌木/km ²	合计/km ²
2000	2. 21×10 ⁴	1 119. 2	0. 028	2. 32×10 ⁴
2005	2. 25×10 ⁴	1 173. 6	0. 012	2. 37×10 ⁴
2010	2. 14×10 ⁴	1 265. 6	0. 006	2. 27×10 ⁴
2015	1. 92×10 ⁴	1 366. 9	0. 008	2. 06×10 ⁴
2020	1. 97×10 ⁴	1 427. 7	0. 314	2. 11×10 ⁴

2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的植被空间分布情况(见图 2)。由图可知, 流域北部荒漠区植被覆盖度整体偏低, 草地主要分布在流域山地与绿洲区过渡带, 林地则优势分布于中低山带, 其空间范围显著小于草地覆盖区。在玛纳斯河流域植被分布中, 灌木面积占比最小。

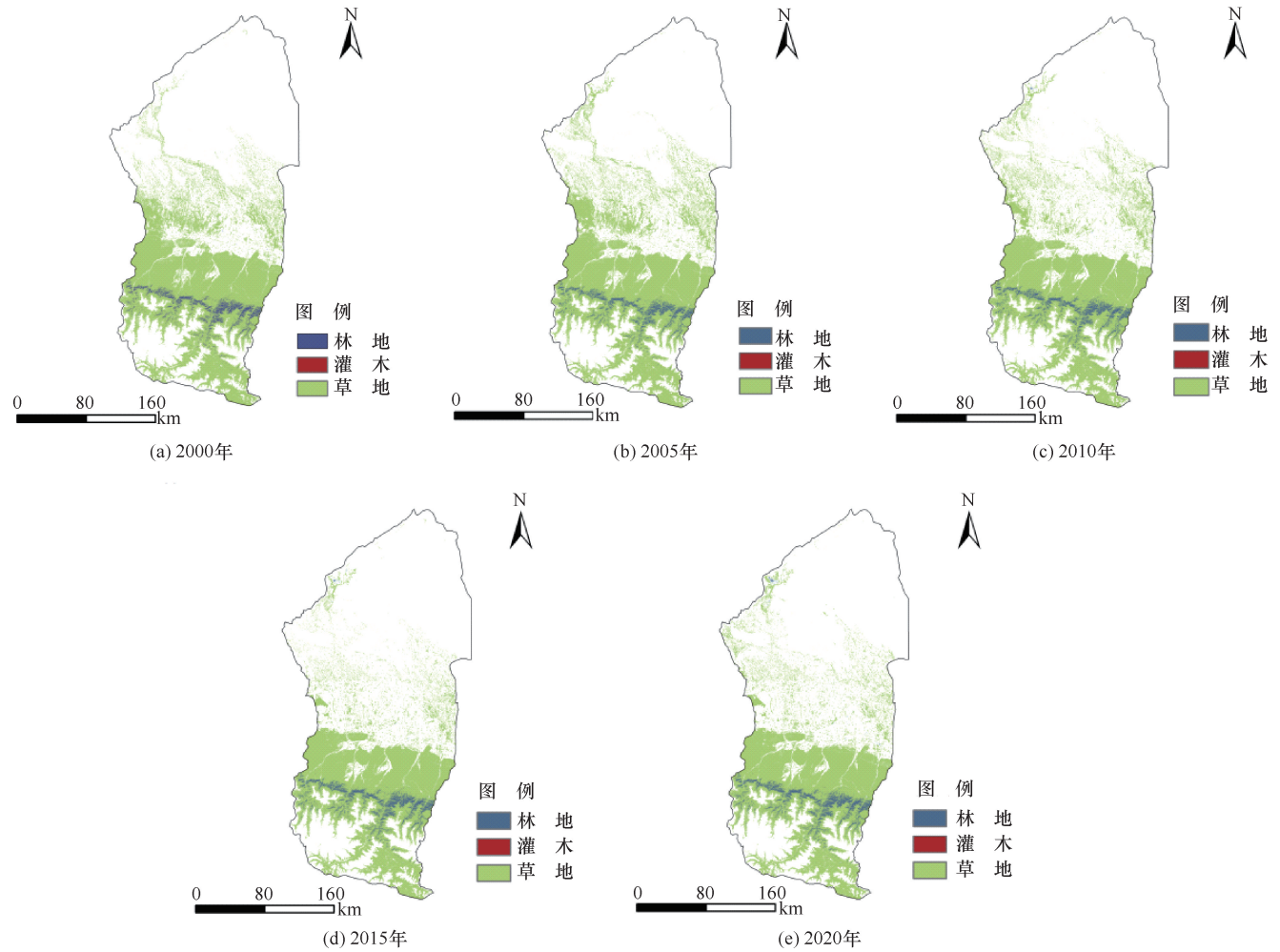


图 2 玛纳斯河流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年植被面积空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of vegetation areas in Manas River Basin in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

3.2 玛纳斯河流域植被生态需水量时空变化特征

3.2.1 植被生态需水量随时间的变化特征

由表 3 可以看出, 2000—2020 年植被生态需水量均先小幅增长再缓慢下降。其中 2000—2005 年植被生态需水量呈上升趋势, 在 2005 年达到最大值, 为 5.40×10^5 万 m^3 ; 2015 年植被生态需水量达到最小值, 为 3.38×10^5 万 m^3 。2000—2020 年, 三种植被类型的生态需水量总体上呈减小趋势, 总生态需水量平均以 8.88×10^4 万 $\text{m}^3/10\text{ a}$ 减少。

表 3 生态需水量统计

Table 3 Statistics of ecological water demand

年 份	草地需水量 /万 m^3	林地需水量 /万 m^3	灌木需水量 /万 m^3	总需水量 /万 m^3
2000	4.86×10^5	3.04×10^4	0.67	5.16×10^5
2005	5.09×10^5	3.12×10^4	0.29	5.40×10^5
2010	4.76×10^5	3.35×10^4	0.15	5.09×10^5
2015	3.06×10^5	3.21×10^4	0.18	3.38×10^5
2020	3.04×10^5	3.46×10^4	7.19	3.39×10^5

在水平年内草地的生态需水量远大于林地和灌木的生态需水量, 约占总植被生态需水量的 92 %。2000—2005 年草地植被生态需水量呈小幅增长趋势, 在 2005 年达到最大值, 为 5.09×10^5 万 m^3 ; 2005—2020 年呈下降趋势, 2020 年的生态需水量为 3.04×10^5 万 m^3 , 约占 2005 年草地需水量的 62.6 %。林地的生态需水量整体上呈上升趋势, 在 2020 年达到最大值为 3.46×10^4 万 m^3 。灌木生态需水量的变化呈现出先下降后上升的趋势, 2010 年灌木的生态需水量达到最低值, 为 0.15 万 m^3 ; 2020 年达到最高值, 为 7.19 万 m^3 。

3.2.2 植被生态需水量随空间的变化特征

运用 arcgis 栅格数据集的镶嵌功能, 计算得到 2000—2020 年玛纳斯河流域植被生态需水空间分布 (见图 3)。结果表明, 玛纳斯河流域植被生态需水量的高值区域分布在中低山带, 这主要是由于该区域林地覆盖集中, 其植被系数较高、蒸散能力较强, 加之山区降水相对充沛、土壤水分条件较好, 共同作用下

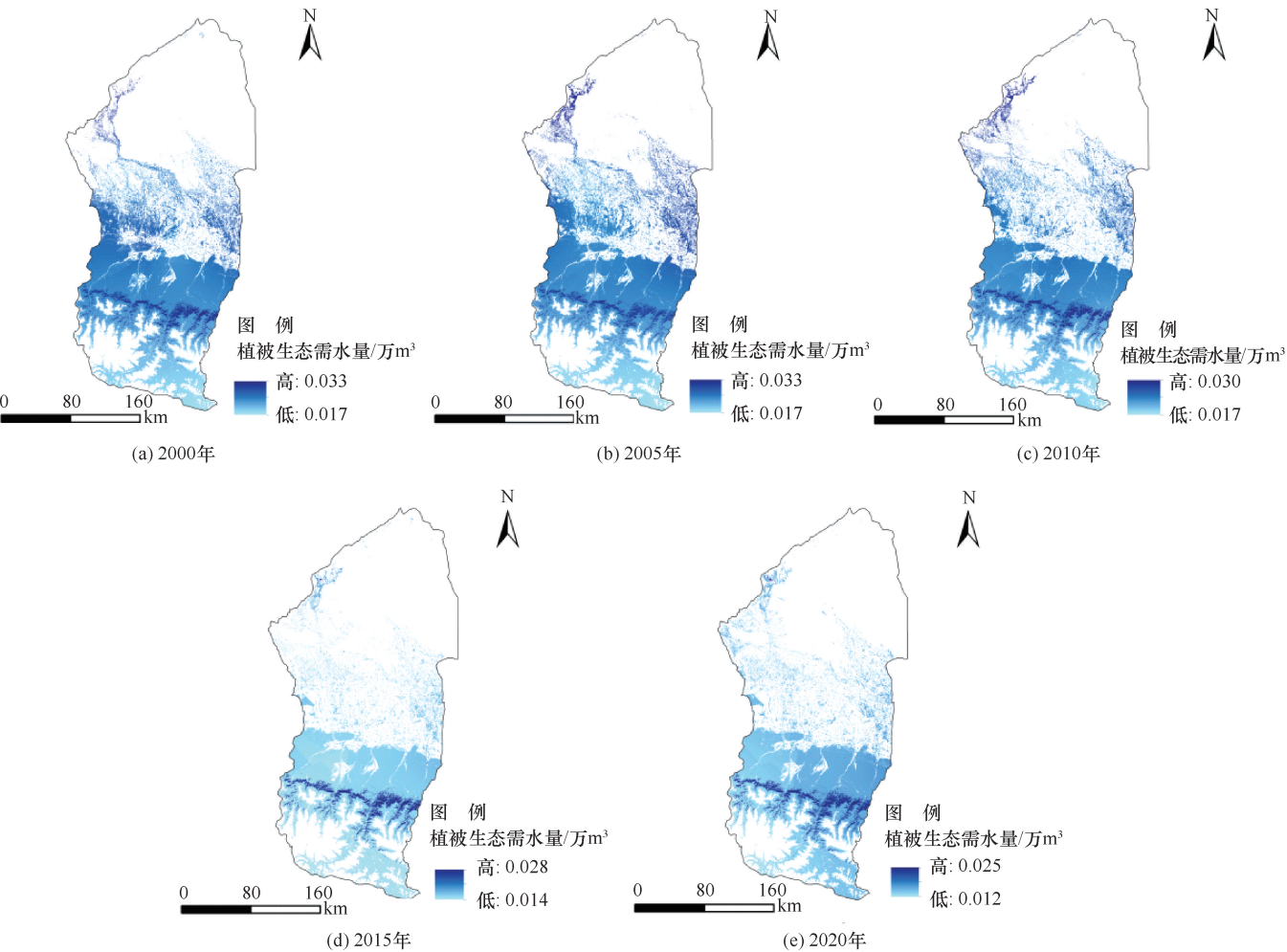


图 3 玛纳斯河流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年植被生态需水量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation ecological water demand in Manas River Basin in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

促使单位面积生态需水量显著高于其他区域。在不同水文年份之间高值区域的差异并不显著,但是在中部绿洲区的低值覆盖区域差异较为明显。此外,在2000—2020年期间,低值区域的分布面积呈现出逐渐减小的趋势。在2015年,植被生态需水量的变化最为明显,除植被面积减少的直接影响外,也与当年气候、土壤含水率较低等环境因素密切相关。

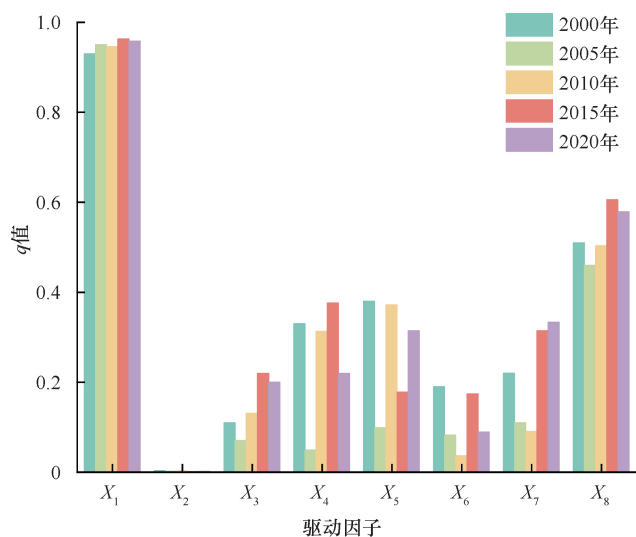
3.3 植被生态需水驱动因素分析

3.3.1 因子探测器结果

因子探测器通过计算 q 值,对玛纳斯河流域植被生态需水量的变化进行单因子解释力分析。 q 值越大,表明该因子对植被生态需水量的解释力越强^[31],所反映的植被生态需水量的空间分异性越强。

因子探测器结果显示(见图4),各因子对植被生态需水量解释力的年际差异,主要源于气候变化和人类活动强度的阶段性波动。具体而言,气象条件的年际变化直接影响气候因子的 q 值大小。例如,干旱年份土壤水分胁迫加剧,使得植被需水对降水的敏感性增强;土地利用因子的 q 值较高并保持相对稳定,反映了土地利用变化作为区域核心要素的持续性影响。2000年,土地利用类型作为关键人文影响因子,其解释力最强, q 值为0.93,高程的解释力仅次于土地利用变化,作为次要驱动因素。2005年,土地利用对植被生态需水量变化的解释力最强,高程解释力仍仅次于土地利用,气候因子对植被生态需水量的影响均呈下降趋势;2010年,人类活动因子、气候因子、地形因子对植被生态需水量的影响与2000年较为接近;2015年,风速与相对湿度对植被生态需水量的影响呈上升趋势,与2010年相比 q 值分别增加0.13、0.22,其他因子的变化趋势较小,与2010年相似;2020年,风速与降水对植被生态需水量的影响呈现下降趋势,日照时数呈上升趋势。较2015年驱动因子的 q 值来看,2020年其他因子的 q 值基本保持稳定。

综合分析表明,土地利用类型是影响玛纳斯河流域植被生态需水量的主要驱动因子,其 q 值介于0.93—0.96之间,表现出显著主导作用;高程作为次要驱动因子,其解释力保持相对稳定。在气候因子中,降水和日照时数对植被生态需水量的解释力最强,但其影响呈现明显的时空异质性,表现为 q 值的波动性特征。这一结果证实,在玛纳斯河流域,人类活动驱动的土地利用变化及地形因素是影响植被生态需水量的关键因子,而气候因子的影响则表现出较强的不确定性。



X₁—土地利用; X₂—人口密度; X₃—平均气温; X₄—降水;
X₅—日照时数; X₆—风速; X₇—相对湿度; X₈—高程

图4 研究区2000年、2005年、2010年、2015年、2020年植被生态需水量各驱动因子探测结果

Fig. 4 Detection results of each driving factor of vegetation ecological water demand in study area in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020

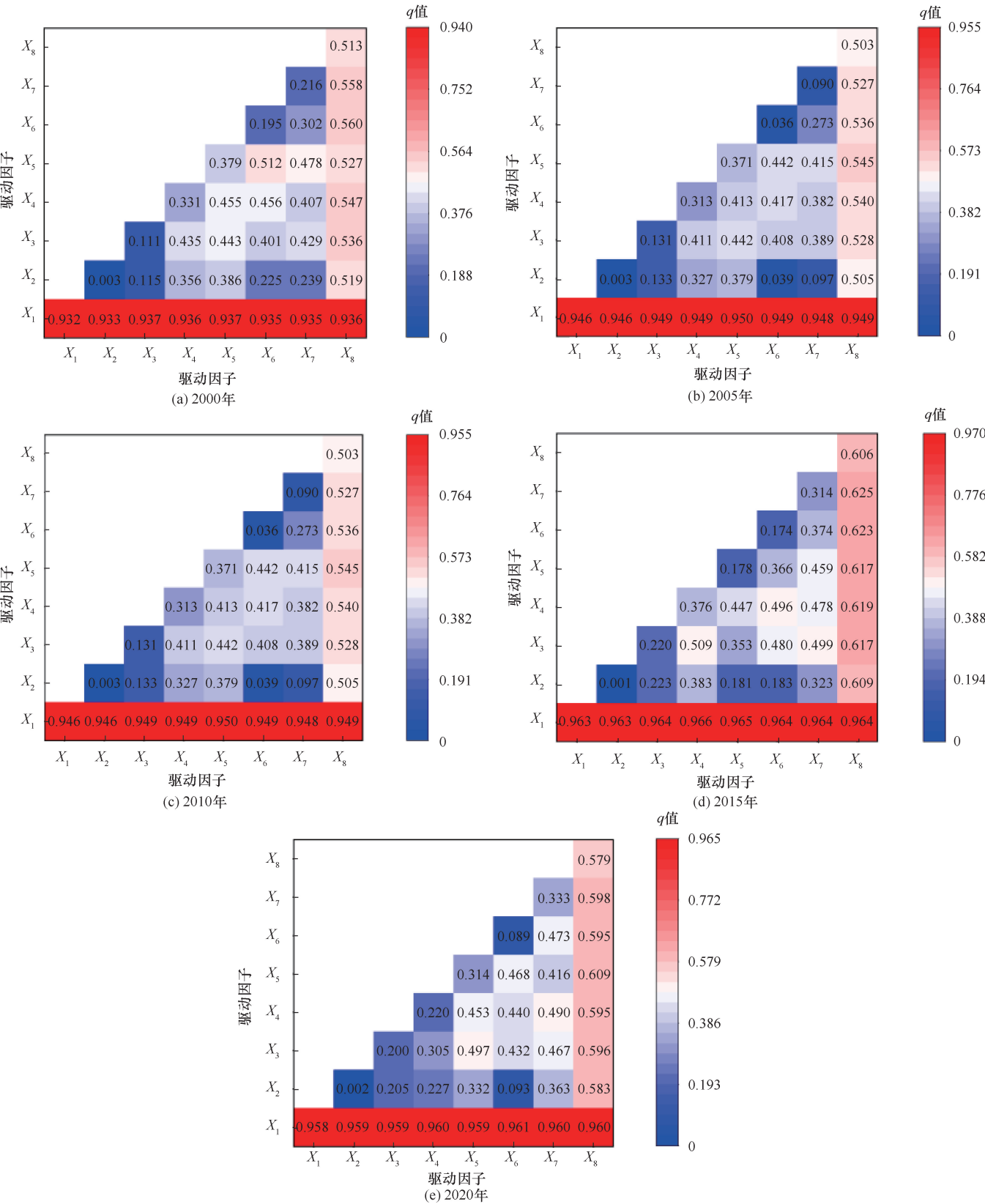
3.3.2 交互探测器结果

基于交互探测器的计算结果(见图5),本研究分析了2000年、2005年、2010年、2015年和2020年各驱动因子对玛纳斯河流域植被生态需水量的交互作用。结果表明,任意两因子交互后的解释力(q 值)均显著高于单一因子的独立影响,表明各驱动因子间存在协同增强效应^[32]。其中,土地利用和高程与其他因子的交互探测值普遍较高,凸显其关键驱动作用。

此外,在2000年、2005年、2010年,土地利用与日照时数的交互作用对植被生态需水量的解释力最强,解释力分别为0.937、0.950、0.950;2015年则是土地利用与降水的交互作用对植被生态需水量的解释力最强,解释力为0.966;而2020年是土地利用与风速的交互作用对植被生态需水量的解释力最强,为0.961。综上所述,人类活动(如土地利用变化)与气候因素(如日照时数、降水、风速)的共同作用成为玛纳斯河流域植被生态需水量变化的突出因素。

4 讨论

植被是生态系统的重要组成部分^[33],其生长需要消耗一定的水资源。在玛纳斯河流域,天然植被多依赖于降水入渗、地下水补给、融雪径流来维持生命活动^[34]。本研究虽未直接模拟土壤水分来源与植



X_1 —土地利用; X_2 —人口密度; X_3 —平均气温; X_4 —降水; X_5 —日照时数; X_6 —风速; X_7 —相对湿度; X_8 —高程

图5 研究区2000年、2005年、2010年、2015年、2020年植被生态需水量各驱动因子交互作用探测结果

Fig.5 Detection results of interaction effects of various driving factors on vegetation ecological water demand in study area in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

被的耦合过程,但通过土壤水分限制系数间接反映了土壤水分胁迫对植被蒸腾的抑制效应,这在一定程度上体现了水分来源变化对生态需水的制约。精确量化植被生态需水量是保障水平衡和促进生态可持续发展的关键。本文基于玛纳斯河流域土地利用数据表明了草地面积总体上呈减少的趋势,张林等^[35]研究表明2001—2020年玛纳斯河流域草地面积呈下降趋势,本研究结论与其保持一致。其本质上是气候波动、土地利用变化与生态政策调整共同驱动的结果。这一现象与王娇娇等^[36]关于玛纳斯河流域土地利用动态变化的研究结论高度一致。其研究表明,2000—2020年草地是面积转出量最大的地类,而耕地则是面积转入量最大的地类,且耕地转入面积占同期所有地类总转入面积的82%。这清晰地显示了农业经济发展导致的耕地扩展与草地面积减少之间存在显著的时空关联。林地持续扩张的格局与吾米提·艾尼瓦尔^[37]对林地变化的研究结论吻合,但灌木的微弱恢复(2020年面积仅 0.314 km^2),凸显出干旱区生态恢复的脆弱性。

研究显示植被生态需水量以 $8.88\times 10^4\text{ 万 m}^3/10\text{ a}$ 的速率下降,草地需水量占比长期维持在92%以上,其面积大幅度减少直接导致总需水量下降,这与姜亮亮等^[38]提出的草地需水量变化主导整个流域生态需水的变化相吻合。草地面积的减少虽是导致生态需水总量下降的主因,但其背后反映的生态空间的萎缩与潜在的退化风险。因此,未来水资源分配需要考虑不同植被类型的生态功能与需水阈值,以保障基本生态安全,但更应基于可用于支撑经济社会发展的水资源总量,寻求生态保护与经济发展的最优平衡点。空间分布上,流域南部的中低山地呈现生态需水量高值区,主要原因在于林地的植被系数(K_e)显著高于其他植被类型,从而提高了其需水定额。这一结果与WANG等^[39]对单位面积植被生态需水量的研究结论相一致。

地理探测器揭示了土地利用变化对植被生态需水量的主导地位。其中,气候因子与土地利用的交互作用呈现阶段性强化特征(如2015年土地利用与降水交互解释力 $q = 0.966$),表明人类活动与气候因子协同调控了自然波动对植被生态需水量的影响。玛纳斯河流域作为天山北坡经济带的生态屏障^[40],其植被生态需水量的动态变化与区域生态安全格局密切相关。本研究通过解析该流域植被生态需水量的变化规律,可为中亚干旱区类似流域制定生态保护策略、实现人地协调可持续发展提供科学依据。

5 结 论

本文基于玛纳斯河流域土地利用数据,系统分析了植被面积的时空变化特征;在此基础上,采用改进的彭曼公式法计算了研究区植被的生态需水量,定量评估了研究区植被生态需水量的时空变化格局;进而,运用地理探测器模型中的因子探测与交互探测方法,深入探究了植被生态需水量变化的主导因素及其相互作用机制。研究结果表明。

(1)玛纳斯河流域2000—2020年植被面积整体呈下降趋势。其中,草地面积呈先增加后减小的趋势,在2005年达到峰值为 $2.25\times 10^4\text{ km}^2$;林地面积呈现缓慢增加的趋势,增长比例约为27.6%;灌木面积波动较其他植被来说相对较小。玛纳斯河流域草地面积占比最大,大多分布在山区与绿洲的过渡带区;林地主要分布在低矮山带;而灌木面积最小,变化也最不显著。

(2)2000—2020年植被生态需水量的波动较大,整体呈下降趋势,其中,植被生态需水量排序为草地>林地>灌木。草地需水量整体上呈先增加后减小的趋势,林地需水量随面积扩大持续增长,灌木需水呈阶段性恢复但需水量较为微弱。空间上,生态需水量高值区与林地分布吻合。

(3)地理探测器模型结果表明:土地利用是植被生态需水量变化的核心驱动力,其 q 值稳定在0.93~0.96的高水平范围,解释力极强。交互探测揭示了人类活动与气候因子的非线性增强效应,进一步表明人类活动与气候变化协同增强了植被生态需水量的空间异质性。

本研究通过改进的Penman-Monteith模型与地理探测器,揭示了玛纳斯河流域植被生态需水量的时空格局及其驱动机制。然而,本研究对植被生态需水驱动机制的解析仍存在一定局限。由于缺乏流域连续地下水动态监测数据,本研究未能量化地下水补给与消耗对植被生态需水量的具体贡献。这一数据缺失导致我们在归因分析中,难以完全判定水分来源变化对单位面积需水量的独立影响,从而在一定程度上削弱了驱动因子份额界定的精准性。未来研究将利用地下水观测数据,进一步将地下水因子纳入地理探测器分析框架,从而更精确地解析水分来源与土地利用对生态需水变化的独立与交互作用,提升玛纳斯河流域生态需水归因分析的严谨性。

参考文献(References):

- [1] ZHANG J X, ZHU B Q. Chemical weathering in Manas River Basin;

- Driven by sulfuric acid or carbonic acid[J]. *Acta Geochimica*, 2025, 44(1): 59-85.
- [2] 王帝盟, 尹小君, 王娇娇, 等. 玛纳斯河流域生态系统健康时空演变及归因分析[J]. *地理研究*, 2025, 44(2): 515-537.
WANG D M, YIN X J, WANG J J, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces of ecosystem health in the mountain-basin system on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. *Geographical Research*, 2025, 44(2): 515-537.
- [3] HUANG M T, MU Z X, ZHAO S K, et al. Ecological water requirement of natural vegetation in the Tarim River Basin based on multi-source data[J]. *Sustainability*, 2024, 16(16): 7034.
- [4] ZHANG G Q, CHENG Y T, LIU H D, et al. Evaluation of the groundwater ecological water requirement in the southeast margin of Otindag Sandy Land based on allowable groundwater depth drawdown [J]. *Water*, 2023, 15(19): 3504.
- [5] QIU M T, JIANG S H, GUO J Y, et al. Spatiotemporal pattern of terrestrial ecological drought based on ecological water deficit in the Yellow River Basin[J]. *Hydrology Research*, 2025, 56(11): 1182-1204.
- [6] QI Z, XI L, CUI M C, et al. Optimization of forest and grass vegetation distribution in the Aksu River Basin by water resources carrying capacity[J]. *Water*, 2024, 16(3): 389.
- [7] 王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等. 中国西北地区生态需水研究(1): 干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 1-8.
WANG F, LIANG R J, YANG X L, et al. A study of ecological water requirements in northwest China I: Theoretical analysis[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 1-8.
- [8] GLEICK P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
- [9] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [10] 李志军, 龙爱华. 基于天然植被时空格局变化的干旱内陆河平原绿洲区合理生态需水研究: 以和田河为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2025, 36(4): 70-76.
LI Z J, LONG A H. Reasonable ecological water demand in arid inland river plain oasis based on spatial and temporal pattern change of natural vegetation: A case study of the Hotan River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2025, 36(4): 70-76.
- [11] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用[J]. *干旱区资源与环境*, 1995, 9(3): 107-112.
TANG Q C. The development in oases and rational use of water resources[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1995(3): 107-112.
- [12] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 243-250.
JIA B Q, CI L J. The primary estimation of water demand by the eco environment in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 243-250.
- [13] 王化齐, 董增川, 权锦, 等. 石羊河流域天然植被生态需水量计算[J]. *水电能源科学*, 2009, 27(1): 51-53.
WANG H Q, DONG Z C, QUAN J, et al. Calculation of ecological water requirement of natural vegetation in Shiyang River Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(1): 51-53.
- [14] YE Z X, CHEN Y N, LI W H. Ecological water demand of natural vegetation in the lower Tarim River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 261-272.
- [15] 张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 307-312.
ZHANG L, LI L J, LIANG L Q, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 307-312.
- [16] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6282-6291.
HU G L, ZHAO W Z. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6282-6291.
- [17] 王改玲, 王青杵, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(10): 1743-1753.
WANG G L, WANG Q C, SHI S X. Vegetation's ecological water requirement in Yongding River watershed in Shanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(10): 1743-1753.
- [18] ZHANG Y, YANG S T, OUYANG W, et al. Applying multi-source remote sensing data on estimating ecological water requirement of grassland in ungauged region[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 953-963.
- [19] WANG J J, YIN X J, LIU S N, et al. Spatiotemporal change and prediction of land use in Manasi region based on deep learning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(34): 82780-82794.
- [20] TU J M, QIAO C L. Simulation and parameter law of HEC-HMS for multi-source flood in arid region based on three-dimensional classification criteria: A case study of Manas River Basin[J]. *Water*, 2025, 17(20): 2952.
- [21] 高喆, 冶建明. 玛纳斯河流域土地利用转型生态环境效应及分异机制: 基于“三生”空间主导功能判别视角[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(11): 1947-1956.
GAO Z, YE J M. Eco-environmental effects and differentiation mechanism of land use transition in Manas River Basin: A perspective based on the dominant function of “production-living-ecological” spaces[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(11): 1947-1956.
- [22] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [23] 张远发. 土地格局演变下的赣抚平原灌区植被生态需水量时空分异研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
ZHANG Y F. Spatial and Temporal Variability of Ecological Water Demand of Vegetation in the Irrigation Area of Ganfu Plain under the Evolution of Land Pattern [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [24] 孙栋元, 杨俊, 胡想全, 等. 基于生态保护目标的疏勒河中游绿洲生态环境需水研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 1008-1020.

- SUN D Y, YANG J, HU X Q, et al. Study on eco-environmental water requirement in the middle-reach oasis of Shulehe River Basin based on ecological protection target [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 1008-1020.
- [25] 刘钰, L. S. Pereira. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证 [J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 26-30.
- LIU Y, L S PEREIRA. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(5): 26-30.
- [26] 张维克. 玛纳斯河流域生态需水特征及生态水资源优化配置研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2024.
- ZHANG W K. Study on the Characteristics of Ecological Water Demand and Optimal Allocation of Ecological Water Resources in Manas River Basin[D]. Shihezi: Shihezi University, 2024.
- [27] 魏怡敏, 李金燕, 苏荟琰, 等. 宁夏清水河流域植被生态需水时空分布规律研究[J]. *水利规划与设计*, 2023(6): 105-111.
- WEI Y M, LI J Y, SU H Y, et al. Study on the spatiotemporal distribution of vegetation ecological water demand in Qingshuihe River Basin of Ningxia[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2023(6): 105-111.
- [28] LI X, JIAN Y T, CUI G N, et al. Analysis of pollution characteristics and identification of driving factors in soils at a typical petroleum refinery [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2025, 116(1): 1.
- [29] 李松波, 高家骥, 田深圳, 等. 中国地级市 $PM_{2.5}$ 时空分异及影响因素分析[J]. *环境保护科学*, 2022, 48(1): 126-134.
- LI S B, GAO J J, TIAN S Z, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of $PM_{2.5}$ of prefecture-level cities in China [J]. *Environmental Protection Science*, 2022, 48(1): 126-134.
- [30] 刘东海, 姚婷, 郭浪, 等. 基于指数熵权模型和地理探测器的滑坡主控因子分析: 以重庆市南川区为例 [J]. *自然灾害学报*, 2025, 34(5): 81-93.
- LIU D H, YAO T, GUO L, et al. Analysis of main controlling factors of landslides based on exponential entropy weight model and geodetector: A case study of Nanchuan District, Chongqing City[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2025, 34(5): 81-93.
- [31] 谢贤健, 吴汉, 许斌, 等. 基于灰色关联度模型和地理探测器的滑坡因子筛选及易发性评价[J]. *高校地质学报*, 2025, 31(5): 535-551.
- XIE X J, WU H, XU B, et al. Slope factor screening and susceptibility assessment based on the grey relational degree model and geographic detector[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2025, 31(5): 535-551.
- [32] 李晓航, 龚建周, 陈康林, 等. 珠三角城市群景观破碎化对生态系统服务的地理探测[J]. *生态科学*, 2025, 44(5): 13-24.
- LI X H, GONG J Z, CHEN K L, et al. Geographic detection of landscape fragmentation on ecosystem services in the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Ecological Science*, 2025, 44(5): 13-24.
- [33] LIU Y, WANG C Y, WANG E H, et al. Trends and controlling factors of vegetation change in different regions of China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2025, 35(6): 1269-1282.
- [34] 孔晶晶, 咎梅, 王雪梅, 等. 新疆玛纳斯河流域植被水分利用效率时空格局及影响因素研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 196-203.
- KONG J J, ZAN M, WANG X M, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Manas River Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 196-203.
- [35] 张林, 马松梅, 张云玲, 等. 玛纳斯河流域草地覆盖度动态变化及影响因素研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(6): 737-746.
- ZHANG L, MA S M, ZHANG Y L, et al. Study on dynamic change and influencing factors of grassland coverage in Manas River Basin [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2023, 41(6): 737-746.
- [36] 王娇娇, 尹小君, 刘陕南, 等. 基于深度学习的玛纳斯土地利用时空格局变化与预测[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(1): 69-77.
- WANG J J, YIN X J, LIU S N, et al. Study on the change and prediction of spatiotemporal pattern of land use in Manasi region based on deep learning[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(1): 69-77.
- [37] 吾米提·艾尼瓦尔. 气候和土地利用变化下玛纳斯河流域产水量的变化研究[J]. *地下水*, 2023, 45(1): 206-207.
- WUMITI · AINIWAER. Study on the changes in water yield in the Manas River Basin under climate and land use changes [J]. *Groundwater*, 2023, 45(1): 206-207.
- [38] 姜亮亮, 包安明, 刘海隆, 等. 玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 143-149.
- JIANG L L, BAO A M, LIU H L, et al. Study on the reponses relationship between ecological water requirement and landscape pattern in manas river basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 143-149.
- [39] WANG R R, ZAYIT A, HE X M, et al. Ecological water requirement of vegetation and water stress assessment in the middle reaches of the Keriya River Basin[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4638.
- [40] XIAO R M, DONG X B, WANG X C, et al. Spatial association and trade-off/synergy relationships between ecosystem health and human well-being: A case study of the Manas River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 178: 114060.

(责任编辑 王海锋)