

# 跨流域调水对石羊河流域非地带性植被的影响

李 星<sup>1</sup>,汪 勇<sup>1</sup>,赵 勇<sup>1</sup>,何 凡<sup>1</sup>,翟家齐<sup>1</sup>,李嘉欣<sup>1</sup>,闫 龙<sup>1</sup>,  
刘 源<sup>1</sup>,胡雅杰<sup>2</sup>,陈敏建<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室; 2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司)

**摘要:**结合野外调查数据、无人机影像和遥感影像等多源数据,采用融合监督分类方法提取植被信息,定量解析跨流域调水前后石羊河流域非地带性植被空间分布的变化特征及影响因素。结果表明:调水后青土湖地下水埋深平均抬升 1. 1 m,水面面积增加 26. 7 km<sup>2</sup>,蔡旗断面年径流量从 2000 年的 0. 95 亿 m<sup>3</sup> 增至 2020 年的 2. 87 亿 m<sup>3</sup>;地下水埋深是决定尾间白刺种群空间分布的关键因子,地下水恢复后,白刺群落密度与斑块覆盖率显著提升,空间异质性加剧;河道径流及距河岸距离共同决定了河岸带植被的分布形态,随着距河道距离的增加,归一化植被指数(NDVI)从 0. 227 下降至 0. 131,呈显著递减趋势,地下水埋深从 5. 1 m 增加至 16 m,呈显著递增趋势;调水后,距河岸小于 2000 m 的区域 NDVI 值增长幅度显著高于远离河岸区域,距离河岸 2000 m 是径流补给地下水强度及 NDVI 发生显著变化的关键拐点。

**关键词:**调水工程;非地带性植被;水分变化;空间分布;石羊河流域

**Impacts of inter-basin water transfer on azoic vegetation in Shiyang River Basin**//Li Xing<sup>1</sup>, Wang Yong<sup>1</sup>, Zhao Yong<sup>1</sup>, He Fan<sup>1</sup>, Zhai Jiaqi<sup>1</sup>, Li Jiaxin<sup>1</sup>, Yan Long<sup>1</sup>, Liu Yuan<sup>1</sup>, Hu Yajie<sup>2</sup>, Chen Minjian<sup>1</sup>(1. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research*; 2. *Power China Beijing Engineering Corporation Limited*)

**Abstract:** Taking the Shiyang River Basin as study area, this study integrated multi-source data including field surveys, unmanned aerial vehicle(UAV) imagery and remote sensing data, and adopted a fused supervised classification method to extract vegetation information. It quantitatively analyzed the spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of azonal vegetation distribution before and after the inter-basin water transfer project. The results show that after water diversion, the average groundwater depth in Qingtu Lake increased by 1. 1 m, and the water surface area increased by 26. 7 km<sup>2</sup>. The annual runoff at the Caiqi Section increased from 95 million m<sup>3</sup> in 2000 to 287 million m<sup>3</sup> in 2020. Groundwater depth was identified as the key factor determining the spatial distribution of *Nitraria tangutorum* populations in the terminal lake area. Following groundwater recovery, both the community density and patch coverage of *Nitraria tangutorum* increased significantly, accompanied by intensified spatial heterogeneity. River runoff and distance from the river channel jointly determined the distribution pattern of riparian vegetation. With increasing distance from the river, the normalized difference vegetation index(NDVI) decreased significantly from 0. 227 to 0. 131, while groundwater depth increased notably from 5. 1 m to 16 m. After water diversion, the NDVI growth rate in areas within 2 000 m from the riverbank was significantly higher than that in areas farther away, indicating that 2000 m from the river represents a critical threshold for significant changes in groundwater recharge intensity from runoff and corresponding NDVI variations. This study reveals the quantitative impacts of inter-basin water transfer on the spatial distribution of azonal vegetation communities in arid regions.

**Key words:** water diversion project; azonal vegetation; moisture variation; spatial distribution; the Shiyang River Basin

干旱区内陆河流域的植被空间分布特征是水文与生态相互作用的结果,深刻反映了水资源胁迫下植被的生存策略<sup>[1]</sup>。干旱区植被空间分布特征受多种因素影响,其中水分条件被认为是决定性要素<sup>[2-3]</sup>。生态水文过程控制着植被的生长与分布<sup>[4-6]</sup>,进而影响植被演替和荒漠化进程,驱动干旱

基金项目:国家自然科学基金项目(52025093);国家重点研发计划项目(2021YFC3200200)  
作者简介:李星(1995—),男,博士研究生,主要从事干旱区生态水文研究。E-mail:lixing@edu.iwhr.com  
通信作者:汪勇(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事干旱区生态水文研究。E-mail:wangyong@iwhr.com

区生态与环境变化。水分条件的变化,不仅直接影响植被的生长发育,还会造成区域植被类型、种类、分布间距、密度等呈差异性分布<sup>[7]</sup>。干旱区水分条件的分布存在显著的空间异质性<sup>[8]</sup>,造成植物空间分布模式具有明显的区域特征。近年来,随着国家水网工程的推进,西北干旱区作为主要受水区,调水工程显著改变了流域水分再分配过程<sup>[9-10]</sup>,同时对流域植被空间分布特征产生了显著影响<sup>[11-12]</sup>。因此,探究调水前后流域水分条件对植被空间分布特征的影响机制,对揭示干旱地区植被分布的生态规律具有重要意义。

干旱区非地带性植被主要包括河岸带植被和尾间植被,其分布主要受径流、地下水等非地带性水分条件影响,而调水工程对河道径流与区域地下水位的影响最为直接<sup>[13]</sup>。河岸带是陆生与水生生态系统的联系通道,对维持干旱区生态稳定发挥着重要作用<sup>[14]</sup>。河岸带植被呈现绿洲-过渡带-荒漠的圈层结构分布,内在驱动要素为水分的差异。径流不直接作用于河岸带植被,而是通过补给地下水的强弱过程驱动其变化<sup>[15-16]</sup>。尾间植被呈点阵式分布特征,分布类型通常表现为均匀分布、聚集分布与随机分布<sup>[17]</sup>。目前,关于水分与植被空间分布特征的研究多集中在流域大尺度植被生态变化,通过遥感影像分析流域归一化植被指数(NDVI)、归一化水体指数(NDWI)等遥感指数<sup>[18-20]</sup>,解析流域植被生态的时空变化特征;也有学者将植被指数与降水、温度等

气象因子及人类活动相结合,分析植被生态变化的驱动因素<sup>[21-22]</sup>;针对干旱区单一植被类型或单株植被水分利用特征的研究也较为普遍<sup>[23-24]</sup>。现有研究多关注大尺度的生态水文效应,研究方法偏重于统计分析,而针对水分再分配对非地带性植被群落特征的影响机制及定量刻画等研究仍存在不足。

本文以与径流、地下水等水文要素密切相关的非地带性植被为研究对象,利用最新多尺度遥感技术,精细化提取典型区植被群落空间分布特征,解析调水工程对流域水文过程的影响,构建水分变化与非地带性植被空间分布形态的量化关系,揭示干旱区非地带性植被独特空间分布的水分驱动机制,定量刻画植被空间分布特征,为流域生态恢复与水资源可持续管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与样地选取

### 1.1 研究区概况

石羊河流域(36°29'N ~ 39°27'N, 101°41'E ~ 104°16'E)位于中国西北部甘肃省中部。石羊河为我国第三大内陆河,发源于祁连山脉,最终注入青土湖,属于国家“两屏三带”重点生态功能区的北方防沙带;流域荒漠化率高达 88%,生态环境恶化严重,调水工程集中。研究区概况如图 1(a)所示。

受地形差异影响,石羊河流域呈典型的半干旱-干旱气候特征<sup>[25]</sup>。其中流域中下游平原区多年平均降水量较低,中游为 277.2 mm,下游仅 98.4 mm;

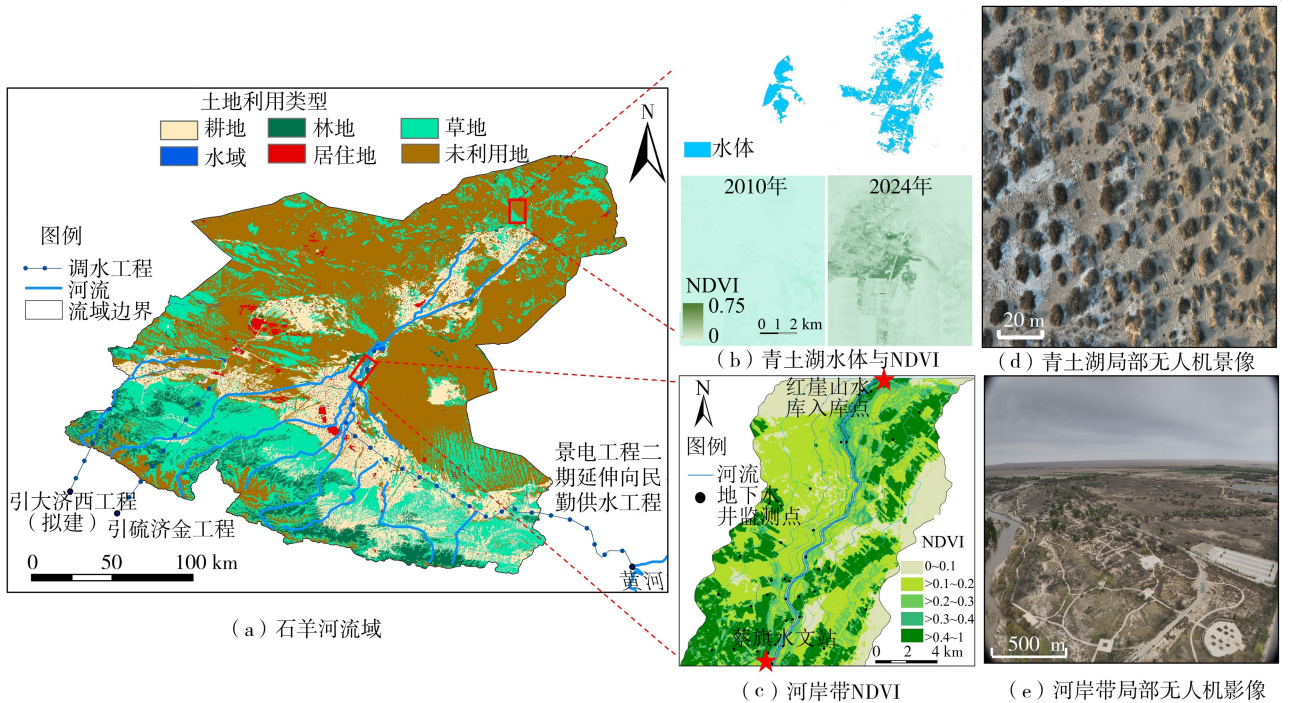


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

青土湖流域降水尤为稀少,年降水量仅 50 mm,年蒸发量却高达 2 600 mm。21 世纪初,由于生态环境恶化,国家启动石羊河流域生态修复治理工程,跨流域调水工程作为重要的人工修复措施,有效遏制了生态恶化的趋势。2010 年实施生态补水后,青土湖水面面积与植被 NDVI 均得到显著恢复(图 1(b)(c))。

石羊河流域中游具有显著的河岸带植被空间分布特征(图 1(e))。河岸带植被是干旱区普遍存在的植被分布类型,其主要特征是随着与河道距离的增加,河道对地下水的补给作用减弱,地下水埋深不断增加,导致植被覆盖度与植被类型发生变化。而青土湖流域的白刺以灌丛沙包形态广泛分布于干旱区不同区域(图 1(d)),该沙包形态在遥感影像上呈点状分布,故被定义为点阵式分布。本文以青土湖优势物种白刺群落和蔡旗断面至红崖山水库间的河岸带植被为典型研究对象,探究调水工程对流域非地带性植被的影响。

### 1.2 样地选取

点阵式白刺植被样地选于石羊河流域青土湖附近(39°8′N, 103°38′E),样地面积为 0.215 km<sup>2</sup>(430 m×500 m),在该样地布设监测点,用于分析 2010 年(监测点 1)与 2024 年(监测点 2)白刺的空间分布特征。河岸带植被样地选于石羊河流域中游,自蔡旗断面(38°13′N, 102°46′E)至红崖山水库(38°23′N, 102°50′E),河段总长 25 km。依据与河道的距离,分别以 100、500、1 000、2 000、4 000、6 000 m 作为边界,分析距河道不同距离处的植被生态状况。

### 1.3 数据来源

a. NDVI 和 NDWI 数据集来自美国国家航空航天局数据库(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)。

b. 土地利用数据来自中国遥感数据中心发布的 1990—2020 年土地利用/覆盖变化(land-use and land-cover change, LUCC)数据,空间分辨率为 30 m,包括耕地、林地、草地、水域、居住地和未利用地六大类。LUCC 数据有助于区分人工植被和自然植被(<http://www.resdc.cn>)。

c. 气象数据为中国气象局国家气象信息中心提供的日降水量和温度数据(<http://data.cma.cn>),对原始气象数据中存在的日尺度缺失值采用线性插值法处理。

d. 地下水监测数据主要来源于《中国地质环境监测地下水位年鉴》和地区监测站的长期观测记录,辅以实地调查数据。

## 2 研究方法

### 2.1 影像分割与参数优化

采用野外调查数据、无人机影像和遥感影像多源数据融合的方法提取植被信息,即通过解译高分辨率遥感影像获取历史数据,利用无人机实地拍摄获取现状年数据,同时进行野外实地调查进行验证。运用多尺度分割算法,对解译后的遥感影像和无人机影像进行对象化处理,关键参数设置如下:①波段权重。鉴于红(R)、绿(G)、蓝(B)3 种波段在可见光谱中具有相似的重要性,将 R、G、B 波段权重比设为 1:1:1。②分割尺度。综合考虑分类精度、植被形态学特征、分割密度、计算效率等评价指标,经反复试验优化,确定尺度参数为 20。③均质性准则。基于郝梦宇等<sup>[26]</sup>的研究与实际应用需求,由色彩因子(0.9)和形状因子(0.1)组成,其中形状因子进一步分解为光滑度(0.7)与紧密度(0.3)。上述参数组合在 eCognition 9.0 软件中实现,有效平衡了白刺灌丛沙包边缘特征的精确提取与斑块空间分布的合理性。分割生成的矢量图经地理坐标系配准(WGS84)与几何校正后,提取各斑块的面积和空间坐标。数据经格式转换后导入 R 语言平台(v3.5.3),使用 spatstat 包、ggplot2 包、sf 包等函数包,通过绘制点特征分布图和成对相关函数曲线,量化白刺灌丛沙包的分布模式。

### 2.2 监督分类与精度验证

监督分类法因操作简便、计算效率高,且可有效整合先验知识,在遥感地物分类领域应用广泛<sup>[27]</sup>。本文针对点阵式白刺植被样地区域内白刺、裸地及水体等地物类型开展分类提取,基于 eCognition 9.0 软件平台完成白刺灌丛沙包植被分布图的监督分类制图。

为定量评估分类结果的准确性,选取 Kappa 系数作为评价指标<sup>[28]</sup>,计算步骤为:①验证样本采集。按照约 10 个/万 m<sup>2</sup> 的密度,在两个监测点范围内随机生成 229 个验证点,通过高分辨率影像解译和野外实地调查获取各验证点的真实地物类型。②混淆矩阵构建。对比验证点的真实类别与监督分类结果,构建混淆矩阵。③Kappa 系数计算。基于混淆矩阵,综合各类别正确分类的像元数量、各类别对应列与行的验证样本像元总数,以及总体验证样本像元数,计算得到 Kappa 系数。

### 2.3 植被点格局分析

采用空间点格局分析法量化白刺灌丛沙包的空间分布特征,基于 Ripley's K 函数的空间分析原理,首先计算不同空间尺度 K(r) 函数值<sup>[29]</sup>,r 为空间距离尺度。为了克服 K(r) 函数的尺度累积效应,进

一步采用其微分形式,即成对相关函数  $g(r)^{[30]}$  开展分析。

借助蒙特卡罗模拟方法,模拟提升分析精度并进行显著性检验,通过模拟的最小值和最大值生成上、下包迹线<sup>[31]</sup>,计算 99%置信水平下的置信区间,模拟次数为 999 次。当  $g(r)$  函数值处于上下包迹线之间,则为随机分布;若  $g(r)$  函数值大于置信区间值上限,则为聚集分布;若  $g(r)$  函数值小于置信区间值下限,则为均匀分布。

2.4 NDVI 数据

NDVI 可用于定量表征植被生长健康状况与覆盖密度,经光谱校正处理后可得到其基于红色与近红外光谱带的反射率数据。

2.5 NDWI 数据

NDWI 是用于遥感图像中水体监测的指数,基于水体对近红外波段与绿色光谱带的不同吸收特性计算<sup>[19]</sup>,被广泛用于水体信息的提取。

3 结果与分析

3.1 调水工程对河道径流量和青土湖地下水埋深的影响

石羊河流域调水工程于 21 世纪初启动,主要包括 2001 年的景电工程二期延伸向民勤供水工程、2003 年的引疏济金工程。调水工程的实施对增加石羊河干流径流量发挥了重要作用。1990—2000 年调水实施前,石羊河流域干流径流量显著下降,由 1990 年的 1.65 亿  $m^3$  降至 2000 年的 0.95 亿  $m^3$ ,调水工程运行后,干流径流量得到有效恢复,由 2001 年的 0.96 亿  $m^3$  回升至 2020 年的 2.87 亿  $m^3$ (图 2(a))。

青土湖生态补水工程自 2010 年启动,流域生态环境得到显著改善。生态补水前,青土湖湖面干涸,地下水埋深超过 4 m,区域生态环境恶劣。随着生态补水工程的持续实施,截至 2024 年,累计生态补水量已达 4.6 亿  $m^3$ 。一方面,区域地下水埋深逐步抬升,至 2024 年稳定在 2.9 m,累计抬升 1.1 m,表明

生态补水有效提升了地下水位,为生态系统的可持续恢复提供了保障;另一方面,生态补水有效恢复了青土湖水域面积,湖面由补水初期的 3  $km^2$  逐步恢复,至 2024 年稳定在 26.7  $km^2$ (图 2(b))。

3.2 调水工程对青土湖白刺群落空间分布的影响

3.2.1 监督分类与精度评估

通过遥感影像对分类结果进行验证评估,结果显示 2 个监测点的分类精度均达到较高水平(表 1,行和列分别为遥感影像识别与实际验证结果)。其中,监测点 1 的总体分类精度为 94.32%,Kappa 系数为 0.84;监测点 2 的总体分类精度为 91.7%,Kappa 系数为 0.80。当 Kappa 系数大于 0.80 时,表明分类结果与真实地物类型具有高度一致性。本文各监测点的 Kappa 系数均超过 0.8,表明监督分类方法在研究区具有可靠的分类精度,所得结果可用于后续分析。

表 1 监测点监督分类结果统计

Table 1 Statistics of supervised classification results at monitoring sites

| 类别  | 监测点 1 |     |    | 监测点 2 |     |    |
|-----|-------|-----|----|-------|-----|----|
|     | 白刺    | 裸土地 | 水体 | 白刺    | 裸土地 | 水体 |
| 白刺  | 47    | 5   | 0  | 60    | 11  | 0  |
| 裸土地 | 8     | 169 | 0  | 7     | 147 | 0  |
| 水体  | 0     | 0   | 0  | 0     | 1   | 3  |

3.2.2 调水前后白刺群落空间分布特征

研究结果表明,生态调水前后 2 个监测点的白刺空间分布特征均存在一定的差异。监测点 1 与监测点 2 是同一位置的不同年份,白刺空间分布特征相近,均表现较为密集的分布状态(图 3(a)(b))。

2010 年生态补水工程实施以来,青土湖地下水埋深由 3.8 m 回升至 2.9 m,地下水对植被补给作用显著增强,白刺斑块数量与总面积均有一定程度的增加,其中斑块数量由 1 520 个增至 3 095 个,增幅 104%;种群密度有所提升(监测点 1 平均密度为 71.1 株/万  $m^2$ ,监测点 2 为 144.8 株/万  $m^2$ );斑块总体覆盖率由 11% 升至 19%,斑块平均面积由 15.6  $m^2$  降至 13  $m^2$ 。不同大小的斑块数量分布特征

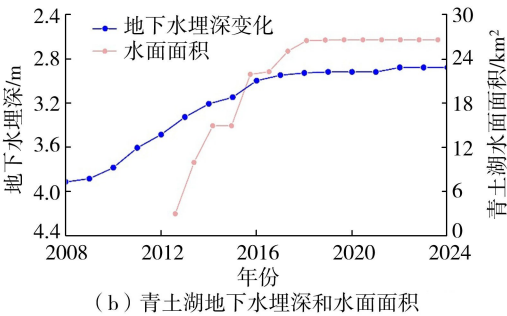
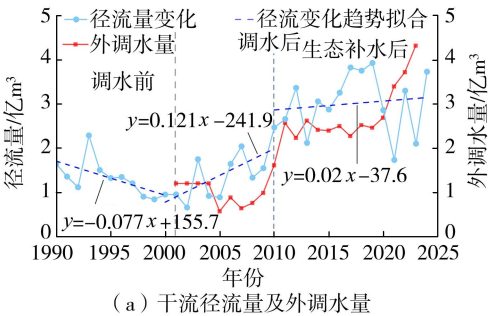


图 2 调水后径流量、青土湖地下水埋深和水面面积变化

Fig. 2 Changes in runoff, groundwater depth and water surface area of Qingtu Lake after water diversion project

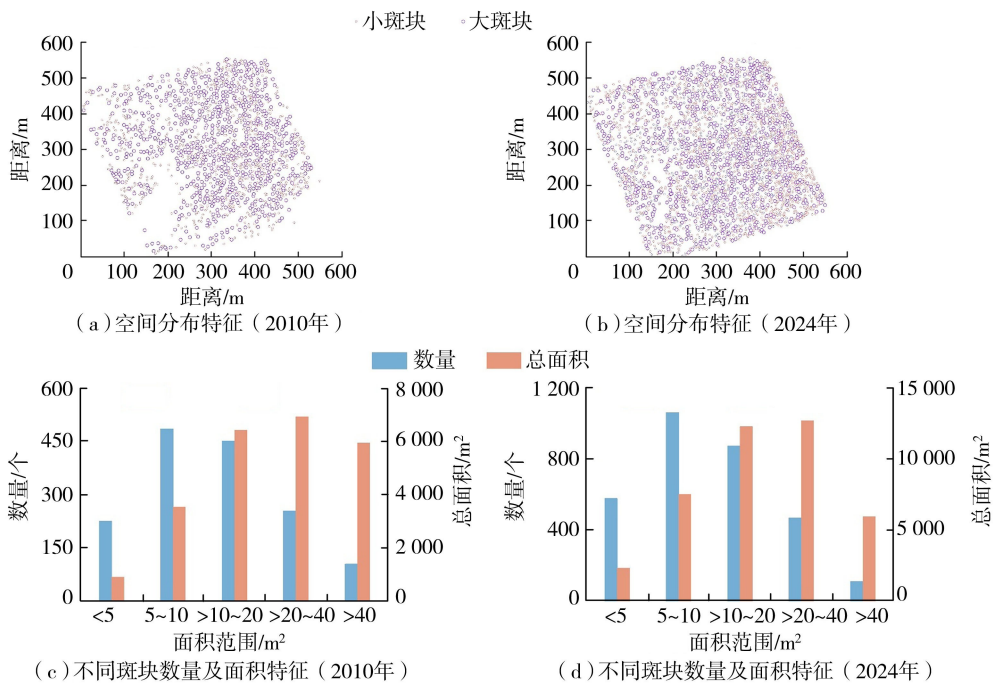


图3 青土湖白刺群落空间分布及斑块特征

Fig.3 Spatial distribution and patch characteristics of *Nitraria tangutorum* in Qingtu Lake

相似,优势斑块大小均为  $5 \sim 10 \text{ m}^2$ , 占比略有差异(监测点1为32%,监测点2为34.3%),如图3(c)(d)所示。可见,由生态调水带来的地下水位回升在一定程度上改变了白刺斑块数量与空间密度,显著影响了青土湖优势物种植被的空间分布特征。

### 3.2.3 调水前后白刺种群点格局分布特征

如图4所示,2010年和2024年青土湖白刺种群点格局分布特征整体较为相似。

$g(r)$  曲线分析表明,在监测点1(地下水埋深

3.8 m),小斑块( $<10 \text{ m}^2$ ) 在  $0 \sim 1.1 \text{ m}$  尺度均匀分布, $>1.1 \sim 2.7 \text{ m}$  尺度为随机分布,更大尺度转为聚集分布;大斑块( $\geq 10 \text{ m}^2$ )表现出尺度依赖的分布特征转变,在  $0 \sim 5.6 \text{ m}$  均匀分布, $>5.6 \sim 6.9 \text{ m}$  随机分布, $>6.9 \text{ m}$  呈聚集分布。该监测点白刺种群平均聚集半径为3 m,综合  $g(r)$  曲线显示,其在  $0 \sim 3.8 \text{ m}$  尺度为均匀分布, $>3.8 \sim 4.6 \text{ m}$  尺度为随机分布, $>4.6 \text{ m}$  尺度表现为聚集分布。在监测点2(地下水埋深2.9 m),小斑块在  $0 \sim 4 \text{ m}$  尺度呈均匀分布,

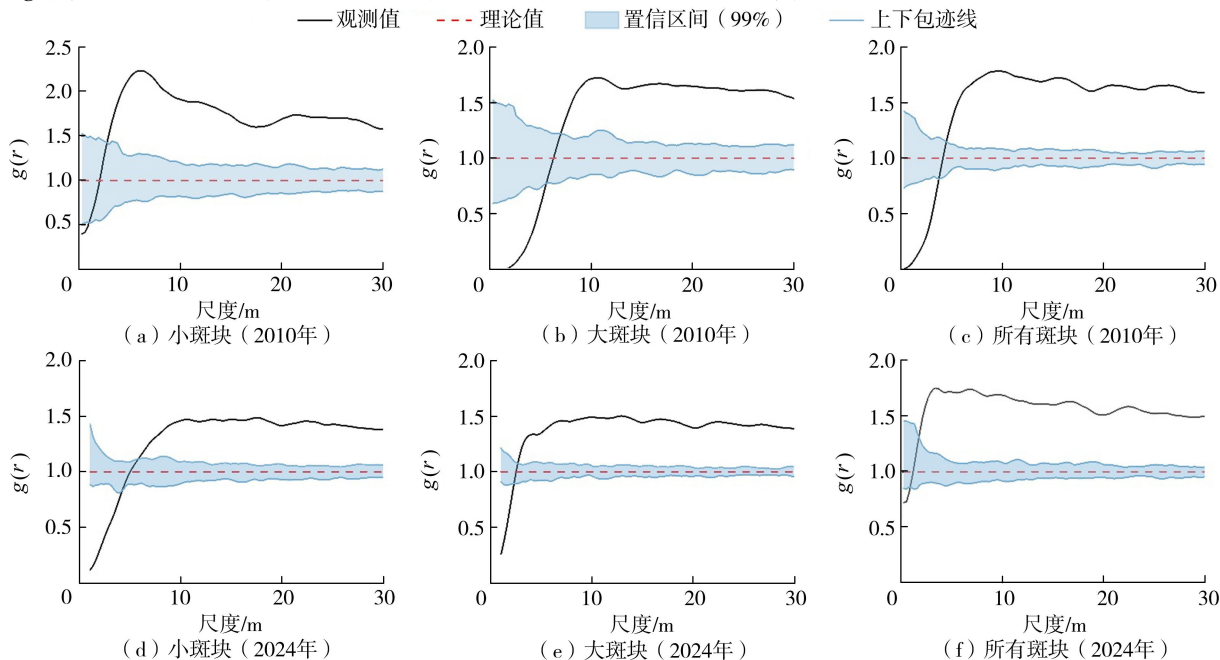


图4 完全空间随机模型模拟的白刺种群点格局分布

Fig.4 Point pattern distribution of *Nitraria tangutorum* population simulated by complete spatial randomness model

>4~6 m 尺度为随机分布,更大尺度转为聚集分布;大斑块在 0~2.4 m 尺度均匀分布,>2.4~2.7 m 尺度随机分布,>2.7 m 尺度呈聚集分布。该监测点白刺种群平均聚集半径为 3 m,综合  $g(r)$  曲线显示,0.8~1.8 m 尺度为随机分布,>1.8 m 尺度表现为聚集分布。

生态调水显著改变了青土湖流域地下水埋深,进而对白刺种群点格局特征产生重要影响。随着地下水埋深减小,白刺斑块的面积、数量与密度发生相应变化,使其在更大空间尺度上呈现聚集分布特征。该空间特征差异体现了水分可利用性对植物种群空间分布的调控作用;地下水埋深越浅,地下水补给越充足,可支撑更高密度的种群发育,种群通过种内竞争调节,最终形成更为聚集的空间分布特征。

3.3 调水工程对河岸带植被空间分布特征的影响

3.3.1 干流河岸带植被 NDVI 与地下水埋深的梯度变化

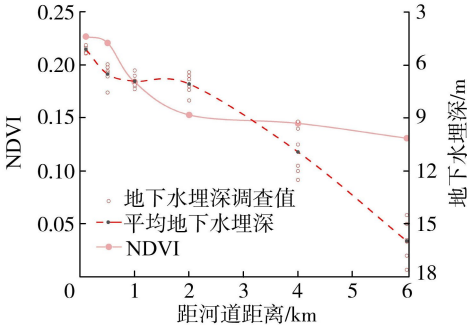
通过对 NDVI 栅格数据与土地利用栅格数据进行比对分析,剔除耕地数据,仅对自然植被 NDVI 开展研究。基于石羊河流域干流河岸带 NDVI 的空间分析结果(图 5),植被 NDVI 呈现显著的河岸梯度效应。距离河道不同位置,NDVI 的响应模式不同。0~2 000 m 区间,NDVI 值由 0.227 骤降至 0.153(衰减率 32.6%/km);>2 000~6 000 m 区间,NDVI 变化趋缓(衰减率降至 14.4%/km),表明距离河岸

2 000 m 是植被水分条件差异化的拐点。此外,随着与河道距离的增加,NDVI 结构转变显著,在近岸区( $\leq 100$  m)优势 NDVI 值区间为 0.2~0.3,占比为 31.3%;过渡区(>100~2 000 m)优势 NDVI 值区间为 0.1~0.2,区间占比从 100 m 处的 28.2%增至 2 000 m 处的 54.1%;远岸区(4 000~6 000 m) NDVI 低值区间(0~0.1)成为主导(占比为 44.5%)。通过分析 NDVI 值小于 0.2 的低覆盖度植被占比,发现随着距河道距离的增加,该占比呈单调递增的趋势,由距河岸 100 m 处的 42.7%升至 2 000 m 处的 62.9%(增幅 20.2%),至 6 000 m 处达 87.3%(增幅 44.6%)。

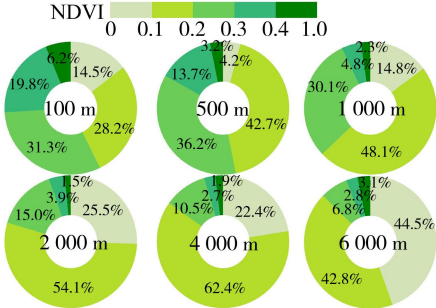
地下水埋深随着距河道中心距离的变化表现为:近河岸带区域( $\leq 2 000$  m)地下水埋深普遍较浅,远离河道区域埋深较大。近河岸带区域地下水平均埋深为 5~7 m,尽管随着距离增加,地下水埋深增加,但增幅不明显;远河岸带区域(>2 000 m)地下水埋深普遍大于 10 m,且随着距离增加呈显著上升趋势。研究表明,河道径流可对近河岸带地下水形成有效补给,但其影响范围在 2 000 m 以内,因此,近河岸带地下水埋深变化不显著;在远河岸带区域,河道对地下水补给作用减弱,径流对地下水的补给能力有限,地下水埋深整体偏大。

3.3.2 河岸带不同位置植被 NDVI 年际变化

图 6 为 1990—2020 年不同年份、不同位置河岸带植被 NDVI 的变化。随着距离的增加,不同年代 NDVI 变化趋势较为一致,均表现为 NDVI 逐渐减小,且在 2 000 m 处的变化速率发生明显变化。综上,河道对植被影响的有效距离约为 2 000 m,在该范围内,河道水分通过地下水补给,满足植被生长用水需求;超出 2 000 m 后,河道对地下水的补给有限,植被生长所需水分与河道补给水分关系不大。距离河岸 2 000 m 是径流补给地下水强度和植被 NDVI 显著变化的关键拐点。



(a) 不同距离处植被NDVI与地下水埋深变化



(b) 不同距离处植被NDVI区间占比

图 5 河岸带植被生态水文要素梯度变化情况

Fig. 5 Gradient variations of eco-hydrological elements in riparian zone vegetation

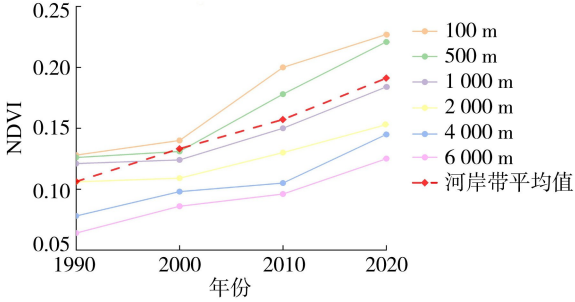


图 6 不同位置河岸带植被 NDVI 年际变化

Fig. 6 Interannual changes in NDVI of riparian zone vegetation at different locations

3.3.3 径流量对河岸带植被 NDVI 的驱动

由表 2 可知,河岸带植被 NDVI 变化与径流量

表 2 不同调水阶段径流量与河岸带植被 NDVI 变化

Table 2 Changes in runoff and NDVI of riparian zone vegetation at different water diversion stages

| 调水阶段        | 不同位置河岸带植被 NDVI 变化/% |       |         |         |         |         |      | 径流量变化/% |
|-------------|---------------------|-------|---------|---------|---------|---------|------|---------|
|             | 100 m               | 500 m | 1 000 m | 2 000 m | 4 000 m | 6 000 m | 平均值  |         |
| 1990—2000 年 | 9.4                 | 4.0   | 2.5     | 2.8     | 25.6    | 34.4    | 10.4 | -42.3   |
| 2000—2010 年 | 42.9                | 35.9  | 21.0    | 19.3    | 7.1     | 11.6    | 24.9 | 160.1   |
| 2010—2020 年 | 13.5                | 24.2  | 22.7    | 17.7    | 38.1    | 30.2    | 24.8 | 15.8    |

关系密切,1990—2000 年河岸带植被样地整体 NDVI 值增长幅度在 10.4%,主要原因是该阶段河道径流量显著下降,致使径流对河岸带地下水补给减弱。而在 2000m 以外,植被 NDVI 值增幅却远大于流域平均值,说明河道径流量的减少并未对其造成影响,NDVI 值增大主要受降水和温度上升的影响。

2000—2010 年,区域平均 NDVI 值增加 24.9%。近河岸带植被 NDVI 值显著增加,尤其是小于 500 m 的区域,增长幅度超过 35%;而远河岸带增幅显著低于近河岸带整体区域的平均值,说明跨区域调水带来的径流量增加,显著改善了近河岸带植被,而对远河岸带植被改善作用有限。2010—2020 年,河道径流量持续增加,近河岸带植被增幅与区域整体增幅接近,表明河岸带植被 NDVI 随着径流量增加呈上升趋势,但并不会随着径流量的持续增加而持续显著增长;而河道径流量对远河岸带植被 NDVI 的影响较小。不同径流量对地下水的补给强度存在差异,造成河岸带植被 NDVI 变化存在差异,反映出近河岸带植被非地带性属性特征显著,远河岸带植被主要依赖降水补给,地带性特征突出。

4 讨 论

4.1 植被空间分布特征的影响因素

植被空间分布特征本质上是多因子与多过程驱动下植被的自组织行为,可能的驱动力包括气候、土壤、地貌、生境条件、地下水、人类活动等<sup>[32-35]</sup>。首先,气候是决定植被空间分布特征的基础驱动力,尤其在干旱区,降水和温度发挥着关键作用<sup>[36]</sup>,降水直接影响区域的水分供给,温度则影响植物的生理活动与生长周期。本文认为,远河岸带不同时段

NDVI 变化幅度与降水、温度变化密切相关。1990—2000 年,尽管河道径流量显著下降,但降水与温度明显增大(图 7),导致远河岸带植被 NDVI 增幅偏大。其次,微地形和土壤等因素导致植被空间局部差异化<sup>[37-38]</sup>。青土湖白刺灌丛在局部斑块密度、斑块大小上表现出空间差异化特征。在特定降水和地下水埋深的水分胁迫下,该差异化主要受地形和土壤盐渍化影响,局部微地形制约了汇水过程,导致不同斑块间地下水实际埋深与盐渍化程度存在差异。此外,人类活动是现代植被空间特征变化的重要驱动因素之一,农田开垦、植树造林等人类活动,显著改变了局部的水热条件和植被空间分布特征<sup>[39]</sup>。由于本文重点关注大范围白刺的整体空间分布特征,未对微地形与土壤因子展开深入分析,且剔除了人工耕地的影响,重点关注调水工程引起的水分条件变化对自然植被空间分布特征的影响。

尽管影响植被空间分布特征影响因素众多,但水分依然是干旱区植被生存与分布的核心限制因子<sup>[40-41]</sup>。本文揭示了水分条件变化对干旱区植被空间分布特征的多尺度调控机制,包括局域尺度(青土湖白刺群落)与河岸带尺度。结果表明,水分驱动的资源异质性通过改变植被-水分反馈过程,显著影响了植被的自组织分布特征。补水后白刺斑块仍呈聚集性分布,但其聚集尺度、斑块密度与数量均发生了显著变化,其响应模式与于春堂等<sup>[42]</sup>的研究结论一致,表明水分条件的改善通过调节土壤水-地下水-植被的动态平衡,重塑了植被的空间异质性。在河岸带,植被分布的空间差异主要受河道水源对地下水补给能力的调控<sup>[43]</sup>。近河岸带区域植被生长强烈依赖河道径流下渗补给的地下水,而远河岸带区域

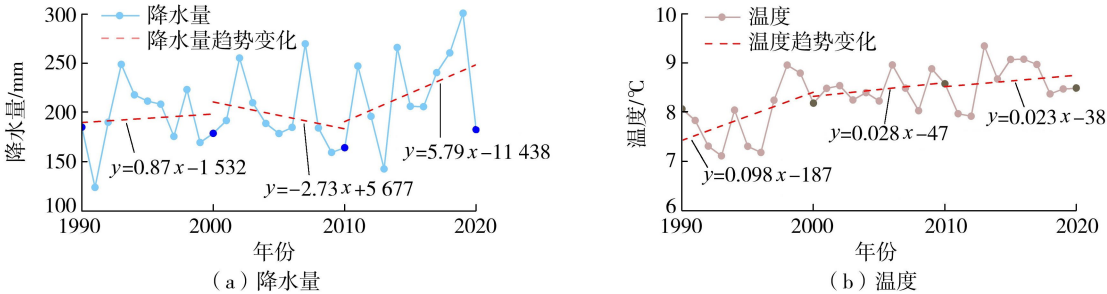


图 7 河岸带区域降水量和温度年际变化

Fig. 7 Interannual changes in precipitation and temperature in riparian zone area

的植被则主要受降水与温度控制。该分异机制在1990—2000年表现尤为突出,尽管河道径流量减少,但远河岸带因降水与温度上升(图7),植被增幅(25.6%~34.4%)远高于河岸带平均水平(10.4%)。

4.2 河道对河岸带植被的影响

在干旱地区,河岸带植被的空间分布特征和结构特征从根本上受到水文条件的影响,特别是河流水的可用性<sup>[44-45]</sup>。河道径流与径流对地下水补给强弱(离河岸距离)共同决定了植被的空间特征,反映了水资源对生态系统组织的强烈控制<sup>[46]</sup>。

气候驱动下降水与径流变化,以及地下水开采、农业扩张等人类活动,均会改变河流有效影响范围<sup>[47-48]</sup>,进而引发植被分布特征的调整。因此,构建基于水文阈值与气候预估的适应性管理策略,对维持河岸生态系统韧性具有重要意义。

受控生态引水可显著改变河流流量,从而影响河岸带植被动态并提升其生态功能。为了优化生态系统修复中的水资源分配,量化植被与地下水对径流量变化的反应至关重要。在石羊河流域,河流水文影响的边界被确定在距离河道约2000m处。值得注意的是,该阈值距离处,植被类型和NDVI都表现出明显的结构变化,与地下水位的急剧下降相吻合。可见,河流补给水源主要通过地下水补给维持河岸生态系统,进而调控干旱区的植被空间分布特征。

5 结 论

a. 跨流域调水工程极大地改善了石羊河流域水文过程。调水后,干流蔡旗断面河道年径流量从2000年的0.95亿m<sup>3</sup>大幅攀升至2020年的2.87亿m<sup>3</sup>;青土湖流域地下水位平均抬升1.1m,湖面面积稳定增加至26.7km<sup>2</sup>,可见调水工程显著改变了流域内水分再分配过程。

b. 地下水埋深决定了青土湖植被空间分布特征。生态补水后,白刺种群密度由71.1株/万m<sup>2</sup>跃升至144.8株/万m<sup>2</sup>,斑块覆盖率从11%提升至19%,表明水分补给有效促进了种群扩张。然而,白刺平均斑块面积从15.6m<sup>2</sup>减小至13m<sup>2</sup>,反映出水分条件变化加剧了白刺种群空间分布特征的异质性,凸显了干旱区植被对水分响应的复杂性。

c. 河道径流与径流对地下水补给强弱(离河岸距离)共同塑造了河岸带植被特征。随着与河道距离增加,河道对地下水补给能力渐弱,植被NDVI值从0.227下降至0.131,呈显著递减趋势,同时地下水埋深从5.1m增加至16m,呈显著递增态势。跨流域调水通过增加河道径流量,对近河岸带(≤2000m)植被NDVI影响显著高于远河岸带

(>2000m),距离河道2000m成为径流补给地下水强度和植被NDVI显著变化的关键拐点。

参考文献:

[1] Song Changqing, Yuan Lihua, Yang Xiaofan, et al. Ecological-hydrological processes in arid environment: past, present and future [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27: 1577-1594.

[2] Li Yan, Xu Ru, Yang Zhao, et al. Upwind moisture controls on interannual variations of precipitation and vegetation in China's drylands [J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(18): e2024GL110997.

[3] Zhao Wei, Yu Xiaobo, Xu Chengdong, et al. Dynamic traceability effects of soil moisture on the precipitation-vegetation association in drylands [J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128645.

[4] Marani M, Silvertri S, Belluco E, et al. Spatial organization and ecohydrological interactions in oxygen-limited vegetation ecosystems [J]. Water Resources Research, 2006, 42: W06D06.

[5] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, et al. Ecohydrology of water-controlled ecosystems [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(8-12): 1335-1348.

[6] 姜翠玲, 许睿亭. 水文要素对河湖生态环境的调控效应研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 119-128. (Jiang Cuiling, Xu Ruiting. Research progress on regulation effects of hydrological factors on ecological environment of rivers and lakes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 119-128. (in Chinese))

[7] Cooper D J, Sanderson J S, Stannard D I, et al. Effects of long-term water table drawdown on evapotranspiration and vegetation in an arid region phreatophyte community [J]. Journal of Hydrology, 2006, 325(1-4): 21-34.

[8] Yu Hongwei, Shen Nan, Yu Dan, et al. Effects of temporal heterogeneity of water supply and spatial heterogeneity of soil nutrients on the growth and intraspecific competition of *bolboschoenus yagara* depend on plant density [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 9: 1987.

[9] 陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其, 等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 133-141. (Tao Jiahui, Bian Jinyu, Ao Tianqi, et al. Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of East Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 133-141. (in Chinese))

[10] 陈军飞, 张学友, 李远航, 等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(6): 18-28. (Chen Junfei, Zhang Xueyou, Li Yuanhang, et al. Ecological compensation

- contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference [J]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2023, 51(6):18-28. (in Chinese))
- [11] 唐彩红,陈东明,易雨君,等.生态补水对白洋淀湿地植被格局的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4):1197-1207. (Tang Caihong, Chen Dongming, Yi Yujun, et al. Effects of ecological water supplement on vegetation dynamics in Lake Baiyangdian wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4):1197-1207. (in Chinese))
- [12] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等.塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. *水资源保护*, 2019, 35(5):120-126. (Liao Shumin, Xue Lianqing, Chen Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5):120-126. (in Chinese))
- [13] 邢姝颖,刘德地,程玉菲,等.干旱半干旱区跨流域调水对供水格局的影响[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3):232-243. (Xing Shuying, Liu Dedi, Cheng Yufei, et al. Impacts of inter-basin water transfer on water supply structure in arid and semi-arid regions [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3):232-243. (in Chinese))
- [14] Naiman R J, Decamps H. The ecology of interfaces: riparian zones [J]. *Annual review of Ecology and Systematics*, 1997, 28(1):621-658.
- [15] Li Weihong, Zhou Honghua, Fu Aihong, et al. Ecological response and hydrological mechanism of desert riparian forest in inland river, Northwest of China [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(6):949-955.
- [16] 汪勇,陈敏建,赵勇,等.基于生态圈层结构稳定的地下水位计算与调控[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4):597-607. (Wang Yong, Chen Minjian, Zhao Yong, et al. Calculation and regulation of groundwater level based on the stability of groundwater-dependent ecosystem [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4):597-607. (in Chinese))
- [17] 牛程旭,张定海,张志山,等.毛乌素沙地盐池地区固定沙丘主要固沙灌木的空间分布格局与空间关联性研究[J]. *生态科学*, 2024, 43(1):1-9. (Niu Chengxu, Zhang Dinghai, Zhang Zhishan, et al. Spatial distribution pattern and spatial correlation of main sand-fixing shrubs in fixed dunes in Yanchi region, Mu Us sandy land[J]. *Ecological Science*, 2024, 43(1):1-9. (in Chinese))
- [18] 陈兵兵,盖迎春,王生荣,等.基于改进遥感生态指数的干旱区生态质量评价:以石羊河流域为例[J]. *遥感技术与应用*, 2025, 40(2):472-484. (Chen Bingbing, Gai Yingchun, Wang Shengtang, et al. Evaluation of ecological in arid region based on upgraded remote sensing ecological index; taking Shiyang River Basin as an example [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2025, 40(2):472-484. (in Chinese))
- [19] 张珂,吴星宇,吴南,等.基于高分一号遥感影像的水体提取方法对比分析与改进[J]. *水资源保护*, 2024, 40(4):9-16. (Zhang Ke, Wu Xingyu, Wu Nan, et al. Comparative analysis and improvement of water body extraction methods based on GF-1 remote sensing images [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4):9-16. (in Chinese))
- [20] 吴杰,董小涛,张珂,等.基于高分一号卫星数据的库区淹没频率分析方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(5):9-14. (Wu Jie, Dong Xiaotao, Zhang Ke, et al. An analysis method of reservoir inundation frequency based on GF-1 satellite data [J]. *Journal of Hohai University( Natural Sciences )*, 2023, 51(5):9-14. (in Chinese))
- [21] 朴世龙,方精云.1982—1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003(1):119-125. (Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China from 1982 to 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003(1):119-125. (in Chinese))
- [22] Gang Chengcheng, Zhou Wei, Chen Yizhao, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11):4273-4282.
- [23] 赵勇,董义阳,翟家齐,等.考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3):78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3):78-89. (in Chinese))
- [24] 孟娇,张晓涛,党红凯,等.轮作期内冬小麦不同灌溉制度对夏玉米水分利用效率的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(4):102-110. (Meng Jiao, Zhang Xiaotao, Dang Hongkai, et al. Effects of different irrigation regimes for winter wheat on water use efficiency of summer maize during rotation period [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4):102-110. (in Chinese))
- [25] Gu Jinjin, Guo Ping, Huang Guohe. Achieving the objective of ecological planning for arid inland river basin under uncertainty based on ecological risk assessment[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2016, 30(5):1485-1501.
- [26] 郝梦宇,秦龙君,毛鹏,等.基于无人机可见光影像的荒漠植被分布格局研究方法[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6):169-179. (Hao Mengyu, Qin Longjun, Mao Peng, et al. Unmanned aerial vehicle(UAV)based methodology for spatial distribution pattern analysis of desert vegetation [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(6):169-179. (in Chinese))
- [27] 杨家芳,尹林江,张洪亮,等.基于无人机遥感影像多维

- 特征的茶树种植信息提取方法[J]. 测绘通报, 2025(3): 138-143. (Yang Jiafang, Yin Linjiang, Zhang Hongliang, et al. The extraction method of tea plantation information based on multi-dimensional features from UAV remote sensing images [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(3): 138-143. (in Chinese))
- [28] 廖孟光, 陈醒, 李猛, 等. 基于多时相 Sentinel-2 数据的温州市红树林提取及应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(4): 37-45. (Liao Mengguang, Chen Xing, Li Meng, et al. Extraction of mangroves in Wenzhou City based on multi-temporal Sentinel-2 data and its application [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 37-45. (in Chinese))
- [29] Ripley E A. Drought in the Sahara: insufficient biophysical feedback? [J]. Science, 1976, 191(4222): 100.
- [30] 冯林艳, 周火艳, 赵晓迪. 乌兰布和沙漠两种植物的分布格局及其变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 155-160. (Feng Linyan, Zhou Huoyan, Zhao Xiaodi. Spatial distribution patterns and changes of *Haloxylon ammodendron* and *Artemisia desertorum* population in Ulan Buh Desert [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(1): 155-160. (in Chinese))
- [31] Lewis A, Bridle S. Cosmological parameters from CMB and other data: a Monte-Carlo approach [J]. Physical Review D, 2002, 66(10): 103511.
- [32] Roy D P, Kovalskyy V, Zhang H K, et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 57-70.
- [33] Joswing J S, Wirth C, Mahecha M D. Climatic and soil factors explain the two-dimensional spectrum of global plant trait variation [J]. Nature Ecology & Evolution, 2022, 6(1): 36-50.
- [34] Couteron P, Lejeune O. Periodic spotted patterns in semi arid vegetation explained by a propagation-inhibition model [J]. Journal of Ecology, 2001, 89(4): 616-628.
- [35] Wu H, Sharp P J H, Walker J, et al. Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants [J]. Ecological Modelling, 1985, 29: 215-243.
- [36] Li Xing, Wang Yong, Zhao Yong, et al. Research on the impact of climate change and human activities on the NDVI of arid areas: a case study of the Shiyang River Basin [J]. Land, 2024, 13(4): 533.
- [37] 赵婷. 气候变化背景下秦岭山地植被变化的地形分异效应[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [38] 张谱. 绿洲外围荒漠区植被时空格局及形成机制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [39] 张立峰. 西北生态环境脆弱区典型内陆河流域植被覆盖变化及其影响因素研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [40] Taylor R, Scanlon B, Doll P, et al. Ground water and climate change [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(4): 322-329.
- [41] 王安琪, 张钰, 刘佳伟, 等. 新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区植被群落多样性及空间分布格局[J]. 干旱区地理, 2024, 47(11): 1841-1851. (Wang Anqi, Zhang Yu, Liu Jiawei, et al. Vegetation community diversity and spatial distribution pattern in Ganjiah Lake National Nature Reserve, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(11): 1841-1851. (in Chinese))
- [42] 于春堂, 杨晓晖, 尹伟伦, 等. 鄂尔多斯高原北缘唐古特白刺灌丛沙包的空间分布格局分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 39-45. (Yu Chuntang, Yang Xiaohui, Yin Weilun, et al. The spatial pattern of *Nitraria tangutorum* shrub islands in the north of Ordos Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5): 39-45. (in Chinese))
- [43] 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 等. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1053-1061. (Zhu Xuchao, Yuan Guofu, Shao Mingan, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River Basin [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(11): 1053-1061. (in Chinese))
- [44] 张军, 姜和震, 杨胜天, 等. 河道流量对疏勒河中下游河岸带植被变化的影响评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 123-129. (Zhang Jun, Jiang Hezhen, Yang Shengtian, et al. Impact of river flow on vegetation change in the riparian zone of the middle and lower reaches of the Shule River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2): 123-129. (in Chinese))
- [45] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1830-1837. (Guo Erhui, Sun Ranhao, Chen Liding. Main ecological service functions in riparian vegetation buffer zone: research progress and prospects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(8): 1830-1837. (in Chinese))
- [46] 岳东霞, 苗俊霞, 朱敏翔, 等. 疏勒河流域陆地水储量与植被指数的时空耦合关系[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5268-5278. (Yue Dongxia, Miao Junxia, Zhu Minxiang, et al. Spatio-temporal coupling between terrestrial water storage and vegetation index in Shule River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5268-5278. (in Chinese))
- [47] 刘虎俊, 刘世增, 李毅, 等. 石羊河中下游河岸带植被对地下水位变化的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335-341. (Liu Hujun, Liu Shizeng, Li Yi, et al. Response of riparian vegetation to the change of groundwater level at middle and lower reaches of the Shiyang River [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 335-341. (in Chinese))
- [48] 刘世增. 石羊河流域中下游河岸植被变化及其驱动因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 胡新宇)