

变化环境下西北地区生境质量时空演变态势及驱动机制分析

李光轩^{1,2,3}, 赵钟楠¹, 李原园¹, 刘震¹, 李激¹, 邢子强¹, 陈飞¹, 马若绮¹,
潘扎荣¹, 陈康¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院; 2. 北京大学环境科学与工程学院; 3. 水沙科学教育部重点实验室)

摘要:以西北地区的 38 个水资源三级区为对象,采用 InVEST 模型评估了 1985—2023 年西北地区及典型水资源三级区的生境质量时空演变态势,并结合 Sen's 斜率估计法分析了趋势的显著性。通过 XGBoost 模型构建了生境质量与驱动因子之间的定量关系,利用 SHAP 方法量化了气候、人类活动及下垫面覆盖的影响。结果表明:1985—2023 年西北地区整体生境质量较低,生境指数多年平均值为 0.428,时间上呈先降后升再降的波动趋势,空间分异显著,呈南、北、东三面山地较高、中部荒漠较低的环状格局;典型水资源三级区差异突出,石羊河、黑河、疏勒河的生境质量均呈上升趋势,2023 年生境指数较 1985 年分别提高约 10.3%、5.0%、2.8%,空间上由南部祁连山向北部走廊平原递减,生态保护工程与降水量增加共同驱动生境质量改善;塔里木河整体生境质量较低,生境指数年均值变化范围为 0.188~0.427,干流以南生境质量低于干流以北,和田河、克里亚河诸小河呈上升趋势,阿克苏河、喀什噶尔河呈下降趋势,耕地面积占比、降水量分别是导致区域生境下降、上升的主要驱动因子;伊犁河、额敏河生境质量较高,生境指数多年平均值分别为 0.793、0.787,但下降显著,2023 年较 1985 年分别下降 6%、7.8%,耕地扩张为主要驱动因子;羌塘高原区生境质量较高,生境指数多年平均值为 0.705,且整体稳定;西北地区生境质量的核心驱动因子为归一化植被指数(NDVI)、降水量、耕地面积占比,自然要素(植被、降水量)主导调控,人类活动为次要影响因素。

关键词:生境质量;变化环境;归一化植被指数;降水量;耕地面积占比;西北地区

Analysis of spatiotemporal evolution trend and driving mechanism of habitat quality in Northwest China under changing environment//Li Guangxuan^{1,2,3}, Zhao Zhongnan¹, Li Yuanyuan¹, Liu Zhen¹, Li Wei¹, Xing Ziqiang¹, Chen Fei¹, Ma Ruqi¹, Pan Zharong¹, Chen Kang¹(1. MWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design(GIWP), China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University; 3. Key Laboratory of Water and Sediment Science, Ministry of Education)

Abstract: Taking 38 third-class water resource regions of Northwest China as the study subject, the spatiotemporal evolution trend of habitat quality in Northwest China and typical third-class water resource regions from 1985 to 2023 was assessed by using InVEST model. And combined with Sen's slope estimation method, the significance of the trend was analyzed. The XGBoost model was employed to establish quantitative relationships between habitat quality and driving factors, while the SHAP method was used to quantify the impacts of climate, human activities, and underlying surface conditions. The results showed that the overall habitat quality in the Northwest China was relatively low from 1985 to 2023, with an average habitat index of 0.428 over the years. The time showed a fluctuating trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing again, with significant spatial differentiation. It presented a circular pattern with higher mountains in the south, north, and east and lower deserts in the central region. The differences in typical third-class water resource regions are prominent, with the habitat quality of Shiyang River, Heihe River, and Shule River showing an upward trend. In 2023, the habitat index increased by about 10.3%, 5.0%, and 2.8% respectively compared to 1985, and spatially decreased from the southern Qilian Mountains to the northern corridor plain. Ecological protection projects and increased precipitation jointly drive the improvement of habitat quality. The overall habitat quality of the Tarim River is

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211303,2022YFC3202300)
作者简介:李光轩(1994—),男,工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:liguangxuan@tju.edu.cn
通信作者:赵钟楠(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:zhaozhongnan@giwp.org.cn

relatively low, with an annual average change range of habitat index of 0.188-0.427. The habitat quality south of the main stream is lower than that north of the main stream. The small rivers of Hotan River and Kriya River show an upward trend, while the Aksu River and Kashgar River show a downward trend. The proportion of arable land and precipitation are the main driving factors for the regional habitat decline. The habitat quality of Ili River and Emin River is relatively high, with an average annual habitat index of 0.793 and 0.787, respectively, but the decline is significant. In 2023, the habitat index will decrease by 6% and 7.8% compared to 1985, respectively. The expansion of arable land is the main driving factor. The habitat quality of Ili River and Emin River is relatively high, with an average annual habitat index of 0.793 and 0.787, respectively, but the decline is significant. In 2023, the habitat index will decrease by 6% and 7.8% compared to 1985, respectively. The expansion of arable land is the main driving factor. The core driving factors for habitat quality in the northwest region are normalized difference vegetation index (NDVI), precipitation, and the proportion of arable land. Natural factors (vegetation and precipitation) dominate regulation, while human activities are secondary influencing factors.

Key words: habitat quality; changing environment; normalized difference vegetation index; precipitation; proportion of cultivated land area; Northwest China

在全球变化与人类活动日益加剧的双重作用下,我国生态环境演化态势突出,各类生态系统面临着结构与功能的重塑挑战^[1-3]。作为我国生态环境的关键屏障区,西北地区因其独特的地理区位与脆弱的生态本底,在变化环境下呈现出更为严峻的形势,土地荒漠化、水资源短缺、生物多样性减少等问题相互交织,严重制约着该区域的可持续发展^[4-5]。生境质量作为衡量生态系统提供适宜生存条件能力的核心指标,直接反映了生态系统的健康状况与服务功能水平,是区域生态保护与修复工作的重要依据^[6]。因此,深入研究西北地区生境质量的时空演变态势及其驱动机制,对于科学服务国家新时代西部大开发战略的生态保护需求、精准支撑国家水网建设中的生态协调布局具有重要参考价值。

当前,已有众多学者开展了针对西北地区生境质量的演变态势及其驱动机制的研究,覆盖了省域、流域、地区、县域等不同空间尺度。从演变态势看,西北地区不同区域生境质量的时间演变呈现多元特征:阿勒泰地区 1990—2021 年整体轻度下降^[7],新疆 2000—2035 年均值持续降低且呈现衰退态势^[8],河西走廊 1990—2020 年虽整体处于较低水平但呈上升趋势^[9],昆仑山北坡绿洲-荒漠关键带 2004—2021 年波动递增^[10],布尔津县 2000—2030 年呈现先降后的特征^[11],后三者均表现出改善或波动的态势。空间上则呈现清晰的分异规律:高值区多集中于西北部或南部生态敏感区,例如阿勒泰地区呈西北和北部高、南部低的特征^[7],河西走廊表现为南高北低的空间格局^[9],新疆呈“三屏两环”的独特分布^[8],玛纳斯河流域^[12]、艾比湖流域^[13]、塔里木河流域^[14]、祁连山自然保护区^[15]、甘南州^[16]等典型区域各自呈现独特的空间演变规律。在驱动机制解析方面,驱动因子的选取紧密契合西北地区生态本底特征:自然维度聚焦水热条件与地理格局相关因子,如新疆的生境质量变化与土地利用类型转换及气候

情景密切相关^[8];人类活动维度则以土地利用变化为核心切入点,既涵盖耕地扩张、草地退化等土地利用类型转换,也关注人类干扰的空间分异规律,如甘肃的生境质量及退化程度取决于人类活动的区位与强度^[17]。分析方法层面呈现侧重创新与提升精度的演进趋势:早期研究多依赖 ArcGIS 空间相关性分析^[7]、回归分析^[9,18]、莫兰指数^[17]等传统统计手段,侧重单因子与生境质量关联的量化分析;随着研究的深入,地理探测器^[15]、SD-PLUS-InVEST 耦合模型^[8]、DRSEI 模型^[10]等方法工具逐步应用,不仅可解析多因子的协同作用机制,还能显著提升机制解析的精准度。

综上所述,当前针对西北地区生境质量的研究存在两方面局限:研究时间多聚焦于 2000 年以后的典型年份,缺乏对长时序动态过程的系统刻画;驱动机制解析多集中于坡度、土地利用等下垫面覆盖层面,对多维度环境要素的综合影响探讨不足,尚未形成多时间尺度、多维度的整合研究框架。鉴于此,本文选取西北地区 38 个水资源三级区作为研究单元,聚焦 1985—2023 年长时序,借助 InVEST 模型量化生境质量,以此为基础深入探究区域内不同水资源三级区生境质量的时空演变特征;再以降水量、气温等气候因子,耕地面积占比、不透水面积占比、归一化植被指数(NDVI)等下垫面因子,以及农业灌溉用水、制造业用水等人类活动因子为自变量,驱动极端梯度提升树(XGBoost)模型模拟生境质量动态变化;最终通过 SHAP 法定量揭示生境质量对变化环境的响应机制,以期为西北地区生态保护提供科学依据和决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西北地区(图 1,审图号为 GS(2023)2767)涵盖新疆全境,甘肃、青海、内蒙古部分区域及西藏羌塘

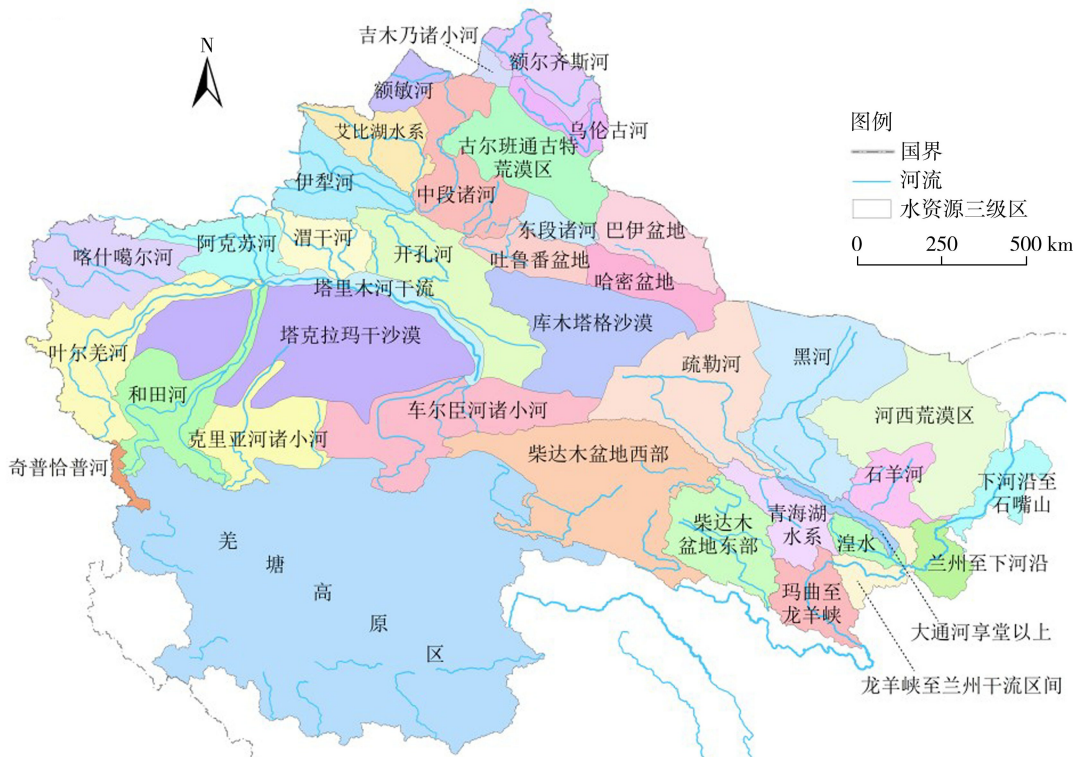


图1 西北地区38个水资源三级区

Fig. 1 38 typical third-class water resource regions of Northwest China

高原,共包含38个水资源三级区,总面积占全国国土面积的31.8%。作为国家重要的能源与资源开发核心区域,西北地区不仅分布有天山北坡国家级城市群,还集聚了准东、吐哈、克拉玛依等重点煤炭与石油基地,区域总人口达3000万人以上,地区生产总值为2.18万亿元,经济社会发展潜力突出;从水资源禀赋来看,西北地区属典型干旱与极度干旱气候区,年降水量普遍不足200 mm,水面蒸发量为800~2850 mm,全国八大沙漠中7个分布于此,多年平均水资源总量为1261.7亿 m^3 ,降水转化为水资源的效率仅24%,剩余部分均通过陆地蒸发消耗^[19-20];受全球气候变暖影响,昆仑山、天山等山脉的冰川加速退缩,导致区域水源涵养能力显著下降,且河网密度偏低,存在大范围无流区,水资源呈现“北多南少、边多腹少”的空间分布特征^[21-22],具体表现为河西内陆河流域水资源短缺,而伊犁河等跨界河流水资源相对丰沛^[23-25];在水文系统构成方面,西北地区拥有193条流域面积1000 km^2 以上河流、93个面积100 km^2 以上湖泊,且河流多为季节性河流,湖泊以高原湖泊、尾间湖泊及咸水湖/盐湖为主,此外还分布有4个国际重要湿地、26个国家重要湿地,共同构成了独特的干旱区水文生态系统。

1.2 数据来源

本文选取的土地利用数据来源于武汉大学CLCD数据集,空间分辨率30 m;气温和降水数据均

来源于国家青藏高原科学数据中心,空间分辨率1 km;NDVI数据来源于Scientific Data,空间分辨率0.05°;农业灌溉用水和制造业用水来源于Scientific Data,空间分辨率0.1°。其中,根据土地资源和利用属性将土地利用类型划分为耕地、林地、灌木丛、草地、水域、冰川/雪地、未利用地、建设用地、湿地,并将数据重采样至1 km。

2 研究方法

本文的研究流程如图2所示。

2.1 基于InVEST模型的生境质量量化

InVEST模型由斯坦福大学、世界自然基金会等联合开发,在生态系统服务功能的定量评估研究中备受学界关注^[26-27]。其生境质量模块借助一系列数学模型与算法,将土地利用生境适宜性、威胁因子等核心要素进行了整合,最终输出量化的生境质量,即生境指数,计算公式为:

$$I_{ij} = H_j \left(1 - \frac{D_{ij}^z}{D_{ij}^z + k^z} \right) \quad (1)$$

式中: I_{ij} 为第 j 类土地利用类型中栅格 i 的生境指数; H_j 为第 j 类土地利用类型的生境适宜度; D_{ij} 为第 j 类土地利用类型中栅格 i 的生境退化度; k 为半饱和常数; z 为归一化常量。

生境指数取值范围为0~1,越趋近1表明区域在土地利用生境适宜性方面表现越好,对于维持生

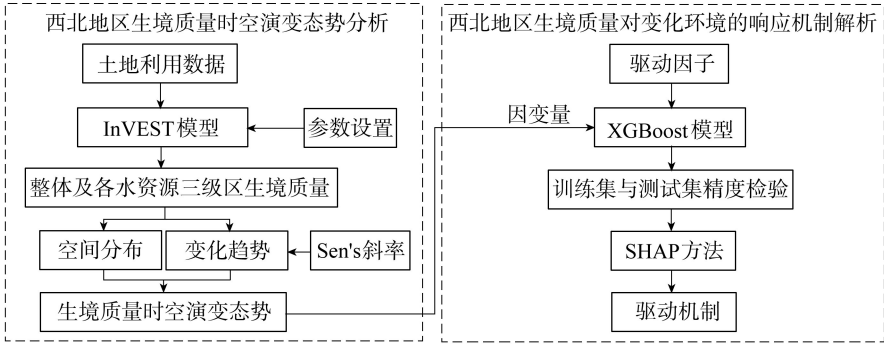


图2 研究流程

Fig. 2 Study flow chart

物多样性而言,是极为有利的优质生境;反之,越趋近于0表明区域的土地利用方式越严重破坏了生境适宜性,同时遭受高强度的威胁因子干扰,物种生存面临严峻挑战,生物多样性难以维系^[28]。参考张志浩等^[8-9,29]的研究,根据生境指数对生境质量等级进行划分,生境指数为0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1时,生境质量分别为低、较低、适中、较高、高等级。

2.2 威胁因子选取

威胁因子是指对环境造成破坏或人为干预因子。结合西北地区土地利用现状,本文选取耕地、建设用地、未利用地3种土地利用类型作为影响生境质量变化的威胁因子,参考张志浩等^[8,11]的研究,确定不同土地利用类型的生境适宜度及其对威胁因子的敏感度,进而确定各威胁因子的胁迫距离、权重、衰减类型,具体见表1、表2。

表1 不同土地利用类型的生境适宜性及其对威胁因子的敏感度

Table 1 Habitat suitability of different land use types and its sensitivity to threat factors

土地利用类型	生境适宜度	对各威胁因子的敏感度		
		耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.4	0.2	0.8	0.4
林地	1.0	0.5	0.8	0.2
灌木丛	0.9	0.6	0.8	0.6
草地	0.9	0.2	0.5	0.3
水域	1.0	0.4	0.6	0.5
冰川/雪地	0.8	0.7	0.7	0.7
未利用地	0.1	0.1	0.3	0.2
建设用地	0	0	0	0.1
湿地	0.5	0.4	0.2	0

表2 威胁因子胁迫距离及权重

Table 2 Stress distance and weight of threat factors

威胁因子	胁迫距离/km	权重	衰退类型
耕地	2	0.2	线性
建设用地	8	1	指数
未利用地	3	0.4	线性

2.3 XGBoost-SHAP 驱动机制解析模型

XGBoost 是对传统梯度提升决策树 (GBDT) 的

优化,核心通过迭代构建多棵决策树,以前一轮模型的残差为优化目标来提升预测精度与泛化能力,同时融入 L1/L2 正则化、树剪枝机制防止过拟合,并支持并行计算加快训练效率,可广泛应用于分类、回归任务及特征重要性排序^[30-32]。

SHAP (Shapley additive exPlanations) 是一套依托博弈论框架的机器学习模型解释工具^[33],通过枚举并分析所有潜在的特征子集组合,逐一测算单个特征在不同组合场景下对模型预测结果产生的边际效应,进而以量化形式明确各特征对预测过程的贡献程度^[34]。在具体解释维度,SHAP 值的正负属性分别对应特征对模型最终预测结果的正向推动或负向抑制作用,而其绝对值大小则直观反映该特征对预测结果整体偏差的影响强弱^[5,35]。

本文以西北各水资源三级区的降水量(气候因子)、气温(气候因子)、耕地面积占比(下垫面因子)、不透水面积占比(下垫面因子)、NDVI(下垫面因子)、农业灌溉用水(人类活动因子)、制造业用水(人类活动因子)等驱动因子为自变量,驱动 XGBoost 模型对西北地区各水资源三级区生境质量进行模拟预测;将 XGBoost 模型的训练数据传递给 SHAP 解释器,通过计算每个特征变量的 SHAP 值,量化不同自变量对因变量(生境指数)变化的影响程度。训练集为 1985—2017 年西北地区各水资源三级区驱动因子和对应生境指数组成的数据集,测试集为 2018—2023 年西北地区各水资源三级区驱动因子和对应生境指数组成的数据集。采用均方根误差 (RMSE)^[36] 和决定系数 (R^2)^[37] 验证 XGBoost 模型模拟的准确性, RMSE 越小、 R^2 越接近 1,表示 XGBoost 模型的预测性能越好。

3 结果与分析

3.1 西北地区生境质量时空演变态势

3.1.1 地区整体生境质量演变态势

图 3 为 1985—2023 年西北地区生境指数 (1986—1989 年数据缺失,作截断处理)。由图 3 可

见,西北地区的生境质量整体处于较低水平,生境指数的多年平均值为 0.428。1985—2023 年西北地区的生境指数呈现先降后升再降的波动变化趋势,1985 年为 0.429,1997 年降至 0.425,2017 年回升至 0.431,2023 年又回落至 0.426。

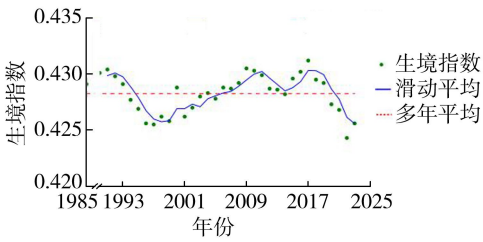


图 3 1985—2023 年西北地区生境质量

Fig. 3 Habitat quality in Northwest China from 1985 to 2023

图 4 为西北地区典型年份生境质量等级的空间分布。由图 4 可见,西北地区生境质量的空间分异特征显著,北部区域包括额尔齐斯河、额敏河、伊犁河及中段诸河等,整体生境质量较好,多数区域属高等级和较高等级,仅靠近古尔班通古特荒漠区的零

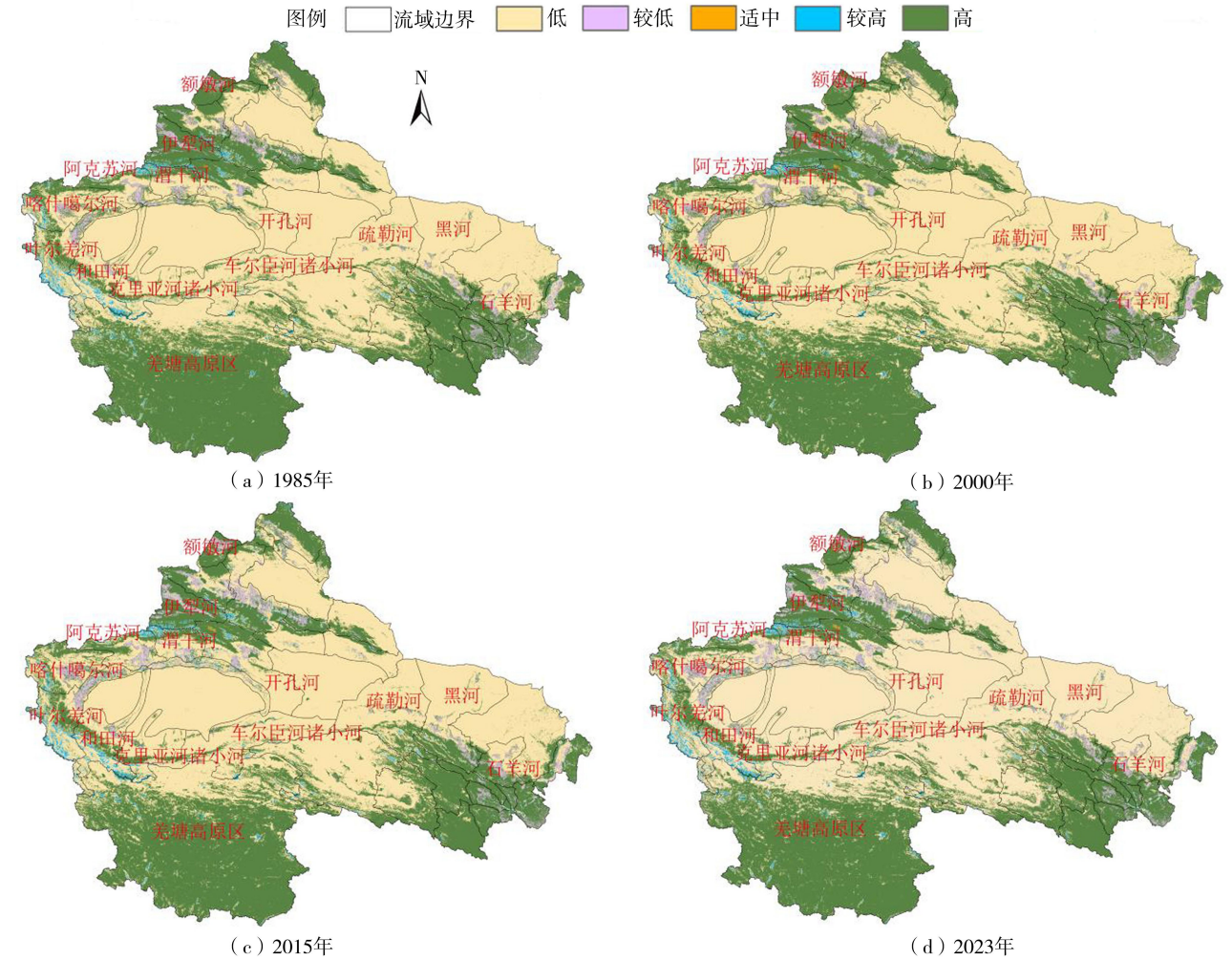


图 4 西北地区典型年份生境质量等级的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of habitat quality levels in typical years in Northwest China

散地带为低等级;塔里木河各水资源三级区如喀什噶尔河、叶尔羌河、阿克苏河等,生境质量分布较复杂,高、较高、较低、低等级均有分布;羌塘高原区生境质量较高,大部分区域属于高等级和较高等级,仅靠近中部的部分区域为低等级;东部区域如下河沿至石嘴山、兰州至河口镇、玛曲至龙羊峡、大通河享堂以上及湟水等黄河地区水资源三级区,生境质量整体较高,大部分为高等级和较高等级,仅零星区域为较低等级;中部区域以塔克拉玛干沙漠、库木塔格沙漠等塔里木盆地荒漠区为代表,生境质量偏低,多数区域为低等级,仅零散分布少量高等级和较高等级。

3.1.2 典型水资源三级区生境质量演变态势

选取典型水资源三级区,包括东部的河西走廊的石羊河、黑河和疏勒河,西部的塔里木河各水资源三级区、北部的伊犁河和额敏河、南部的羌塘高原区,开展生境质量时空演变态势分析,结果如图 5 所示(1986—1989 年数据缺失,作截断处理)。

河西走廊各水资源三级区(石羊河、黑河、疏勒河)生境质量水平分化显著,石羊河多年均值最高

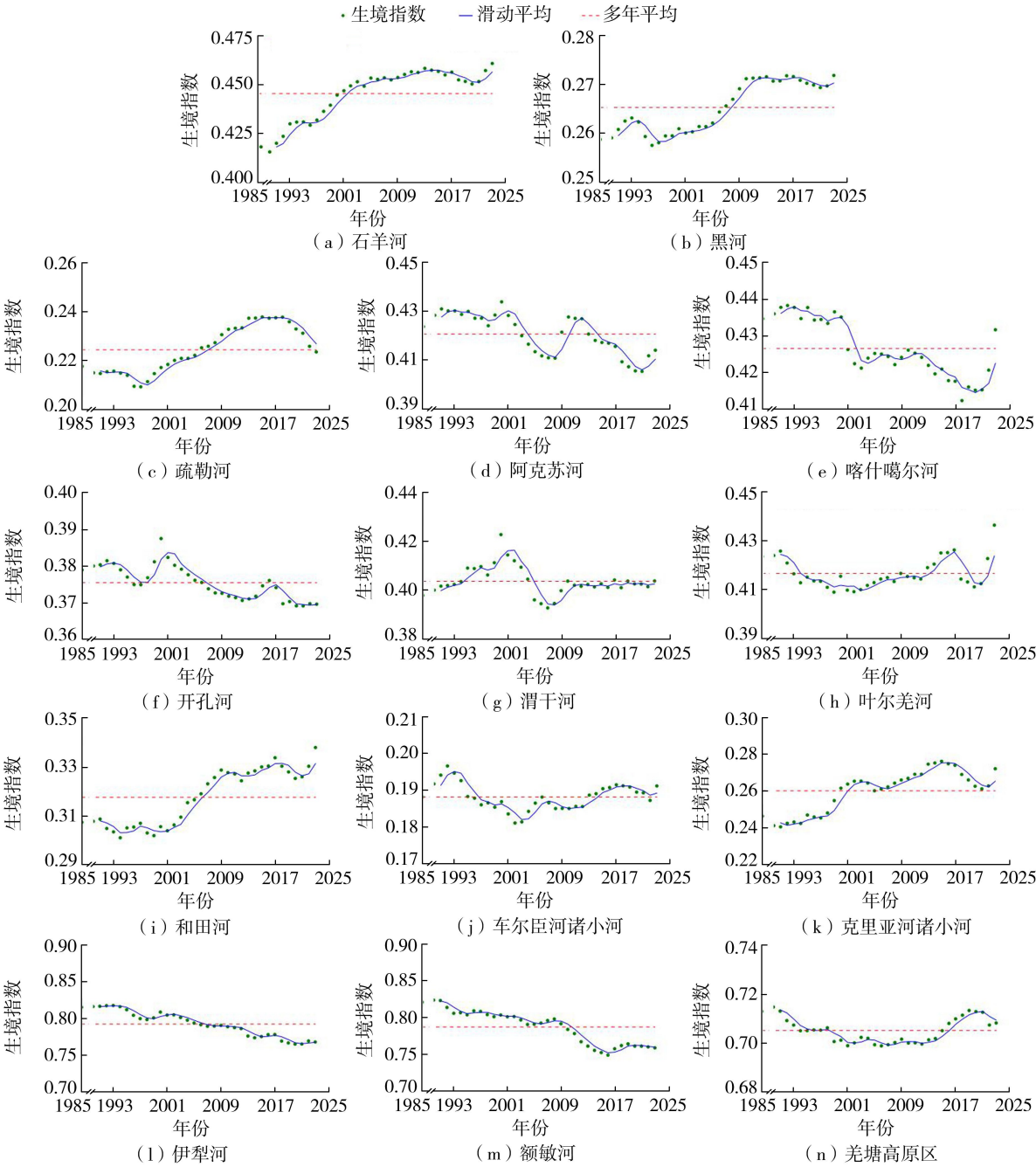


图 5 1985—2023 年典型水资源三级区的生境指数

Fig. 5 Habitat index of typical third-class water resource regions from 1985 to 2023

(0.445), 黑河(0.265)和疏勒河(0.225)较低,且3个水资源三级区生境质量均呈上升趋势(Sen's斜率^[38]均约为0.001)。2023年石羊河、黑河生境质量相较于1985年分别提高约10.3%、5%;疏勒河生境质量呈波动变化,虽2023年较此前峰值有所回落,但相较于1985年仍提高约2.8%。空间分布上,该地区生境质量分异特征突出,东西向由东部石羊河向西部疏勒河梯度递减,南北向均由南部祁连山向北部区域递减;高等级主要分布在祁连山地区,中等级多见于中部走廊平原区,低等级则集中在库姆塔格沙漠和巴丹吉林沙漠边缘地区。

塔里木河各水资源三级区生境质量整体处于较低水平,生境指数的年均值变化范围为0.188(车尔臣河诸小河)~0.427(喀什噶尔河),演变趋势与空间分布呈显著区域差异。1985—2023年,和田河和克里亚河诸小河生境质量呈上升趋势(Sen's斜率均约为0.001),2023年相较于1985年分别提高10.1%、10.5%;阿克苏河和喀什噶尔河生境质量呈下降趋势(Sen's斜率均为-0.001),2023年相较于1985年均呈小幅下降,分别下降2.4%、0.7%。开孔河、渭干河、叶尔羌河、车尔臣河诸小河的生境质量虽存在一定波动,但整体保持稳定(Sen's斜率均

约为0)。空间上,塔里木河干流以南各水资源三级区(冰川和高海拔地区主要分布于喀喇昆仑山和昆仑山,径流补给依赖两山脉冰川融水)的生境质量低于干流以北各水资源三级区(冰川和高海拔地区主要分布于天山及帕米尔高原东部,径流补给依赖天山冰川融水与山区降水);干流以北各水资源三级区中,喀什噶尔河、阿克苏河、渭干河、开孔河的生境质量由北向南(从天山山区向塔里木盆地腹地)逐步降低;干流以南各水资源三级区中,叶尔羌河、和田河和克里亚河诸小河生境质量由南向北(从昆仑山-喀喇昆仑山山区向干流)逐步降低,车尔臣河诸小河生境质量较高区域呈零星分布。

伊犁河和额敏河生境质量处于较高水平,生境指数多年均值分别为0.793、0.787,且均呈显著下降趋势(Sen’s斜率均约为-0.002),2023年相较于1985年分别降低约6.0%、7.8%。空间分布上,两区域大部分地区为生境质量高等级;其中伊犁河中部的河谷地带(伊犁河谷、喀什河谷等,为伊宁市、喀什市等城市主要分布区)生境质量相对较低,仅区域南部零星分布生境质量较高等级;额敏河仅北部小部分区域为生境质量低等级。

羌塘高原区生境质量整体处于较高水平,生境指数多年均值为0.705,且整体趋于稳定(Sen’s斜率约为0)。空间分异性显著,南部和中部大部分地区为生境质量高等级,零星分布有生境质量较高等级;西南部地区以戈壁和荒漠地貌为主,为生境质量低等级。

3.2 西北地区环境变化要素演变态势

3.2.1 地区整体环境变化要素演变态势

为研究1985—2023年西北地区环境变化要素

表3 1985—2023年西北地区整体及典型水资源三级区不同驱动因子和生境质量的Sen’s斜率

Table 3 Sen’s slope of different driving factors and habitat quality in overall and typical third-class water resource regions of Northwest China from 1985 to 2023								
地区	气候因子		人类活动因子		下垫面因子			生境质量
	降水量	气温	灌溉用水	制造业用水	NDVI	耕地面积占比	不透水面积占比	
西北地区	0.245	0.035	1.508	-0.158	0	0.037	0.006	0
阿克苏河	0.374	0.042	0.161	0.002	0.001	0.194	0.021	-0.001
喀什噶尔河	0.554	0.044	0.218	0.002	0.001	0.128	0.001	-0.001
开孔河	-0.256	0.037	0.276	0.004	0	0.095	0.013	0
渭干河	0.562	0.044	0.198	0.002	0.001	0.200	0.022	0
叶尔羌河	0.332	0.039	0.023	0	-0.001	0.090	0.004	0
和田河	0.247	0.041	-0.015	0	-0.002	0.034	0.001	0.001
车尔臣河诸小河	-0.350	0.030	0.057	0	-0.001	0.009	0	0
克里亚河诸小河	0.164	0.037	0.010	0	-0.001	0.021	0	0.001
黑河	0.221	0.043	-0.059	-0.073	0	0.034	0.001	0.001
石羊河	0.828	0.025	-0.147	-0.014	0.001	0.056	0.002	0.001
疏勒河	0.373	0.037	0.049	-0.008	0	0.019	0	0.001
额敏河	0	0.036	-0.048	0	0.001	0.231	0.004	-0.002
伊犁河	0.112	0.045	0.087	0.003	0.002	0.151	0.012	-0.002
羌塘高原区	0.279	0.029	0	0	0	0	0	0

的演变规律,计算地区整体及典型水资源三级区变化环境要素的Sen’s斜率开展分析,结果如表3所示。由表3可见,1985—2023年,西北地区的气候因子呈现一定变化,降水量和气温序列均呈上升趋势,其中降水量的上升趋势更为明显。在人类活动方面,农业灌溉用水序列表现出较强的上升趋势,而制造业用水序列则呈弱下降趋势。下垫面覆盖及生态方面,耕地面积占比和不透水面积占比序列均呈弱上升趋势,NDVI的Sen’s斜率接近0,表明其未呈现出显著的变化趋势。

3.2.2 典型水资源三级区环境变化要素演变态势

由表3可见,典型水资源三级区的环境变化要素演变呈现出显著的区域分异特征,不同水资源三级区在气候条件、人类活动及下垫面覆盖方面的演变态势各有侧重。

河西走廊的环境变化要素特征鲜明。气候条件方面,该区域降水量和气温均呈上升趋势,但不同水资源三级区的降水量增幅与升温幅度存在一定差异。人类活动方面,灌溉用水变化呈现显著空间差异,黑河与石羊河呈减少趋势,疏勒河则呈增加态势;制造业用水在3个区域均呈下降趋势,其中黑河的下降幅度较为突出。下垫面覆盖特征方面,石羊河NDVI呈弱上升趋势,黑河与疏勒河NDVI无明显变化;3个区域耕地面积占比均呈上升趋势;不透水面积占比在黑河与石羊河呈弱上升趋势,疏勒河则无显著变化。

塔里木河各水资源三级区的要素变化趋势分化明显。气候条件方面,各水资源三级区降水变化差异显著,阿克苏河、喀什噶尔河、渭干河、叶尔羌河、

和田河、克里亚河诸小河的降水量呈上升趋势,其中喀什噶尔河与渭干河的上升趋势最为强劲,开孔河与车尔臣河的降水则呈下降趋势;所有水资源三级区气温均一致呈上升趋势。人类活动方面,各水资源三级区灌溉用水变化呈现空间差异,阿克苏河、喀什噶尔河、开孔河、渭干河、叶尔羌河、车尔臣河诸小河、克里亚河诸小河的灌溉用水呈增长趋势,和田河灌溉用水呈减少趋势;对于制造业用水,阿克苏河、喀什噶尔河、开孔河、渭干河呈微弱增长,其余水资源三级区变化不显著。下垫面覆盖方面,各水资源三级区 NDVI 变化存在空间分异,阿克苏河、喀什噶尔河、渭干河 NDVI 呈弱上升趋势,叶尔羌河、和田河、车尔臣河诸小河、克里亚河诸小河的 NDVI 呈弱下降趋势;各水资源三级区耕地面积占比均呈上升趋势;不透水面积占比在阿克苏河、喀什噶尔河、开孔河、渭干河、叶尔羌河、和田河呈弱上升趋势,在车尔臣河诸小河与克里亚河诸小河无明显变化。

额敏河与伊犁河的驱动因子变化存在明显差异。气候条件方面,两区域降水量均呈上升趋势;气温亦均呈上升态势,且伊犁河的升温趋势比额敏河更为显著。人类活动方面,灌溉用水变化方向相反,额敏河灌溉用水呈减少趋势,伊犁河灌溉用水呈增长趋势;对于制造业用水,额敏河无显著变化,伊犁河呈弱上升趋势。下垫面覆盖方面,两区域 NDVI 均呈弱上升趋势;耕地面积占比与不透水面积占比也均呈上升趋势,变化特征较为一致。

羌塘高原地区的驱动因子变化呈现独特的高原特征。气候条件方面,该区域降水量与气温均呈上升趋势,符合高原气候变化的整体规律。人类活动与下垫面覆盖方面,受高原生态保护与人类活动强度较低的影响,两者均无显著变化,保持相对稳定的状态。

3.3 西北地区生境质量对变化环境的响应机制

3.3.1 XGBoost-SHAP 驱动机制解析结果

图 6 为 XGBoost 模型对西北地区生境质量的模拟结果与 InVEST 模型计算结果对比,模拟结果与计算结果显示出良好的一致性。从评价指标来看,生境质量模拟的 RMSE 和 R^2 在训练集分别为 0.041 和 0.971,在测试集分别为 0.069 和 0.914,表明 XGBoost 模型在模拟西北地区生境质量时表现优异,能够较好地捕捉降水、气温、耕地面积占比、不透水面积占比、NDVI、灌溉用水、制造业用水等不同驱动因子与生境质量之间的关系,适用于该地区的生境质量模拟。

基于 XGBoost-SHAP 驱动机制解析模型,计算数据集中各特征值的绝对平均 SHAP 值,明确不同

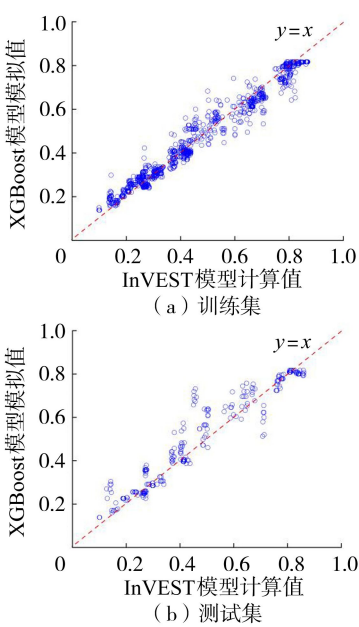


图 6 XGBoost 模型对西北地区生境质量的模拟结果与 InVEST 模型计算结果对比

Fig. 6 Comparison between simulation results of XGBoost model and calculation results of InVEST model for habitat quality in Northwest China

驱动因子对生境质量的影响程度。根据西北地区生境质量驱动因子的绝对平均 SHAP 值,得到各驱动因子对生境质量的影响强度由大到小依次为:NDVI (0.141)、降水量(0.046)、耕地面积占比(0.027)、气温(0.018)、灌溉用水(0.01)、制造业用水(0.003)、不透水面积(0.002)。

3.3.2 地区整体生境质量对变化环境的响应机制

各驱动因子对西北地区生境质量的影响呈现显著梯度差异,直观反映了不同要素在区域生态系统中的作用权重。其中,NDVI 以 0.141 的绝对平均 SHAP 值位居首位,远超其他指标,表明植被覆盖是决定该区域生境质量的核心因素,丰富的植被能稳固土壤、调节微气候、为生物提供多样栖息空间,其支撑作用在生态脆弱的西北地区尤为突出。气候条件中,降水量(0.046)影响显著高于气温(0.018),这与西北地区干旱半干旱特征密切相关;降水作为水资源主要来源,直接影响植被生长、湿地维系和土壤湿度;气温则更多通过间接改变蒸发量等体现作用,短期内影响较弱。下垫面覆盖因素中,耕地面积占比(0.027)影响强于不透水面积(0.002),说明农业开发对自然生境的挤占改造是更关键的生态干扰源;不透水面积占比影响较小,可能与西北地区城市化进程较缓、人工硬化地表扩张有限有关。人类活动相关用水指标中,农业灌溉用水(0.01)影响高于制造业用水(0.003),既反映农业灌溉在区域用水结构中的主导地位,也暗示不合理灌溉方式(如漫

灌)可能通过引发土壤盐渍化、挤占生态用水等,对生境质量产生更明显扰动;制造业用水影响较弱,可能与区域工业规模较小、废水处理技术提升有关。整体而言,自然要素(尤其是植被和降水)仍是调控西北地区生境质量的主导力量,人类活动对下垫面的改造及水资源利用方式则是不可忽视的次要影响因素,为区域生态保护策略制定提供了明确优先级参考。

3.3.3 典型水资源三级区生境质量对变化环境的响应机制

典型水资源三级区生境质量对驱动因子的响应呈现显著区域分化,且与地区整体的响应机制规律高度契合。河西走廊石羊河、黑河、疏勒河生境质量呈增加趋势,其核心驱动机制为气候因子变化(降水显著增加)与政策干预的协同作用。具体包括三北防护林体系建设工程(1978 年启动)、黑河综合治理工程(2001 年启动)、石羊河重点治理规划(2007 年批复)及敦煌水资源合理利用与生态保护综合规划(2011 年启动)等一系列生态工程,有效遏制了区域生态退化,与降水量增加的自然条件形成协同叠加效应。塔里木河各水资源三级区则呈现明显分化特征:阿克苏河、喀什噶尔河虽降水量与 NDVI 均有增加,但耕地扩张(两区域 2023 年耕地面积较 1985 年分别扩张超 45% 和 60%)导致生境质量下降;和田河、克里亚河诸小河则呈现相反态势,尽管耕地面积有所增加,但降水量显著增加(自然要素主导)推动生境质量上升;叶尔羌河前期因耕地扩张导致生境质量下滑,后期则因耕地面积趋于稳定与降水量增加(自然与人类活动达成动态平衡)实现回升。额敏河与伊犁河生境质量持续下降,主因是西部大开发战略与耕地占补平衡政策驱动下的耕地大幅扩张(两区域 2023 年耕地面积较 1985 年增幅均超 45%)。两区域农业生产地位突出——伊犁州(伊犁河)为新疆粮食主产区,额敏县(额敏河)为国家粮食基地县,此类人类活动对下垫面的改造构成生境退化的关键驱动因素。

3.4 讨论

在西北地区生境质量演变态势方面,既有研究已揭示了西北地区不同空间单元生境质量的基本特征:如新疆全域呈现衰退趋势^[8];河西走廊整体处于较低水平并缓慢上升,且呈现“南高北低”的空间格局^[9];塔里木河地区整体持续下降,空间上表现为“边缘高、中部低”的特征^[39]。这些成果为探索西北地区生境质量格局奠定了重要基础,但仍存在两方面局限:①研究多聚焦单一流域或固定时段,缺乏对西北地区全域跨更长时序的系统性整合;②空间

单元划分多基于行政或自然地理边界,对与干旱区生境关联更为紧密的水资源三级区关注不足。本文在既有成果基础上进一步深化研究,在时序维度上,覆盖 1985—2023 年,明确了西北地区全域生境质量“先降后升再降”的完整变化过程;在空间维度上,基于水资源三级区视角,细化了不同区域生境质量的时空演变特征,如河西走廊石羊河、黑河、疏勒河三区域变化趋势一致,塔里木河各水资源三级区呈现显著差异化特征,北疆伊犁河与额敏河整体处于较高水平但逐年下降。这种从全域到水资源三级区的空间尺度梯度延伸,与从整体时序到逐年动态的时间尺度精细解构,共同构成的双维度解析框架,为揭示干旱区生境质量的整体性规律与区域性分异特征提供了更精细化的认知视角。

在驱动机制解析方面,前人研究已识别出生境质量受气候条件、人类活动、下垫面覆盖等因素的综合影响。气候条件如降水和气温,在生态脆弱区域尤为关键,降水直接决定生态系统的水分供给,调控植被生长、土壤湿度及水文过程,进而影响生物栖息地的水分适宜性;气温则主导生态系统的能量平衡,通过影响生物新陈代谢、植被光合作用效率及物质循环速率,决定生物生存的温度阈值与生态系统的生产力水平^[40]。人类活动中的用水行为也对生境质量有重要影响,农业灌溉用水的不合理分配可能导致湿地萎缩和土壤盐渍化,制造业用水产生的废水若处理不当会造成水体污染,这些都会改变生物的生存条件,进而影响生境质量的整体水平^[41-43]。另外,NDVI 的提升能显著改善生境质量,这是由于高 NDVI 值意味着更丰富的植被覆盖,可增强生态系统的稳定性和抗干扰能力^[10,44];而耕地面积占比过高会挤占自然生境空间,不透水面积占比增加则会破坏水循环和土壤结构^[45],这些都会对生境质量产生负面影响。以往的研究中,张志浩等^[8]强调土地利用转化的主导性,隋露等^[46]侧重高程与气候的作用,阿迪力江·帕尔合提等^[10]指出土地利用程度与潜在蒸散发的负相关。但这些研究均存在“单因子聚焦多、多因子协同少”和“定性描述多、定量拆分少”的局限。本文采用多方法耦合框架,通过 InVEST 模型评估西北地区及各水资源三级区的生境质量时空演变态势,再借助 XGBoost 模型与 SHAP 方法实现对西北地区生境质量的多因子定量评估,明确 NDVI(下垫面覆盖)、降水量(气候)、耕地面积比例(人类活动-下垫面覆盖耦合)是三大核心驱动因子,并结合政策背景分析西北地区各典型水资源三级区生境质量变化的驱动机制。

4 结 论

a. 1985—2023 年西北地区生境质量整体处于较低水平,呈先降后升再降的波动变化趋势;空间异质性显著,高等级集中于南部的羌塘高原、北部的额尔齐斯河以及东部黄河部分区域,低等级主要位于中部的塔里木盆地荒漠带,西部喀什噶尔河空间分布较为复杂,整体呈现“南、北、东三面山地高、中部荒漠低”的环状格局。

b. 河西走廊,石羊河多年平均生境指数与西北地区整体水平相近;黑河、疏勒河则长期偏低,其中石羊河、黑河呈持续上升态势,疏勒河则经历先降后升再降的波动上升过程,且 3 个水资源三级区均表现为由南部祁连山向北部走廊平原逐步递减。塔里木河各水资源三级区中,阿克苏河和喀什噶尔河呈下降趋势,和田河和克里亚河诸小河持续上升,开孔河、渭干河、叶尔羌河和车尔臣河诸小河生境质量整体保持稳定;空间上,干流以南各水资源三级区明显低于干流以北各水资源三级区,且干流以北区域自北向南递减、干流以南区域自南向北递减。伊犁河、额敏河及羌塘高原区等水资源三级区的生境质量显著高于西北地区平均水平,但伊犁河与额敏河呈逐年下降趋势,羌塘高原区整体保持稳定;空间上,伊犁河中游河谷、额敏河北缘局部及羌塘高原西南缘戈壁形成低值中心。

c. 基于 XGBoost 模型,在水资源三级区尺度上构建并验证了 1985—2023 年生境质量与气候、人类活动及下垫面覆盖驱动因子的定量关系。XGBoost 模型表现优异,预测精度可靠。引入 SHAP 方法量化了降水量、气温、耕地面积占比、不透水面积占比、NDVI、农业灌溉用水及制造业用水对生境质量的影响。结果表明,西北地区生境质量受气候、人类活动、下垫面覆盖等多因子耦合驱动,其中 NDVI、降水量和耕地面积占比为核心驱动因子。

参考文献:

[1] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等. 黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 38-46. (Ju Qin, Pu Yuanyuan, Shen Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 38-46. (in Chinese))

[2] 袁汝华,李趁,陈建明. 基于 CVM 的城市河道改造生态环境价值评估[J]. 水利经济, 2024, 42 (3): 27-35. (Yuan Ruhua, Li Chen, Chen Jianming. Ecological environment value assessment of urban river channel

reconstruction based on CVM [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (3): 27-35. (in Chinese))

[3] 王俊,刘超,王智源,等. 洪泽湖流域污染负荷削减对生境质量的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 190-199. (Wang Jun, Liu Chao, Wang Zhiyuan, et al. Effects of pollution load reduction on habitat quality in Hongze Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 190-199. (in Chinese))

[4] 侯彩霞,陈柯成,付汉良. 西北地区水安全综合评价及障碍因子分析[J]. 水利经济, 2025, 43 (2): 81-89. (Hou Caixia, Chen Kecheng, Fu Hanliang. Comprehensive evaluation of water security and obstacle factor analysis in Northwest China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (2): 81-89. (in Chinese))

[5] 李光轩,赵钟楠,李原园,等. 气候变化下西北内陆河典型流域出山径流变化归因分析[J]. 水资源保护, 2026, 42 (1): 152-161. (Li Guangxuan, Zhao Zhongnan, Li Yuanyuan, et al. Attribution analysis of mountainous runoff evolution in typical basins of northwest inland rivers under climate change [J]. Water Resources Protection, 2026, 42 (1): 152-161. (in Chinese))

[6] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology [J]. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25 (1): 173-182.

[7] 卢梦,王鹤松,荀雪. 阿勒泰地区生境质量的时空演变及其驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46 (3): 27-39. (Lu Meng, Wang Hesong, Xun Xue. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Altay area and its driving factors [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46 (3): 27-39. (in Chinese))

[8] 张志浩,何宝忠,宋雅宁,等. 基于 SD-PLUS-InVEST 的新疆土地利用及生境质量多情景分析[J]. 环境科学与技术, 2025, 48 (3): 10-22. (Zhang Zhihao, He Baozhong, Song Yaning, et al. Multi-scenario analysis of land-use and habitat quality in Xinjiang based on SD-PLUS-InVEST [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48 (3): 10-22. (in Chinese))

[9] 王梓洋,石培基,李雪红,等. 河西走廊地区生境质量对土地利用变化的响应机制及提升路径[J]. 环境科学, 2024, 45 (12): 6910-6921. (Wang Ziyang, Shi Peiji, Li Xuehong, et al. Response mechanism and promotion path of habitat quality to land use change in Hexi Corridor Area [J]. Environmental Science, 2024, 45 (12): 6910-6921. (in Chinese))

[10] 阿迪力江·帕尔合提,李刚勇,陈春波,等. 昆仑山北坡绿洲荒漠关键带生境质量时空变化:以和田地区于田绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2025, 48 (10): 1721-1735. (Adilijian Parhat, Li Gangyong, Chen Chunbo, et al. Spatio-temporal shifts in ecological habitat quality of the oasis-desert critical zone on the northern slope of Kunlun

- Mountains;taking the Yutian Oasis in Hotan Prefecture as an example[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(10): 1721-1735. (in Chinese))
- [11] 闫晓梅,王宏卫,罗魁,等. 基于生态安全格局确定县域生物多样性保护的优先区域:以布尔津县为例[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(4): 586-598. (Yan Xiaomei, Wang Hongwei, Luo Kui, et al. Determining priority areas for county biodiversity conservation based on ecological security pattern;a case study of Burqin County[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(4): 586-598. (in Chinese))
- [12] 陈乐,卫伟. 西北旱区典型流域土地利用与生境质量的时空演变特征[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1909-1918. (Chen Le, Wei Wei. Spatiotemporal changes in land use and habitat quality in a typical dryland watershed of northwest China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1909-1918. (in Chinese))
- [13] Wei Qianqian, Abudurehman M, Halike A, Yao, et al. Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109632.
- [14] He Bing, Chang Jianxia, Guo Aijun, et al. Assessment of river basin habitat quality and its relationship with disturbance factors:a case study of the Tarim River Basin in Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(2): 167-185.
- [15] 张莹,王让会,刘春伟,等. 祁连山自然保护区生境质量模拟及预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3): 135-144. (Zhang Ying, Wang Ranghai, Liu Chunwei, et al. Simulation and prediction of habitat quality in the Qilian Mountain Nature Reserve [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2024, 48(3): 135-144. (in Chinese))
- [16] 苏军德,赵晓同,李国霞,等. 县域尺度下甘南州生境质量时空演变及驱动力分析[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(12): 6679-6792. (Su Junde, Zhao Xiaojiong, Li Guoxia, et al. Analysis of spatiotemporal evolution and driving forces of habitat quality in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture at the county-level scale [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(12): 6679-6792. (in Chinese))
- [17] 赵晓同,王建,苏军德,等. 基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 301-308. (Zhao Xiaojiong, Wang Jian, Su Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18): 301-308. (in Chinese))
- [18] Wang Baixue, Cheng Weiming. Effects of land use/cover on regional habitat quality under different geomorphic types based on InVEST model[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1279.
- [19] 粟晓玲,刘雨翰,姜田亮,等. 西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 9-18. (Su Xiaoling, Liu Yuhuan, Jiang Tianliang, et al. Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystem in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 9-18. (in Chinese))
- [20] 郭泽呈,魏伟,石培基,等. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1948-1965. (Guo Zecheng, Wei Wei, Shi Peiji, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1948-1965. (in Chinese))
- [21] 刘轩,粟晓玲,刘雨翰,等. 西北地区生态干旱脆弱性评估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 65-73. (Liu Xuan, Su Xiaoling, Liu Yuhuan, et al. Vulnerability assessment of ecological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 65-73. (in Chinese))
- [22] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1189-1203. (Deng Mingjiang. "Three Water Lines" strategy: its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1189-1203. (in Chinese))
- [23] 陈启慧,纪璐,李琼芳,等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 90-99. (Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 90-99. (in Chinese))
- [24] 宋子奕,鲁程鹏,吴成城,等. 2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 160-167. (Song Ziyi, Lu Chengpeng, Wu Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of ground water level in Hexi Corridor from 2009 to 2019 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 160-167. (in Chinese))
- [25] Li Huiwen, Cao Yue, Xiao Jingfeng, et al. A daily gap-free normalized difference vegetation index dataset from 1981 to 2023 in China[J]. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 527.
- [26] Wang Xiaojun, Liu Guangxu, Lin Durui, et al. Water yield service influence by climate and land use change based on InVEST model in the monsoon hilly watershed in South China[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 2024-2048.
- [27] 张锐,刘京,霍璐彦町,等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务驱动因子与权衡协同关系:以陕西渭北旱原为例[J]. *环境科学*, 47(6): 3941-3954. (Zhang Rui, Liu Jing, Huo Rongyanting, et al. Analyzing driving factors and trade-offs/synergies of ecosystem services using the

- InVEST model: a case study from the Weiwei Loess Plateau, Shaanxi, China [J]. *Environmental Science*, 47 (6):3941-3954. (in Chinese))
- [28] 邱大鹅,张军以,齐渴路,等. 基于可解释性机器学习的四川生境质量时空演变特征及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2025, 45(24):12306-12323. (Qiu Dae, Zhang Junyi, Qi Kelu, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and critical driving factor threshold analysis of habitat quality in Sichuan province based on SHAP-interpretable machine learning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(24):12306-12323. (in Chinese))
- [29] 刘东岳,董文卓,勾容,等. 基于 InVEST 模型和 XGBoost-SHAP 的重庆市生态系统服务供需时空演变及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2026, 47(5):3312-3323. (Liu Dongyue, Dong Wenzhuo, Gou Rong, et al. Spatial and temporal evolution of ecosystem service supply and demand and analysis of driving factors in Chongqing based on InVEST model and XGBoost-SHAP [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(5):3312-3323. (in Chinese))
- [30] 董增川,王佳晟,崔璨,等. 基于滚动交叉验证的城市需水预测方法[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3):13-19. (Dong Zengchuan, Wang Jiasheng, Cui Can, et al. Method for urban water demand forecast based on rolling cross-validation[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3):13-19. (in Chinese))
- [31] 施国良,薛航. 基于 XGBoost 算法的跨境河流水资源争端影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6):137-144. (Shi Guoliang, Xue Hang. XGBoost-based analysis of factors affecting water resources disputes in transboundary rivers[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6):137-144. (in Chinese))
- [32] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates Inc, 2017: 4768-4777.
- [33] 蒋燕,牛杰帆,张珂,等. 引入质量守恒的 LSTM 模型在径流模拟中的应用及其可解释性分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(6):149-157. (Jiang Yan, Niu Jiefan, Zhang Ke, et al. Runoff simulation based on mass-conserving LSTM model and its interpretability analysis [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(6):149-157. (in Chinese))
- [34] 咎子懿,岳卫峰,赵航正,等. 基于机器学习和 SHAP 算法的农业用水量预测模型构建[J]. *节水灌溉*, 2024(12):102-110. (Zan Ziyi, Yue Weifeng, Zhao Hangzheng, et al. Development of agricultural water-consumption prediction model based on machine learning and SHAP[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(12):102-110. (in Chinese))
- [35] 王建群,段蓉,蔡晨凯. TIGGE 模式在淮河水系史河流域的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1):14-21. (Wang Jianqun, Duan Rong, Cai Chenkai. Application of TIGGE precipitation forecast in Shihe Catchment of Huaihe River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(1):14-21. (in Chinese))
- [36] 朱晓琳,李一平,许益新,等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. *水资源保护*, 2020, 36(3):67-75. (Zhu Xiaolin, Li Yiping, Xu Yixin, et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3):67-75. (in Chinese))
- [37] 许月萍,曾田力,周欣磊,等. 基于主要驱动因子筛选法和深度学习算法的浙江省动态需水量预测[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(2):47-53. (Xu Yueping, Zeng Tianli, Zhou Xinlei, et al. Forecast of dynamic water demand in Zhejiang Province based on main driving factor screening method and deep learning algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(2):47-53. (in Chinese))
- [38] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324):1379-1389.
- [39] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 黄河水源涵养区不同生态水文分区植被对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2025, 45(22):11205-11217. (Han Yuna, Zuo Depeng, Wang Guoqing, et al. Response of vegetation growth to climate change based on the ecohydrological regionalization in the water conservation area of the Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(22):11205-11217. (in Chinese))
- [40] 王彪,吴燕锋,章光新,等. 流域生态系统多水文功能性及其对农业水安全影响综述[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(12):2340-2358. (Wang Biao, Wu Yanfeng, Zhang Guangxin, et al. Review of the multiple hydrological functions of watershed ecosystems and their impacts on agricultural water security[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(12):2340-2358. (in Chinese))
- [41] 贾玉博,杨宏伟,栗晓玲,等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2024, 40(5):86-94. (Jia Yubo, Yang Hongwei, Su Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5):86-94. (in Chinese))

(下转第 118 页)

Nanguo River Basin based on the LSTM model [J].
Journal of China Hydrology, 2025, 45 (3) : 78-85. (in
Chinese))

[30] Santos C, Cetin B, Murillo M, et al. Novel approach to
evaluate the effect of aggregate physical properties on the
stiffness of pavement base layer [J]. International Journal
of Pavement Engineering, 2025, 26 (1) : 2532697.

[31] Imai N, Samejima H, Demies M, et al. Response of tree
species diversity to disturbance in humid tropical forests of
Borneo [J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27 (4) :
739-748.

[32] 张豪, 鲍振鑫, 王婕, 等. 气候与植被协同变化下的径流
响应研究: 以秦岭北麓为例 [J]. 水科学进展, 2025, 36
(4) : 596-609. (Zhang Hao, Bao Zhenxin, Wang Jie, et al.
The response of runoff to coordinated changes in climate
and vegetation: a case study at northern foothills of Qinling
Mountains [J]. Advances in Water Science, 2025, 36 (4) :
596-609. (in Chinese))

[33] 莫淑红, 王学风, 勾奎, 等. 气候变化和人类活动对灞河
流域径流情势的影响分析 [J]. 水力发电学报, 2016, 35
(9) : 7-17. (Mo Shuhong, Wang Xuefeng, Gou Kui, et al.
Impacts of climate changes and human activities on annual
runoff of Bahe River basin [J]. Journal of Hydroelectric
Engineering, 2016, 35 (9) : 7-17. (in Chinese))

[34] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响
要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5) : 9-17. (Li
Fawen, Tao Renjie. Analysis of factors influencing
hydrological processes in the Ziya River Basin under
changing environment [J]. Water Resources Protection,
2023, 39 (5) : 9-17. (in Chinese))

[35] 王金星. 渭河流域关中地区水资源承载力及优化提升
研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.

[36] 张建. 秦岭北麓水系现状调查研究: 以辋川河水生态治
理为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[37] 樊丽京. 气候变化背景下渭河流域农业灌溉对河流流
量衰减的风险评估 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学,
2025.

[38] 李慧, 邓佳伟, 李亚鑫, 等. 秦岭北麓典型流域径流对气
候和土地利用变化的响应: 以灞河流域为例 [J]. 生态
环境学报, 2024, 33 (5) : 802-811. (Li Hui, Deng Jiawei,
Li Yaxin, et al. Impacts of climate and land use change on
runoff in typical basin of northern foothills of Qinling
Mountains: case study of Bahe River Basin [J]. Ecology
and Environmental Sciences, 2024, 33 (5) : 802-811. (in
Chinese))

[39] 崔亮, 王进, 吕明侠. 干旱半干旱区流域水文变异下生
态效应研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (7) : 72-74.
(Cui Liang, Wang Jin, Lv Mingxia. Ecological effects of
watershed hydrological variation in arid and semi-arid
regions [J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (7) :
72-74. (in Chinese))

[40] 胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过
程的影响机制研究: 以灞河流域为例 [J]. 干旱区地理,
2017, 40 (5) : 967-978. (Hu Sheng, Qiu Haijun, Song
Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on
runoff process in the north slope of Qinling Mountains: a
case of the Bahe River Basin [J]. Arid Land Geography,
2017, 40 (5) : 967-978. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 08 - 07 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 76 页)

[42] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水
污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例 [J]. 环境科学,
2021, 42 (7) : 3291-3303. (Ma Xiaoxue, Gong Chang, Guo
Jiaxun, et al. Water pollution characteristics and source
apportionment in rapid urbanization region of the lower
Yangtze River: considering the Qinhuai River Catchment
[J]. Environmental Science, 2021, 42 (7) : 3291-3303. (in
Chinese))

[43] Yuan Fei, Bauer M E. Comparison of impervious surface
area and normalized difference vegetation index as
indicators of surface urban heat island effects in Landsat
imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106
(3) : 375-386.

[44] 张建永, 李扬, 赵文智, 等. 河西走廊生态格局演变跟踪
分析 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (3) : 5-10. (Zhang
Jianyong, Li Yang, Zhao Wenzhi, et al. Tracking analysis
on changes of ecological patterns in Hexi Corridor Region
[J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (3) : 5-10. (in
Chinese))

[45] 王洋, 冯卓亚, 许丽, 等. 塔里木河流域生境质量与土地
利用变化响应及驱动力 [J]. 干旱区研究, 2024, 41
(12) : 2132-2142. (Wang Yang, Feng Zhuoya, Xu Li, et
al. Response and influencing factors of habitat quality and
land use change in the Tarim River Basin [J]. Arid Zone
Research, 2024, 41 (12) : 2132-2142. (in Chinese))

[46] 隋露, 闫志明, 李开放, 等. 人类活动及气候变化影响下
伊犁河谷生境质量预测研究 [J]. 干旱区地理, 2024, 47
(1) : 104-116. (Sui Lu, Yan Zhiming, Li Kaifang, et al.
Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under
the influence of human activities and climate change [J].
Arid Land Geography, 2024, 47 (1) : 104-116. (in
Chinese))

(收稿日期: 2025 - 09 - 03 编辑: 王芳)