文章编号:1671-9352(2026)10-0201-12 DOI:10.6040/j.issn.1671-9352.0.2026.109

黄河流域典型城市地表水连通性变化与生态修复策略

张学涵,韩美*
(山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要:济南市是黄河流域中心城市,是驰名中外的“泉城”,全面评估其地表水连通性的时空变化,识别关键影响因素,提出科学可行的优化路径,对提升其水资源流动性、改善水质、促进以泉水为核心的生态系统修复具有重要意义。本研究立足南山北水地貌格局,构建“结构连通-过程连通-功能连通”三维评价体系,综合利用遥感解译、地理空间分析等多源数据,系统揭示 1985—2022 年济南市地表水连通性的时空演变特征与驱动机制,并提出多尺度优化策略。实践上,将海绵城市建设理念融入路径设计,提出适用于北方岩溶型城市的保泉供水协同优化策略,为破解水资源供需矛盾提供技术范式。结果表明:近 40 年来,济南市的地表水连通性呈现波动上升的趋势;在空间上呈现出南部山区优于北部城区的格局,过渡带受农田水利工程影响,整体形成结构优化-功能提升的良性循环。生态修复工程缓解了城市连通性退化,但城市化扩张对水系格局的切割效应仍然存在。地理探测器定量归因表明,GDP 和年降水量是解释连通性空间分异的主导因子,人类活动已成为影响连通性演变的主导因素。基于上述结论,本文针对性提出南部岩溶区封山育林与阶梯渗滤池修复地下水、北部平原疏浚河道与建设生态堰重构廊道、建成区推广海绵工程与智慧管理,促进蓝绿协同的差异化修复策略。

关键词:济南市;地表水连通性;景观格局指数;生态修复策略;黄河流域
中图分类号:X171.1 **文献标志码**:A
引用格式:张学涵,韩美. 黄河流域典型城市地表水连通性变化与生态修复策略[J]. 山东大学学报(理学版),2026,61(10):201-212.

Changes in surface water connectivity and ecological restoration strategies in typical cities of the Yellow River Basin

ZHANG Xuehan, HAN Mei*
(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, Shandong, China)

Abstract: Jinan, a central city in the Yellow River Basin and a renowned “City of Springs,” is characterized by a distinctive spring-centered water ecosystem. A comprehensive assessment of the spatiotemporal changes in its surface water connectivity, identification of the key influencing factors, and development of scientifically sound and feasible optimization pathways are of considerable significance for enhancing water circulation, improving water quality, and promoting the restoration of spring-centered ecosystems. Based on the geomorphological pattern characterized by mountains in the south and water systems in the north, this study established a three-dimensional evaluation framework integrating structural, process, and functional connectivity. Multi-source data, including remote sensing interpretation and geospatial analysis, were used to systematically reveal the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of surface water connectivity in Jinan from 1985 to 2022, and multi-scale optimization strategies were subsequently proposed. In practical terms, the concept of sponge city development was incorporated into the design of restoration pathways, and a coordinated optimization strategy for spring conservation and water supply in northern karst cities was proposed, providing a technical framework for addressing the imbalance between water supply and demand. The results showed that surface water connectivity in Jinan exhibited a fluctuating upward trend over the past four decades. Spatially, connectivity was generally higher in the southern mountainous areas than in the northern urban areas. Influenced by agricultural water conservancy projects, the transitional zone generally developed a positive cycle of structural optimization and functional improvement. Ecological restoration projects alleviated the degradation of urban water connectivity, although the fragmentation of the water network caused by urban expansion remained

收稿日期:2026-04-22; **网络出版时间**:2026-08-26
基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371517); 国家社会科学基金资助项目(21BGL026)
第一作者:张学涵(2003—),男,硕士研究生,研究方向为黄河流域地表水文连通及其生态环境效应. E-mail:2722080884@qq.com
*通信作者:韩美(1963—),女,教授,博士生导师,博士,研究方向为黄河流域生态保护与高质量发展. E-mail:hanmei568568@126.com

evident. Quantitative attribution analysis using geodetector indicated that GDP and annual precipitation were the dominant factors explaining the spatial differentiation of connectivity, and that human activities had become the principal driver of connectivity evolution. Based on these findings, differentiated restoration strategies were proposed, including mountain closure for afforestation and the construction of stepped infiltration basins to restore groundwater in the southern karst region; river dredging and ecological-weir construction to reconstruct water corridors in the northern plain; and the promotion of sponge-city projects and smart management in built-up areas to enhance blue-green coordination.

Key words: Jinan City; surface water connectivity; landscape pattern indices; ecological restoration strategies; Yellow River Basin

0 引言

在全球气候变化与城市化进程加速的双重驱动下，水资源系统的脆弱性日益凸显[1]，河湖水系连通性作为河湖生态系统的核心特征，其生态学机理已成为国际研究热点[2]。近年来，水文连通性研究已从早期的结构描述转向功能评估与驱动机制解析，图论、网络分析和机器学习等方法的应用日益广泛[3]。特别是在地下水-地表水相互作用方面，山区基岩含水层的水力连通性对气候变化高度敏感[4]；水利工程对洪泛区地表水连通性的影响可通过数值模拟与地统计学方法有效量化[5]；地球化学示踪与统计分析可用于识别地下水来源及含水层联系[6]；自然示踪剂也被广泛应用于山区流域地下水补给及其与地表水连通性的评估[7]。这些研究为理解多尺度水文连通性提供了重要技术支撑。

水文连通性研究历经数十年发展，已形成较为完善的理论框架[8]。水文连通性概念起源于数学图论领域，Bondy 和 Murty[9] 系统阐述了图论的基本原理，为连通性分析的后续应用奠定基础。21 世纪初，Pringle[10] 将水文连通性引入生态水文学与保护区管理研究，阐明了水文过程对物质、能量和生物传输的重要作用，推动了生态水文交叉研究的发展。随着学科交叉深化，Bracken 等[11] 从概念层面区分结构连通性与功能连通性，强调二者在径流主导地貌系统中的作用差异；Turnbull 等[12] 构建了跨时空尺度的生态水文相互作用框架，揭示半干旱区连通性的动态性与尺度依赖性；Ward[13] 则强调“纵向-横向-垂向-时间”四维连通性，为城市河流修复提供理论支撑。近年来，研究者开始关注水力捷径对农田与地表水连通性的增强效应[14]，以及环境水流释放对恢复地下水-地表水连通性的积极作用[15]。在河漫滩景观中，地表水连通性表现出无标度结构特征[16]，而季节性孤立湖泊的连通性动态则受湖泊-洪泛区系统水文过程的控制[17]。这些前沿研究为理解人类活动与自然过程耦合下的连通性演变提供了新视角。

济南市作为黄河流域中心城市与独具特色的泉城生态文化承载地，因泉而生、因泉而名，其泉水生态系统是城市最核心的生态标识与文化符号。但这座拥有七十二名泉的千年泉城，正面临独特水文地质结构下的严峻挑战。受降水偏少、城市用水增长和岩溶地下水集中开采等因素影响，济南泉群曾多次出现间歇性断流，泉域地下水处于超采状态[18]。这不仅暴露出自然水文循环受阻与人工调控低效的双重困境，更直接威胁泉城赖以存续的地下水补给系统与泉水持续喷涌能力。济南市人均水资源量仅 283 m^3，不足全国均值的七分之一，水资源供需矛盾进一步加剧水生态系统健康风险与城市水安全压力，使得保泉与供水的矛盾成为泉城可持续发展的关键制约。已有研究主要涉及济南市河流水污染防治与生态修复[19]，但对多尺度水网结构-功能协同机制，尤其是岩溶区地下水与地表水耦合关系，仍缺乏系统解析。因此，全面评估济南市地表水连通性的时空变化，识别关键影响因素，并提出科学可行的优化路径，对提升水资源流动性、改善水质及促进以泉水为核心的生态系统修复具有重要意义。

作为泉城，济南市的水文连通性挑战具有典型性与复杂性。其独特的岩溶地貌与南山北水格局，使地下水与地表水的动态交互成为泉水喷涌的核心机制。现有研究已揭示济南泉域河流-泉水连通及其水化学过程[20]，但对 1985—2022 年地表水连通性的长期演变及水库调蓄、跨流域调水、地下水开采等多因素耦合驱动仍缺乏系统刻画。因此，本研究立足南山北水的地貌格局，构建“结构-过程-功能”三维评价体系，通过遥感解译与地理探测器结合的方法，系统诊断黄河、小清河等骨干水系的空间阻隔节点，揭示快速城市化背景下地表-地下水系统的耦合响应机制。实践上，研究将海绵城市建设理念融入路径设计，提出针对北方岩溶型城市的保泉供水优化策略，为破解水资源供需矛盾提供技术范式。这一研究不仅能够为济南市水生态修

复提供科学依据,还可为同类城市提供可借鉴的经验。济南市作为黄河流域典型城市,其研究成果可为流域生态保护与经济发展协同提供参考[21]。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区概况

本研究选取黄河流域下游的核心城市,山东省济南市作为典型案例区(图 1)。济南市位于黄河下游右岸,是黄河流域中心城市群的重要节点,总面积 10 244 km^2,管辖十区二县。其南山北水的阶梯状地貌与暖温带半湿润季风气候下降水时空分布不均的特征,集中体现了黄河流域从山区水源涵养到平原城市化地区的过渡格局与核心水文挑战。作为驰名中外的"泉城",济南市高度依赖于南部岩溶区与北部城区地表水系统的连通性以维持泉水喷涌,其同时面临严峻的水资源短缺问题,人均本地水资源量仅 283 m^3,不足全国平均水平的 1/7,供需矛盾尖锐,体现了黄河流域城市在快速发展中普遍存在的生态保护与水资源利用之间的紧张关系。境内以黄河、小清河、徒骇河等为骨干的"三纵四横"水系,呈现南部自然树枝状补给网络与北部高度渠化、人工化河网并存的二元结构,正是流域内许多城市自然水网与人工干预交织作用的典型代表。因此,以济南市为研究对象,不仅能深入解析其保泉供水的特定问题,更能借此典型窗口,揭示黄河流域城市普遍存在的水文连通性受损机制与生态修复路径,为流域尺度的系统性治理提供科学依据与实践范式。

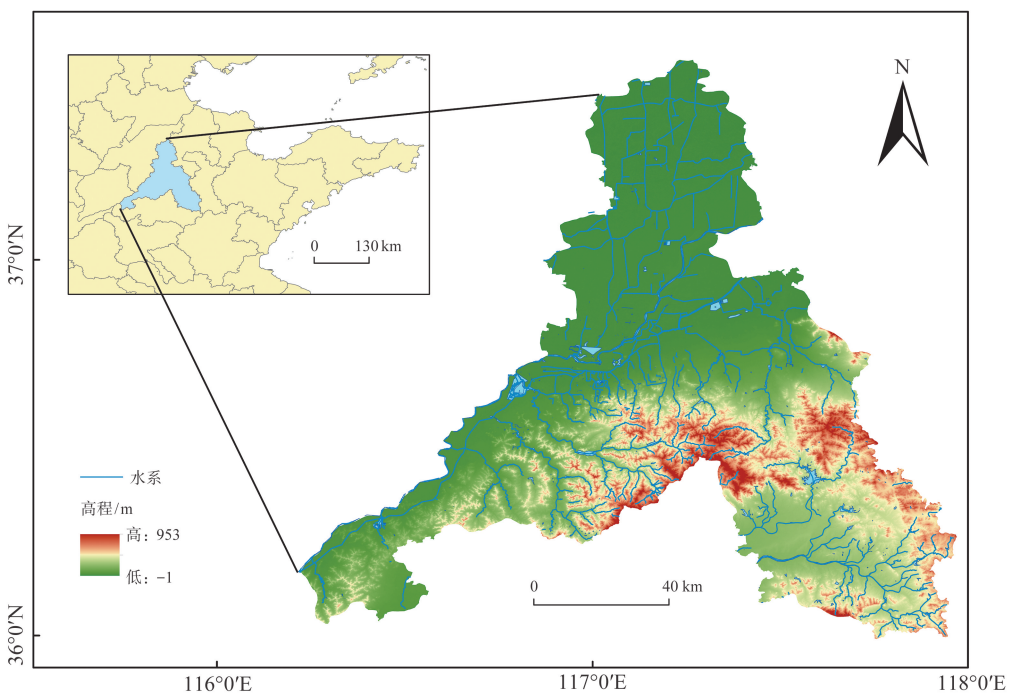


图 1　济南市地形水系图

Fig.1　Topographic and water system map of Jinan City

1.2　数据来源

本文所采用的土地覆盖基础数据为"GLC_FCS30D:1985—2022 年全球 30 m 精细土地覆盖动态监测数据集(https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30/314)",该数据集由中国科学院空天信息创新研究院刘良云研究团队研制[22],该数据基于密集 Landsat 时间序列影像和连续变化检测方法生成,时间范围覆盖 1985—2022 年,空间分辨率为 30 m,具有较好的长时序一致性和地表覆盖分类精度,可满足济南市地表水体斑块识别及连通性变化分析的需要。本文采用空间分辨率为 30 m 的 SRTM DEM 数据(https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-srtmgl1n-003),用于提取济南市地形坡度、地形起伏及河网结构等基础地形信息,并与土地覆盖数据进行空间配准、裁剪和统一投影处理,为地表水连通性格局分析提供地形背景支撑。

本研究以 1985 年作为连通性时序分析起点,主要依据为 GLC_FCS30D 数据集的时间覆盖范围。该数据集提供 1985—2022 年连续年度土地覆盖信息,1985 年是可获得统一分类体系和相同空间分辨率数据的最早年份,因此起始年由数据可得性决定,而非根据结果变化人为选取。考虑到年度水体提取结果可能受遥感影像质量、季节性水位变化和分类误差影响,本文采用 5 年滑动平均方法对年度连通性指数进行平滑处理,以突出阶段性演变趋势。为降低起始年选择对结果的影响,本文对不同起点的滑动平均结果进行了对比,结果表明不同起点下长期变化趋势基本一致,仅端点附近数值存在轻微差异,不影响主要结论。

为定量识别地表水连通性时空分异的关键驱动因子并解析其交互作用,本文选取气候、水文、经济发展、水利工程和地表覆盖等 5 类驱动因子。驱动因子分析涉及多源数据,其中,气象数据来自中国气象数据网;水利工程数据来自《济南市水利志》与水利普查;土地利用数据源自前述土地覆盖分类;地下水开采数据来自《济南市水资源公报》;GDP 来自山东省统计年鉴;其他辅助数据包括《山东省统计年鉴》《济南市统计年鉴》《济南市海绵城市专项规划修编(2020 年)》《济南市国土空间总体规划》《济南市“十四五”水利发展规划》《济南市水资源利用开发规划》《济南市“十四五”水务发展规划和水系规划》等相关规划文件,共同构成多源数据支撑体系。

1.3 数据预处理

在建模前,本文对多源基础数据进行了统一预处理。将土地覆盖数据、DEM 数据和行政边界数据统一至相同坐标系统,并按照济南市行政边界进行裁剪;随后,基于 GLC_FCS30D 土地覆盖分类体系提取地表水体类型,将河流、湖泊、水库、坑塘等重分类为水体斑块,用于景观格局和连通性指数计算。DEM 数据经填洼、坡度和流向分析后,用于辅助识别地形条件与水系空间结构。气象、水资源、统计年鉴和水利工程资料按年份进行整理,对个别缺失值采用线性插值或相邻年份均值补齐,并按照区县尺度或统一网格尺度进行空间匹配。考虑到多源数据的空间尺度差异可能影响景观格局分析结果,本文统一了空间分辨率与分析尺度[23]。

地理探测器模型本身不要求输入变量必须归一化,其关键在于解释变量的合理分层。因此,本文在驱动因子探测前主要对 GDP、年降水量、流量、地表水量、地下水量、城市建成率和 NDVI 等连续变量进行了尺度统一和离散化处理,采用自然断点法划分等级后输入模型。

1.4 研究方法

为系统评估济南市地表水连通性的时空演变,本研究构建了结构-功能-过程三维综合评价框架。该框架旨在从景观格局、生态流潜力及水文动态 3 个互补维度,全面揭示水系连通性的复杂特征,并引入地理探测器方法识别关键驱动因子。

1.4.1 景观指数法

景观指数能够定量刻画斑块的组成、空间配置与破碎化程度,是水文连通性格局分析中的常用方法[24]。结构连通性反映水体斑块的数量、密度、聚集程度与分割状态[25];功能连通性基于图论思想,将水体斑块视为节点、潜在连接路径视为边,用以表征斑块间生态流与水文过程的潜在传输能力。所用指数及其生态学含义如下。

斑块数量(number of patches, NP)与斑块密度(patch density, PD)直接反映地表水体的破碎化程度,其上升趋势常指示自然河道被分割或人工水体增多。

聚合度指数(aggregation index, AI)反映水体斑块在空间上的聚集程度。在本研究中,AI 值的变化尤其关注城市建成区与南部山区的对比,以揭示人工干预对水系空间格局的重塑效应。

$$\mathrm{AI}=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{g_{i,j}}{\max(g_{i,j})}\right)P_i, \tag{1}$$

式中,$g_{i,j}$为景观类型 i 中同类斑块的邻接数,$\max(g_{i,j})$指的是最大邻接数量,P_i 指的是斑块类型的景观组成比例。AI 值接近 1,表示斑块高度聚合,连通性良好;若显著低于 1,则需关注水系分割问题。

景观分割度指数(landscape division index, DIV)表征景观被分割的破碎化水平。针对济南市南山北水的地貌格局,该指数有助于量化从山区连续水系到平原破碎化水网的梯度变化。

$$\mathrm{DIV}=\left\{1-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{a_{i,j}}{A}\right)^2\right\}, \tag{2}$$

式中,$a_{i,j}$为斑块 i,j 之间的面积,A 为景观总面积。DIV 值越高,表明水体斑块分割越明显、结构连通性越弱。

整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC)衡量景观中所有斑块的整体连接程度,对大面积斑块的连通状态尤为敏感,用于评估骨干水系的连接性贡献。

$$\mathrm{IIC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left[(a_i*a_j)/(1+\mathrm{NL}_{i,j})\right]}{A_L^2}, \tag{3}$$

其中, n 是景观中存在的地表水斑块数量,a_i 和 a_j 分别是斑块 i 和 j 的面积。$\mathrm{NL}_{i,j}$是斑块 i 和 j 之间最短路径(拓扑距离)的链接数。A_L 是景观总面积。IIC 的范围是 0 到 1,随着连接性的改善而增加。

可能连通性(probability of connectivity, PC)指数考虑所有可能连接路径的概率,更能反映斑块间物质传输的潜在能力。本研究选用 PC 指数进行与降水等驱动因子的相关性分析,因其能更好地表征潜在水文连接,克服仅依赖现实河道结构的局限。

$$\mathrm{PC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_i a_j P_{i,j}^{*}}{A_L^2}, \tag{4}$$

其中,$P_{i,j}^{*}$是斑块 i 和 j 之间所有可能路径的最大乘积概率。如果斑块 i 和 j 足够接近,最大概率路径将简单地等于斑块 i 和 j 之间的直接运动。PC 值越高,表示斑块连通度越高。

1.4.2　*驱动因子识别模型*

为克服传统相关分析的局限性,定量识别各环境因子对连通性变化的贡献率与交互机制,本研究引入地理探测器(geodetector)模型[26]。

地理探测器是用于探测空间分异性及其背后驱动因子的统计模型。其核心是 q 统计量,值域为[0,1],值越大表示该因子对连通性空间分异的解释力越强。本文利用地理探测器的因子探测功能评估各因子对 PC 指数空间分布的贡献度,并利用交互作用探测功能分析不同因子之间的交互作用对连通性的影响方向。

$$q=1-\frac{1}{n\delta^2}\sum_{h=1}^{l}n_h\delta_h^2, \tag{5}$$

式中:q 为因子作用力,q 值越大表明因子解释力越强;h 为指标分级的数量;n_h 和 δ_h^2 分别为特定层的样本数和方差,n 和 δ^2 分别为整个区域的样本数和方差。

2　结果与讨论

2.1　地表水连通性的时空演变分析

本研究从结构、功能与过程 3 个维度,系统揭示了 1985—2022 年济南市地表水连通性的时空演变特征。总体而言,济南市地表水连通性在快速城市化、降水波动与生态治理工程的共同作用下,呈现出“结构趋于破碎但局部聚集、功能连通阶段性波动、过程连通受人为调度影响明显”的复合演变模式。以下结合多指数测算结果,对其时空格局及驱动机制进行综合讨论。

时间序列分析表明,结构连通性指数呈现差异化演变。斑块数量(NP)与斑块密度(PD)的总体上升趋势(年均增长率分别为 0.4% 和 0.5%)清晰反映了城市化导致的景观破碎化进程。与之呼应,分割度指数(DIV)长期高位攀升,进一步印证了水体斑块间空间隔离的持续加剧。然而,聚合度指数(AI)在波动中略有回升,尤其在 2015 年后表现明显,这表明整体景观趋于破碎,但通过生态修复工程等措施,局部水体的空间聚集程度得到增强,体现了结构性修复措施的积极效应。功能连通性变化反映了城市建设与生态修复的共同影响。可能连通性指数(PC)的持续上升(从 0.32 增至 0.61)表明,闸坝、桥梁等人工设施在客观上改善了水系网络的拓扑连接,增强了潜在的物质传输能力。然而,整体连通性指数(IIC)的剧烈年际波动则暴露这种人工连接的功效局限性。IIC 的波动模式与大规模开发建设和后续生态修复工程的交替推进高度相关,形成“干扰导致下降–修复促成回升”的循环,说明人工设施在提升局部连接的同时,也引入了阻隔效应,

其对生态流的实际促进效果具有不确定性。过程连通性分析将上述格局置于动态水文背景下,揭示其季节性及人为调控特征[27]。研究区降水集中的水文节律导致连通性呈现显著的季节性波动,丰水期自然连通性大幅提升,而枯水期则因生态流量不足而显著下降。人类活动,特别是水利工程调度和土地利用变更,深刻改变了自然水文过程,加剧了非汛期的连通性衰减,使得过程连通性成为自然节律与人为干预共同作用的产物。

值得注意的是,图 2 中 AI 和 DIV 变化较为平缓,而 IIC 和 PC 在 2000 年和 2015 年前后出现明显波动,主要与不同指数的敏感对象不同有关。AI 和 DIV 主要反映水体斑块在全市尺度上的聚集程度和破碎化状态,对局部水系工程、闸坝调度和关键节点连通变化的响应相对较弱;而 IIC 和 PC 基于图论方法计算斑块之间的连接关系,对关键斑块、连接路径和潜在通道变化更加敏感。因此,少数关键河段、水库或人工连通工程的变化,可能引起 IIC 和 PC 的较大波动。2000 年前后的突变可能与中心城区快速扩张、河道渠化和水系人工化改造有关,表现为自然水体连接受阻与人工排水、调蓄网络增强并存[28];2015 年前后的变化则可能与河道综合整治、水源连通工程、生态补水和海绵城市建设等生态治理措施推进有关,使部分孤立水体重新形成潜在连接。因此,图 2 所反映的并非整体景观格局的同步突变,而是结构连通性与功能连通性对城市化和生态修复响应尺度不同的结果。

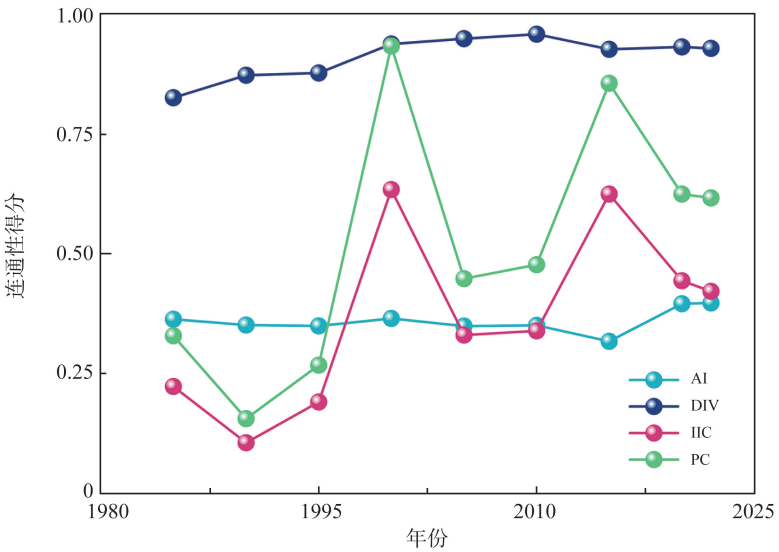


图 2 济南市连通性计算结果

Fig.2 Connectivity calculation results of Jinan City

空间上,地表水连通性表现出沿南部山区至北部平原梯度递减的显著格局,这是自然环境与人类活动强度空间分异共同作用的结果。各区县连通性离散程度的空间变化见图 3。在南部山区,较高的 AI 值和 PC 值、较低的 DIV 值共同表明该区域保持了较好的自然连通性。以自然水系为主导、受人类活动干扰相对较轻是本区连通性较优的主要原因[24]。但局部采矿等活动仍造成了不可忽视的退化点,提示在生态本底优良区域防范局部高强度干扰的重要性。北部平原,尤其是高度城市化的建成区,构成了连通性低地。该区域较低的 AI 值与较高的 DIV 值反映水系结构的高度破碎化。同时,较低的 IIC 与 PC 值表明,尽管人工设施密集,但河道渠化、硬质化改造削弱了水系的生态功能连接,导致其物质传输与生态服务功能较弱[29]。平原与山区的过渡带是连通性变化最为剧烈的生态敏感区。此地地形变化显著,同时承受城市扩张的前沿压力,导致 PD、DIV 等指数空间变异较大。该区域连通性格局的脆弱性,凸显了在城乡交错带开展精细化生态空间规划与管控的必要性。

2.2 水文连通性时空变化的驱动机制分析

水文连通性的时空演变是自然过程与人类活动非线性交互作用的复杂产物。为深入解析驱动机制,本研究将环境因子归纳为气候因子(气温、降水)、水文因子(流量、地表水量、地下水量)、经济发展因子(GDP)、水利工程因子(水利工程数)和地表覆盖因子(城市建成率、NDVI)5 大类,并采用地理探测器进行定量归因,结合岩溶区分布、水库调蓄等济南市区域水文背景和机制讨论,以揭示各因子对地表水连通性空间分异的解释力及其交互作用。

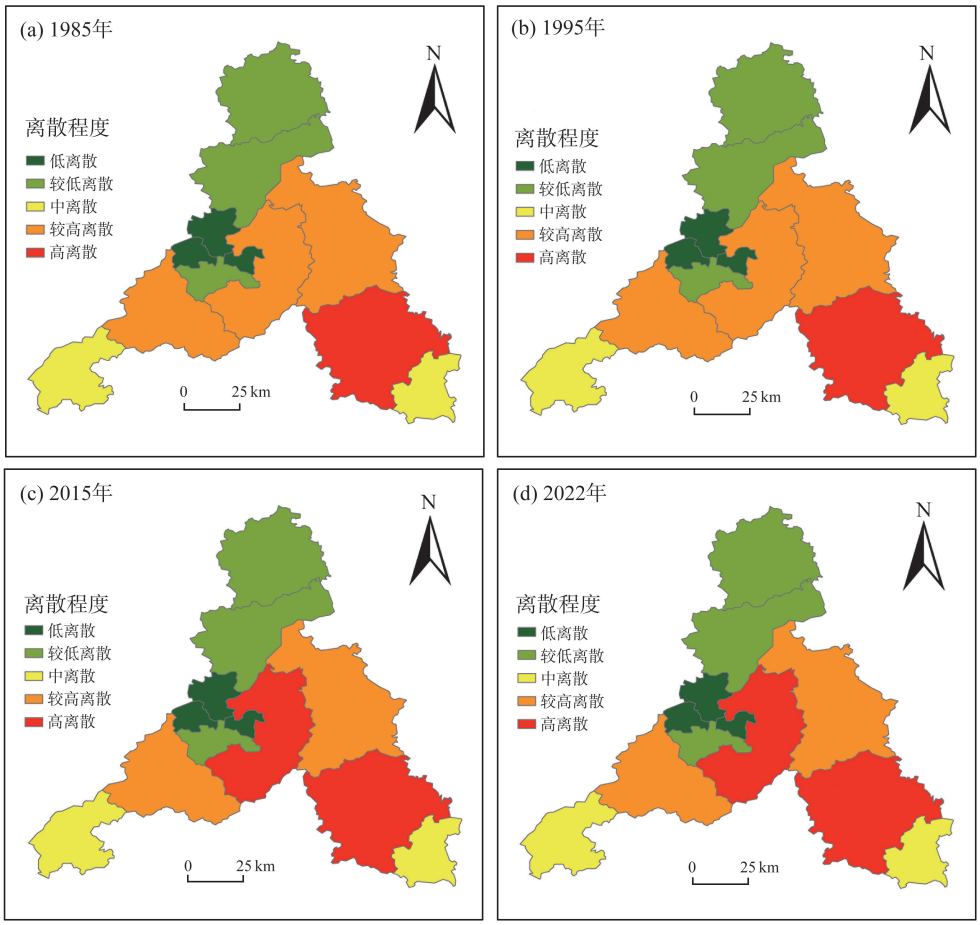


图 3　济南市离散程度变化

Fig.3　Variation of dispersion degree in Jinan City

地理探测器的因子探测结果表明(表 1),所有因子对 PC 指数空间分异的解释力均达到较为显著水平。其中,GDP 的 q 值最高,表明经济发展水平是塑造济南市地表水连通性空间格局的主导因子;年降水量和流量次之,反映了水文过程对连通性的基础控制作用;水利工程数和 NDVI 也表现出较强的解释力;地下水量和地表水量的解释力居中;而城市建成率和气温的 q 值相对较低。城市建成率主要反映建设用地面积占比,能够表征城市扩张的总体程度,但难以直接刻画河道渠化等具体水文过程变化,因此其解释力较低。这一结果定量证实,在快速城市化背景下,人类活动,特别是经济发展驱动的水利工程建设和土地利用改变,已成为影响济南市地表水连通性空间格局的主导因素,而单一气候因子的直接贡献有限。

表 1　济南市连通性分异驱动因子探测结果

Table 1　Detection results of driving factors for connectivity differentiation in Jinan City

因子指标	q	p
年降水量	0.860	0.000
年均温	0.201	0.006
流量	0.837	0.001
地表水量	0.540	0.000
地下水量	0.663	0.000
GDP	0.861	0.000
水利工程数	0.812	0.007
城市建成率	0.369	0.000
NDVI	0.754	0.000

地表水连通性的变化并非孤立过程,而是与区域水网调蓄、跨流域调水、多流域特征及地下水系统紧密耦合。地理探测器的交互作用分析已揭示,多个因子间的非线性增强效应是驱动连通性演变的关键机制[30]。交互作用探测进一步揭示了因子间的非线性耦合效应(图 4)。所有因子对的交互 q 值均大于任一单因子的 q 值,且绝大多数表现为非线性增强。GDP 与水利工程数的交互 q 值为 0.981,表现为双因子增强。这表明经济发展水平高的区域往往也是水利工程密集区,二者叠加导致自然水系被人工水网深度替代,结构连通性(IIC)受损而功能连通性(PC)被人工维持。流量与水利工程的交互 q 值为 0.972,同样为双因子增强。水利工程(水库、连通工程)对天然径流过程具有强烈的削峰填谷调制作用,使连通性对水文波动的响应从自然状态下的线性模式转变为高度非线性的工程调控模式。

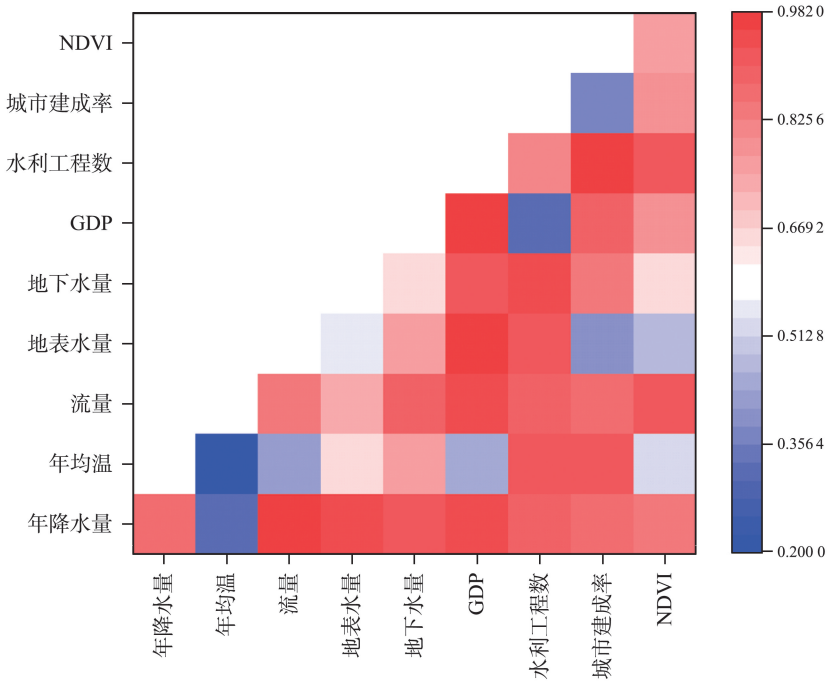


图 4 地理探测器交互作用探测结果热力图

Fig.4 Heat map of detection results from the interaction of geodetectors

卧虎山、锦绣川等大中型水库的修建与运行,在保障城市供水、防洪调蓄和生态补水的同时,也改变了天然河流的径流过程,对河流纵向连通性产生一定影响。从水文过程看,水库调度主要通过改变降水-径流响应关系影响地表水连通性[31]。丰水期蓄水减少下游流量,枯水期放水补充基流,但这种人为调节往往难以完全模拟自然水文节律,导致 IIC 指数剧烈波动。南水北调东线工程及本地水源连通工程构成了济南市多源互补、水库连通的人工水网骨架。目前建成的水源连通工程共 7 项,总调水能力达 416.2 万 m^3/d(表 2)。这些工程显著提升了功能连通性(PC),但暗涵、泵站等人工设施也可能削弱自然河道的纵向连续性,不同水源的水化学差异还可能对水生生态系统产生影响。济南南部岩溶区裂隙、溶隙和重点渗漏带发育,地表水可通过河道渗漏、裂隙入渗和水库补给等方式转化为岩溶地下水,并进一步影响泉域地下水位和泉群出露过程[20]。类似研究表明,补给区地表水-地下水连通性还会随强气候事件发生明显变化[32]。综合以上结果表明,自然因素奠定了连通性动态的时空本底,但其直接解释力相对有限;强烈的人类干预在快速城市化进程中重塑了水文连通的空间格局与演变方向,并已超越自然气候波动成为主导控制因子。

表 2 济南市主要水源连通工程概况

Table 2 Overview of major water source connection projects in Jinan City

工程名称	调水能力/(万 $m^3 \cdot d^{-1}$)	连通对象	主要功能
新五分水闸至玉清湖引水工程	77.8	济平干渠→玉清湖水库	南水北调水补库
贾庄分水闸至卧虎山水库输水工程	30.0	济平干渠→卧虎山水库	南水北调水补库
五库连通工程	16.0	卧虎山、锦绣川、兴隆、浆水泉、孟家水库	水库联调、生态补水
四库连通调水工程	40.0	东湖、白云、杜张、狼猫山水库	东部水源联调
卧虎山水库至锦绣川水库连通工程	30.0	卧虎山↔锦绣川水库	双向调水
雪野水库至大冶水库连通工程	15.0	雪野→大冶水库	跨区域补水
田山灌区与济平干渠连通工程	207.4	济平干渠↔田山沉沙池	南水北调水调配

3 基于连通性评估的生态修复策略

地表水连通性与生态修复之间存在“问题诊断、目标导向、措施响应”的逻辑链条。河流连通性研究强调纵向、横向、垂向和时间维度的协同恢复[33],3 流 4D 连通性生态模型进一步为结构、功能与过程统筹提供了理论依据[34]。连通性评估揭示的结构破碎化、功能波动化、过程人工化问题是生态修复的出发点;以提升

结构连通性、功能连通性和过程连通性为修复目标;进而针对不同区域的主导问题及其交互驱动因子,采取差异化的工程与非工程措施。基于上述驱动机制与逻辑关联分析,本文针对济南市不同地理单元的核心问题提出以下修复策略。

南部岩溶区进行渗流通道修复与水源涵养强化。针对岩溶裂隙系统碎片化、补给通道堵塞等问题,实施以改善岩溶地下水补给条件为目标的修复策略。在玉符河上游及泉群直接补给区实施封山育林,优先种植根系发达的乡土树种,提升植被覆盖率,减少水土流失;在岩溶裂隙发育区建设阶梯式渗滤池,利用砾石层过滤雨水并增加下渗量,以改善地下水补给条件[35]。加强人类活动管控,将岩溶渗流脆弱区纳入严格保护范围,逐步退出补给区内不合理的矿山开采活动并修复破损山体。在矿区边缘构建梯田式渗滤结构,通过分级孔隙介质促进雨水滞蓄与下渗。推广节水灌溉技术,在农田集中区布设生态沟渠与缓冲带,降低化肥和农药随径流进入地下水的风险。建立泉域水位与泉水流量协同监测体系,根据地下水补给状况动态调整水库生态补水方案,降低泉群季节性断流风险。

北部平原区进行河流廊道重构与河湖连通。针对河道渠化硬化、纵向连通性阻隔和横向生态空间丧失等问题,实施疏通与提升自修复力相结合的修复策略。纵向连通性修复方面,在小清河济南段、徒骇河下游,对低效或废弃的拦河闸坝进行拆除或生态化改造,在保留的闸坝旁建设鱼道或仿自然阶梯、深潭结构,恢复鱼类洄游通道[31]。在玉符河入黄口段,针对季节性断流问题建设串联式生态堰,形成多级跌水,延长水体滞留时间。横向生态空间拓展方面,在黄河滩区实施退耕还湿工程,恢复河漫滩湿地面积,种植芦苇、香蒲等乡土水生植物,构建宽 50~100 m 的滨水缓冲带[36]。湿地斑块的空间扩展及其与河道的汇合过程会影响景观尺度的地表水连通性[37]。对兴济河、全福河等城市内河,采用生态石笼、连锁块护坡替换硬质混凝土护岸,并配置乡土草本植物,增强河岸带截污与生物栖息功能[38]。建立小清河、白云湖、黄河三水联合调度机制,利用数字孪生技术模拟不同降水情景下的水量分配,实现生态补水与防洪排涝的动态平衡。

城市建成区进行蓝绿空间协同与智慧管理。针对水体斑块破碎、硬质化率高和蓝绿空间割裂等问题,实施渗透、调蓄、管理三位一体的修复策略。升级海绵城市建设,在济南新旧动能转换起步区推广“下沉式绿地+透水铺装+雨水花园”组合模式[39]。在老城区结合老旧小区改造,推进雨污分流及雨水桶、绿色屋顶等微型蓄水设施建设,削减径流峰值并缓解排水管网压力。构建蓝绿廊道网络,依托小清河、大辛河等骨干水系建设连续滨水绿道,串联华山湖、北湖等城市公园,形成一轴多核的生态网络[36]。探索建设智慧管控平台,集成遥感监测、物联网传感器与 AI 算法,实时识别河道阻塞和水质异常,并生成闸坝调度建议,提高水系应急监测与调度效率。

为增强修复策略的可操作性,本文进一步从规划衔接、工程条件和实施路径 3 个方面分析其可行性。本文提出的生态修复策略与济南市现有水利发展规划、国土空间规划、海绵城市建设及水系治理方向具有较高一致性,具备纳入既有治理体系的基础。分区、分阶段推进的综合整治思路已在区域单元治理研究中形成相对完整的技术框架[40],可为本研究策略的实施组织提供借鉴。相关措施并非完全依赖新建大型工程,而是在现有河道、水库、湿地、公园绿地和排水系统基础上进行功能提升。后续实施中应优先选择连通性受损明显、生态修复收益较高且工程条件较成熟的区域开展试点,并通过水位、水质、生态流量和遥感监测等手段持续评估修复效果,逐步完善动态调整机制。总体来看,本文提出的生态修复策略具有较好的规划基础和工程衔接条件,但其实施效果仍需依赖长期监测、分阶段推进和精细化管理。

4　结论

本研究以济南市为研究对象,基于 1985—2022 年遥感影像与多源数据,从结构连通、功能连通和过程连通 3 个维度系统分析了地表水连通性演变特征,采用地理探测器定量识别关键驱动因子及其交互作用,并提出分区优化策略。主要结论如下:

(1) 地表水连通性时空演变特征。济南市地表水连通性呈现结构趋于破碎、功能波动中有所恢复的复合演变模式。斑块数与斑块密度持续上升,聚合度指数在 2015 年后有所回升,生态修复工程缓解了连通性退化;可能连通性指数从 0.32 增至 0.61,功能连通性明显增强。空间上呈南山优、北城劣的显著格局,南部山区保持较好自然连通性,北部平原建成区连通性较差,过渡带空间变异最大,是生态敏感区。

(2) 水文连通性变化的关键驱动因子。地理探测器因子探测表明,GDP、年降水量和流量是解释连通性空间分异的前三位因子。交互作用探测发现,经济发展驱动的水利工程建设与自然水文过程的深度耦合是塑造连通性格局的核心机制。人类活动已超越自然气候波动成为主导控制因子。

(3) 多因素耦合与生态修复。水库调蓄、南水北调、水源连通工程等人工干预在提升功能连通性的同时,也切断河流纵向连通性,导致整体连通性剧烈波动。地表水连通性与生态修复之间存在问题诊断、目标导向、措施响应的逻辑链条,连通性评估结果为分区修复提供了直接依据。

(4) 差异化治理路径。南部岩溶区以封山育林、阶梯渗滤池修复地下水补给通道为核心;北部平原区以拆除硬质护岸、建设生态堰、恢复河漫滩湿地重构纵向生态廊道为核心;城市建成区以海绵设施与智慧水务协同、增强蓝绿空间网络连接为核心。

研究验证景观指数法和地理探测器方法在北方岩溶城市水系统评价中的适用性,为破解保泉与供水矛盾提供可推广的技术框架,对黄河流域生态保护与城市可持续发展具有实践参考价值。

参考文献:

[1] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724.
Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724.

[2] 左其亭. 中国水科学研究进展报告: 2019—2020[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 500.
Zuo Qiting. Report on advances in water science research in Chinafrom 2019 to 2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021: 500.

[3] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119: 17-34.

[4] Abhervé R, Roques C, de Dreuzy J R, et al. Projected climate change impacts on groundwater-surface water connectivity in a compartmentalized mountain headwater bedrock aquifer[J]. Water Resources Research, 2025, 61(10): e2025WR040083.

[5] Wang Z, Xiao Y, Zhang T, et al. Effects of a proposed hydraulic project on the surface water connectivity in Poyang Lake floodplain system, China:numerical simulation and geostatistical analysis[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 50: 101593.

[6] Stanley J, Reading L. Determination of radon source in basaltic groundwater, using geochemical tracers and chemometric statistical analysis[J]. Heliyon, 2025, 11(3): e41859.

[7] Choi H, Lee C M, Jo H J, et al. Assessment of groundwater recharge and connectivity with surface water in a mountainous watershed using natural tracers in Daejeon, Korea[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(22): 530.

[8] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594.
Gao Changjun, Gao Xiaocui, Jia Peng. Summary comments on hydrologic connectivity[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(3): 586-594.

[9] Bondy J A, Murty U S R. Graph theory with applications[M]. London: Macmillan Education UK, 1976: 42-63.

[10] Pringle C M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective[J]. Ecological Applications, 2001, 11(4): 981-998.

[11] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(13): 1749-1763.

[12] Turnbull L, Wainwright J, Brazier R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. Ecohydrology, 2008, 1(1): 23-34.

[13] Ward J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems[J]. Journal of the North AmericanBenthological Society, 1989, 8(1): 2-8.

[14] Schönenberger U, Stamm C. Hydraulic shortcuts increase the connectivity of arable land areas to surface waters[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(4): 1727-1746.

[15] Liu S D, Zhou Y X, Zang Y N, et al. Effects of downstream environmental flow release on enhancing the groundwater recharge and restoring the groundwater/surface-water connectivity in Yongding River, Beijing, China[J]. Hydrogeology Journal, 2023, 31(7): 1795-1811.

[16] Castillo C R,Güneralp İ, Hales B, et al. Scale-free structure of surface-water connectivity within a lowland river-floodplain

landscape[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(16): e2020GL088378.
[17] Tan Z Q, Wang X L, Chen B, et al. Surface water connectivity of seasonal isolated lakes in a dynamic lake-floodplain system [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124154.
[18] 王庆兵, 段秀铭, 高赞东, 等. 济南岩溶泉域地下水可持续开采方案分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 1-5.
Wang Qingbing, Duan Xiuming, Gao Zandong, et al. Analysis of sustainable groundwater development scenarios in the Jinan karstic spring basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 1-5.
[19] 夏文菊, 刘意, 曹岳阳. 济南市河流水污染防治与生态修复研究[J]. 山东水利, 2013(11): 20-21.
Xia Wenju, Liu Yi, Cao Yueyang. Study on river water pollution prevention and ecological restoration in Jinan City[J]. Shandong Water Resources, 2013(11): 20-21.
[20] Ke Y L, Song X F, Yang L H, et al. River-spring connectivity and hydrogeochemical processes in a karst water system of northern China: a case study of Jinan spring catchment[J]. Water, 2024, 16(6): 829.
[21] 宁朝山, 李绍东. 黄河流域生态保护与经济发展协同度动态评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(12): 1-6.
Ning Chaoshan, Li Shaodong. Dynamic evaluation ofsynergy between ecological protection and economic development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2020, 42(12): 1-6.
[22] Liu L Y, Zhang X. Algorithm, progresses, datasets and validation of GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamic product with fine classification system from 1985 to 2022[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2024, X-2-2024: 137-143.
[23] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2340-2355.
Zhang Na. Scale issues in ecology: concepts of scale and scale analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2340-2355.
[24] 冯久格, 李谦维, 梁晨, 等. 基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 12-21.
Feng Jiuge, Li Qianwei, Liang Chen, et al. Landscape index analysis of hydrological connectivity dynamics in the Yellow River Delta[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 12-21.
[25] 胡尊乐, 汪姗, 费国松. 基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 24-28, 43.
Hu Zunle, Wang Shan, Fei Guosong. Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 24-28, 43.
[26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
[27] 任瑞杰, 范碧航, 张亚玲, 等. 基于小波相干方法的坡面地下水文连通性量化分析[J/OL]. 工程科学与技术. https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250703.1418.002.
Ren Ruijie, Fan Bihang, Zhang Yaling, et al. Quantification of subsurface hydrological connectivity using wavelet coherence analysis[J/OL]. Advanced Engineering Sciences. https://ink.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250703.1418.002.
[28] 赵彦军, 徐宗学, 赵刚, 等. 城市化对济南小清河流域产汇流的影响研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 35-46.
Zhao Yanjun, Xu Zongxue, Zhao Gang, et al.Impact of urbanization on regional rainfall-runoff processes in Xiaoqing River basin, Jinan[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10): 35-46.
[29] 杨丹. 城市人工河道生态水系景观规划设计研究[J]. 科技资讯, 2022, 20(21): 119-122.
Yang Dan.Study on urban artificial river ecological water system landscape planning and design[J]. Science & Technology Information, 2022, 20(21): 119-122.
[30] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173-2187.
[31] Grill G, Lehner B, Thieme M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569(7755): 215-221.
[32] Batista L V, Gastmans D, Sánchez-Murillo R, et al. Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014—2016[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(16): 2483-2495.
[33] 方佳佳, 王烜, 孙涛, 等. 河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 19-26.
Fang Jiajia, Wang Xuan, Sun Tao, et al. Review of research on river connectivity and its impact on eco-hydrological process [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 19-26.
[34] 董哲仁, 赵进勇, 张晶. 3 流 4D 连通性生态模型[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 134-141.
Dong Zheren, Zhao Jinyong, Zhang Jing.Three types flows via four dimensional connectivity ecological model[J]. Water

Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 134-141.
[35] 管清花, 汪玉静, 陈学群, 等. 济南玉符河重点渗漏带岩溶地下水补给特征与保护[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 233-244.
Guan Qinghua, Wang Yujing, Chen Xuequn, et al. Recharge characteristics and protection of karst groundwater in major leakage area of Yufu river in Jinan[J]. CarsologicaSinica, 2023, 42(2): 233-244.
[36] 张梦嫚, 吴秀芹. 近20年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4205-4213.
Zhang Mengman, Wu Xiuqin. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years[J]. Acta EcologicaSinica, 2018, 38(12): 4205-4213.
[37] Vanderhoof M K, Alexander L C, Todd M J. Temporal and spatial patterns of wetland extent influence variability of surface waterconnectivity in the Prairie Pothole Region, United States[J]. Landscape Ecology, 2016, 31(4): 805-824.
[38] 姜乖妮, 张坦. 基于"城市双修"理念的城市滨水空间设计策略: 以张家口市清水河滨水空间为例[J]. 城市问题, 2018(3): 42-47.
Jiang Guaini, Zhang Tan. The design strategy of urban waterfront based on the idea of "City Double Repair": a case study ofQingshui River Waterfront of Zhangjiakou City[J]. Urban Problems, 2018(3): 42-47.
[39] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.
Xu Zongxue, Cheng Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61.
[40] 王也, 吕统华, 郭灵俊, 等. 海湾单元全域土地综合整治技术框架: 以宁波环石浦港区域为例[J]. 规划师, 2026, 42(2): 129-135.
Wang Ye, Lü Tonghua, Guo Lingjun, et al. Technical framework for comprehensive land consolidation in the bay unit: a case study of the shipu harbor area in Ningbo[J]. Planners, 2026, 42(2): 129-135.

(编辑:胡春燕)

(上接第157页)

[36] 马和平, 李江荣, 卢杰, 等. 西藏色季拉山不同海拔梯度土壤有效氮和土壤微生物量氮的变化[J]. 高原农业, 2017, 1(1): 27-32.
Ma Heping, Li Jiangrong, Lu Jie, et al. Change of soil effective nitrogen and SMBN along the different elevation gradient in segila mountains of Tibet, China[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2017, 1(1): 27-32.
[37] Philippot L, Chenu C, Kappler A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(4): 226-239.
[38] 连晨星, 张秋芳, 任飞, 等. 生态化学计量不平衡驱动高寒草甸土壤细菌群落对氮添加的响应[J]. 应用生态学报, 2025, 36(4): 1081-1090.
Lian Chenxing, Zhang Qiufang, Ren Fei, et al. Ecological stoichiometric imbalance drives the responses of soil bacterial communities to nitrogen addition in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(4): 1081-1090.
[39] 吴亚轩, 马和平, 司孟鑫, 等. 西藏米拉山西坡不同海拔梯度土壤有机碳氮分布特征[J]. 高原农业, 2025, 9(5): 596-604.
Wu Yaxuan, Ma Heping, Si Mengxin, et al. The distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen at different altitude gradients on the west slope of Mila Mountain in Xizang[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2025, 9(5): 596-604.
[40] Liu Kunhe, Xue Yaqi, Zhu Lanping, et al. Effect of different land use types on the diversity of soil bacterial community in the coastal zone of Jialing River[J]. Huanjing Kexue, 2022, 43(3): 1620-1629.
[41] Wu Yanru, Yang Wenquan, Li Qinyao, et al. Microbial community response to alpine meadow degradation and its impact on soil nutrient cycling[J]. Agronomy, 2024, 14(1): 195.
[42] Li Xianping, Li Teng, Li Huixin. Asynchronous patterns in soil bacterial diversity and functional potentials along an alpine altitudinal gradient[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1428815.
[43] Allison S D, Martiny J B H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(S1): 11512-11519.

(编辑:胡春燕)