

DOI: 10.20103/j.stxb.202411182828

张轲,尹力,赵浪,魏伟,薄立明.中原城市群水生态空间演变时空特征及其驱动机制——基于时空立方体与可解释机器学习分析.生态学报, 2025, 45(10): 4697-4715.

Zhang K, Yin L, Zhao L, Wei W, Bo L M. Spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of hydro-ecological space evolution in Zhongyuan Urban Agglomeration: an analysis based on a space-time cube and interpretable machine learning. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4697-4715.

中原城市群水生态空间演变时空特征及其驱动机制 ——基于时空立方体与可解释机器学习分析

张 轲¹, 尹 力², 赵 浪², 魏 伟^{2,3}, 薄立明^{3,*}

1 黄淮学院建筑工程学院, 驻马店 463000

2 武汉大学城市设计学院, 武汉 430072

3 武汉大学中国发展战略与规划研究院, 武汉 430072

摘要: 中原城市群是推动黄河流域高质量发展的核心空间载体, 科学认知其水生态空间演变的时空特征及形成机制, 对黄河下游地区水生态空间管制和国土空间规划具有重要支撑作用。采用时空立方体刻画 2000—2023 年长时序中原城市群水生态空间年际演变动态及典型模式, 从规模-位置 2 个维度综合分析空间结构转型特征, 进而利用 Mantel test 矩阵分析水生态空间结构转型与驱动因素的相关性关系, 在此基础上运用 XGBoost 模型和可解释机器学习 VIVI-PDP 框架从驱动因素重要程度、交互作用强度和非线性依赖关系分析演变机制。结果表明: ①近 23 年中原城市群水生态空间增加 805.53 km², 增幅高达 33.52%, 整体呈现“上升—平稳—上升—平稳”的动态变化趋势, 在稳定的基础上逐步提升; ②“农业空间-水生态空间”的动态转换现象尤为显著, 且在城市群的六大功能分区中差异明显, 其中高效生态示范区的水生态空间转型最为活跃, 核心发展区与跨区域协同发展区相对活跃, 而转型创新发展区和承接产业转移区转换度较低; 水生态空间动态转换的高-高聚类区, 即水生态空间的转入和转出均较为频繁的区域, 主要集中于水资源丰富的西部、南部与东部地区, 低-低聚类区则多位于北部和中部地区, 其水生态空间的转入和转出均较为有限; ③自然地理基础与交通区位条件是中原城市群水生态空间动态转型过程中的主导因素, 然而, 在水生态空间向农业空间的转出和城镇空间向水生态空间的转入过程中, 社会经济因素作用逐渐凸显, 自然与人文因素的交织作用使得转型过程呈现出多重因素交织、区域差异显著的驱动机制。

关键词: 水生态空间; 时序遥感; 分异格局; 驱动因素; 水生态保护; 中原城市群

Spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of hydro-ecological space evolution in Zhongyuan Urban Agglomeration: an analysis based on a space-time cube and interpretable machine learning

ZHANG Ke¹, YIN Li², ZHAO Lang², WEI Wei^{2,3}, BO Liming^{3,*}

1 College of Architecture Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China

2 School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China

3 China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: The Zhongyuan Urban Agglomeration functions as a strategic spatial platform driving sustainable development in the Yellow River Basin. A scientific understanding of the spatiotemporal differentiation characteristics and formation mechanisms of hydro-ecological space evolution within this region is essential to support water ecological space use

基金项目: 河南省教育厅人文社科一般项目(2025-ZZJH-045); 驻马店市科技创新青年专项项目计划支持(QNZX202402); 中国地质大学(武汉)国家地理信息系统工程技术研究中心开放基金资助(2023KFJJ03); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJA630003)

收稿日期: 2024-11-18; **采用日期:** 2025-03-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: boliming@whu.edu.cn

regulation and integration into the national territorial spatial planning system in the lower Yellow River area. This study employs a space-time cube model to characterize the interannual dynamics and typical patterns of hydro-ecological space within Zhongyuan Urban Agglomeration from 2000 to 2023. A comprehensive analysis of spatial structure transformation is conducted from two critical dimensions-scale and location-to systematically capture the extent, spatial distribution, and dynamic shifts of hydro-ecological space within the Zhongyuan Urban Agglomeration. This analysis enables a refined understanding of spatial configuration changes, expansion-contraction dynamics, and regional structural adjustments over time. To further investigate the underlying drivers of these transformations, the study employs a Mantel test matrix to quantitatively examine the correlation between hydro-ecological spatial structure evolution and a range of potential influencing factors, including natural geographic attributes, socioeconomic conditions, and infrastructural developments. By assessing the strength and significance of these spatial associations, the study identifies key determinants shaping hydro-ecological space changes. Building upon this foundation, an XGBoost model is integrated with an interpretable machine learning framework, VIVI-PDP, to conduct an in-depth exploration of the evolution mechanisms. This approach allows for a precise evaluation of factor importance, the strength of interactions among key variables, and the complex nonlinear dependencies influencing hydro-ecological space transformation. The results reveal that: ① Over the past 23 years, hydro-ecological space expanded by 805.53 km² (33.52% growth rate), exhibiting a phased evolutionary trajectory: expansion→stabilization→expansion→stabilization, demonstrating cumulative ecological resilience. ② The dynamic conversion between “agricultural space-hydro-ecological space” is particularly pronounced, with significant differences across the six functional zones of the urban agglomeration. Notably, hydro-ecological space transformation is most active in high-efficiency ecological demonstration zones, relatively active in core development and cross-regional coordinated development areas, and less pronounced in transformation and innovation development areas and industrial transfer zones. High-intensity transition clusters (HH-type) predominantly occur in resource-rich western/southern/eastern zones, while low-low clustering (LL-type) areas are mainly located in the northern and central areas, where both the influx and outflux of hydro-ecological space are relatively limited. ③ Natural geographic conditions and transportation location are the primary driving factors in the dynamic transformation of hydro-ecological space. However, during the transition from hydro-ecological space to agricultural space and from urban space to hydro-ecological space, socioeconomic drivers emerge as dominant determinants. The interplay of natural and human factors results in a transformation process manifesting multifactorial synergies with pronounced spatial heterogeneity.

Key Words: hydro-ecological space; time-series remote sensing; differentiation pattern; driving factors; hydro-ecological protection; Zhongyuan Urban Agglomeration

水是山水林田湖草生命共同体的纽带性要素,也是城镇、农业和生态空间的底层支撑^[1]。水资源短缺是我国的基本国情^[2],全球气候变化与城镇化进程的加速加剧了水资源相关的矛盾与自然灾害,水污染与水生态损害加重了水资源短缺,也进一步恶化了水质性缺水的状况^[3],深刻影响区域人-地关系^[4],并制约城市的可持续发展与高质量转型^[5]。自党的十八大(2012年)提出生态文明战略以来,我国陆续出台了一系列重大决策以缓解水资源的制约及供需矛盾:2014年3月14日,习近平总书记在中央财经领导小组第五次会议上首次提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路;2019年9月,在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上,强调必须坚持“四水四定”原则,将水资源作为最大的刚性约束;2021年,在推进南水北调后续工程高质量发展座谈会上,明确提出要“立足流域整体和水资源空间均衡配置,统筹存量与增量,加强互联互通,加快构建国家水网主骨架和大动脉”;2024年,在全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上,再次强调“坚持量水而行、节水优先,坚持因地制宜、分类施策,坚持统筹谋划、协同推进”。表明水生态文明建设已成为我国可持续发展的重要组成部分,其战略意义在于通过合理的水生态空间布局实现空间资源统

筹,促进经济社会发展与生态环境保护的协调。从空间战略的落实和规划实施来看,国土空间规划体制机制改革以来水生态空间规划逐渐成为国土空间规划中的一项重要专项内容,在推进水资源空间融入“多规合一”的过程中发挥关键作用,上述的顶层战略谋划必须通过国土空间规划的实施,实现自上而下的政策传导与尺度递进^[6]。然而,目前相关研究未能有效协调新规划体系与“三区”国土治理体系^[7],从而制约了涉水专项规划的实践发展。因此,在现阶段有必要厘清水生态空间在长时间序列下的演变规律,并揭示关键影响因素与驱动机制,以实现水生态空间资源客体和国土空间规划主体的有机衔接,从而提升规划编制的有效性和针对性。

自水生态文明提出以来,水生态空间成为学界广泛关注的焦点,相关研究主要聚焦于以下几个方面:①水生态空间的识别与功能分类。国外对于水生态空间的分类^[8-9]、研究方法^[10]与范式^[11]已经形成完整的体系,且逐渐分化为区域水生态保护管理^[12-13]和城市蓝色空间设计^[14-16]两个研究方向;国内则通过空间分类与概念追溯^[17-18],构建管控指标体系^[19],结合“多规合一”与国土空间规划探索水生态空间安全格局及基础网络的实施方案与管理体系。②水生态空间演变分析。演变特征层面,当前研究多采用5—10年期的时间截面^[20]数据,主要聚焦在规模、形态等二维平面的刻画,而水生态空间具有典型的时序波动特征,必须从更加精细的时空尺度精细演化特征刻画;演变机制层面,多采用耦合协调度模型^[21]、空间面板杜宾模型^[22]、地理加权回归^[23]等静态分析方法,缺乏对人-地复杂系统中驱动因子的重要程度、交互强度和非线性作用的“多维度探测”。③演变模拟分析。侧重于水生态系统模拟^[24]、水生态承载力模拟^[25]、水环境污染模拟^[26]等方面,通常通过构建土地利用变化与水生态系统服务功能的耦合模型开展空间层面研究^[27],或针对特定地域如海岸带^[28]和滨水空间^[29]进行土地利用演变研究。综观现有研究,主要以水利部、生态环境部等管理主体的水资源治理为核心,缺乏面向国土空间规划实施的水生态空间格局优化研究,对水生态空间演变规律及形成机制的分析仍需深化:①针对城市群尺度与长时间序列的水生态空间演变过程的研究较为稀缺,现有演变特征的刻画主要依赖截面数据,无法精准测度水资源的时序波动特征;②水生态空间演变是自然生态系统与人类社会系统的复杂交互作用的结果,基于传统模型的研究往往无法充分捕捉水生态空间的非线性变化趋势,导致对水生态空间动态演变的理解不足。当前,自然资源部已建立并行使所有国土空间用途管制职责,分散的国土管理职能进一步集中,为水生态空间的统一分类提供了政策支撑;进一步明确以国土空间规划用途管制为导向的水生态空间识别标准,将水生态空间时空演变过程拓展到动态时空层面,并揭示特定时间段内不同影响因素对水生态空间的复杂作用机制,成为当前开展水生态空间演变研究的关键突破点。

城市群在黄河流域高质量发展中发挥着重要作用,既是经济增长的引擎,也是生态保护与区域协同发展的关键载体。作为中部地区承接产业转移与西部地区资源输出的重要枢纽,中原城市群不仅是黄河流域人口与生产力布局的主要载体^[30],还是“一带一路”建设的重要内陆腹地,承载着连接东西、沟通南北的战略功能,是推动区域经济一体化与合作发展的关键力量。自2014年南水北调中线工程通水以来,该区域已构建起以骨干河流为框架、各类河道与渠系为输水线路、湖泊与水库为调蓄中枢的水资源工程网络,实现了多库互联、水系联网及城乡一体化,形成了集蓄、滞、泄、排、调、供、节于一体的综合水资源管理体系,为中原城市群的水资源统一调度、优化配置与高效利用奠定了良好基础。然而,该区域历来面临水资源时空分布不均^[31]、水资源与生产力配置不匹配^[32]、人均水资源占有量偏低以及水污染严重^[33]等诸多挑战,如何通过规划管理手段有效遏制水域空间流失,引导区域形成“人-水-地”和谐的国土空间格局,将成为中原城市群高质量发展的重要课题。全面分析中原城市群的水资源演变特征、趋势与驱动机制,对于保障人口密集的传统农区的农业与生态安全、加速新型城镇化进程以及促进水生态空间的健康转型具有重要意义。基于此,本文系统研究2000—2023年间中原城市群水生态空间演变过程,面向国土空间规划实践需求构建水生态空间分类体系,定量分析水生态空间时空演变格局、转换模式与形成机制,以填补当前在国土空间规划语境下,关于水生态空间演变的时序性、空间性及转化机制等方面的研究缺失,并为中原城市群水生态空间保护、开发及相关专项规划编制提供理论借鉴与数据支撑。

1 研究方法 with 数据

1.1 研究区概况

中原城市群(图 1)地跨豫、晋、冀、鲁、皖 5 省 30 地市,总面积约 28.7 万 km²。该区域位于我国第二、三阶梯过渡区,涉及海河、黄河、淮河、长江四大流域。其中,河川径流总量在全国处于中等偏下水平,地区分布上呈自南向北、自西向东逐渐递减特征;主要水库有小浪底水库、丹江口水库、白龟山水库等。该城市群水资源总量少,平均地表水资源总量约为 74.7 亿 m³,人均占有水资源量为 343.60m³/人,不足全国人均的 1/5,且区域六大功能区水资源分布不均衡:郑州大都市区生产总值占全城市群的 27.37%,水资源量仅占 8.31%,而高效生态示范区生产总值不足 11.8%,却拥有 35.38%的水资源量。随着中原城市群人口与产业的加速集聚,区域水资源供需失衡问题日益凸显,土地利用结构的变化进一步加剧了水资源调配的复杂性。在此背景下,南水北调中线工程的实施为破解区域水资源短缺提供了关键支撑,为城市群的高质量发展提供了战略性水资源支撑。依托这一重大水利工程,各地因地制宜构建了以“山区生态屏障、水系生态廊道、平原生态绿网”为核心的“三屏四廊”生态保护格局,尝试从整体空间格局上优化水资源的调配与利用路径,以提升城市群在水资源调控、生态环境保护及风险应对能力方面的综合韧性。但目前水资源短缺、分布不均依然是制约中原城市群可持续发展的短板因素之一,需要从空间层面深入了解水资源空间分布特征及演化规律,为水资源的精细化管理提供支撑。

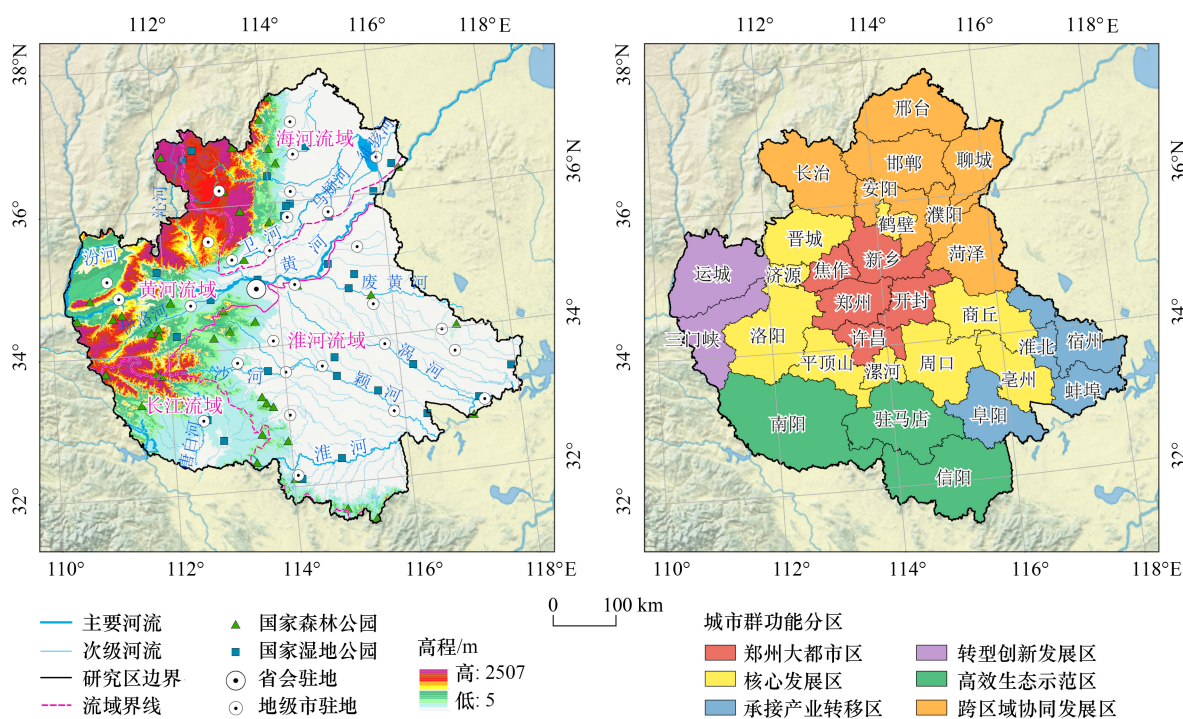


图 1 中原城市群自然地理条件与功能区域划分

Fig.1 Natural geographical conditions and functional area division in Zhongyuan Urban Agglomeration

右图区域功能划分来源于国家发展改革委印发的《中原城市群发展规划》(2016.12)及河南省委、省政府印发的《河南省建设中原城市群实施方案》(2017.06.12),文件提出构建“一核四轴四区”及“一核一副四轴四区”的空间格局,为本研究提供了政策依据和理论框架

1.2 数据及空间分类体系

1.2.1 数据来源与处理

本研究基于土地利用数据提取中原城市群水生态空间及其他国土空间分布数据,数据来源于 1985—2023 中国年度土地覆被 30m×30m 精度数据集 (China Land Cover Dataset, CLCD)^[34]。研究核心使用该数据

集中 2000—2023 年共计 23 期数据展开中原城市群水生态空间演化特征及驱动因素分析。此外,研究所用到的行政边界数据、政府驻地数据、流域分区、国家森林公园及湿地公园、河流水系、DEM 数据、人口密度以及铁路、公路矢量数据来源于资源环境科学数据平台(<http://www.dsac.cn/>)和地理监测云平台(<http://www.dsac.cn/>)。气温降水以及日照等气候数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。人口规模、产业增加值等社会经济数据来源于各年度《中国县域统计年鉴(县市卷)》、河南省、河北省、山西省、山东省、安徽省等省及涉及地级市的统计年鉴。

1.2.2 国土空间分类体系

水生态空间是中原城市群社会经济高质量发展、生态文明建设的基础空间支撑,为整个国土空间系统的功能提供必要的水生态服务。结合土地利用分类与地区战略需求构建水生态空间分类体系是开展中原城市群水生态空间演化研究的首要任务。中原城市群涉水土地利用类型包括水域、湿地两类,共同组成了区域水生态空间,为城镇发展、农业生产以及生态保护等国土空间功能提供了水源涵养、洪水调蓄、水质净化以及物种保育等水生态服务。同时,由于需要分析水生态空间与其他国土空间的交互转换情况,明晰水生态空间结构转型特征。研究根据城镇、农业以及生态等主体功能将其他国土空间分为城镇空间、农业空间以及其他生态空间,最终形成中原城市群国土空间分类体系(表 1)。基于分类体系,将区域土地利用数据整合为包含水生态空间在内的 4 种国土空间分布数据,为进一步分析水生态空间演化特征及驱动机制提供基础数据底图。

表 1 中原城市群国土空间分类体系与土地利用类型的衔接

Table 1 The connection between territorial spatial classification system and land use types in Zhongyuan Urban Agglomeration

主体功能 Primary function	国土空间分类 Territorial spatial classification	CLCD 土地覆被数据 China Land Cover Dataset (CLCD)
水生态服务功能 Hydro-ecological service functions	水生态空间	水体 湿地
城镇发展功能 Urban development functions	城镇空间	不透水表面
农业生产功能 Agricultural production functions	农业空间	耕地
生态保护功能 Ecological conservation functions	其他生态空间	森林 灌木丛 草地

该分类体系能够覆盖研究区的全部国土空间

1.3 研究方法

1.3.1 基于时空立方体的水生态空间时空演化特征分析

人类活动以及自然气候变化影响水资源的形成、迁移、转化、发生,导致水生态空间特征的时空演化。考虑到基础设施建设、产业发展等人类活动以及气候变化并非短时间完成的事件,而是长时间的过程。因此,深入理解水生态空间的演化模式不仅需要从空间维度探讨变化规模、分布位置等特征;也有必要从时间维度展开分析,一方面减少周期性气候波动对水生态空间演化特征刻画的影响,另一方面结合中原城市群各项国土空间开发保护工程建设时序更清晰地了解水生态空间演变过程,厘清水生态空间的分时序演化模式。为深入分析中原城市群水生态空间时空演化特征,引入时空立方体模型^[35]集成中原城市群水生态空间的时空和时间信息,进一步分析水生态空间分布的时空热点、局部异常值以及演化模式。基于时空立方体的水生态空间时序演化模式在传统的二维空间演化特征分析基础上增加了时间这一维度,将“空间邻近”扩展至“时空邻近”,具体实现步骤如下:①水生态空间时空立方体构建(图 2)。为充分理解中原城市群水生态空间演化在时间序列上对于人类活动以及自然环境变化的响应长度,利用 ArcGIS Pro 软件中时空立方体创建工具,将水生态空间规模以县级行政单元作为空间步长,分别以 1 年、3 年、5 年、7 年为时间步长构建中原城市群水生态空间时空立方体。将中原城市群水生态空间演化的空间、时间信息集成到该立方体中,为演化模式分析提供基础数据。具体操作方法及工具实现可参见 ArcGIS Pro 时空模式挖掘分析工具箱中对应工具集(<https://pro.arcgis.com/zh-cn/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/an-overview-of-the-space-time-cube-creation-toolset.htm>)②水生态空间分布冷热点分析。水生态空间冷热点分析采用 ArcGIS Pro 软件中新兴时空热点分析工具(<https://pro.arcgis.com/zh-cn/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/emergingho>

tsplots.htm), 计算 Getis-Ord G_i^* 值并基于 Mann-Kendall 检验将水生态空间的演变趋势识别为新增热/冷点、连续热/冷点、加强热/冷点等多种模式。通过冷热点分析, 可以探测水生态空间分布的冷热点区域及时间维度上的动态变化情况, 有利于深入了解中原城市群水生态空间分布格局以及其变化趋势。③水生态空间演化局部异常值分析。局部异常值分析运用 ArcGIS Pro 软件中局部异常值分析工具, 按邻域距离和邻域时间步长参数计算各县水生态空间演化时空信息数据的局部莫兰指数, 并划分为高-高(H-H)、低-低(L-L)、高-低(H-L)、低-高(L-H)、多种类型和不显著(NS)共6种模式类型(<https://pro.arcgis.com/zh-cn/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/localoutlieranalysis.htm>)。通过局部异常值可以判断中原城市群水生态空间演化在时空邻域的显著或异常聚集和分散特征。

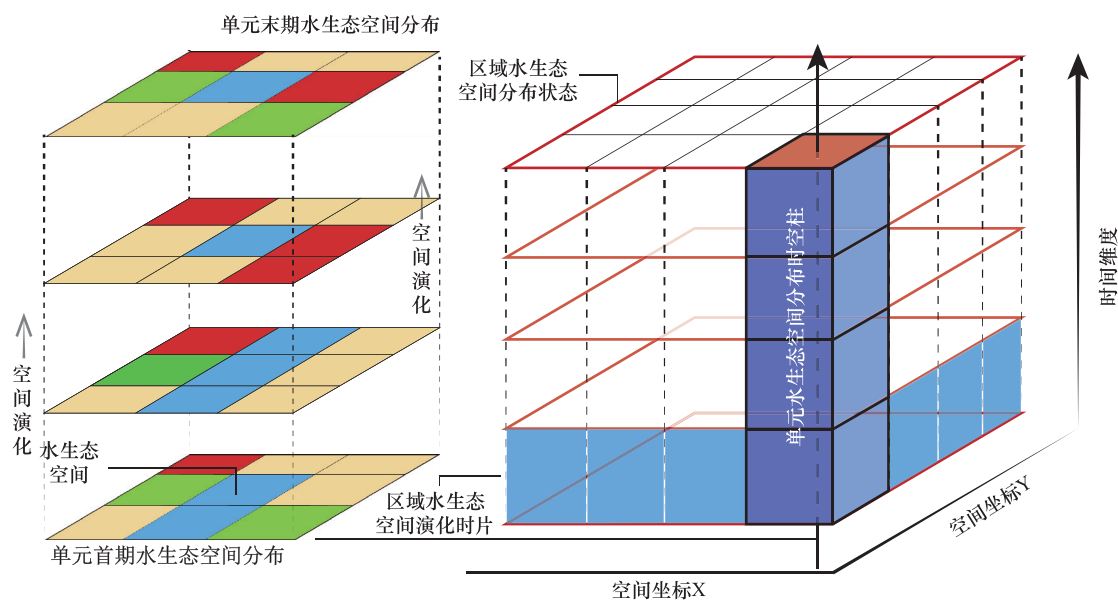


图2 水生态空间分布时空立方体模型

Fig.2 Space-time cube model of hydro-ecological space distribution

1.3.2 综合规模-区位的水生态空间结构转型特征刻画

水生态空间结构转型是指水生态空间与其他国土空间发生功能转换引起区域国土空间系统结构转型的过程。转型规模和空间位置的特征分别表示水生态空间与其他国土空间交互的剧烈程度和区位。研究使用空间转移矩阵、空间分区统计分析、空间自相关分析方法分析中原城市群水生态空间结构转型特征。其中, 空间转移矩阵^[36]用以揭示水生态空间结构转型的方向和规模, 通过 ArcGIS 对研究时段首末期国土空间分布数据进行空间叠加、面积制表和汇总获取。空间分区统计意在实现城市群功能分区-空间结构转型衔接关系的判断, 引入功能区作为参照分区统计各类空间演化结果。空间自相关分析用以刻画水生态空间结构转型的空间分异特征; 使用全局莫兰指数判断各类空间演化是否存在空间相关性, 判断其空间聚集、分散情况; 进而采用局部莫兰指数具体测度其空间范围。全局莫兰指数、局部莫兰指数计算公式详见参考文献^[37]。

1.3.3 利用可解释机器学习的驱动因素及作用关系识别

水生态空间结构转型是由水文系统与社会系统、自然系统之间复杂的相互作用引起, 研究利用可解释机器学习模型探讨其内在影响路径。主要基于相关性检验、机器学习模型构建以及模型解释三个步骤(图3)实现水生态空间结构转型驱动因素及作用关系的识别:

(1) Mantel test 检验

利用 Mantel test 检验对各影响因子进行相关性检验。Mantel test 检验是一种基于距离矩阵的统计方法, 适用于分析变量之间的空间或环境相似性, 相较于传统相关性分析方法更适用于复杂系统中的多维数据分

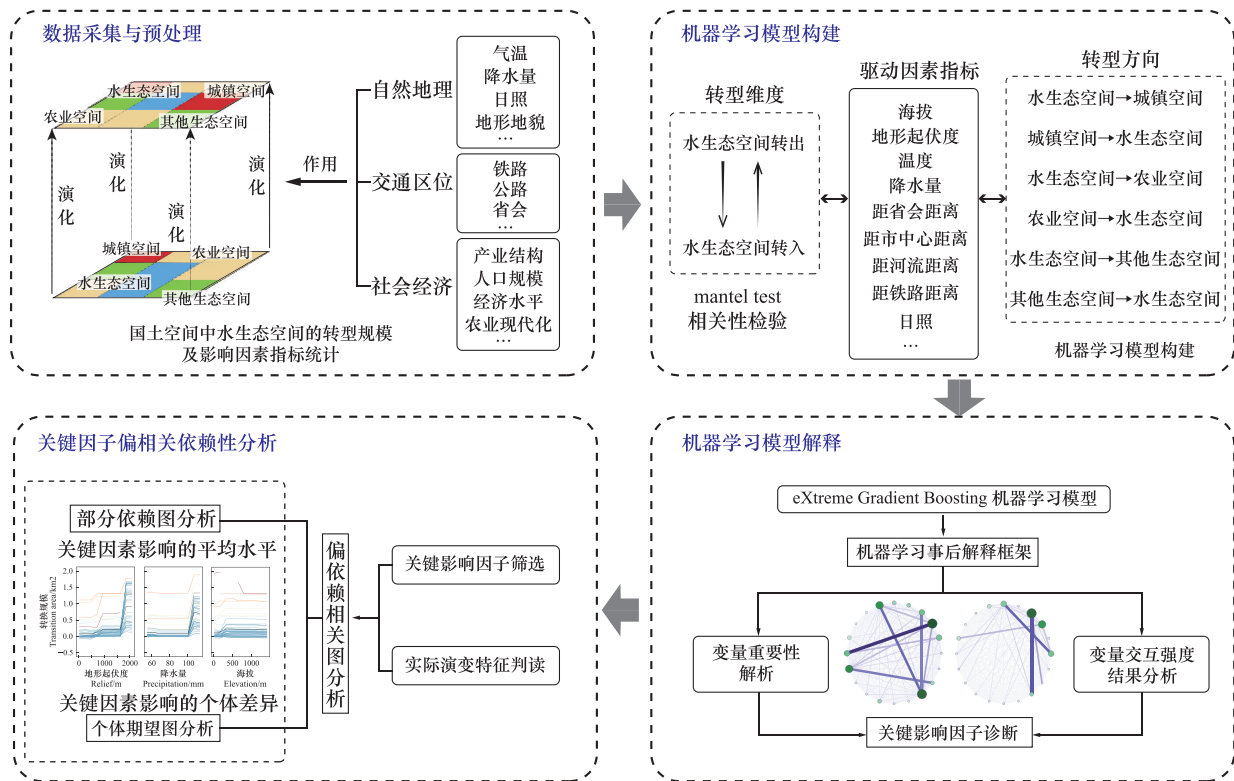


图3 中原城市群水生态空间演变驱动因素及作用关系识别技术流程

Fig.3 Technical process for identifying driving factors and their relationships in the evolution of hydro-ecological space in Zhongyuan Urban Agglomeration

析。其基本假设是两个数据矩阵不相关^[38],从而将每个数据矩阵转换为相异(距离)矩阵,通过评估样本距离在两个矩阵中的相关性来验证数据矩阵之间的关系。结果中, P 值显著时表明存在相关性,而 r 值越大,则相关性越强^[39]。研究中将水生态空间转换规模矩阵(X)与自然地理、社会经济和交通区位等维度的因子矩阵(Y)进行匹配,以检验不同影响因子间的相关性。通过该过程识别出具有统计显著性且与水生态空间演化密切相关的关键因素,为后续分析提供基础。标准化的 Mantel test 检验统计量 r 的计算公式为:

$$r = [1/(n-1)] \sum_i \sum_j [(x_{ij} - \bar{x}) / S_x] [(y_{ij} - \bar{y}) / S_y] \quad (1)$$

式中, x_{ij} 和 y_{ij} 分别表示矩阵 X 和矩阵 Y 中的元素; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示矩阵 X 和矩阵 Y 所有元素的平均值; S_x 和 S_y 分别为矩阵 X 和矩阵 Y 所有元素的标准差; n 为矩阵中成对比较的元素总数。公式通过对两个矩阵中每一对元素的偏离均值的标准化乘积求和,计算出 Mantel test 总体相关性系数 r 。

(2) XGBoost 模型构建

选择 XGBoost 模型深入挖掘各关键驱动因素对水生态空间演化的具体影响。XGBoost 模型是一种基于梯度提升框架的树模型算法,因其高效性和准确性在处理复杂非线性关系时具有显著优势。基于优化后的数据集,以水生态空间转换规模为因变量,自然地理、社会经济以及交通区位维度要素作为解释变量,构建 1000 棵分类回归树的决策模型。XGBoost 模型具体公式为:

$$\hat{y}_n = \sum_{h=1}^H f_h(x_n), f_h \in F \quad (2)$$

式中, $\hat{y}_n$ 为迭代计算结束后模型所预测的水生态空间演化规模值; x_n 为驱动因素的特征向量集合; H 表示回归

树的数量; $f_h(x_n)$ 是要素 n 单元在第 h 棵数的预测结果; n 为要素单元个数; F 是回归树的集合空间。

(3) VIVI-PDP 解释框架

为提升 XGBoost 模型的可解释性,引入 VIVI-PDP 解释方法通过结合变量重要性 (Variable Importance)、变量交互作用 (Variable Interaction, 与前者合称 VIVI) 和偏依赖相关性 (Partial Dependence Plot, PDP)、个体条件期望 (Individual Conditional Expectation, ICE), 辅助理解机器学习模型的内部机制。其中, VIVI 用于解释不同影响因素的重要性和相互作用, 更全面地理解模型中各特征的作用及其相互关系, 计算流程及公式详见参考文献^[40]。偏依赖相关性则主要基于 PDP 分析特定影响因素对水生态空间演化的平均影响作用, 识别所有样本偏依赖关系, 从而寻找某个关键因子对演变的平均影响。同时, 辅助 ICE 细化 PDP 分析结果, 可捕捉各县水生态空间演化对影响因素变化的响应差异。通过展示各县水生态空间演化对于影响因素变化的单独响应, 可以揭示出特征与预测之间的非一致性效应, 帮助个体偏依赖关系与整体趋势的不同。这种细粒度分析为模型解释提供了更深入的洞察, 能够更准确地理解自然地理、社会经济、交通区位等要素在区域中的差异性影响, 从而增强模型对研究区域实际应用的解释性和可信度。基于 XGBoost 模型的 PDP、ICE 计算公式分别为:

$$F_{x_s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{f}(x_s, x_{i,-s}) \quad (3)$$

$$E_i(x_s) = \hat{f}(x_s, x_{i,-s}) \quad (4)$$

式中, F_{x_s} 表示影响因素 x_s 的对水生态空间演化的平均影响; $E_i(x_s)$ 表示影响因素 x_s 的对第 i 个县水生态空间演化影响; n 表示样本数; $\hat{f}$ 是研究使用的 XGBoost 模型预测函数; $x_{i,-s}$ 表示第 i 个县除了 x_s 以外的所有影响因素值。

2 结果与分析

2.1 中原城市群水生态空间演变过程及模式

2.1.1 时空演变过程

2000—2023 年水生态空间规模变化 (图 4) 表明, 中原城市群水生态空间整体规模由 2403.09 km² 增至 3208.62 km², 增量达 805.53 km², 变化幅度为 33.52%。分阶段来看, 2000—2006 年持续上升, 2007—2014 年略有波动, 2015—2018 年再次迎来增长, 2019—2023 年则出现轻微下滑。分区域来看, 高效生态示范区增量最为显著 (+266.58 km²), 但升幅低于平均水平 (30.63%), 整体趋势为“持续增长-波动下降-高峰与稳定”; 跨区域协同发展区增幅最大 (+57.88%), 转型创新发展区和核心发展区增幅均超过 40%, 相较之下, 郑州大都市区和承接产业转移区增幅低于整体变化水平, 尤其是郑州大都市区自 2014 年达到高峰后开始回落, 而承接产业转移区自 2019 年起也出现下滑。城市层面, 南阳市的水生态空间增加规模最大, 接近 200 km², 其独特的水资源优势得益于南水北调中线工程的渠首位置和重要水源地的身份; 洛阳紧随其后, 增量接近 100 km², 可能与其推进的“四河同治、三渠联动”及引水补源项目密切相关; 鹤壁市则表现出最高的变化速率, 约为 275%, 这与其水资源紧缺及再生水循环利用试点城市的建设息息相关; 相反, 焦作市则是唯一出现负增长的城市, 其水资源短缺和供需矛盾依旧突出, 生态用水来源紧张, 水生态空间的变化更多体现在修复与改善上, 而非简单的面积增加。

2.1.2 空间演变模式

针对 2002—2023 年中原城市群水生态空间进行变化规模和速率分析 (图 5), 结果表明, 研究区整体呈现显著增长趋势。具体而言, 增长最明显的区域以信阳为中心——西北延展至平顶山、洛阳和运城沿线一带, 向东沿淮河向阜阳、蚌埠相连的淮河南岸区域发展, 还包括东部豫东平原、淮北平原和山东半岛部分组成的黄泛区。局部区域经历了不同程度的减少, 零散分布于每个功能区; 其中, 承接产业转移区和高效生态示范区中蚌埠怀远县表现尤为突出, 减少规模达 -11.74 km²; 郑州大都市区及核心发展区内多个县区亦出现 2—5 km² 不

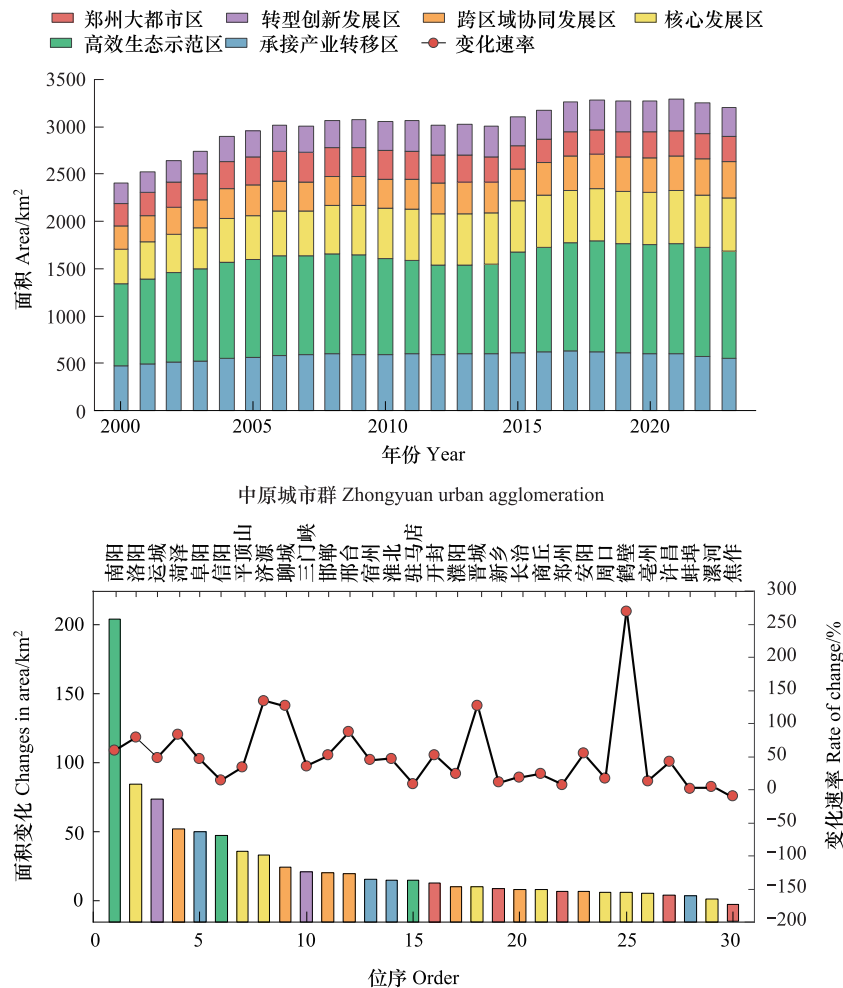


图4 2000—2023 中原城市群水生态空间规模及各城市变化速率

Fig.4 Scale of hydro-ecological space and rate of each city in Zhongyuan Urban Agglomeration from 2000 to 2023

同程度的减少;跨区域协同发展区和转型创新发展区出现负值变化的县区较少。就变化速率而言,不同区域在水生态空间演变过程中呈现显著差异:承接产业转移区与高效生态示范区整体变化速率较低,多个地区出现负值变化;大都市区与核心发展区变化速率居于中等水平,其中大都市区诸如新乡、焦作和开封等地显示负值变化,而核心发展区的西部总体为正值,但南部、东部和北部,如漯河、周口、商丘及鹤壁局部仍有负值变化,尤其临颍县变化速率甚至超过 2500%;跨区域协同发展区与转型创新发展区的整体变化速率较高,尽管长治、邢台市一些地区变化速率超过 2500%,但亦存在局部负值变化,显示出水生态空间演变的复杂性与多样性。

鉴于时间段的波动性,短期(如 1 年)、中期(3—5 年)和长期(7 年)的分析能够揭示不同层次的生态趋势和人类活动的累积效应。因此,本文选取了 4 个时间跨度,对研究区水生态空间进行局部异常值及新兴时空热点分析,具体如下:在 1 年跨度内,研究区北部和中部的的水生态空间变化呈现出“始终仅为低-低聚类”特征,其中北部主要涵盖海河流域华北平原边缘地区,而中部则位于黄淮平原淮河与黄河支流交汇处,此时低值聚类未检测到新兴时空热点模式。相较之下,南部淮河沿岸展现出“始终仅为高-高聚类”的带状空间格局,此外,在西部和西南部——汾河与黄河交汇区域以及丹江口水库附近则形成了“始终仅为高-高聚类”的点状空间分布;新兴时空热点分析表明,聚类区域主要由持续的热点、逐渐减少的热点和分散的热点构成。随着时间的推移,至 3 年跨度,北部低水平聚类区在东西方向有所扩大,中部低水平聚类则向东南方向延展,此时北部

检测出逐渐减少的冷点,而中部则出现连续冷点;同时,高水平聚类在淮河源区域向北扩展,汾河与黄河交汇区域的南北方向也均有所扩张,加强的热点范围逐渐增大。至 5 年跨度,中部低水平聚类进一步在东西方向扩展,北部则转变为持续的冷点,中部继续维持连续冷点,而西南地区出现了两块“始终仅为高-高聚类”区域。至 7 年跨度,区域整体空间格局未发生显著变化,“始终仅为低-低聚类”的状态依旧保持,而“始终仅为高-高聚类”区域在西南及南部形成了连贯的带状分布,逐渐减少的热点则被加强的热点取代。整体而言,近 23 年来,中原城市群四大流域的水生态空间差异显著:海河流域始终呈现低水平聚类,黄河流域和淮河流域则分别呈现东西差异和南北差异,长江流域则始终仅为低-高水平聚类;海河流域和黄河以北时空热点为持续的冷点及逐渐减少的冷点,淮河以南时空热点为持续的热点、加强的热点及逐渐减少的热点。

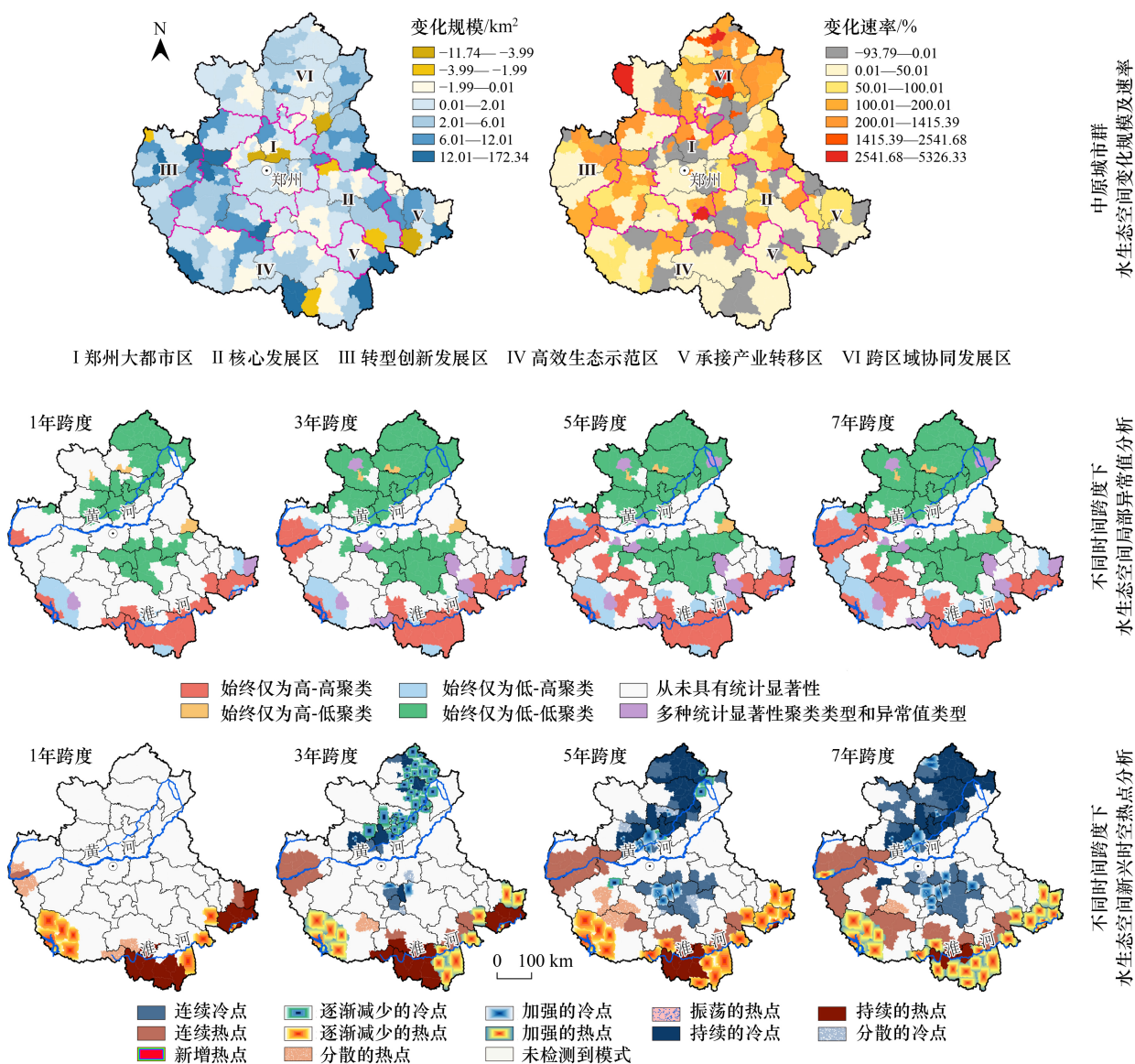


图 5 2000—2023 年中原城市群水生态空间变化规模及演变模式分析

Fig.5 Analysis of the scale and evolution mode of hydro-ecological space change in Zhongyuan Urban Agglomeration from 2000 to 2023

2.2 中原城市群水生态空间结构转型特征分析

2.2.1 规模特征

根据研究区国土空间结构转型规模(图 6),2000—2023 年中原城市群水生态空间约有 1938.8km² 经历了

结构转型,涉及6种类型,其中,农-水变化是主导类型,超过70%,其次为城-水变化,而与其他生态空间的互换占比不足3%。图6显示,在农-水转换规模上,6大功能区大体呈现高效生态示范区(398.4km²)>承接产业转移区(232.2km²)>核心发展区(224.3km²)>郑州大都市区(190.4km²)>跨区域协同发展区(185.9km²)>转型创新发展区(152.5km²)的转型特征,其中农业空间→水生态空间的规模约为水生态空间→农业空间的2.3倍;在城镇空间转换方面,各区域城镇向水流动量普遍高于水向城镇的流动量,尤其高效生态示范区,在城镇向水的流动量上遥遥领先,而郑州大都市区在水向城镇的流动量上则处于领先地位;与其他生态空间的转换方面,高效生态示范区流动量略高(22.0km²),而承接产业转移区几乎未发生流转(0.3km²)。整体而言,高效生态示范区表现出更高的水生态空间转型活跃度,反映出该区域在农业发展及城市发展中对水资源的强烈需求。就城市角度而言,南阳和信阳的转换活动表现出显著的活跃度:南阳在农→水和城→水的转换规模上均位居第一,信阳则在水→农以及与其他生态空间的动态互转方面表现突出,相较之下,郑州在水→城转换中表现稍显突出。此外,信阳、运城、菏泽和洛阳在农业空间→水生态空间的转换规模上均超过60km²,同时,南阳、信阳、运城和洛阳在城镇空间向水生态空间的转换中同样表现明显,均超过36km²,表明这些城市对水生态空间日益增长的需求;而郑州、运城和新乡则在水生态空间向城镇空间的转换中展现出显著的流动性,这或许与其快速城镇化和开发策略有关,导致水资源的利用与城镇空间扩展需求的增加。

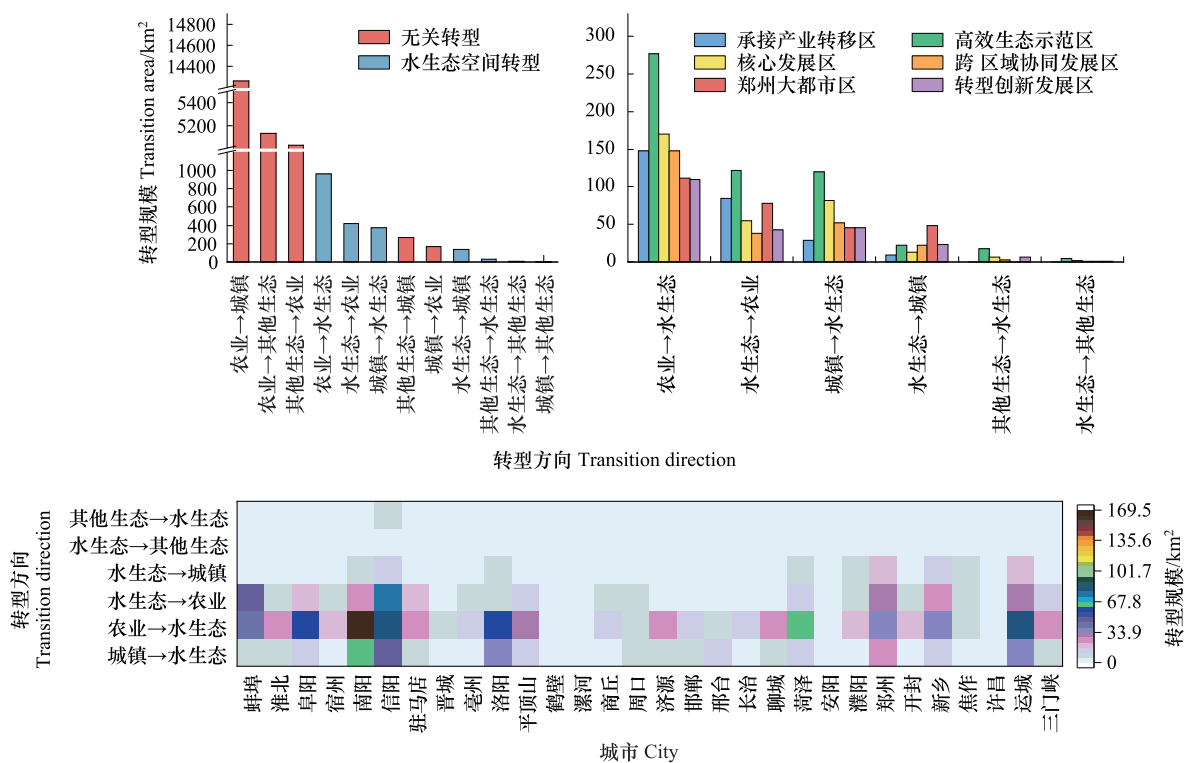


图6 2000—2023 年中原城市群水生态空间结构转型规模及分区特征

Fig.6 The scale and zoning characteristics of the transformation of the hydro-ecological spatial structure in Zhongyuan Urban Agglomeration from 2000 to 2023

2.2.2 分异特征

水生态空间的转入与转出表现出高度的地理一致性。由空间相关性分析可知,水生态空间的转入和转出主要以高-高聚类区和低-低聚类区为主,其中,高-高聚类区广泛分布于研究区的东南一带以及中西部的部分地区,低-低聚类区则主要分布在研究区北部。总体来看,这两种聚类区的空间分布格局揭示了水生态空间转入与转出之间的显著空间相关性。从水生态空间的转入来看(图7),高-高聚类区主要分布在西部、南部和东部——西部区域涵盖运城盆地及晋豫交界山区,临近黄河,水资源相对丰富;南部区域位于淮河干流及南岸豫

皖交界处,因淮河流经而拥有丰富水资源,同时桐柏山与大别山进一步增强了水资源供给能力;东部区域则主要集中在宿州灵璧县,其水资源主要依赖地下水或小河流,水量相对充足。低-低聚类区则集中在北部和中部地区,北部包括邢台-邯郸-安阳一线及长治、安阳交界地带,中部主要分布在贾鲁河、颍河及沙河交汇处附近的周口与漯河等地,形成淮河北岸水系交汇区。低-高聚类区主要位于南阳盆地丹江口水库周边、淮河北岸局部地区以及运城和晋城等地。而高-低聚类区则主要分布在新乡北部与晋城交界地带。从转出来看,转出区域与转入的高-高聚类区几乎完全重合且有所扩展;低-低聚类区亦与转入区域重合,并呈现一定程度的增量;值得关注的是,低-高聚类区的分布往往伴随高-高聚类区的存在。具体到典型地区而言,较为活跃的区域主要集中在运城、信阳与宿州,而豫北及海河流域城市转型表现相对较弱;农业转水生态空间主要分布在豫西和豫南地区,其中南阳淅川县的转变规模明显高于其他地区;水转农业空间主要发生在淮河两岸,怀远县、固始县、潢川县与五河县尤为突出;城市转水生态空间主要集中于豫西、豫南及运城部分区域,尤其在水库或河湖周边;而水转城镇空间则主要分布在豫北、豫中、鲁西南及晋南盆地等处。值得注意的是,黄河在洛阳和郑州段增减区位存在一定错位,这反映出黄河改道的现象在一定程度上影响了水生态空间的演变。

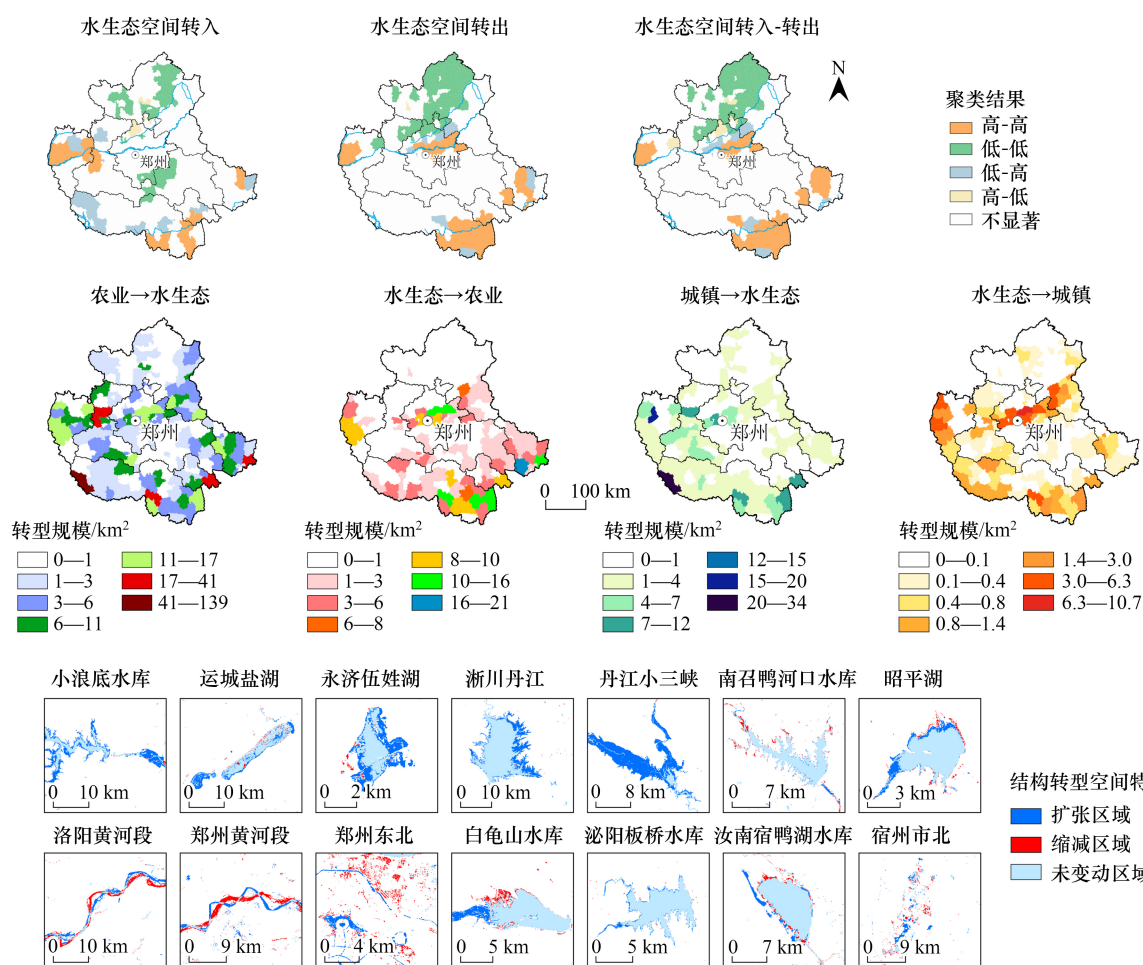


图7 中原城市群水生态空间结构转型的空间分异特征

Fig.7 Spatial differentiation characteristics of hydro-ecological spatial structure transformation in Zhongyuan Urban Agglomeration

2.3 中原城市群水生态空间演变驱动机制分析

2.3.1 驱动因素选择与相关性分析

综合考虑研究区特征、数据易获取性和指标代表性,从自然地理、交通区位和社会经济 3 个方面选取 20 个自变量(表 2)对关键因素的重要程度和交互作用强度进行分析。

表 2 中原城市群水生态空间演变驱动因素的可解释机器学习变量说明

Table 2 Variable description of driving factors of hydro-ecological spatial evolution in Zhongyuan Urban Agglomeration

因素类型 Factor type	驱动因素 Driving factor	符号 Symbol	驱动因素 Driving factor
自然地理 Natural geography	海拔	elev	平均海拔高度大小/m
	坡度	slope	平均坡度大小,由高程数据二次计算得出/(°)
	地形起伏度	relief	单元内海拔最大值与最小值的差值/m
	温度	tmp	首末两年平均气温的差值/℃
	降水量	pre	首末两年平均降水量的差值/mm
	日照	suhr	首末两年年均日照时数的差值/h
交通区位 Transportation	距省会距离	pcdst	距离省会的欧式距离/km
location	距市中心距离	ucdst	距离地市中心的欧式距离/km
	距河流距离	rvrdest	距离三级以上大河的欧式距离/km
	距铁路距离	raildst	距主要铁路线的欧式距离/km
	距公路距离	roaddst	距主要公路的欧式距离/km
社会经济 Socioeconomic	人口规模	pop	首末两年地区人口总数的差值/万人
	国内生产总值	gdp	首末两年国内生产总值的差值/亿元
	人口密度	popden	首末两年人口密度的差值/(人/km ²)
	农业机械总动力	argmach	首末两年农业机械总动力的差值/(kW·h)
	财政支出	fncexp	首末两年地区财政支出的差值/亿元
	第一产业增加值	indus1	首末两年第一产业增加值的差值/亿元
	第二产业增加值	indus2	首末两年第二产业增加值的差值/亿元
	第三产业增加值	indus3	首末两年第三产业增加值的差值/亿元
	城镇化率	urb	首末两年区域城镇人口占总人口比值的差值/%

分析结果如图 8 所示,水生态空间转入与 indus1、argmach 存在显著关联,而水生态空间转出则与 pre、tmp、indus1、argmach 均呈现显著关联。在自然地理因子内部, slope、elev、relief 间的相互关系最为紧密 (Pearson 相关系数 $r>0.5$),同时温度和降水量的关联亦显著 (Pearson 相关系数 $r>0.5$),此外,tmp 与 elev、suhr 与 pre、tmp 之间的负相关关系也较为显著 (Pearson 相关系数 $r<-0.5$);在交通区位属性方面,pcdst 和 roaddst 之间的关联最为密切 (Pearson 相关系数 r 接近 1);在社会经济属性中,indus3 和 gdp 之间的关联度最高 (Pearson 相关系数 r 接近 1),其次为 indus2 和 gdp 之间的关系 (Pearson 相关系数 $r>0.5$),另外,popden 与 indus3、popden 与 gdp、fncexp 与 indus1 的关联也较为显著 (Pearson 相关系数 r 约为 0.5)。

2.3.2 演变机制解析

基于上述分析,进一步利用 XGBoost 模型求解重要转型方向,并运用 VIVI-PDP 框架分析关键因素的重要程度及其交互作用强度(图 9)。模型结果显示出较高的解释力,揭示了转型过程中多种因素的复杂交织,以及不同转型方向之间在驱动因素重要性和交互作用强度上的差异。首先,农业空间向水生态空间的转型过程中,海拔与距省会距离是两个关键因素,呈现“重要性高-交互力强”特征,表明这两个因素不仅单独发挥作用,而且相互作用共同推动了转型的发生;水生态空间向农业空间转型中,降水量和距河流距离的重要性较高,并且与财政支出、二产增加值、一产增加值、地形起伏度和距公路距离等因素存在较强的交互作用,表明在这一转型过程中自然因素和社会经济因素共同作用形成了复杂的“作用网”。其次,城镇空间向水生态空间的转型中,海拔、距省会距离和地形起伏度是主导因素,形成了特定的“作用链”。而在水生态空间向城镇空间的转型中,一产和距公路距离的重要性和交互作用均较为显著,这可能反映了城镇扩张对农业用地和交通可达性的需求。此外,其他生态空间与水生态空间的转换所占比重小 (2.18%),驱动因子的作用强度和交互强度也相对较低,这可能意味着该转型过程受外部影响较小,更多地受到内在自然条件的制约。

结合图 9,综合运用 PDP 和 ICE 图对 XGBoost 模型中的典型驱动因素与空间转型规模的相关性进行详细

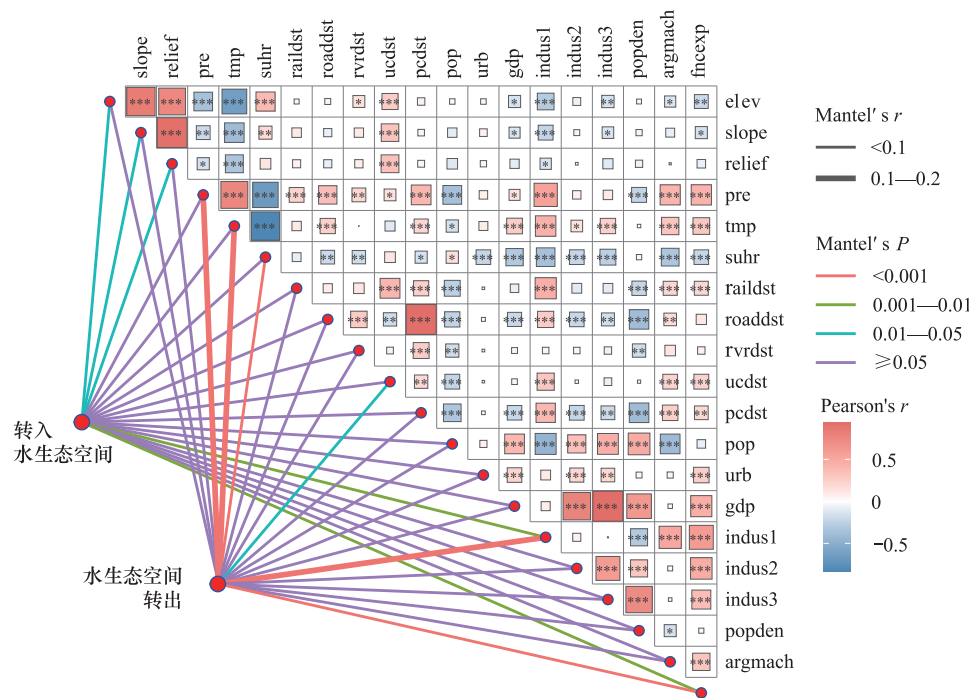


图8 中原城市群水生态空间结构转型与所选驱动因素间的 mantel 相关性分析

Fig.8 Mantel correlation analysis between the transformation of hydro-ecological spatial structure and the selected driving factors in Zhongyuan Urban Agglomeration

注: elev:海拔; slope:坡度; relief:地形起伏度; tmp:温度; pre:降水量; suhr:日照; raildst:距铁路距离; roaddst:距公路距离; rrvdst:距河流距离; ucdst:距市中心距离; pcdst:距省会距离; pop:人口规模; urb:城镇化率; gdp:国内生产总值; indus1:第一产业增加值; indus2:第二产业增加值; indus3:第三产业增加值; popden:人口密度; argmach:农业机械总动力

刻画,进一步分析关键因素与转型规模之间的偏相关依赖关系(图10),并据此对研究区水生态空间演变过程进行机制分析。具体如下:

(1)水生态空间与农业空间剧烈互转。过去23年中,农业空间与水生态空间的动态互转占主导地位,农→水的规模约为其余两者转入量的2.36倍,水→农的规模约为其余两者转出量的2.86倍,经分析,海拔和距省会距离等非社会经济因素的影响较为显著。图9显示,在距离省会30km以内且海拔200—400m范围内,随着海拔的增加,农业空间向水生态空间的转型显著增加——该区域多位于平原与丘陵交界地带,涵盖郑州市及周边的新郑市、荥阳市、中牟县等地,地形平坦、交通便捷,加之靠近省会,形成了中原城市群中人口密集、经济活跃的区域;此外,降水的影响也不容忽视,当年均降水量差值在10—20mm时,农业空间向水生态空间的转型随降水量增加而显著提升,主要分布在南部和东南部地区,如信阳市周边、南阳东南部及驻马店部分地区,受季风影响,降水较为充足,推动了该区域的空间转型。相反,在水生态空间向农业空间的转化中,降水量、距河流距离和财政支出成为关键影响因素:年降水量差值在70mm以下时,随着降水的增加,水生态空间向农业空间的转换规模下降;而当差值达到100mm左右时,则呈相反趋势,实际中如南阳市的水生态空间向农业空间的转化可能受到其特定的降水量和区域气候的影响;在距离河流20—50km区域中,距离越远转化可能性越低,现实中如鹤壁市由于其靠近黄河,更易利用河流水资源进行灌溉,促进农业发展,从而将水生态空间转化为农业空间;此外,财政支出差值在25—90亿元范围时,支出越高,水生态向农业空间的转化也越显著,而高于90亿元后影响趋于平缓,洛阳市作为中原城市群中的副中心城市,其相对较高的财政支出可能用于水资源管理和农业发展项目,促进了水生态空间向农业空间的转化。这些因素的综合作用,反映出中原城市群中农业与水生态空间相互转化的复杂动态。

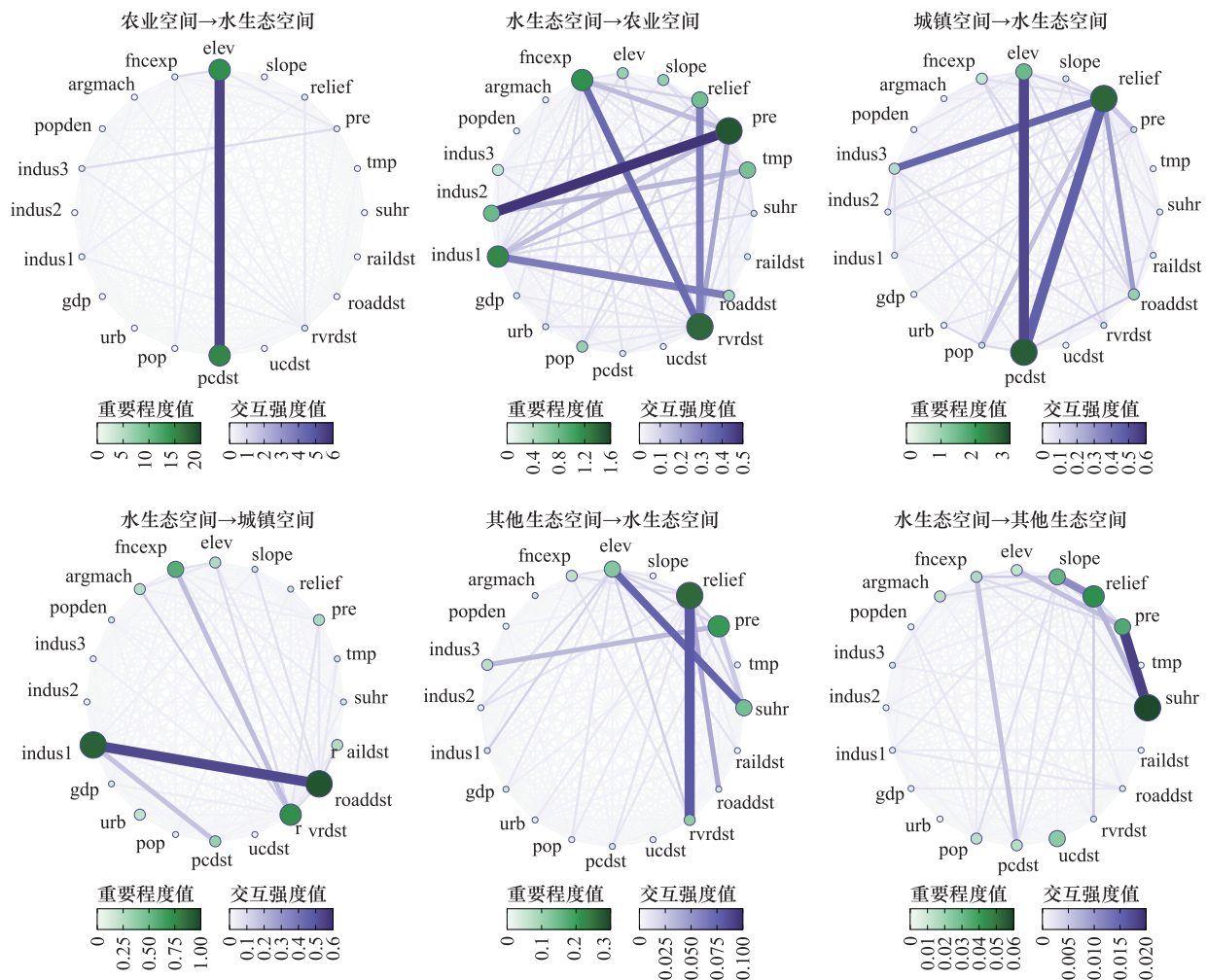


图9 中原城市群水生态空间演变的重要程度与交互作用探测结果

Fig.9 Detection results of importance and interaction of hydro-ecological spatial evolution in Zhongyuan Urban Agglomeration

(2) 水生态空间的转入与转出。水生态空间的转入过程中,海拔、起伏度、降水及距离省会距离是前4位驱动因素,表明水生态空间的保护与自然地理和交通区位密切相关。社会经济因素如第三产业产值在此过程中的相对重要性较低,但其与自然因素的交互作用表现出较强的影响力。偏相关依赖图显示,起伏度介于500—1000m、海拔低于300m的条件下,当距省会距离超过30km且降水量差值超过100mm时,水生态空间的转入显著增强。这表明距离越远、降水量越高,转化的可能性越大。现实中,高效生态示范区的此类转化较为活跃,以信阳地区为例,它地处中原南部,地形多样且海拔相对较低,起伏度适中,年均降水量常常高于1000mm,且距离省会郑州约60km,在自然条件与生态农业、湿地保护等相关项目支持下,其水生态空间得以显著扩展,在初期转化过程中,信阳的社会经济因素重要性较低,但随着社会经济条件的逐渐提升,促进了水生态空间的转化与保护。在水生态空间转出过程中,不同转换方向背后的驱动因素各具特点:当转为其他生态空间时,自然地理因素发挥了重要作用;而当转化为城镇空间时,交通区位和社会经济因素的驱动作用则更加明显。例如第一产业增加值在20—40亿元范围时,随着产值的增加转换显著增强,当距离公路介于2—5km时,转化的可能性随距离的增加而显著减少,但当距离超过20km时,转化又会随距离的增加而增多,表明交通可达性在水生态空间向城镇空间的转化中扮演了关键角色。

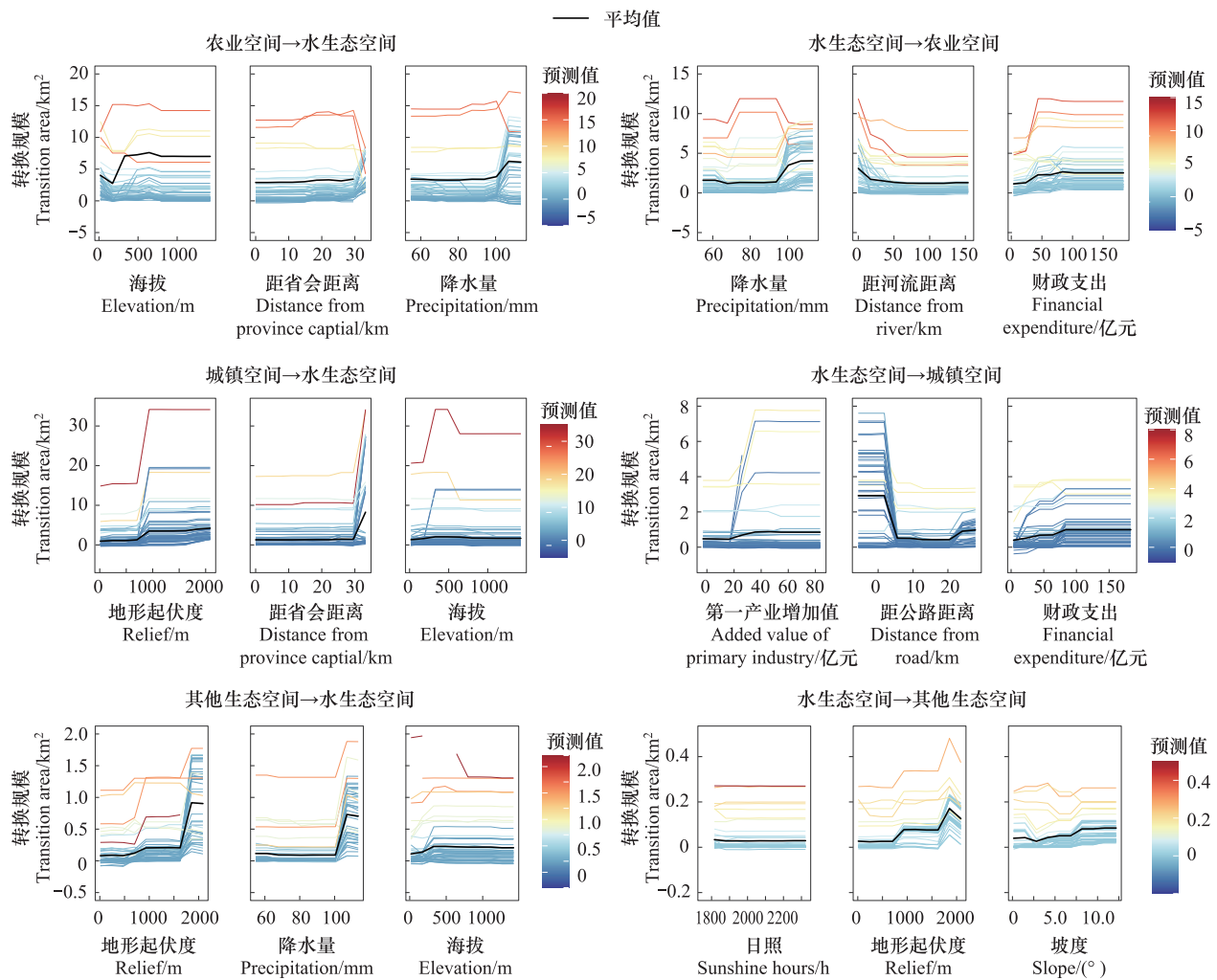


图 10 中原城市群水生态空间演变关键驱动因子的偏依赖相关图

Fig.10 Partial dependence correlation diagram of key driving factors of hydro-ecological spatial evolution in Zhongyuan Urban Agglomeration

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以中原城市群水生态空间为研究对象,探究其长时序的时空演变过程、模式及转型特征,在此基础上,运用可解释机器学习模型从重要性和交互作用强度两个角度识别空间演变的关键因素。主要结论如下:

(1) 2000—2023 年中原城市群水生态空间呈“上升-平稳-上升-平稳”的动态演变趋势,其中 2000—2006 年保持增长,2007—2014 年略有波动,2015—2018 年再次增长,2019—2023 年出现轻微下滑。不同功能区在这一过程中呈现显著差异:就增长规模而言,高效生态示范区>核心发展区>跨区域协同发展区>转型创新发展区>承接产业转型区>郑州大都市区,增幅最为显著的区域以信阳为中心向西北方向及沿淮河向东扩展,黄泛区的扩张也尤为突出;就速率而言,跨区域协同发展区>核心发展区>转型创新发展区>高效生态示范区>承接产业转型区>郑州大都市区。结合不同时间跨度与时空热点可知,海河流域始终处于低水平聚类,黄河流域与淮河流域则表现出东西与南北的显著差异,而长江流域则主要呈现低-高水平聚类。整体而言,水生态空间格局变化较为平稳,低值聚集区分布稳定,高值聚类区主要集中在西南及南部并形成连贯带状;新的高值热点区域逐步取代了原有的热点分布。

(2) 研究期间约有 1938.8km² 水生态空间经历了结构转型,涉及 6 种类型,农-水变化是主导类型(>70%),其中农业空间→水生态空间的规模约为水生态空间→农业空间的 2.3 倍;其次为城-水变化,其中城镇空间向水生态空间的流动量普遍高于后者向前者的流动量;而与其他生态空间的互换占比最低(<3%)。区域分布上,高效生态示范区水生态空间转型最为活跃,尤其南阳和信阳最为显著,而郑州在水→城转换中表现稍显突出;从分异特征来看,水生态空间的转入与转出分布较为一致,其中高-高聚类区主要集中于水资源丰富的西、南与东部地区,而低-低聚类区则多位于中、北部地区,低-高聚类区主要位于丹江口水库周边、淮河北岸等地,高-低聚类区则主要分布在新乡北部与晋城交界地带。

(3) 中原城市群水生态空间转型受自然地理和交通区位的显著影响,社会经济因素相对较弱,但其与自然因素的交互作用表现出较强的影响力。农业空间与水生态空间的剧烈转型主要受非社会经济因素驱动,其中农业空间向水生态空间的转型主要受海拔与距省会距离这两大因素的交互作用推动,而水生态空间向农业空间的转型则涉及降水量、距河流距离和财政支出等多个因素,形成复杂的“作用网”。城镇空间向水生态空间的转型由海拔、距省会距离和地形起伏度主导,而水生态空间向城镇空间的转型则受到第一产业增加值及距公路距离的影响。而其他生态空间向水生态空间的转入仅受自然地理因素的绝对主导。值得注意的是,南水北调工程作为影响中原城市群水资源配置的重要工程,在一定时期内对区域水生态空间结构的优化起到了积极作用——特别是在受水区,工程缓解了水资源短缺问题,对区域土地利用格局和生态保护格局的调整产生了阶段性影响。然而,从整体驱动机制来看,南水北调工程的作用更多体现在水资源供给改善方面,而在本研究的长期分析中,自然地理与交通区位因素仍然是主要的驱动力量。

3.2 讨论

作为我国中部地区社会经济活动高度密集的典型城市群,中原城市群水生态空间的演变过程揭示了人口集聚、产业发展与资源环境之间的动态平衡机制。从整体趋势来看,水生态空间呈现稳步增长,但不同功能分区的差异显著,表明资源配置的不均衡依然是限制可持续发展的关键因素。例如,郑州大都市区的下降趋势与其城市化进程及资源管理的不足密切相关,亟需在国土空间规划实践中加强生态空间与城市发展的协调。本文对中原城市群水生态空间演变的分析结论与于洋^[41]、王万同^[42]和郑靖伟^[43]的研究结果一致,但在影响因素和作用机制等细节方面存在差异或补充,如杜锦^[44]认为中原城市群的生态脆弱性是自然环境和人类活动共同作用的结果,本文验证了以上因素相互作用共同构成了中原城市群水生态空间变化驱动的复杂图景,并进一步揭示了不同因素在特定转型中的作用差异。值得注意的是,由于遥感影像适用范围的限制,本文在水生态空间识别方面仍面临一些不可避免的问题,如分类体系主要反映了水生态空间面积的动态变化,而对于水生态空间质的变化及地下水生态空间等的变动,尚难以提出可操作的技术方案和具可比性的研究结果;在机制分析方面,南水北调工程作为一项重大水利工程,其长期影响仍需进一步研究,以评估其对生态系统稳定性和空间结构的深远影响,未来研究可进一步结合不同季节影响模式的精细分析,为水生态空间的保护和管理提供更为科学的依据。

此外,水生态空间规划作为空间规划体系的重要组成部分,要求在不同水域功能的合理定位和黄河水功能区划的完善方面进行更高层次的协调与优化。为此,建议在以下几个方面开展深入研究与优化:首先,管理层面需构建跨部门协作机制,通过构建跨部门协作机制,实现生态保护与经济发展政策的统筹协调;定期评估各类空间功能的实施效果,及时调整管理策略,以应对生态系统与经济活动之间的动态关系。其次,应针对不同区域的生态特征与发展需求,通过精准识别不同区域的资源禀赋、环境承载力和发展潜力,从而实现差异化的空间治理,以促进资源的高效配置与合理利用。最后,建议建立基于“流域单元+区域协调”综合治理框架之下的多尺度、多主体协同、上下游联动机制等,强化城市群内部及跨区域生态协同机制以及在南水北调工程的背景下,加强上游水源地保护与下游用水区域的协作治理等内容。实施生态恢复和水资源保护的综合性措施;通过设立水生态保护红线,强化对水源地和重要生态区域的监管,推动水生态空间可持续发展,进而提升生态系统韧性与服务功能。

参考文献 (References):

- [1] 周广金, 童亚莉, 王凌青, 迟海龙, 朱昕虹, 梁涛. 国土空间规划中水生态空间及保护线的多维识别技术与应用. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3102-3117.
- [2] 刘海猛, 石培基, 杨雪梅, 张胜武, 韩梅芳, 陈莉. 人水系统的自组织演化模拟与实证. 自然资源学报, 2014, 29(4): 709-718.
- [3] 张胜武, 韩日, 李小胜, 宋马林, 刘海猛. 新型城镇化促进水生态文明建设: 影响机制及空间效应. 地理科学进展, 2024, 43(1): 1-16.
- [4] 霍守亮, 张含笑, 金小伟, 曹晓峰, 吴丰昌. 我国水生态环境安全保障对策研究. 中国工程科学, 2022, 24(5): 1-7.
- [5] 郝兆印, 王成新, 白铭月, 邓祥征, 窦旺胜, 于尚坤. “两山论”: 人地关系理论的中国实践与时代升华. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 136-144.
- [6] 薄立明, 魏伟, 尹力, 赵浪, 夏俊楠. 2000—2020 年长江经济带水生态空间格局变化及其影响要素. 中国环境科学, 2023, 43(2): 874-885.
- [7] 薄立明, 魏伟, 赵浪, 尹力, 夏俊楠. 青藏高原水生态空间格局时空演化特征及驱动机制. 地球科学进展, 2023, 38(4): 401-413.
- [8] Aspinall R, Pearson D. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: Linking landscape ecology, environmental modelling and GIS. Journal of Environmental Management, 2000, 59(4): 299-319.
- [9] Tormos T, Kosuth P, Durrieu S, Villeneuve B, Wasson J G. Improving the quantification of land cover pressure on stream ecological status at the riparian scale using High Spatial Resolution Imagery. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011, 36(12): 549-559.
- [10] Catherine A, Mouillot D, Maloufi S, Troussellier M, Bernard C. Projecting the impact of regional land-use change and water management policies on lake water quality: an application to periurban lakes and reservoirs. PLoS One, 2013, 8(8): e72227.
- [11] Kaandorp V P, Molina-Navarro E, Andersen H E, Bloomfield J P, Kuijper M J M, de Louw P G B. A conceptual model for the analysis of multi-stressors in linked groundwater-surface water systems. Science of the Total Environment, 2018, 627: 880-895.
- [12] Choi B, Choi S S. Integrated hydraulic modelling, water quality modelling and habitat assessment for sustainable water management: a case study of the Anyang-cheon stream, Korea. Sustainability, 2021, 13(8): 4330.
- [13] Ghosh A, Maiti R. Development of new Ecological Susceptibility Index (ESI) for monitoring ecological risk of river corridor using F-AHP and AHP and its application on the Mayurakshi river of Eastern India. Ecological Informatics, 2021, 63: 101318.
- [14] Mishra H S, Bell S, Vassiljev P, Kuhlmann F, Niin G, Grellier J. The development of a tool for assessing the environmental qualities of urban blue spaces. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 49: 126575.
- [15] Hawley R J. Expanding catchment-scale hydrologic restoration in suburban watersheds *via* stream mitigation crediting—a Northern Kentucky (USA) case study. Urban Ecosystems, 2022, 25(1): 133-147.
- [16] Fedorov R, Kuklina V, Sizov O, Soromotin A, Prihodko N, Pechkin A, Krasnenko A, Lobanov A, Esau I. Zooming in on Arctic urban nature: green and blue space in nadym, *Siberia*. Environmental Research Letters, 2021, 16(7): 075009.
- [17] 康丽婷, 胡希军, 罗紫薇, 韦宝婧, 周冬梅. 县域水生态空间识别及其分布特征. 水土保持学报, 2022, 36(1): 170-181.
- [18] 唐寅, 王中根, 王婉清, 黄火键, 袁勇. 适用于遥感影像的水生态空间多功能分类体系研究. 地理科学进展, 2020, 39(3): 454-460.
- [19] 杨晴, 王晓红, 张建永, 赵伟. 水生态空间管控规划的探索. 中国水利, 2017(3): 6-9.
- [20] Bonetti S, Wei Z W, Or D. A framework for quantifying hydrologic effects of soil structure across scales. Communications Earth & Environment, 2021, 2: 107.
- [21] 刁艺璇, 左其享, 马军霞. 黄河流域城镇化与水资源利用水平及其耦合协调分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(3): 326-333.
- [22] 肖攀, 苏静. 城镇化对生态环境质量影响的实证研究——以环洞庭湖区为例. 财经理论与实践, 2019, 40(1): 150-155.
- [23] Tu J. Spatial variations in the associations of surface water quality with roads and traffic across an urbanization gradient in northern *Georgia*, USA. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(41): 94694-94720.
- [24] 夏瑞, 贾蕊宁, 陈焰, 王璐, 马淑芹, 张远. 流域水生态系统完整性模拟方法展望. 环境工程, 2022, 40(6): 241-252.
- [25] 崔丹, 陈馨, 曾维华. 水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1174-1184.
- [26] 陈鼎豪, 郑文丽, 王骥, 林兴周, 冯立师, 陈思莉, 魏清伟. 简化一维水质模型在突发水污染事故模拟预测中的应用. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3199-3203.
- [27] 贾梦圆, 陈天. 基于土地利用变化模拟的水生态安全格局优化方法——以天津市为例. 风景园林, 2021, 28(3): 95-100.
- [28] 宋百媛, 侯西勇, 王晓利, 刘玉斌. 海岸带土地利用变化多情景模拟——以山东海岸带为例. 海洋科学, 2022, 46(1): 22-33.
- [29] 唐亚男, 李琳, 韩磊, 谢双玉. 国外城市滨水空间转型发展研究综述与启示. 地理科学进展, 2022, 41(6): 1123-1135.
- [30] 丁志伟, 简子菡, 李凌子, 张改素. 中原城市群研究进展——基于 1987—2017 年中国知网文献的计量分析. 地域研究与开发, 2020, 39

(1): 51-58.

- [31] 吴泽宁, 管新建, 岳利军, 焦建林. 中原城市群水资源承载能力及调控研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2015.
- [32] 马晓蕾, 王婕, 刘若男. 中国“水量”和“水质”生态足迹及可持续能力量化方法与实证研究. 生态学报, 2023, 43(9): 3677-3688.
- [33] 刘慧, 孙思奥, 王晶, 方创琳. 黄河流域城市集中式生活饮用水水源地水质超标空间特征与因子识别. 地理研究, 2023, 42(12): 3264-3277.
- [34] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [35] 张棋, 许德合, 丁严. 基于 SPEI 和时空立方体的中国近 40 年干旱时空模式挖掘. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 194-201.
- [36] 魏伟, 尹力, 谢波, 薄立明. 国土空间规划背景下黄河流域“三区空间”演化特征及机制. 经济地理, 2022, 42(3): 44-55, 86.
- [37] 闫茜, 黄晓军, 张玉星, 赵凯旭, 李琳钰. 长江经济带高温热浪演化特征及人口暴露风险研究. 长江流域资源与环境, 2024, 33(5): 1041-1054.
- [38] 宋伟轩, 叶玲, 路以豪, 徐昀. 南京中产阶层居住迁移的时空特征与典型模式. 地理研究, 2024, 43(5): 1187-1204.
- [39] Crabot J, Clappe S, Dray S, Datry T. Testing the Mantel statistic with a spatially-constrained permutation procedure. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(4): 532-540.
- [40] Inglis A, Parnell A, Hurley C. Vivid: an R package for variable importance and variable interactions displays for machine learning models. *The R Journal*, 2023, 15(2): 344-361.
- [41] 于洋, 韩鹏, 杨楠, 李小磊, 郭昀昊. 中原城市群核心城市资源环境承载力研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2018, 54(2): 407-414.
- [42] 王万同, 孙汀, 王金霞, 付强, 安传艳. 基于多源遥感数据的区域生态系统服务价值年际动态监测——以中原城市群为例. 地理科学, 2019, 39(4): 680-687.
- [43] 郑靖伟, 孙才志. 基于 MRIO 与 ESTDA 模型的中国水资源流动格局分析. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(4): 172-183.
- [44] 杜锦, 苗长虹, 许家伟, 吕可文, 李晨阳. 中原城市群城市高质量发展时空格局与影响因素. 经济地理, 2025, 45(1): 67-76.