

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.016; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.016.

薄立明, 赵浪, 尹力, 等. 国土空间规划背景下黄河流域水生态空间格局演变特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 178-190.

Bo Liming, Zhao Lang, Yin Li, et al. Evolution of hydroecological spatiotemporal pattern and its influencing factors in the Yellow River Basin in the context of the territorial spatial planning[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 178-190.

国土空间规划背景下黄河流域水生态空间格局演变特征及其影响因素

薄立明¹, 赵浪², 尹力², 张翔³, 魏伟^{1,2,4}

(1. 武汉大学 中国发展战略与规划研究院, 武汉 430072; 2. 武汉大学 城市设计学院, 武汉 430072; 3. 中国地质大学(武汉) 国家地理信息系统工程技术研究中心, 武汉 430078; 4. 湖北省人居环境工程技术研究中心, 武汉 430072)

摘要: [目的] 科学认知黄河流域上、中、下游水生态空间格局演化特征及影响因素, 促进水资源用途管制客体向国土空间规划体系治理系统的融入, 推动黄河流域生态保护和高质量发展。 [方法] 采用空间转移矩阵、最优地理探测器等量化模型分析黄河流域上、中、下游水生态空间格局演变的区域差异, 剖析了水生态空间格局演变路径并揭示其内在影响因素。 [结果] (1) 黄河流域水生态空间规模为 2.76 万 km², 仅占流域国土总面积的 2.28%, 上、中、下游水生态空间规模占比为 22:2:3, 研究期内规模性扩张了 4 989.90 km², 上游地区增长规模最大, 下游地区增长幅度最剧烈。(2) 上游地区水生态空间主要与其他生态空间发生交叉转换, 引起水生态空间大规模扩张, 其次是与农业空间交互转换造成水生态空间小规模流失; 中游地区水生态空间主要与农业空间发生交叉转换, 其次是其他生态空间, 引起水生态空间小规模扩张; 下游地区农业空间向水生态空间的转换引起水生态空间大规模扩张的同时水生态空间也规模性转换为城镇空间。(3) 上游地区水生态空间规模性扩张核心影响因素是水资源“液化”的水文循环过程, 流失则是主要由第一、三产业发展诉求驱动; 中游地区水生态空间格局演变整体表现为政府财政所主导的适配地区自然地理条件、社会经济的水资源调配过程; 下游地区则是水生态空间伴随城镇化进程在农业地区和城镇地区的转移。 [结论] 黄河流域上、中、下游水生态空间格局演变特征、路径和影响因素差异显著, 需要根据各区域水资源保护利用的发展定位, 建立起共同治理、协同发展的流域协作体系。

关键词: 水生态空间; 国土空间规划; 用途管制; 时空格局; 黄河流域

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0178-13

Evolution of hydroecological spatiotemporal pattern and its influencing factors in the Yellow River Basin in the context of the territorial spatial planning

Bo Liming¹, Zhao Lang², Yin Li², Zhang Xiang³, Wei Wei^{1,2,4}

(1. China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. National Engineering Research Center for Geographic Information System, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 4. Center of Hubei Human Habitat Engineering and Technology, Wuhan 430072, China)

Abstract: [Objective] This study aims to understand the characteristics and influencing factors of the evolution of the hydroecological spatial pattern in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin, to promote the integration of water resources use regulation into the territorial spatial planning system, and to enhance ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin.

收稿日期: 2024-03-23

修回日期: 2024-04-25

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 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(2023KFJJ03); 教育部人文社会科学研究规划资助项目(23YJA630003); 湖北省自然科学基金面上项目(2023AFB794); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(20242024kf0029)

第一作者: 薄立明(1982—), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事国土空间规划、水生态环境保护研究。E-mail: boliming@whu.edu.cn

通信作者: 魏伟(1976—), 男, 宁夏银川人, 博士, 教授, 主要从事国土空间规划研究。E-mail: weiwei@whu.edu.cn

http://stbcj.paperonice.org

[**Methods**] Spatial transition matrices and optimal geographic detectors, among other quantitative models, were used to analyze regional differences in the evolution of the hydroecological spatial pattern across the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin. This analysis delineated the paths of spatial pattern evolution and revealed the underlying influencing factors. [**Results**] (1) The scale of the hydroecological space in the Yellow River Basin was 27 600 km², accounting for only 2.28% of total land area in the basin, with the proportions in the upper, middle and lower reaches being 22 : 2 : 3. During the study period, there was an expansion of 4 989.90 km², with the largest growth in the upper reaches and the most drastic increase in the lower reaches. (2) In the upper reaches, the hydroecological space transformation involved interactions with other ecological spaces, leading to a large-scale expansion of hydroecological space, followed by a minor loss due to interactions with agricultural space. In the middle reaches, the main transformations occurred with agricultural spaces, leading to a small-scale expansion of hydroecological space. In the lower reaches, the conversion of agricultural space into hydroecological space led to a large-scale expansion, while hydroecological space also was converted into urban space on a large scale. (3) The core factor influencing the massive expansion of hydroecological space in the upper reaches was the ‘liquefaction’ of water resources in the hydrological cycle, with losses mainly driven by the demands of primary and tertiary industries. In the middle reaches, the evolution of the hydroecological space pattern was predominantly governed by governmental fiscal policies adapted to local natural geographical conditions and socio-economic development. In the lower reaches, the changes in hydroecological space were associated with urbanization processes, shifting between agricultural and urban areas. [**Conclusion**] The characteristics, pathways, and influencing factors of the evolution of hydroecological spatial patterns in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin are significantly different. It is necessary to establish a river basin collaboration system for joint governance and coordinated development based on the developmental positioning of water resource protection and utilization in each region.

Keywords: hydroecological space; territorial spatial planning; land use control; spatiotemporal pattern; Yellow River Basin

黄河流域是水资源短缺的生态脆弱区和经济重载区,以全国 2.6%的水资源量承载着全国 17%的耕地面积,养育了约 12%的人口,创造了约 14%的国内生产总值^[1],水资源开发利用率高达 80%,远超 40%的生态警戒线^[2]。中共中央国务院《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》在国家层面凸显黄河流域生态屏障和经济发展带的战略地位,进一步强调黄河流域将水资源作为最大刚性约束的发展原则。水资源开发保护效益的最大化成为提升黄河流域“生态-经济”协同发展上限,实现生态保护和高质量发展国家性区域重大战略的基础支撑。以习近平同志为核心的党中央着眼于生态文明建设全局,明确了黄河流域“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路^[3];因此,面向黄河流域水资源分布不均、水沙关系不协调的水生态环境条件和人类活动所引起的水资源供需失衡及水质恶化等水生态问题,将水生态空间置于现代化国土空间治理体系中,在空间格局层面实现水资源合理配置,是探寻黄河流域有限水资源开发保护效益最优解的科学路径。

水生态空间被定义为向“生态-水文”过程提供场所、维持水生态系统健康稳定、保障水安全的国土空间^[4]。水生态空间将水资源聚焦于空间实体,形成国土空间系统的关键构成要素,一方面作为其他国土空间的底层支撑,可通过与城镇空间、农业空间、绿色生态空间等国土空间的交互情况刻画水资源保护与利用情况;另一方面,水生态空间作为空间资源客体受到国土空间规划主体的管控与引导,可衔接国土规划体系系统治理水资源实现空间均衡^[5]。新时期国土空间规划体系为健全差异化协同发展长效机制,以主体功能区为国土空间保护开发的基础制度,以“三区三线”为核心管控手段合理布局城镇、农业、生态功能实现国土空间的高质量发展^[6]。水生态空间的管控需求在国土空间规划语境中被进一步明确——需要以主体功能为标准明晰水生态空间具体的管控内涵,细化“三区三线”关于生态空间、生态保护红线的划定方法及管控原则明确水生态空间管控分区及管控方式,通过不同区域差异化的国土空间配置实现水资源开发保护的综合效益最大化。水生态空间演化研究

成为黄河流域水资源开发保护模式优化的关键突破口,已有的黄河流域水资源相关研究为此提供了坚实基础,主要包括:(1) 关注黄河流域水储量^[7]、水沙关系^[8]、水循环^[9-10]过程以及水污染情况等^[11]涉水要素的动态变化情况,梳理了黄河流域水资源的基本特征及问题,为水生态空间特征刻画的分析维度选取提供指引;(2) 构建水生态足迹^[12]、水资源利用效率^[13]以及水资源供需关系等^[14-15]评价体系,系统分析了黄河流域水资源的开发利用情况,为水生态空间时空演化判读提供参考;(3) 评估水资源分布与经济发展^[16-17]、粮食生产^[18-19]、生态系统服务等^[20]要素的协调耦合程度,揭示黄河流域水资源与国土空间功能水平的内在联系,为水生态空间与其他国土空间的交互机制解析提供支撑。已有研究成果颇丰,但仍未衔接国土空间规划体系将水资源空间实体置于国土空间整体中展开系统分析,缺乏黄河流域全域范围的水生态空间长时序、大尺度演化判读,难以支撑水资源在水生态空间层面的开发保护管控。

面向黄河流域水资源短缺且分布不均衡的水生态问题和区域日益增加的农业生产、城镇发展以及生态功能保护需求,需要将水生态空间这一水资源承载空间实体作为关键管控对象推动国土空间规划体系理论方法向水资源规划管理的精准传导。有必要引入国土空间格局时空演化研究范式,精准刻画水生态空间格局演变的区域差异,剖析水生态空间的开发保护动态并揭示其内在影响因素,为水资源管控客体向国土空间规划体系主体的融入提供科学支撑。基于此,本文对黄河流域 2000—2020 年水生态空间格局演变情况及影响因素展开研究,运用空间计量方法、空间转换矩阵描述水生态空间分布特征及其与城镇、农业、其他生态空间的交叉转换路径,采用最优参数地理探测器模型从上、中、下游分区域探讨演变路径的内在影响因素,弥补黄河流域水生态空间长时序、大尺度研究的缺失,为健全黄河流域水资源差异化协同发展开发保护模式,推动黄河流域生态保护及高质量发展提供理论和数据支撑。

1 研究设计

1.1 研究区概况及数据

1.1.1 研究区概况 黄河起源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,流经 9 省 68 市(自治州、盟),研究以该流域涉及 439 个县级行政单元所辖陆域国土空间为研究范围(图 1),总面积约 121.14 万 km²。黄河流域(90°34′—118°24′E,32°23′—42°47′N)自然地理条件复杂,水文、地质条件差异显著,不仅横跨干旱区、半干旱区、半湿

润区、湿润区,同时渡越青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、华北平原四大地貌单元和地势三大台阶。这在一定程度上决定了黄河流域脆弱的生态环境和不均衡的资源基底,形成上游的高原冰川、三江源、祁连山,中游的黄土高原,下游的黄河三角洲等生态环境极易退化的生态功能保护区,造成了水资源短缺、水资源分布不均、水沙矛盾恶化等突出的水生态问题。黄河流域也是中国极为重要的经济带,农牧业基础良好,能源资源富集,分布有黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区等农产品主产区,粮食产量占全国 1/3,也是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地。但黄河流域工、农业生产过程进一步威胁水生态安全,尤其近年来流域快速发展对水资源需求的上升导致水生态问题更加突出,统筹水资源的保护利用成为实现黄河流域生态保护和高质量发展的重要抓手。

1.1.2 数据来源与预处理 为衔接国土空间规划体系,本文以国土空间保护开发基础制度主体功能区为参照,将县/区级行政单元作为基本单元收集与处理土地利用数据、地理空间数据以及社会经济数据等数据并用于后期分析。其中,用以提取水生态空间的土地利用数据来源于 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据产品(GlobeLand30),通过在 ArcGIS 10.6 中镶嵌、裁切和重分类后获得黄河流域 3 期(2000 年、2010 年、2020 年)水生态空间分布数据。地理空间数据中各级行政边界、河流和道路等数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),数字高程模型数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),气温、降水和日照等数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。社会经济数据来源于各年度《中国县域统计年鉴(县市卷)》和所涉及省份的统计年鉴。

1.2 黄河流域水生态空间要素识别

1.2.1 国土空间规划背景下的水生态空间要素识别原则 从国土空间层面开展水资源保护利用研究需要承接国土空间保护开发管控要求,明晰黄河流域水生态空间具体的演变情况,首要任务是衔接国土空间规划体系辨析水生态空间内涵(图 2),进而在国土空间整体中明确水生态空间范围。其关键在于保证获取的水生态空间既适用于国土空间规划整体效益提升,又便于实现国土空间规划体系向水生态空间专项规划的细化落实,这需从水生态空间要素提取的目标、基础以及标准三方面进行考虑:(1) 以国土空间用途管制为目标。国土空间规划体系明确以国土空间规划为依据,突出对专项规划的指导约束,对所有国土空间分区分类实施用途管制,形成以国土空间规

划为基础,以统一用途管制为手段的国土空间保护开发制度^[21]。国土空间与水生态空间分别对应国土空间规划与水生态空间专项规划,应该以国土空间管制手段的传导作为强化两者间指导约束关系的关键链接路径;(2)以国土空间规划用地分类为基础。国土空间用途管制的基础在于空间资源要素,当前国土空间规划实践将第三次全国国土调查数据对应国土空间规划用地分类形成国土空间用途管制的统一底图^[22]。水生态空间是从属于生态空间的涉水部分,是国土空间重要组成,为保障水生态空间与国土空间在用途管制中的可传导性,应当以国土空间规划用地

分类为基础,将土地利用数据转换成适用于国土空间规划体系的水生态空间分类;(3)以国土空间主体功能为标准。国土空间用途管制的核心在于用途分区和分类管理,即通过分区标准的判别将国土空间资源要素整合为各类管制空间单元进行分类管理^[23]。国土空间规划体系将主体功能区作为国土空间开发保护的基础制度,所体现的主体功能理念是国土空间保护开发中实现“功能-管控”协同的分区标准。要从国土空间整体中提取水生态空间内在要素,其关键在于承接国土空间保护开发需求,细化水生态空间所承担的主体功能,从而明确对应的国土空间资源要素。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图边界无修改,下同。

图 1 黄河流域自然地理条件与水生态空间基本要素

Fig. 1 Basic elements of natural geographical conditions and hydroecological space in the Yellow River Basin

1.2.2 黄河流域水生态空间要素分类体系 明确黄河流域水生态空间的要素首先需要细化其主体功能,再结合国土空间规划用地分类从黄河流域土地利用实际中筛选对应空间要素。水是生态之基,是支撑地球生命系统的重要基础,水生态空间是国土空间整体功能实现的基本支撑,在“三区空间”中属于生态空间的核心组成部分,其主体功能在整体上是提供水文相关的生态服务功能,但在国土空间用地分类层面仍需进一步细化。根据《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》,水生态产品整体上包括物质供给、调节服务、文化服务三方面,物质供给直接对应人类

生产、生活所需,文化服务则指为人类提供的休闲旅游和景观价值;调节服务则包括水源涵养、海岸带防护、洪水调蓄、水质净化、气候调节以及物种保育,是其中直接对应水生态空间的生态服务功能细化的水生态产品。参照《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》中的涉水用地类型,耕地中的水田、农业设施建设用地中的水产养殖设施建设用地,公园绿地水面以农业生产和休闲景观为主要功能。而水生态服务功能中对应水源涵养、洪水调蓄功能的主要是陆地水域中的河流水面、湖泊水面、水库水面、坑塘水面、沟渠;对应水质净化、海岸带防护、物种保育

功能则包括湿地中的森林沼泽、灌丛沼泽、沼泽草地、其他沼泽地、沿海滩涂、内陆滩涂以及红树林地；含有气候调节功能的是冰川及常年积雪。进一步结合所

采用的 GlobeLand30 土地利用数据,对应其中地表覆盖类型中的湿地、水体、冰川和永久积雪,最终识别的黄河流域水生态空间要素见表 1。

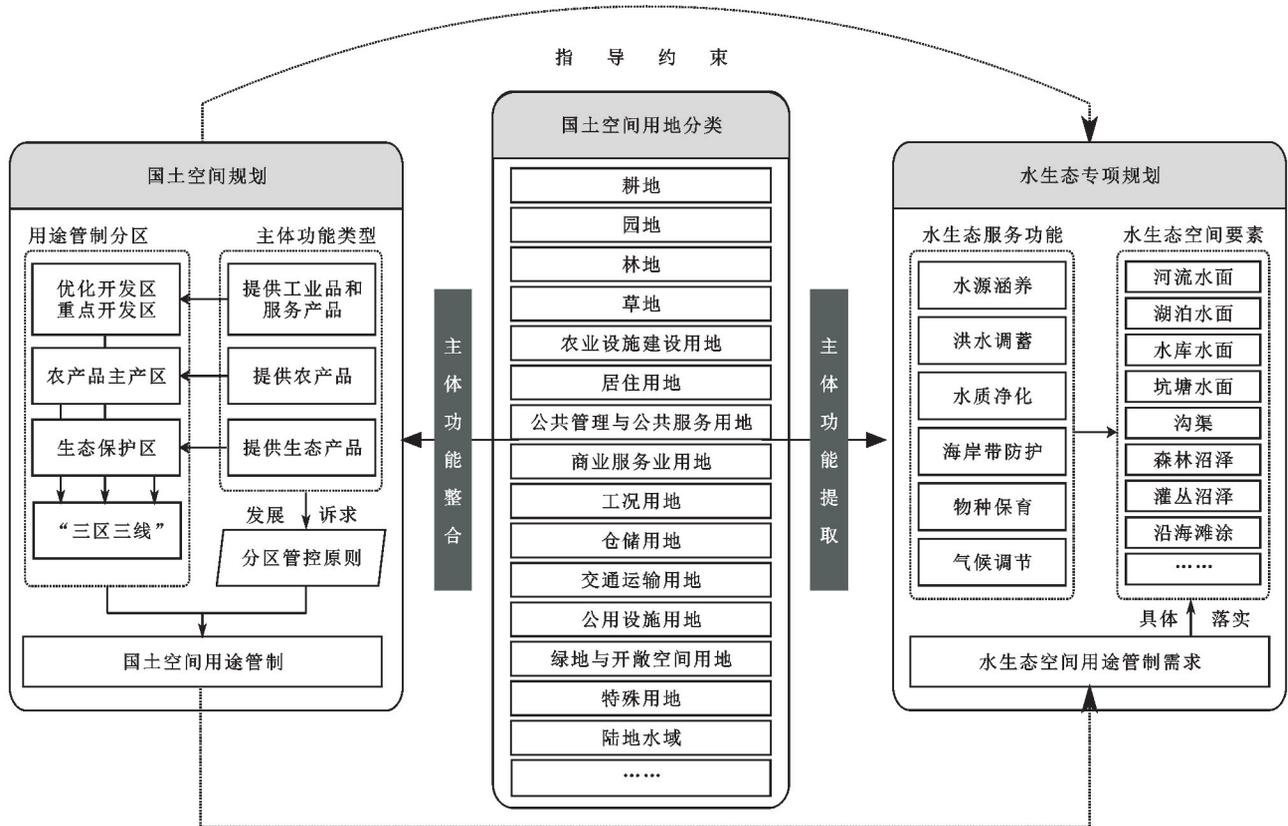


图 2 国土空间规划背景下的水生态空间要素识别框架

Fig. 2 Framework for identifying hydroecological space elements under the context of territorial spatial planning

表 1 黄河流域水生态空间要素与土地利用类型的衔接

Table 1 Integration of hydroecological space elements and land use types in the Yellow River Basin

生态服务功能	国土空间规划用地分类		GlobeLand30 土地利用数据	
	一级地类	二级地类	类型	内容
水源涵养 洪水调蓄	陆地水域	河流水面	水体	陆地范围液态水覆盖的区域,包括江河、湖泊、水库、坑塘等
		湖泊水面 水库水面 坑塘水面 沟渠		
水质净化 海岸带防护 物种保育	湿地	森林沼泽 灌丛沼泽 沼泽草地	湿地	位于陆地和水域的交界带,有浅层积水或土壤过湿的土地,多生长有沼生或湿生植物。包括内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥炭沼泽、红树林、盐沼等
		其他沼泽地 沿海滩涂 内陆滩涂 红树林地		
气候调节	冰川及常年积雪		冰川和永久积雪	由永久积雪和冰盖覆盖的土地,主要包括高山地区永久积雪

注:资料来源于 GlobeLand30 产品说明书(<http://www.globallandcover.com/>)、《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》、《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》。

1.3 水生态空间格局演变情况测度

国土空间是一个有机整体,需要将水生态空间置

于国土空间系统中测度其格局演变情况,既便于从整体层面梳理其演变过程中的具体交叉转换路径,也便

于后期挖掘水生态空间保护开发模式存在的问题并探寻优化策略。水资源受到自然条件变化和人类保护利用的影响而循环流动,在空间上表现为水生态空间在区域中规模和位置的变化,放在国土空间系统中则表现为水生态空间与城镇空间、农业空间、其他生态空间所发生的空间置换。研究从格局演变特征、交叉转换路径两个维度分别运用标准差椭圆、空间转移矩阵对黄河流域水生态空间实现量化分析。其中,标准差椭圆描述各时间截面黄河流域水生态空间的展布范围、重心、聚集程度和方位变化,计算公式详见参考文献[24];空间转移矩阵用以揭示黄河流域水生态空间与其他国土空间的交互变化规模及位置,计算公式详见参考文献[25]。

1.4 水生态空间格局演变影响因素探测

1.4.1 影响因子选取 水生态空间格局演变整体受到自然环境和人类活动两个维度不同要素综合影响,研究基于现有研究理性判断可能存在的内在联系,初步选择如下影响因子:在自然水文循环过程中,已有研究^[26-27]证明海拔高度、地形地貌、降水情况以及温度等自然地理条件直接参与水文循环的形成、流动和蒸散过程,因此在自然地理维度初步选择平均海拔(X_1)、平均坡度(X_2)、地形起伏度(X_3)、平均降水量(X_4)、平均气温(X_5)等影响因子;同时,相关研究^[28]表明人类活动通过建设行为以及生产、生活行为引起土地利用转型,如铁路、公路以及高等级城市设施等基础设施的建设以及地区人口、经济的发展会导致国土空间功能发生改变,因此在交通区位维度初步选择距铁路距离(X_6)、距主要公路距离(X_7)、距主要河流距离(X_8)、距市中心距离(X_9)、距省会距离(X_{10})等影响因子,在社会经济维度初步选择总人口(X_{11})、城镇化率(X_{12})、地区生产总值(X_{13})、第一产业增加值(X_{14})、第二产业增加值(X_{15})、第三产业增加值(X_{16})、农业机械总动力(X_{17})、财政支出(X_{18})等影响因子。

1.4.2 分析模型选择 在新时期国土空间规划体系以主体功能区为顶层战略健全差异化协同发展长效机制的背景下,黄河流域需要通过区域差异化管理手段优化其保护开发模式应对水资源空间分布不均匀的现状。由于黄河流域上、中、下游区域规模、地理跨度以及自然条件差异较大,研究在选择黄河流域水生态空间演化驱动力分析模型时,关注模型在不同地理尺度中的分析能力,以同时实现对黄河流域上、中、下游水生态空间格局演化路径影响因素的探测。最优参数地理探测器(Optimal Parameter Geographic Detector, OPGD)模型基于空间分异性来探测因变量与自变量空间分布格局的一致性,在空间尺度层面具有较强的

稳定性和适用性,因此最终采用此模型按照黄河流域上、中、下游以区域尺度分析影响因子对水生态空间演化的作用强度,具体公式见参考文献[29]。

2 结果与分析

2.1 黄河流域水生态空间格局演变特征

由图3、表2可知,黄河流域水生态空间规模在2020年为2.76万 km^2 ,仅占国土空间总面积2.28%,上、中、下游水生态空间规模占比为22:2:3,近20年增加4 989.90 km^2 ,空间分布重心持续位于上游兰州市,标准差椭圆长轴明显变长,东、西方向展布范围增加。具体分析可知:(1)上游地区是水生态空间分布和扩张的核心区域,也是水生态空间时空分布演化最剧烈的地区。上游地区水生态空间规模2020年达22 351.20 km^2 ,占比超过流域总规模80%,2000—2020年扩张3 412.26 km^2 ,占流域总增长规模的68.38%。上游地区存在冰川积雪、湿地以及河流湖泊等众多水资源空间载体,水生态空间丰富,且普遍呈现扩张状态,其中最剧烈的地方是黄河首曲所在地——被称为“黄河蓄水池”的玛曲县^[30],黄河在玛曲段的补充水量占总水流量的45%。上游地区水生态空间大规模扩张的同时也有部分地区显著退化,主要包括巴颜喀拉山脉积雪区域、黄河几字湾西侧和北侧的沙漠荒地区域。(2)中游地区是黄河流域水生态空间总规模、扩张规模最小的区域。中游地区主要位于黄土高原地区,区域内沙地、荒漠众多,难以形成稳定的水资源空间载体,2020年水生态空间仅有2 130.98 km^2 ,且在20年间呈现先增后减趋势,规模上虽比2000年增加173.09 km^2 ,但占全域规模比例下降0.94%。从空间上来看,中游地区没有形成突出的水生态空间扩张、缩减地区,但值得注意的是减少的地区主要分布于黄河几字湾内部,尤其是2000—2010年黄河几字湾内地区几乎呈现全面缩减状态,且幅度较大。(3)下游地区是水生态空间扩张幅度最大的区域,黄河三角洲地区尤为剧烈。下游地区2000年水生态空间面积仅有1 691.25 km^2 ,占黄河流域总规模7.49%,但经过近20年高达83.05%增幅的大规模扩张,2020年已达到3 095.81 km^2 ,占比增加到11.23%。其中,扩张区域主要分布在华北平原,尤其是黄河三角洲扩张非常剧烈,主要是沿海滩涂大规模的增加导致,而缩减地区主要分布在郑州周围。综合来看,黄河流域水生态空间规模较小,且在上、中、下游存在严重的空间分布不均问题,近20年虽然整体规模不断增加,但主要聚集分布在上游源区和下游出海口附近,东西方向展布范围进一步扩大,中游地区对于水资源的空间承接仍有待加强。

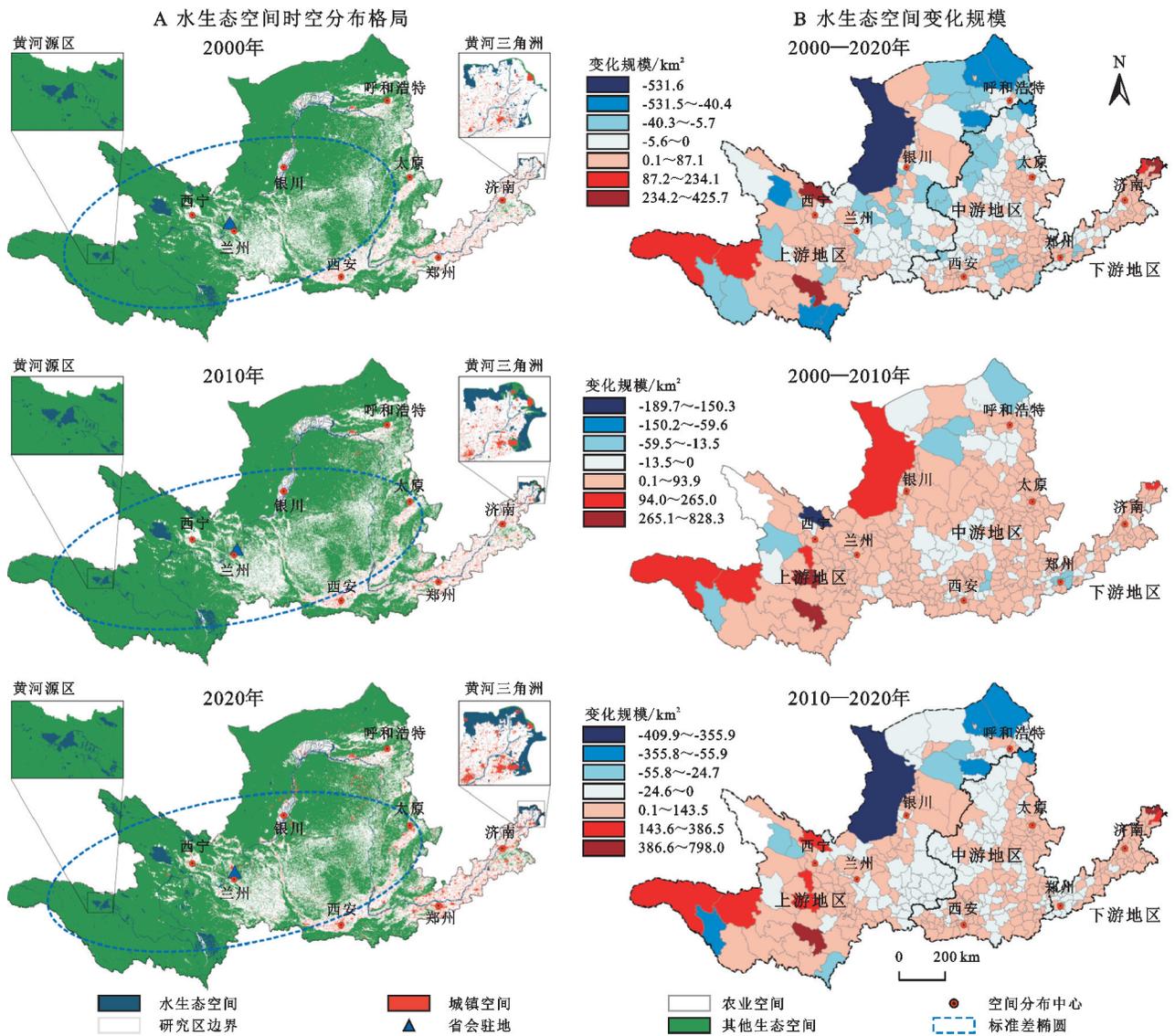


图 3 2000—2020 年黄河流域水生态空间时空分布格局及变化规模

Fig. 3 Spatio-temporal distribution patterns and change magnitude of hydroecological space in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

表 2 2000—2020 年黄河流域水生态空间数据

Table 2 Data on hydroecological space in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

黄河流域 分区	2000 年		2010 年		2020 年		面积总量 变化/km ²	面积变化 幅度/%
	空间 面积/km ²	同时期 占比/%	空间 面积/km ²	同时期 占比/%	空间 面积/km ²	同时期 占比/%		
上游地区	18938.94	83.84	19604.48	80.85	22351.20	81.05	+3412.26	+18.02
中游地区	1957.89	8.67	1877.57	7.74	2130.98	7.73	+173.09	+8.84
下游地区	1691.25	7.49	2764.73	11.40	3095.81	11.23	+1404.55	+83.05
合计	22588.08	100.00	24246.78	100.00	27577.98	100.00	+4989.90	+22.09

2.2 黄河流域水生态空间交叉转换路径

将水生态空间置于国土空间系统,与其他国土空间发生的交叉转换情况见图 4、图 5、表 3,具体分析黄河流域上、中、下游地区水生态空间格局演变中的交叉转换路径:(1) 上游地区是水生态空间与其他生态空间交叉互演的核心区域,该路径引起上游区域水生态空间大规模扩张,而水生态空间与城镇空间、

农业空间的交叉转换路径造成水生态空间小规模流失。水生态空间向其他生态空间的转入、转出规模达到 2 868.87,6 378.15 km²,占比均达到全域 90% 以上,尤其是黄河流域源区所在的青藏高原区域形成了水生态空间与其他生态空间交叉转换的“高一高”聚集区域,其典型发生地区位于松潘高原、隆中高原、冷龙岭以及托来南山等高山积雪区。水生态空间的大

规模转移和增加是雪山积雪等固态水资源“液态化”现象在空间上的直观表现,即积雪消退形成裸地、草地,而融水流动覆盖其他裸地、草地形成大规模水生态空间。此外,在沙地区域水生态空间规模性转换为其他生态空间,以贺兰山西侧腾格里沙漠最为严重。同时,上游地区水生态空间也与城镇空间、农业空间发生一定规模交叉互演,转出规模大于转入规模,造成了水生态空间一定程度上的流失,其中转换为城镇空间集聚发生在宁夏平原地区,转为农业空间集聚发生在河套平原地区且规模达到流域整体规模 45.79%。(2) 中游地区的水生态空间与其他国土空间的交叉转换规模较小,主要发生在黄河主干道附近,地区内形成多种转换类型的“低—低”聚集区域。中部地区水生态空间与农业空间相互转换规模最大,水生态空间转出 497.73 km²的同时有 641.47 km² 转入;其次,226.94 km² 水生态空间转为其他生态空间的同时 287.56 km² 其他生态空间转为水生态空间,两条路径均增加了水生态空间规模,而水生态空间与城镇空间的交叉转换则造成了水生态空间小规模流失。(3) 下游地区是农业空间转为水生态空间、水生态空间转为城镇空间两类交叉转换路径的主要发生区域,

前者是此区域水生态空间规模增加的核心路径。下游地区农业空间向水生态空间转换了 1 904.92 km²,占黄河流域整体 57.71%,同时期仅有 448.92 km² 水生态空间转为农业空间,引起水生态空间规模的大规模扩张。下游地区水生态空间与城镇空间转换规模占比超过流域整体规模 40%,是流域水生态空间与城镇空间交叉转换最剧烈的地区,尤其是水生态空间转为城镇空间规模达到 92.38 km²。值得注意的是,黄河三角洲是水生态空间与城镇空间、农业空间发生交叉转换的“高一高”聚集区,水生态空间转化非常活跃,特别存在大规模农业空间向水生态空间的转换,与黄河退耕还湿、退养还滩项目的落实有密切关系。整体而言,黄河流域水生态空间与农业空间、生态空间的转入、转出规模巨大,引起水生态空间规模的大量增加;与城镇空间交叉转换规模较小,造成水生态空间小规模流失。上、中、下游交叉转换特征差异显著,上游是水生态空间和生态空间主要演化区域,以水资源“液态化”引起的水生态空间分布转移和规模增加为主,中游地区水资源承载力较低,水生态空间演化剧烈程度不高,而下游地区水生态空间与城镇空间、农业空间演化非常剧烈。

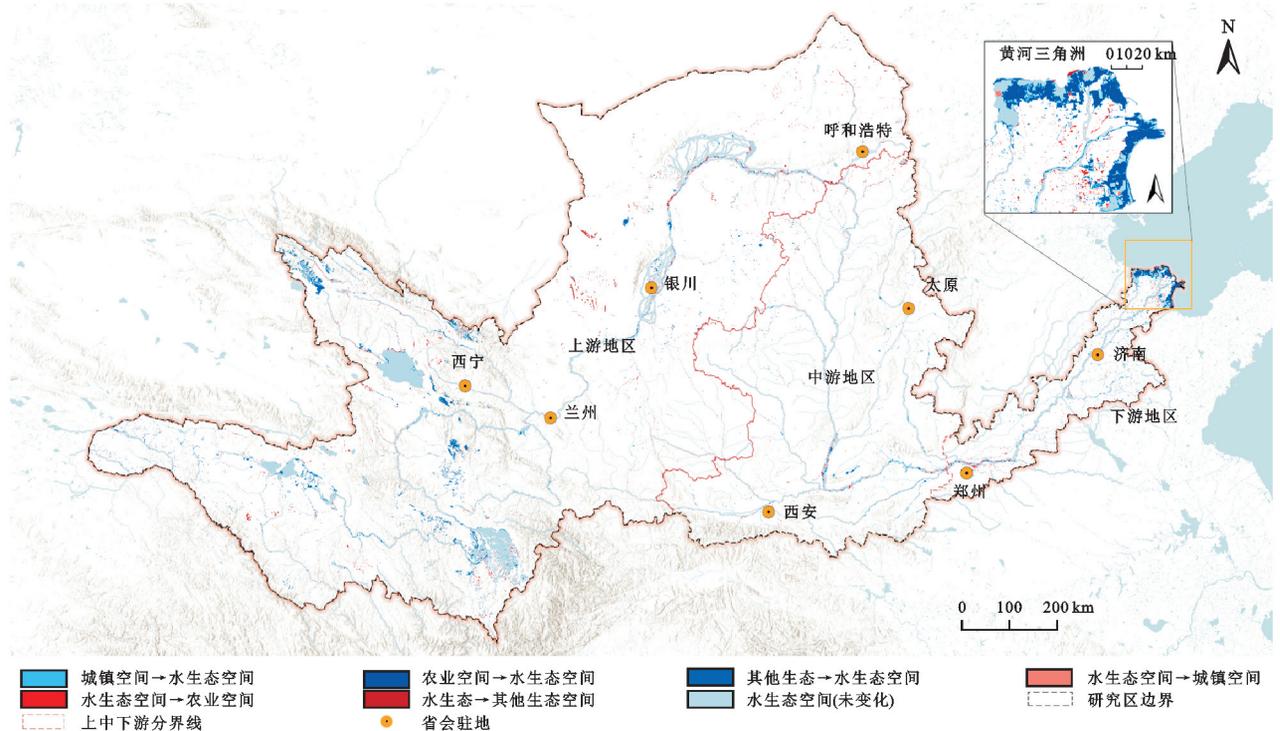


图 4 2000—2020 年黄河流域水生态空间交叉转换图

Fig. 4 Cross-conversion map of hydroecological space in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

2.3 黄河流域水生态空间格局演变影响因素

运用 OPGD 模型对黄河流域水生态空间演化影响因素进行探测,模型拟合结果良好,自然地理、交通区位以及社会经济 3 个维度选取的影响因子在区域尺度的作用强度为图 6。结合黄河流域上、中、下游

水生态空间交叉转换路径分析结果,对各区域水生态空间格局演变的影响因素展开具体讨论:

2.3.1 上游地区 上游地区水生态空间格局演变过程中,其他生态空间转为水生态空间的路径中作用强度排名前 5 的影响因子是平均海拔、距主要公路距

离、平均气温、距铁路距离、地区生产总值,水生态空间转出其他生态空间路径中则是距主要公路距离、距铁路距离、距市中心距离、总人口、距省会距离。水生态空间与其他生态空间相互转换引起的水生态空间格局演变背后,自然地理、交通区位两类影响因素尤其关键,不同海拔、气温以及基础设施建设情况的地区交叉转换规模表现出了显著的空间分异,社会经济类影响因素的作用强度较为有限。水生态空间与其他生态空间交互导致的规模增加并不是受人类活动影响所主导,更多是在某些特定地理区域发生的自然演化现象,如高原雪山地区的积雪融化导致的水生态空间转移,这些地区人类活动适宜性低,基础设施建设修建水平以及人口规模都受到影响从而表现出显著的相关性。此外,引起了上游地区水生态空间流失的水生态空间转为城镇空间路径中作用强度前 5 的

是平均降水量、第三产业增加值、地区生产总值、距省会距离、距主要公路距离等影响因子,转为农业空间路径作用强度前 5 的则是农业机械总动力、第一产业增加值、平均坡度、距主要公路距离、第三产业增加值。水生态空间向城镇空间的转换受到降水量、公路建设水平以及省会辐射带动影响,以第三产业发展为核心目标;而水生态空间向农业空间的转换则更多受到土地坡度、农业发展水平以及公路建设水平影响,以第一、三产业发展为核心目标。综上所述,上游地区水生态空间格局演变的过程中自然环境导致的水文循环过程引起了水生态空间和其他生态空间的规模性转化,水生态空间发生空间转移且规模剧烈增加。同时,上游地区第一、三产业发展诉求也驱动公路建设完善、产业发展禀赋好的区域水生态空间转化为城镇空间、农业空间,造成水生态空间流失。

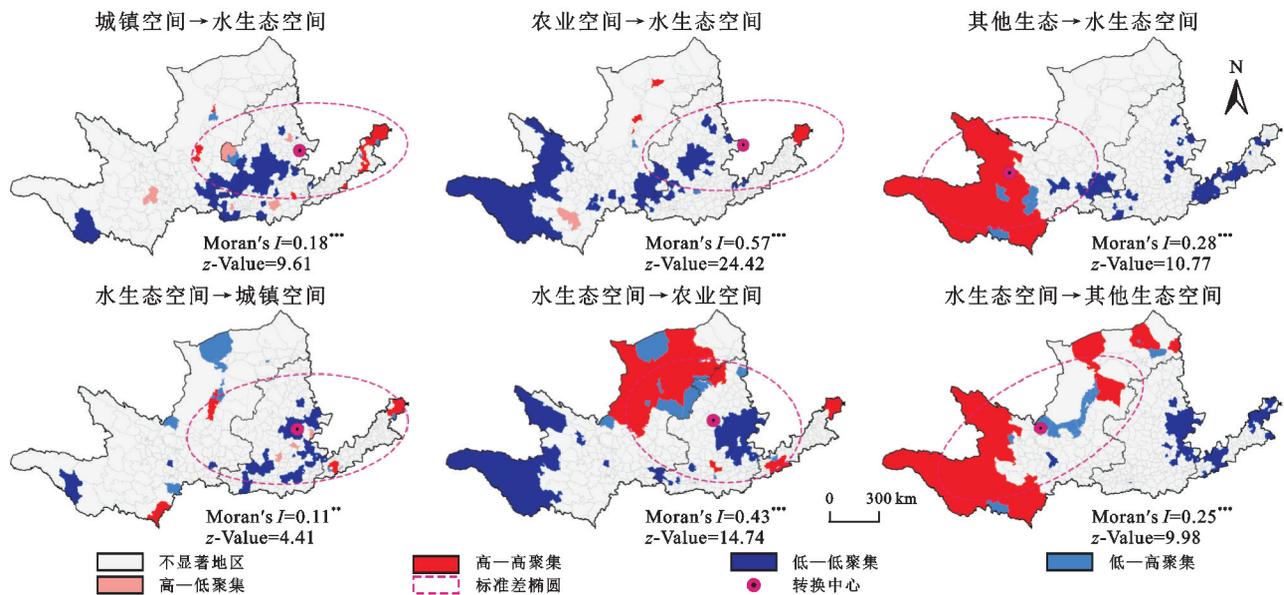


图 5 2000—2020 年黄河流域水生态空间交叉转换的重心及空间自相关情况

Fig. 5 Centroid and spatial autocorrelation of hydroecological space cross-conversion in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

2.3.2 中游地区 水生态空间与农业空间的交叉转换对中游地区水生态空间格局影响最为显著,此路径水生态空间转出过程作用强度前 5 的影响因子包括距主要公路距离、第一产业增加值、平均气温、平均降水量、财政支出,转入过程则是平均海拔、平均气温、第一产业增加值、第三产业增加值、财政支出等影响因子。自然地理条件以及政府主导的农业、服务业发展是中游地区水生态空间和农业空间的转换的关键影响因素,政府为促进农业经济发展而选择公路建设条件良好、气温降水条件适宜的地区投入资金将水生态空间改造成为农业空间,引起水生态空间流失,同时也在不适宜农业发展的地方投入资金修复农业空间为水生态空间,促进第三产业发展,实际上是地方政府对于水资源保护利用的主动调控。其次,水生态

空间与其他生态空间的交叉转换也引起中游地区水生态空间较大规模变化,水生态空间转出过程中影响因子作用强度排序为距主要公路距离、财政支出、距主要河流距离、平均气温以及平均降水量,转入过程则是财政支出、第二产业增加值、平均气温、总人口、地形起伏度。政府财政投入是中游地区水生态空间与其他生态空间相互转换的关键影响因素,除了自然地理条件的影响,公路和河流的分布也影响着水生态空间流失规模,工业经济水平、人口数量则影响着其他生态空间向水生态空间的转换。总的来看,中游地区水生态空间格局的演变过程中,政府主导的财政支出是非常关键的影响因素,基于地方自然条件、公路建设情况以及经济发展需求对水资源的保护利用进行调配引起了水生态空间格局的变化。

表 3 2000—2020 年黄河流域水生态空间交叉转换数据

Table 3 Cross-conversion map of hydroecological space in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

流域 分区	交叉转换规模及 占同类转换比重	水生态空间扩张			水生态空间流失		
		城镇→	农业→	其他生态→	水生态空间→	水生态空间→	水生态→
		水生态空间	水生态空间	水生态空间	城镇	农业	其他生态空间
上游	转换规模/km ²	12.88	754.22	6378.15	65.33	799.66	2868.87
	同类占比/%	27.21	22.85	95.23	32.49	45.79	92.27
中游	转换规模/km ²	12.11	641.47	287.56	43.38	497.73	226.94
	同类占比/%	25.58	19.43	4.29	21.57	28.50	7.30
下游	转换规模/km ²	22.35	1904.92	31.89	92.38	448.92	13.32
	同类占比/%	47.21	57.71	0.48	45.94	25.71	0.43
合计	转换规模/km ²	47.35	3300.61	6697.60	201.09	1746.31	3109.12
	同类占比/%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

2.3.3 下游地区 下游地区水生态空间大规模扩张的关键在于农业空间向水生态空间的转换,其作用强度排序前 5 的影响因子是距铁路距离、平均海拔、距省会距离、城镇化率、距主要河流距离,其同步发生的水生态空间向农业空间的转换则受到平均气温、地区生产总值、农业机械总动力、距铁路距离等影响因子驱动。可以看出,城市化发展导致人口向省会地区等铁路发达地区流动集中,城镇化率提高的同时,距离河流近的养殖坑塘、耕地等农业空间退还为水生态空间,同时为了促进地区经济发展,现代农业规模化、机械化转型也引起了水生态空间向农业空间的流失。水生态空间向城镇空间的转出也是下游水生态空间格局演变的重要转换路径,财政支出、距省会距离、平均海拔、平均降水量是此路径的主要影响因子,政府主导的城镇建设,尤其是在省会辐射范围内大量地侵占水生态空间。综合分析,下游地区水生态空间格局演变更多受到城市化进程影响,人口向省会地区集中的同时导致地区对于城镇空间和农业空间的需求发生了显著变化,因此城镇化地区水生态空间在政府建设下向城镇空间变化,而剩余无人使用的农业空间则在退耕还湿、退养还滩等人为项目和自然演化中转换为水生态空间。此外,相比上、中游地区以公路建设水平为主导的影响因素,下游地区更多受到铁路建设水平的影响。

3 讨论

黄河流域上、中、下游地区水生态空间均在扩张,但各区域水生态空间格局演变的具体特征、转换路径和影响因素差异显著,与黄河流域差异巨大的自然资源禀赋、社会经济发展水平紧密相关。上游地区大部分位于青藏高原、内蒙古高原地区,海拔高差大、地形复杂、气候寒冷,人类居住适宜性低,但丰富的高山积雪含蓄了大量水资源,近年全球气候变暖导致固态水资源向液态水资源转化的“液化”现象引起上游地区

水生态空间的空间转移和增加,高海拔积雪地区水生态空间流失形成裸露地、草地,而低海拔地区承接水资源引起河流径流增加、水生态空间扩张。水资源“液化”现象过程中的水生态空间转移在区位上向受自然地理条件限制进行选址建设的基础设施趋近,即上游地区人类活动区域的水生态空间得到了一定的补充,有利于缓解黄河上游两岸工农业对水资源的需求。中游地区水生态空间格局演变主要由水生态空间与农业空间、其他生态空间的交叉转换引起,而政府对于水资源保护利用的调配在其中起到关键作用。中游地区位于黄土高原腹地,地形起伏大、分布有大量土质疏松的沙地,是 3 个区域中水资源最紧缺、水土流失最严重、水沙矛盾最激烈的地区。虽然政府为促进水资源的高效利用和保护,通过财政投入调水调沙等手段优化水生态空间格局以适配地区社会经济发展需求,但通过上、中、下游水生态空间格局演化结果对比发现,中游地区对于黄河径流增加的承载能力仍需进一步加强。下游地区是黄河流域水生态空间增长幅度最剧烈的区域,大量农业空间被退还为水生态空间,尤其大规模分布在黄河三角洲区域,同时水生态空间也规模性转换为城镇空间。下游地区是黄河流域经济实力最强、城市化水平最高的地区,城镇化发展是下游地区水生态空间格局演变的关键,一方面人口向城镇的流入导致剩余的农业空间退还为水生态空间,省会地区水生态空间转换为城镇空间;另一方面伴随城市经济水平的发展,生态保护和高质量发展的重要性凸显,黄河三角洲退耕还湿、退养还滩等政策推动了水生态空间的修复。水生态空间格局与地区自然禀赋、经济发展差异相结合,形成上、中、下游水资源保护利用的不同发展定位,即上游地区承载流域水源滋养,中游地区重在水土保持,而下游地区则是河岸湿地治理。本文分析了黄河流域上、中、下游水生态空间格局演变特征与影响因素的差异,为推动黄河流域生态保护与高质量发展

提供了基础数据支撑,但要形成黄河流域水资源差异化协同发展开发保护模式,仍需在后续研究中衔接国

土空间规划体系,根据各区域水资源保护利用的发展定位,建立起共同治理、协同发展的流域协作体系。

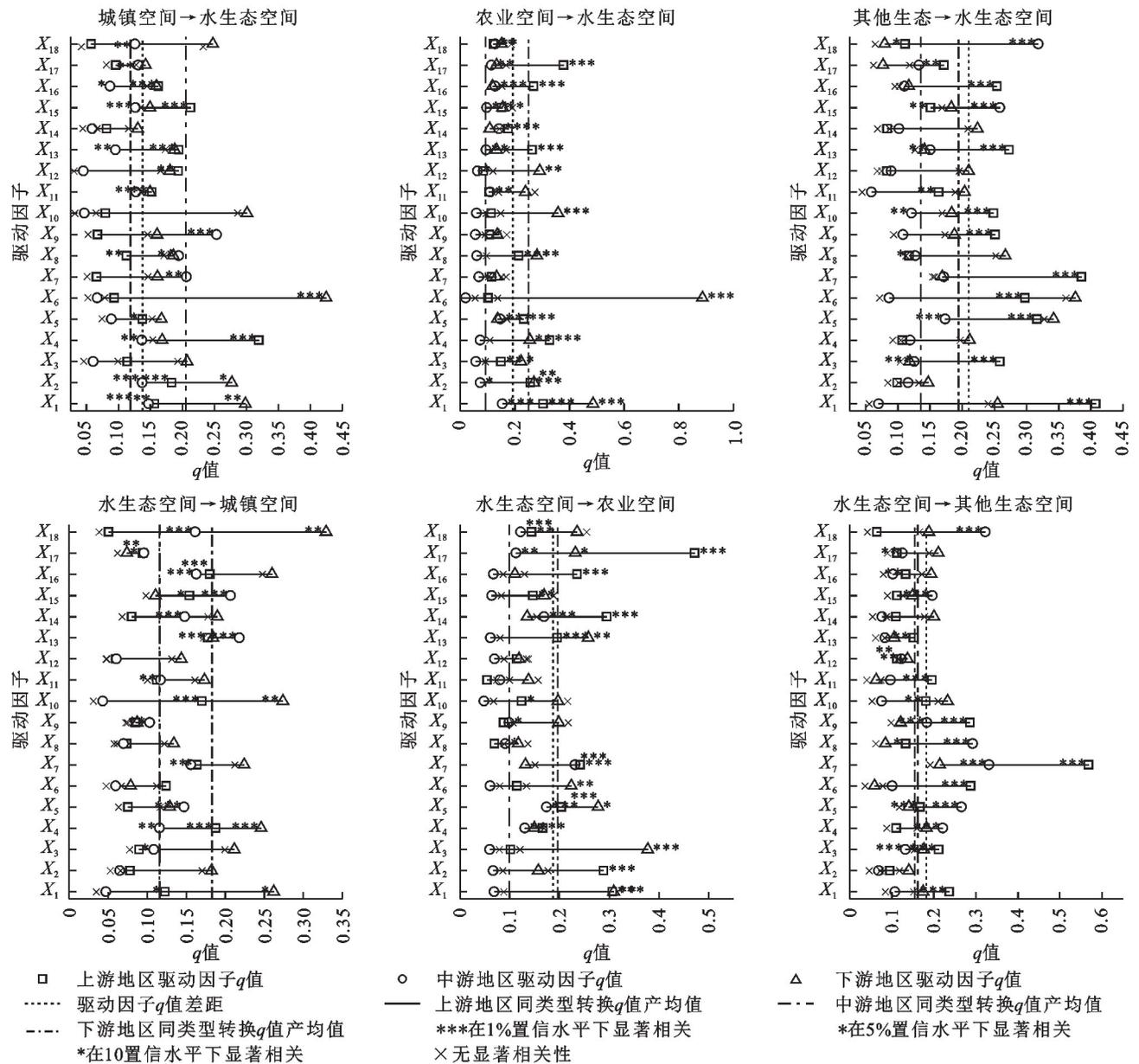


图 6 黄河流域上、中、下游地区水生态空间交叉转换的影响因子作用强度

Fig. 6 Impact intensity of influencing factors on cross-conversion of hydroecological space in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin

4 结论

(1) 黄河流域水生态空间规模为 2.76 万 km^2 , 仅占流域国土总面积的 2.28%, 上、中、下游水生态空间规模占比为 22 : 2 : 3, 近 20 年规模性增长 4 989.90 km^2 。上游地区水生态空间占比达流域总规模 81.05%, 扩张规模最大; 中游地区水生态空间规模仅占 7.73%, 且未发生大幅度格局变化; 下游地区水生态空间扩张幅度最大, 达到 83.05%, 以黄河三角洲地区最为显著。

(2) 黄河流域上游地区主要的交叉转换路径是水生态空间与其他生态空间的交互转换, 引起水生态

空间的大规模空间转移和扩张, 次要转换路径是水生态空间与农业空间的交叉转换, 造成水生态空间小规模流失; 中游地区水生态空间主要与农业空间发生交叉转换, 其次与其他生态空间, 均小规模增加了水生态空间规模; 下游地区水生态空间与农业空间的转换引起水生态空间的大规模扩张, 尤其分布在江海沿岸区域, 同时水生态空间也规模性转换为城镇空间。

(3) 上游地区水生态空间格局演变中水生态空间扩张主要由自然地理要素影响下的水资源“液化”现象所引起, 水生态空间在区位上向人类活动区域转移, 第一、三产业发展诉求也驱动公路建设完善、

产业发展条件适宜的区域水生态空间流失;中游地区水生态空间格局演变表现为受政府财政支出所主导的,适配地区自然地理条件、社会经济发展水平的水资源调配过程;下游地区水生态空间格局则是伴随城镇化进程,地区农业人口向省会地区转移、城市发展水平提高、生态文明建设推进,农业空间剩余而城镇空间紧缺,导致农业空间在黄河治理下退耕还湿、退养还滩等工程下退还为水生态空间,而省会地区仍侵占水生态空间进行城市化建设。

参考文献(References):

- [1] 马涛,王昊,谭乃榕,等.流域主体功能优化与黄河水资源再分配[J].自然资源学报,2021,36(1):240-255.
Ma T, Wang H, Tan N R, et al. Optimization of main functions of river basin and redistribution of water resources in the Yellow River[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(1):240-255.
- [2] 王兆华,邹朋宇,李浩,等.经济—能源—水耦合视角下黄河流域区域协同发展路径[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):10-19.
Wang Z H, Zou P Y, Li H, et al. Path of regional coordinated development in the Yellow River Basin from the perspective of economy-energy-water nexus[J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(8):10-19.
- [3] 姜文来,冯欣,栗欣如,等.习近平治水理念研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(4):1-10.
Jiang W L, Feng X, Li X R, et al. Research on Xi Jinping's thought on water [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020,41(4):1-10.
- [4] 俞孔坚,王春连,李迪华,等.水生态空间红线概念、划定方法及实证研究[J].生态学报,2019,39(16):5911-5921.
Yu K J, Wang C L, Li D H, et al. The concept, methodology and a case study in defining the ecological redline for the hydro-ecological space [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):5911-5921.
- [5] 周广金,童亚莉,王凌青,等.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[J].自然资源学报,2022,37(12):3102-3117.
Zhou G J, Tong Y L, Wang L Q, et al. Multi-dimensional identification technology and application of water ecological space and protection line in the territorial spatial planning[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(12):3102-3117.
- [6] 樊杰,周侃.以“三区三线”深化落实主体功能区战略的理论思考与路径探索[J].中国土地科学,2021,35(9):1-9.
Fan J, Zhou K. Theoretical thinking and approach exploration on deepening the implementation of major function zoning strategy with “three-zones and three-lines” [J]. China Land Science, 2021,35(9):1-9.
- [7] 任立良,王宇,江善虎,等.基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J].水资源保护,2022,38(4):26-32.
Ren L L, Wang Y, Jiang S H, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022,38(4):26-32.
- [8] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(21):112-119.
- [9] 李雪,于坤霞,李鹏,等.黄河流域不同水资源区降雨集中度时空演变与驱动力[J].水土保持研究,2023,30(5):266-273.
Li X, Yu K X, Li P, et al. Spatiotemporal evolution and driving force of rainfall concentration in the Yellow River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):266-273.
- [10] 李勃,穆兴民,高鹏,等.1956—2017 年黄河干流径流量时空变化新特征[J].水土保持研究,2019,26(6):120-126,132.
Li B, Mu X M, Gao P, et al. New characteristics of temporal and spatial changes of runoff in the mainstream of Yellow River from 1956 to 2017 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):120-126,132.
- [11] 马明,易康.政策不确定性下黄河流域污染协同治理的动态调整与实现路径[J].长江流域资源与环境,2023,32(7):1543-1559.
Ma M, Yi K. Dynamic adjustment and realization path of coordinated pollution control in the Yellow River Basin under policy uncertainty [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(7):1543-1559.
- [12] 王慧亮,李卓成.基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J].水资源保护,2022,38(1):147-152.
Wang H L, Li Z C. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on emergy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection, 2022,38(1):147-152.
- [13] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护,2021,37(4):37-43,50.
Zhang Y K, Sun X M. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):37-43,50.
- [14] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J].资源科学,2020,42(1):29-36.
Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation [J]. Resources Science, 2020,42(1):29-36.
- [15] 王锐,祝笑笑,彭艳艳,等.2000—2020 年黄河流域水-能源-粮食系统耦合协调时空演变特征[J].水土保持研究,2024,31(1):354-362.
Wang R, Zhu X X, Peng Y Y, et al. Spatiotemporal characteristics of water-energy-food coupling coordina-

- tion in the Yellow River Basin in the period from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(1):354-362.
- [16] 王格芳,李梦程.黄河流域水资源与区域发展时空耦合研究[J].*干旱区资源与环境*,2023,37(2):8-15.
Wang G F, Li M C. Spatial-temporal coupling between water resources and regional development in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023,37(2):8-15.
- [17] 陈莉,张安安.黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析[J].*水资源保护*,2023,39(2):1-8.
Chen L, Zhang A A. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(2):1-8.
- [18] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J].*资源科学*,2021,43(12):2526-2537.
Xu H, Wang Y W, Zhang Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2021,43(12):2526-2537.
- [19] 张泽琳,周霞,周玉玺.黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性时空耦合及驱动因素[J].*水土保持研究*,2024,31(3):412-420,431.
Zhang Z L, Zhou X, Zhou Y X. Spatiotemporal coupling and driving factors of water resources carrying capacity and grain production resilience in the lower reaches of Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):412-420,431.
- [20] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等.河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J].*湖泊科学*,2022,34(3):919-934.
Wang S S, Yang J Y, Wang A L, et al. Evaluation and forecast of coupling coordination of water resources, economy and eco-system in the Yellow River Basin of Henan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022,34(3):919-934.
- [21] 付佳明,戴林琳.基于国土空间规划的大运河国家文化公园建设实施路径探索[J].*自然资源学报*,2023,38(9):2312-2331.
Fu J M, Dai L L. Exploring the construction path of the Grand Canal National Cultural Park based on territorial spatial planning[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023,38(9):2312-2331.
- [22] 王新哲,杨雨菡,宗立,等.国土空间“总一详”规划空间传导:现实困境、基本逻辑与优化措施[J].*城市规划学刊*,2023(2):96-102.
Wang X Z, Yang Y H, Zong L, et al. Plan transmission from comprehensive planning to detailed planning in the national territorial spatial planning system: real challenges, fundamental rationale, and optimization measures[J]. *Urban Planning Forum*, 2023(2):96-102.
- [23] 岳文泽,王田雨,甄延临.“三区三线”为核心的统一国土空间用途管制分区[J].*中国土地科学*,2020,34(5):52-59,68.
Yue W Z, Wang T Y, Zhen Y L. Unified zoning of territorial space use control derived from the core concept of “three types of spatial zones and alert-lines”[J]. *China Land Science*, 2020,34(5):52-59,68.
- [24] 白冰,赵作权,张佩.中国南北区域经济空间融合发展的趋势与布局[J].*经济地理*,2021,41(2):1-10.
Bai B, Zhao Z Q, Zhang P. Trends and layout of economic integration between North and South China[J]. *Economic Geography*, 2021,41(2):1-10.
- [25] 魏伟,尹力.东北地区“三区空间”格局演化特征及驱动机制[J].*地理科学*,2023,43(2):324-336.
Wei W, Yin L. Evolution characteristics and driving mechanism of spatial pattern of “three-zone space” in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023,43(2):324-336.
- [26] 薄立明,魏伟,尹力,等.2000—2020年长江经济带水生态空间格局变化及其影响要素[J].*中国环境科学*,2023,43(2):874-885.
Bo L M, Wei W, Yin L, et al. Evolution characteristics and influencing factors of hydro-ecological space pattern in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2020[J]. *China Environmental Science*, 2023,43(2):874-885.
- [27] 薄立明,魏伟,赵浪,等.青藏高原水生态空间格局时空演化特征及驱动机制[J].*地球科学进展*,2023,38(4):401-413.
Bo L M, Wei W, Zhao L, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and the driving mechanism of water eco-space in the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2023,38(4):401-413.
- [28] 魏伟,尹力,谢波,等.国土空间规划背景下黄河流域“三区空间”演化特征及机制[J].*经济地理*,2022,42(3):44-55,86.
Wei W, Yin L, Xie B, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and mechanism of “three-function space” in the Yellow River Basin under the background of territorial spatial planning[J]. *Economic Geography*, 2022,42(3):44-55,86.
- [29] 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 J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [30] 薛鹏飞,李文龙,朱高峰,等.黄河首曲玛曲县高寒湿地景观格局演变[J].*植物生态学报*,2021,45(5):467-475.
Xue P F, Li W L, Zhu G F, et al. Changes in the pattern of an alpine wetland landscape in Maqu County in the first meander of the Yellow River [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021,45(5):467-475.