

孙斌,姜慧敏,薛建春.黄河流域城市群水生态韧性与城市发展交互影响关系研究[J].沈阳农业大学学报,2026,57(1):000-000.  
SUN B,JIANG H M,XUE J C,et al.Interaction between water ecological resilience and urban development in the urban agglomeration of the Yellow River Basin[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2026,57(1):000-000.

# 黄河流域城市群水生态韧性与城市发展交互影响关系研究

孙斌<sup>1,2,3</sup>,姜慧敏<sup>1</sup>,薛建春<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学 经济与管理学院,内蒙古 包头 014010; 2. 黄河“几字弯”发展研究基地,内蒙古 包头 014010;3. 内蒙古自治区 产业信息化与产业创新研究中心,内蒙古 包头 014010)

**摘要:** [目的]促进水生态韧性与城市发展高水平协同对实现流域生态保护与高质量发展具有重要的现实意义。[方法]基于2007-2022年黄河流域城市群面板数据,利用投影寻踪模型测度水生态韧性与城市发展综合水平,采用约束效应模型对两子系统的约束强度进行测算,进一步利用耦合协调度模型以及地理探测器模型分析水生态韧性与城市发展耦合协调度及其驱动因素。[结果]研究期内黄河流域城市群水生态韧性与城市发展综合水平呈缓慢上升趋势,但空间分异显著;两子系统的约束强度在时序上递减,整体仍处于强约束状态;黄河流域城市群水生态韧性与城市发展耦合协调度呈上升态势,空间失衡现象突出,呈现“南高北低”特征,且耦合协调等级以濒临失调与勉强协调为主;人口集聚、水资源赋存与水利用效率为核心驱动因子,因子交互作用呈现非线性加强或双因子增强特征,协同推动系统协调演进。[结论]应通过调控城市发展模式、强化水生态韧性,双轮驱动构建以水定城、量水发展的水城协同新格局。

**关键词:**黄河流域城市群;水生态韧性;城市发展;约束强度;耦合协调

中图分类号:TV213.4;F299.23

文献标识码:A

文章编号:1000-1700(2026)01-0000-00

## Interaction Between Water Ecological Resilience and Urban Development in Urban Agglomeration of the Yellow River Basin

SUN Bin<sup>1,2,3</sup>, JIANG Huimin<sup>1</sup>, XUE Jianchun<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 2. Yellow River Jiziwan Development Research Institute, Baotou Inner Mongolia 014010, China;3. Research Center of Industrial Informationization and Innovation of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

**Abstract:** [Objective]Promoting high-level synergy between water ecological resilience and urban development is important for achieving the ecological protection and high-quality development of the basin. [Methods]Based on the panel data of the Yellow River Basin urban cluster from 2007 to 2022, the projection tracing model was used to measure the water ecological resilience and the comprehensive level of urban development; and the constraint strength of the two subsystems was calculated using the constrained effect model. Further analysis of the coupling coordination and its driving factors of the water ecological resilience and urban development was conducted using the coupling coordination degree model and the geographical detector model. [Results]The water ecological resilience and overall level of urban growth of the Yellow River Basin urban cluster demonstrated a gradual rising trend during the study period, but there was significant regional variation. The constraint strength of the two subsystems decreased gradually

收稿日期:2025-07-10 修回日期:2025-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(42061051);内蒙古自治区哲学社会科学规划项目(2024NDA151);内蒙古自治区高等学校人文社会科学重点研究基地开放课题(KFSM-KDSK0206)

第一作者:孙斌(1974-),男,博士,教授,主要从事城市群城镇化研究,E-mail:sunbin\_bsu@hotmail.com

in time sequence, and the overall system remained strongly constrained. The coupling coordination of water ecological resilience and urban development of the Yellow River Basin urban cluster showed an upward trend, and there was a notable spatial imbalance, exhibiting a "south high and north low" pattern. The "near-disbalance" and "barely coordinated" groups accounted for the majority of the coupling coordination level. Population aggregation, water resources, and water utilization efficiency were the core driving factors, and the interaction between these factors showed a non-linear strengthening or double factor enhancement feature, which synergistically promoted the system's coordinated evolution. **[Conclusion]** A new pattern of water-city synergy determined by water availability and capacity should be constructed by regulating the urban development mode that improves the water ecological resilience.

**Key words:** urban agglomeration in the Yellow River Basin; water ecological resilience; urban development; constraint intensity; coupled coordination

黄河流域城市群作为流域经济增长极和人口集聚核心区,以占流域 24% 的国土面积贡献了超过 68% 的 GDP 总量,却消耗流域 73% 的水资源<sup>[1]</sup>。城市群内“高耗低效”的产业模式产出了流域 70% 以上的水污染<sup>[2]</sup>,气候变化与人类活动叠加进一步加剧了水生态系统的脆弱性,水生态韧性持续弱化<sup>[3]</sup>,严重影响流域经济社会发展的可持续发展<sup>[4]</sup>。破解黄河流域城市群高质量发展瓶颈的关键在于提高水生态韧性,这不仅要求水生态系统在冲击中维持基本功能,更需通过动态适应实现水生态系统与城市发展的协同演进,从“以水为限”转向“因水而兴”。因此,新时期全面贯彻落实“四水四定”的政策方针,探究水生态韧性与城市发展的协同关系,对黄河流域城市群生态安全格局的优化、缓解水生态系统与城市发展的突出矛盾具有重要意义。

“韧性”这一词语来源于工程学,原意是指受到扰动后恢复至原始状态的能力<sup>[5]</sup>。生态学家 HOLLING 首次将韧性概念应用于生态学,其强调生态系统在受到干扰后能够通过自我调节恢复原状,维持系统内部结构至稳定状态。随着水资源可持续理念的不断发展,韧性已成为应对水资源问题和支撑城市高质量发展的重要思维模式<sup>[6]</sup>。目前,国内围绕水生态韧性的相关研究处于起步阶段,大致分为两方面:一是水生态韧性的内涵阐述,从单一线性模式向多学科交叉的复杂系统认知演进,提出了水资源恢复力<sup>[7]</sup>、水资源脆弱性<sup>[8]</sup>等观点以表征水生态韧性。既有研究对水生态韧性的概念尚未统一,部分学者认为应该将水生态韧性的重点放在系统自适应动态过程,当水生态系统受到干扰时,通过自然或人为调控进行响应,实现系统恢复与适应能力提升,最终达成更优状态<sup>[8]</sup>;二是水生态韧性的定量分析,学者多基于“压力-状态-响应”(PSR)模型<sup>[9]</sup>或“抵抗性-恢复性-适应性”模型<sup>[10]</sup>构建评价指标体系,运用熵权法测度某区域水生态韧性综合水平<sup>[10]</sup>。随着水资源生态韧性研究的不断深入,其与生态学、经济学等交叉学科的协同研究亦持续深入,如新型城镇化与水生态韧性<sup>[11]</sup>、水资源生态韧性与用水效率耦合协调<sup>[12]</sup>分析等。大多数学者通过构建评价指标体系,采用熵权法、综合评价法测算两者的综合发展水平,并利用耦合协调度模型测度某个区域或流域的耦合协调水平<sup>[11-12]</sup>。

综上,关于水生态韧性与城市发展协同的研究较为匮乏,需进一步完善:(1)视角思路上,多数研究聚焦于“压力-状态”的静态关联分析。本研究基于驱动力-压力-状态-影响-响应(driving-force-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型构建水生态韧性指标体系,弥补传统研究对水生态系统动态演化机制的缺失。(2)研究方法上,既有研究局限于单一角度对水生态韧性和城市发展进行探讨,缺乏系统性与全面性。另外,多数研究采用熵权法、TOPSIS 法等测度综合指数,这些方法对指标独立性要求较为严苛,而基于加速遗传算法的投影寻踪模型通过非线性投影算法保证数据的稳健性。(3)研究尺度上,学者主要从流域、城市等层面对水资源与城市发展进行研究,鲜有学者从城市群角度对水生态韧性与城市发展的协同关系进行探讨。以地级市为研究单元分析城市群,既可避免省级尺度过大导致数据精度不足,又能弥补县域数据的局限性。

基于此,本研究选取黄河流域 7 个城市群 58 个地级市为研究对象,围绕水生态韧性与城市发展的交互关系,探究两子系统的约束强度,进一步对耦合协调关系及其驱动因素进行分析,以期实现黄河流域城市群水生态韧性与城市发展协同的双赢局面,为黄河流域生态保护与高质量发展提供有效的发展思路。

## 1 指标体系构建与研究方法

### 1.1 研究区域及数据来源

黄河流域包括 3 个区域级城市群(山东半岛、中原、关中平原)和 4 个地区性城市群(兰西、宁夏沿黄、呼包鄂榆、晋中)。结合国务院批复黄河流域城市群发展规划和现有相关研究<sup>[13]</sup>,以流域 7 个城市群 58 个样本城市

为研究对象(图1)。本研究选取2007-2022年为研究时段,相关数据均来源于《中国城市统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》、各省市统计年鉴及水资源公报,部分缺失值采用线性插值法进行补齐。



图1 黄河流域城市群分布

Figure 1 Distribution of cities in the Yellow River Basin

## 1.2 评价指标体系构建

本研究基于DPSIR模型构建水生态韧性评价指标体系,其“驱动力-压力-状态-影响-响应”过程体现了水生态韧性与城市发展的动态平衡关系。其中,驱动力是引起水生态韧性不稳定的潜在因素,压力是人类活动对水生态系统的直接影响,当驱动力和压力共同作用于水生态系统,会对其产生一定的压力,促使水生态系统状态发生改变;水生态系统失衡后会对其自身及城市发展产生影响,相应地城市发挥主观能动性做出积极响应反作用于水生态系统,如此往复促进水生态韧性的可持续性。参考相关学者的研究并结合黄河流域城市群实际情况<sup>[11,14]</sup>,最终确定5个维度17个指标。选取城市人口密度、GDP增长率、人口自然增长率反映驱动力;工业用水占比、人均日生活用水量、工业废水排放量、人均污水排放量和万元GDP用水量反映压力;地表水资源占比、降水量和产水模数反映状态;水资源开发利用率、生态用水占比表征影响;生活污水集中处理率、建成区排水管道密度、污水处理厂污水处理能力和用水普及率表征响应。

黄河流域城市群高质量发展是以绿色发展为前提,以创新为动力,统筹经济、社会、人与自然协同演进<sup>[1]</sup>。参考现有研究成果<sup>[15]</sup>,对照黄河流域高质量发展的目标,最终形成了由人口集聚、经济发展、基础设施、生态环境4个维度、涵盖17个指标的城市发展评价指标体系。其中,人口集聚是城市发展的基础,人口向城市的集中是地区城市发展的根本载体,选取万人在校大学生数、失业率、第二产业从业人员占比和第三产业从业人员占比表征人口集聚;经济发展作为推动城市发展的引擎,是城市发展的核心内容,选取经济密度、人均GDP、城镇居民人均可支配收入、教育支出占财政比重和第一、二产业产值比重表征经济发展;基础设施是城市发展的重要内容,能直观地反映城市建设发展水平,选取每万人拥有医院卫生床位数、人均建成区面积、城市燃气普及率、人均城市道路面积表征基础设施;生态环境是城市发展的基底,保障城市可持续发展,选取人均公园绿地

面积、生活垃圾无害化处理率、一般工业固体废物综合利用率和建成区绿化覆盖率表征生态环境。

### 1.3 研究方法

1.3.1 投影寻踪模型 投影寻踪模型是一种基于数据驱动的非参数统计方法,通过寻找能够最大程度揭示高维数据特征的最优投影方向,将多维指标投影到低维空间进行综合评价<sup>[16]</sup>。本研究采用基于加速遗传算法的投影寻踪模型,对黄河流域城市群水生态韧性与城市发展水平进行综合评价。其中,各指标的权重为最佳投影方向向量对应分量的平方,且和为1。

1.3.2 约束效应模型 本研究采用约束效应模型用于量化两子系统间的约束强度。当城市发展水平较高时,对水生态系统的优化能力较强,减弱了与水生态韧性的约束强度,反之对水生态系统的压力加大,两者的约束强度增大;当水生态韧性水平较高时,其对城市发展的约束作用相对越弱,两者之间的约束强度亦较弱,反之约束强度较大<sup>[17]</sup>,计算公式为:

$$WRCI = 1 - (w_1 \times z_1 + w_2 \times z_2) \quad (1)$$

式中:WRCI为水生态韧性与城市发展间的约束强度;  $z_1$ 为水生态韧性综合指数;  $z_2$ 为城市发展综合指数;  $w_1$ 为水生态韧性指标权重;  $w_2$ 为城市发展指标权重,  $w_1+w_2=1$ 。

1.3.3 耦合协调度模型 本研究采用修正后的耦合协调模型,具有较好的效度,计算出来的耦合协调度可以更好地测度子系统之间的耦合协调关系<sup>[18]</sup>,计算公式为:

$$C = \sqrt{\left[ 1 - \frac{\sum_{i>j,j=1}^n \sqrt{(z_i - z_j)^2}}{\sum_{m=1}^{n-1} m} \times \left( \prod_{i=1}^n \frac{z_i}{\max z_i} \right)^{\frac{1}{n-1}} \right]} \quad (2)$$

$$T = \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2, \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (4)$$

式中: $C$ 为协调度; $D$ 为耦合协调度。本研究认为水生态韧性和城市发展两个子系统同等重要,因此  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  均取值为0.5。参照前人研究将耦合度协调度划分为10个等级<sup>[19]</sup>, $(0.00,0.10]$ 为极度失调, $(0.10,0.20]$ 为重度失调, $(0.20,0.30]$ 为中度失调, $(0.30,0.40]$ 为轻度失调, $(0.40,0.50]$ 濒临失调, $(0.50,0.60]$ 为勉强协调, $(0.60,0.70]$ 为初级协调, $(0.70,0.80]$ 为中度协调, $(0.80,0.90]$ 为良好协调, $(0.90,1]$ 为优质协调。

1.3.4 地理探测器模型 地理探测器主要用于探测变量在空间上的分异程度以及检验变量间的空间分布耦合性<sup>[20]</sup>。本研究采用地理探测器的分异因子探测及交互作用探测功能,对影响水生态韧性与城市发展的耦合协调度的主要因子进行分析,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l (N_h \sigma_h^2)}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: $q$ 为驱动因子对耦合协调度空间分异性的解释力,取值范围为[0,1],值越大表明空间分异性越显著; $h$ 为因子分类数( $h = 1, 2, 3, \dots, l$ ); $N_h$ ( $N$ )为  $h$ 层(整体)的单元数; $\sigma_h^2$ ( $\sigma^2$ )为  $h$ 层(整体)方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 水生态韧性与城市发展综合水平特征分析

依据投影寻踪模型,计算出2007–2022年黄河流域城市群58个城市水生态韧性和城市发展的综合评价指数,进而取各城市群内城市的均值以表示各城市群水生态韧性和城市发展综合水平(图2)。从水生态韧性综合指数来看,其上升速度迟缓,年均增长率仅为1.26%。其中,宁夏沿黄、兰西城市群的水生态韧性水平较低,而中原、山东半岛城市群相对较高。与之相比,黄河流域城市群城市发展综合指数较高,年均增长率为3.26%,各城市群的城市发展水平普遍有所提升,兰西城市群尤为显著,城市发展指数从2007年的0.15稳步攀升至2022年的0.31,而宁夏沿黄、关中城市群的城市发展水平相对较低,研究期内并未实现明显增长。总的来说,黄河流域城市群的水生态韧性和城市发展水平相对平稳,但增长速度较为缓慢,未来在城市高质量发展和水生态保护方面要更加注重。

### 2.2 水生态韧性与城市发展约束强度时序演变特征

根据水生态韧性指数与城市发展指数,进一步求出2007–2022年黄河流域7个城市群水生态韧性与城市

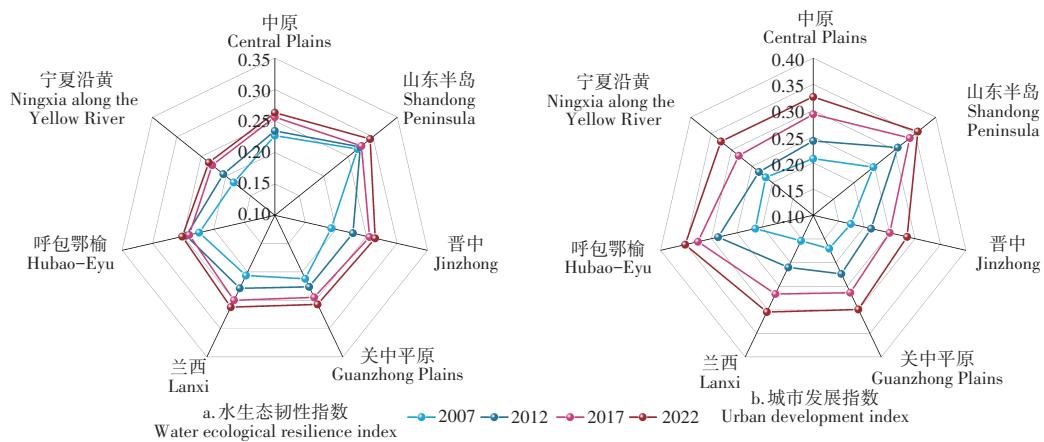


图2 水生态韧性与城市发展综合水平变化趋势

Figure 2 Trend of comprehensive level of water ecological resilience and urban development

发展间的约束强度(图3)。整体来看,黄河流域城市群水生态韧性与城市发展间约束强度呈明显下降趋势,从2007年的0.80下降至2022年的0.70,但仍处于强约束的状态。具体来看,宁夏沿黄及兰西城市群水生态韧性与城市发展间的约束关系呈现出显著的“强约束”特征:一方面,两城市群均位于黄河流域上游,降水量较少,农业用水占比高,水资源本底条件先天不足;另一方面,宁夏沿黄城市群能源产业耗水量大,兰西城市群城市扩张过量开采地下水,加剧了水生态的脆弱性。位于中游的关中城市群和晋中城市群水生态韧性与城市发展间的约束强度极强,2007年约束强度均达到0.8以上,其原因是关中城市群城市发展迅速,城市人口集聚,生活用水远超供给能力,而晋中城市群传统产业升级滞后对水资源约束作用加剧。呼包鄂榆城市群水生态韧性与城市发展的约束强度从2007年的0.78下降至2022年0.69,这得益于跨省区域水权交易,缓解了水资源的压力。中原城市群作为粮食生产核心区,农业用水效率低下与城市建设带来的生活用水激增对水生态韧性造成影响,但南水北调工程正式通水后,其约束强度呈缓慢降低的趋势。与其他城市群相比,山东半岛城市群水生态韧性与城市发展的约束强度最低,由于其优越的地理位置,通过海水淡化等技术创新突破了资源约束,从0.74下降至0.67,使得约束强度得到缓解。

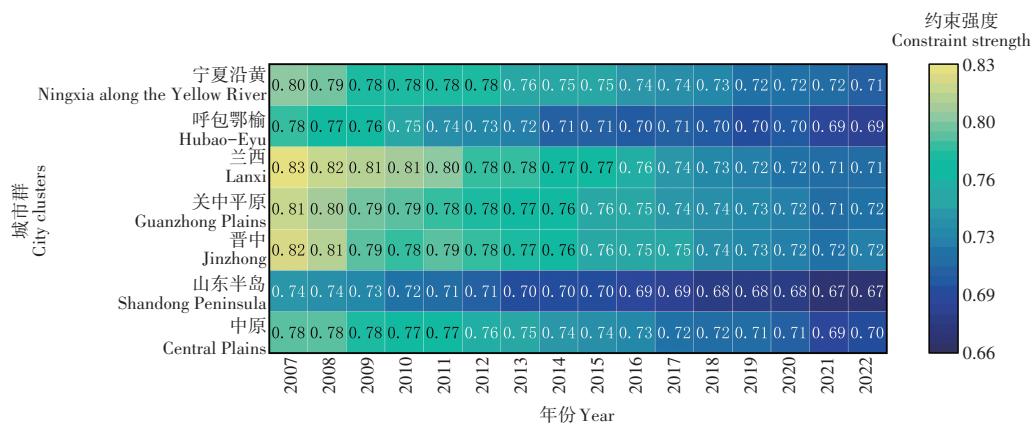


图3 水生态韧性与城市发展约束强度变化趋势

Figure 3 Trend of constraints strength of urban development and water ecological resilience

### 2.3 水生态韧性与城市发展耦合协调度的时空格局演变特征

为有效缓解水生态韧性与城市发展的约束效应,进一步对两者耦合协调度进行探究(图4)。由图4可知,2007-2022年黄河流域城市群水生态韧性与城市发展耦合协调度呈上升趋势,主要集中在0.39~0.54。除了2007-2010年兰西城市群呈现轻度失调的状态,其余时期各城市群处于濒临失调或勉强协调的状态,根本原因是研究初期时,兰西城市群城市发展及水生态韧性水平相对较低,彼此的协同关系并不显著。分区域分析可

知,在区域级城市群中,山东半岛城市群的耦合协调度最高,从2007年的0.49增长到2022年的0.53,主要因为山东半岛城市群位于黄河下游,经济相对发达,工业基础好,水生态韧性与城市发展间的约束强度低;关中城市群的耦合协调度最低,从2007年的0.41增长到0.50,是因为相较于其他两个区域级城市群,关中城市群区域水资源开发强度长期超载且产业结构固化使经济增长与水资源消耗未能实现脱钩;在地区性城市群中,呼包鄂榆城市群的耦合协调度最高,从2007年的0.45缓慢上升至2022年的0.49,是由于呼包鄂榆城市群的水生态韧性与城市发展综合水平较高,且耦合协调度起点高于其他3个城市群;晋中城市群次之,年均增长率为1.42%;兰西城市群的耦合协调度最低,但其增长速度最快,年均增长率达到1.80%。宁夏沿黄城市群的耦合协调度在研究期内始终在0.4~0.5,处于濒临失调状态,其根本原因在于宁夏沿黄城市群属于水资源紧缺区域,农业用水占比高且产业结构单一,多为高耗水型产业,对水生态保护的破坏较为严重,导致耦合协调水平相对较低。

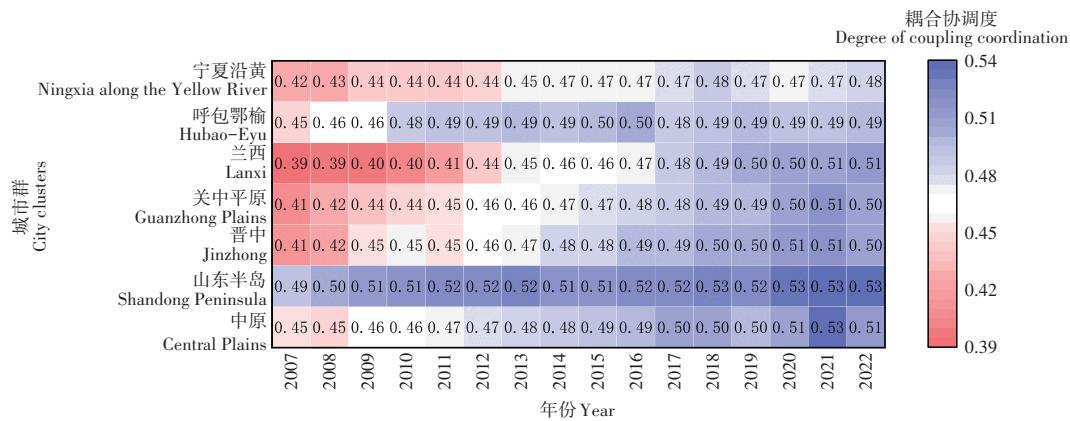


图4 水生态韧性与城市发展耦合协调度变化趋势

Figure 4 Degree of coupling and coordination between water ecological resilience and urban development

为了更直观地展示黄河流域城市群水生态韧性与城市发展的耦合协调等级变化情况,选取2007,2012,2017,2022年作为研究时间节点分析其空间格局演变特征(图5)。由图5可知,2007年,除兰西城市群处于轻度失调状态,其余6个城市群的耦合协调度均在0.4~0.5,处于濒临协调状态;2012年,山东半岛、兰西城市群的耦合协调等级均向上转移一级,其他城市群的耦合协调状态并未发生改变;2017年,中原、山东半岛城市群均处于勉强协调状态,两城市群耦合协调度位居前2;2022年,晋中、关中、兰西城市群的耦合协调度进入勉强协调状态,其余城市群的耦合协调状态均未发生变化。整体而言,黄河流域城市群水生态韧性与城市发展耦合协调度的空间格局表现为“南高北低”,具有明显的地域特征。

## 2.4 水生态韧性与城市发展耦合协调度的影响因素分析

2.4.1 影响因子选取 为深入分析不同驱动因素对耦合协调度的影响,在已有研究的基础上<sup>[21]</sup>,结合黄河流域城市群实际情况,从水生态韧性和城市发展中选取11个指标作为驱动因素进行探测(表1)。

2.4.2 单因子驱动探测 选取2007年和2022年的耦合协调度为因变量,11个影响因子作为自变量,使用R语言对表1的指标进行离散化处理,再导入GD包进行参数最优地理探测器分析,揭示耦合协调度变化的驱动因素。本研究将 $q$ 的数值超过0.4的因子视为主控因子反映驱动因素状况(图6)。由图6可知,2007年水生态韧性与城市发展的耦合协调度变化的主控因子为人均GDP、城镇居民人均可支配收入、人均建成区面积、人均公园绿地面积、工业废水排水量以及用水普及率;2022年,城市人口密度、产水模数、万元GDP用水量以及水资源开发利用成为主要驱动因素。这表明黄河流域城市群早期在经济发展优先发展的情况下,资源利用效率低,生态环境压力逐渐加强,城市发展与水生态保护未能有效协同;随着城市发展水平的不断增高,黄河流域城市群人口集聚效应凸显,水资源自然禀赋不足,水生态韧性成为制约城市发展可持续性的关键短板,未来需通过政策协同、技术创新和公众参与,实现城市发展与水生态韧性的深度耦合。

2.4.3 双因子交互探测 水生态韧性与城市发展耦合协调度的演变由多个因素共同作用,采用交互作用探测器进一步检测各影响因子共同作用对耦合协调度的影响(图7)。由图7可知,双因子交互的因子解释力显著高

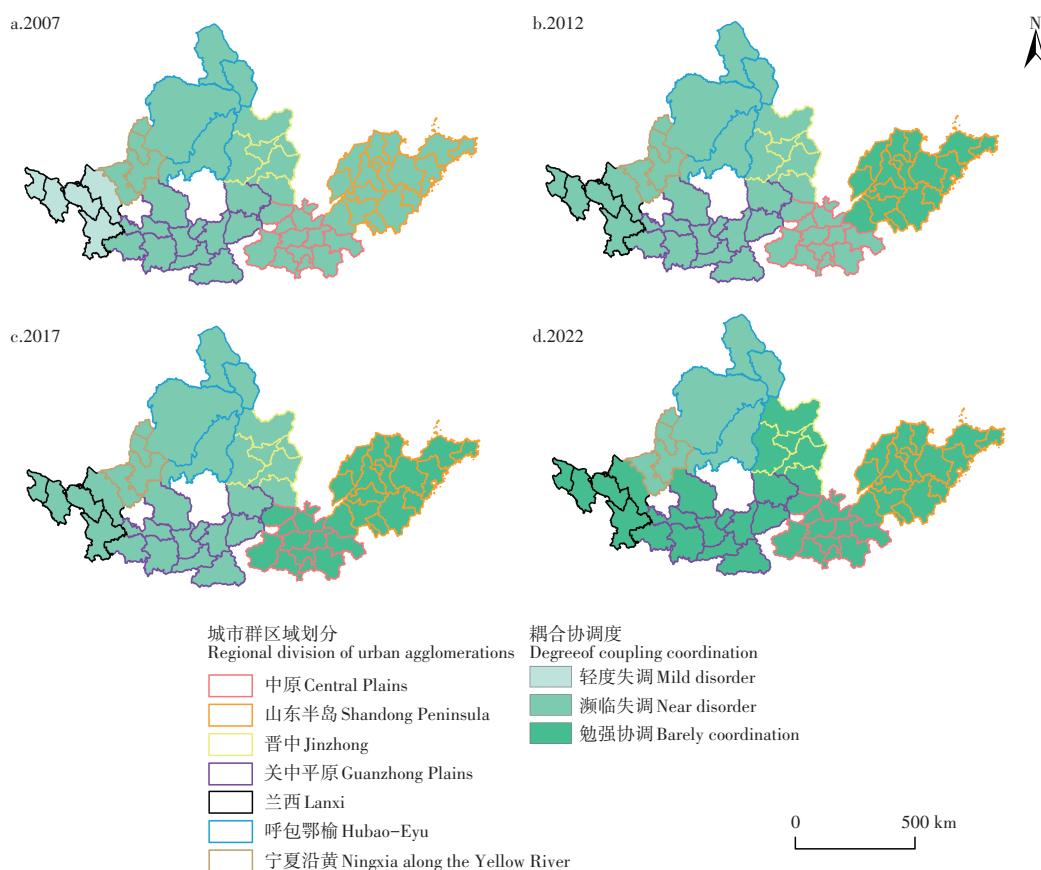


图5 水生态韧性与城市发展耦合协调度空间分异特征

Figure 5 Spatial variation in degree of coupling and coordination between water ecological resilience and urban development

表1 水生态韧性与城市发展的影响因子

Table 1 Factors influencing the relationship between water ecology and urban development

准则层 Normative layer	要素层 Factor layer	影响因子 Impact factor	代码 Code	因子释义 Factor interpretation
城市发展 Urban development	经济水平 Economic level	人均GDP GDP per capita	$X_1$	经济发展水平 Level of economic development
	人口集聚 Population agglomeration	城市人口密度 Urban population density	$X_2$	人口压力 Population pressure
	社会发展 Social development	城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban residents	$X_3$	居民消费水平和生活水平 Level of consumption and living standard of the residents
	基础设施 Infrastructure	人均建成区面积 Area of built-up area per capita	$X_4$	土地利用强度 Intensity of land use
	生态环境 Ecological environment	人均公园绿地面积 Green space per capita	$X_5$	生态环境状态 State of the ecological environment
	水资源赋存 Water resource endowment	产水模数 Water yield modulus	$X_6$	天然水资源丰沛程度 Degree of abundance of natural water resources
	水利用程度 Water utilization degree	万元GDP用水量 Water consumption per 10,000 Yuan GDP	$X_7$	经济生产的水资源利用效率 Water use efficiency in economic production
	水压力指数 Water stress index	水资源开发利用率 Water resources development utilization rate	$X_8$	水资源利用强度 Intensity of water resources utilization
	水管能力 Water management capacity	工业废水排放量 Industrial wastewater discharge	$X_9$	工业污染负荷 Industrial pollution loads
		人均日生活用水量 Daily domestic water consumption per capita	$X_{10}$	居民生活用水习惯和节水意识 Population's domestic water use habits and awareness of water conservation
		用水普及率 Water access rate	$X_{11}$	基础设施覆盖水平 Level of infrastructure coverage

于单因子,交互类型以双因子增强和非线性增强为主,这表明任意两因子交互后的影响均大于其自身对水生态韧性与城市发展耦合协调度的影响,且各影响因子之间存在紧密联系,并非相互独立。从时间维度来看,2007年,城市人口密度与产水模数( $X_2 \cap X_6$ )的解释力最大,达到0.93,说明两者叠加后对2007年的耦合协调度起到主导作用。人均GDP( $X_1$ )与其他因子交互作用后的解释力均处于较高水平,在0.76~0.89,对耦合协调度产生较为显著的强化作用;2022年,产水模数( $X_6$ )、万元GDP用水量( $X_7$ )与其他因子的交互作用仍维持较高水平,进一步印证了水资源赋存与水利用程度在系统耦合协调演进中具有关键驱动作用。值得注意的是,产水模数与工业废水排放量( $X_6 \cap X_9$ )的解释力呈现显著跃升,其 $q$ 值从2007年的0.57增至2022年的0.90,居于所有交互因子首位,说明产水模数与工业废水排放量的协同效应已成为影响水生态韧性与城市发展耦合协调度的主导性因素;另外,尽管人均公园绿地为一般驱动因子,但与其他因子交互作用后,对耦合协调度的影响均有不同程度的加强。

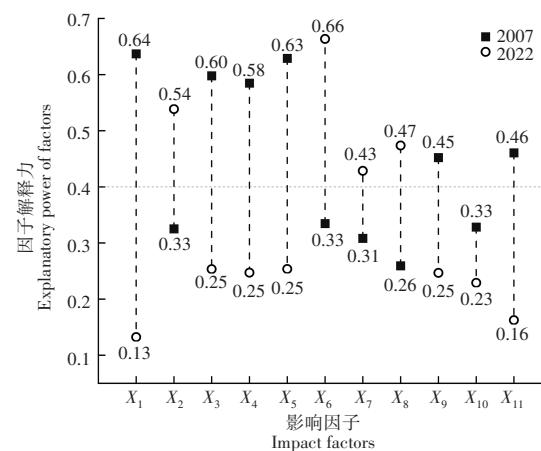


图6 水生态韧性与城市发展耦合协调度单因子探测结果

Figure 6 Single-factor detection of coupling and coordination degree between water ecological resilience and urban development

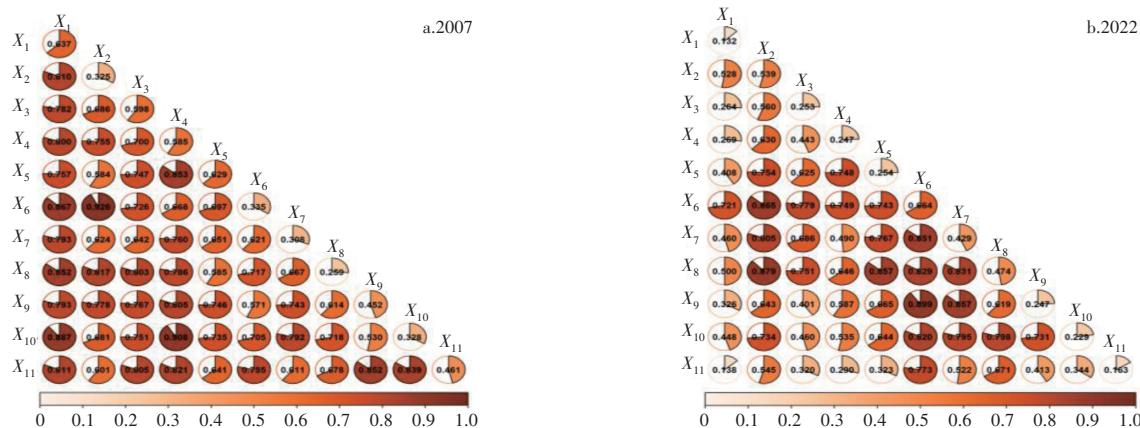


图7 水生态韧性与城市发展耦合协调度交互探测器结果

Figure 7 Results of interaction detector for coupling and coordination of water ecological resilience and urban development

### 3 讨论与结论

开展水生态韧性与城市发展关系协调研究对面临水生态韧性不足、城市发展动力不足的区域统筹水城协同发展具有重要的指导意义。本研究基于城市群角度,采用逆向与正向的角度对水生态韧性与城市发展进行定量分析,并对影响耦合协调度的因子展开探讨,一定程度上弥补了既有研究在研究尺度、方法与视角的缺失。本研究尚存在不足之处有待进一步研究,以城市群为研究尺度,探讨了水生态韧性与城市发展交互关系的时空格局,其数据主要源于统计年鉴。在后续研究中,一是继续深入研究两者耦合协调的空间关联性,并采用系统动力模型、空间马尔可夫链模型等对未来两者耦合协调度的变化趋势进行模拟或预测;二是优化评价指标体系,借助大数据平台,如夜间灯光数据、遥感数据等或结合实地调研优化数据源,提高现有数据源的解释力度和合理性。

本研究结果表明,黄河流域水生态韧性与城市发展综合水平呈现缓慢上升趋势,各城市群的综合水平存在显著差异。城市发展水平高值区主要集中在山东半岛城市群,且兰西城市群的增速最快,水生态韧性水平

高值区集中在中原、山东半岛城市群,而宁夏沿黄城市群相对较低,仍有较大的提升空间;研究期内黄河流域城市群水生态韧性与城市发展的约束强度在时间序列上呈现显著下降趋势,仍处于强约束状态;水生态韧性与城市发展耦合协调度呈上升趋势,其空间失衡现象显著,空间格局表现为“南高北低”,耦合协调等级除2007-2010年兰西城市群处于轻度失调,其余时期各城市群处于濒临失调或勉强协调的状态;当前人口集聚、水资源赋存、水利用程度因素对黄河流域城市群水生态韧性与城市发展耦合协调度的驱动作用较为显著。各因子联系之间联系紧密,存在非线性加强或双因子增强的交互关系,共同推动水生态韧性与城市发展的耦合协调度提升。

基于所得结论,未来要更加注重水城协同发展,一方面要调控城市发展速度和开发强度,结合人口规模及变化、产业特征、土地利用及生活、生产、生态布局,主动性调整城市用水情况,构建水生态安全发展新格局以缓解水生态压力;另一方面要加强科技创新,合理开发水资源,加快韧性海绵城市的建设,利用大数据等技术监测生态环境,及时发现并应对污染源,确保城市高质量发展的同时兼顾水生态环境质量。另外,要完善区域协调联动机制,推动各城市群协同发展,根据水资源禀赋、水文气象变化等,优化黄河可供水量分配方案,实施科学有效的水资源管理方式,促进黄河流域城市群水生态韧性水平的提升,推动城市发展模式向集约、智能、绿色转变。

### 参考文献:

- [1] 秦华,任保平.黄河流域城市群高质量发展的目标及其实现路径[J].经济与管理评论,2021,37(6):26-37.  
QING H,REN B P.The goal and realization path of high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin[J].Review of Economy and Management,2021,37(6):26-37.
- [2] 陶健,林昱辰,王冰鑫,等.黄河流域生态环境脆弱性时空特征[J/OL].生态学杂志,2024:1-11[2024-11-27].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20241127.0917.002.html>.  
TAO J,LIN Y C,WANG B X.Spatiotemporal characteristics of eco-environmental vulnerability in the Yellow River Basin, China[J/OL].Chinese Journal of Ecology,2024:1-11[2024-11-27].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20241127.0917.002.html>.
- [3] 王颖,邓肖灵,徐瑾,等.强人类活动下京津冀城市群水资源演变的影响因素[J].中国给水排水,2018,34(23):75-79.  
WANG Y,DENG X L H,XU J,et al.Influencing factors of water resources evolution driven by strong human activities in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J].China Water & Wastewater,2018,34(23):75-79.
- [4] 陈岩,冯亚中.基于RS-SVR模型的流域水资源脆弱性评价与预测研究—以黄河流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):137-149.  
CHEN Y,FENG Y Z.Assessment and prediction of water resources vulnerability in river basin based on RS-SVR model: A case study of the Yellow River Basin[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(1):137-149.
- [5] MARTIN R,SUNLEY P.On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation[J].Journal of Economic Geography,2015,15(1):1-42.
- [6] 赵志龙,杨亚锋,徐冬梅,等.基于二级模糊综合评判法的水资源系统韧性评价调控模型及应用[J].水电能源科学,2022,40(10):39-43.  
ZHAO Z L,YANG Y F,XU D M,et al.Resilience evaluation and regulation model of water resources system based on two-level fuzzy comprehensive evaluation and its application[J].Water Resources and Power,2022,40(10):39-43.
- [7] 于翠松.山西省水资源系统恢复力定量评价研究[J].水文,2008(2):13-17,66.  
YU C S.Quantitative assessment of water resources system resilience in Shanxi Province[J].Journal of China Hydrology,2008(2):13-17,66.
- [8] 李阳力,陈天,臧鑫宇.围水定策—中国31个省份水生态韧性评价与优化战略思考[J].中国软科学,2022(6):96-110.  
LI Y L,CHEN T,ZANG X Y.Strategic thinking and evaluation of water-ecological resilience—A case study of 31 provinces, autonomous regions and cities in China[J].China Soft Science,2022(6):96-110.
- [9] 周申蓓,汪心愿,童建.基于PSR模型的长江流域水资源系统韧性分析[J].水利经济,2023,41(3):23-28,57,123-124.  
ZHOU S B,WANG X Y,TONG J.Resilience analysis of water resources system of the Yangtze River Basin based on pressure-state-response model[J].Journal of Economics of Water Resources,2023,41(3):23-28,57,123-124.

- [10] 杨 力,徐 悅,朱俊奇,等.长江中游城市群水生态韧性及影响因素分析[J].安全与环境学报,2025,25(1):335–347.  
YANG L,XU Y,ZHU J Q,et al.Assessment of water ecological resilience and influencing factors in urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River[J].Journal of Safety and Environment,2025,25(1):335–347.
- [11] 吕连菊,阚大学.新型城镇化与水生态韧性的交互耦合及驱动因素—基于中部地区研究[J].中国农业资源与区划,2025,46(2):103–116.  
LV L J,KAN D X.Interactive coupling and driving factors of new urbanization and water ecological resilience based on a study in central China[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2025,46(2):103–116.
- [12] 薛选登,范晓婕,谢清华.黄河流域农业水资源生态韧性与用水效率耦合协调及驱动因素研究[J].节水灌溉,2024(7):62–74.  
XUE X D,FAN X J,XIE Q H.Study on coupling coordination and driving factors of ecological resilience and water use efficiency of agricultural water resources in the Yellow River Basin[J].Water Saving Irrigation,2024,(07):62–74.
- [13] 孙 炎,孙 涛,薛建春.黄河流域城市群乡村振兴水平测度、动态演进及区域差异研究[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):166–176.  
SUN B,SUN T,XUE J C.Level measurement, dynamic evolution and regional difference of rural revitalization in the Yellow River Basin urban agglomeration[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(1):166–176.
- [14] 孙 炎,姜慧敏,薛建春,等.黄河流域城市群水资源可持续发展评价及其障碍因素研究[J].中国环境管理,2025,17(1):66–77.  
SUN B,JIANG H M,XUE J C,et al.Valuation and Obstacle factors of sustainable development level of water resources in urban agglomerations of the Yellow River Basin[J].Chinese Journal of Environmental Management,2025,17(1):66–77.
- [15] 梁龙武,王振波,方创琳,等.京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J].生态学报,2019,39(4):1212–1225.  
LIANG L W,WANG Z B,FANG C L,et al.Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the ecological environment of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(4):1212–1225.
- [16] 薛建春,曹凌辰.黄河“几字弯”都市圈土地利用效率与土地生态安全耦合协调研究[J].沈阳农业大学学报,2024,55(3):363–372.  
XUE J C,CAO L C.Coupling and coordination of land use efficiency and land ecological security in Jiziwan metropolitan area of the Yellow River[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(3):363–372.
- [17] 鲍 超,方创琳.干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析[J].地理学报,2008(11):1140–1150.  
BAO C,FANG C L.Temporal and spatial variations of water resources constraint intensity on urbanization in arid area[J].Acta Geographica Sinica,2008(11):1140–1150.
- [18] 王淑佳,孔 伟,任 亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793–810.  
WANG S J,KONG W,REN L,et al.Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J].Journal of Natural Resources,2021,36(3):793–810.
- [19] 孙 炎,杜松朴,薛建春,等.黄河流域新型城镇化—生态安全—公共健康协调发展研究—以内蒙古自治区为例[J].沈阳农业大学学报,2024,55(1):115–127.  
SUN B,DU S P,XUE J C,et al.Study on coordinated development of new urbanization, ecological security, and public health in the Yellow River Basin—A case study of inner mongolia autonomous region[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(1):115–127.
- [20] 边振兴,刘 彬,管德阳.基于土地利用变化的东北黑土区景观生态风险评价[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):140–155.  
BIAN Z X,LIU B,GUAN D Y.Landscape ecological risk assessment for the black soil region in northeast china based on land use change[J].Journal of Shenyang Agricultural University, 2025,56(1):140–155.
- [21] 吕 钺,吕素冰,焦天一,等.河南省黄河流域水资源—经济社会—生态环境协调发展评价及驱动因素分析[J].中国农村水利水电,2024(12):1–11.  
LV C,LV S B,JIAO T Y,et al.Evaluation and driving factors of coordinated development of water resources, economy society and ecological environment in the Yellow River Basin of Henan Province[J].China Rural Water and Hydropower,2024 (12):1–11.