

海河流域河网防洪和供水功能适配性评价及 关键瓶颈诊断

史书汇¹, 李发文¹, 王现领², 陈旭³

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 天津市水利科学研究院; 3. 水利部海河水利委员会水文局)

摘要:为科学评估海河流域河网防洪和供水功能适配性,采用空间数据分析、空间匹配均衡性指标与耦合协调度模型量化了河网功能与需求的适配格局,并结合网络鲁棒性分析识别了制约功能适配性的关键瓶颈。结果表明:海河流域河网防洪功能与需求存在显著空间错配,河网防洪功能高值区集中在西部山区,而防洪需求高风险区则主要分布在东部平原,河网供水功能热点与灌溉需求区存在空间分离;流域河网防洪和供水功能适配性面临空间失衡与系统失调双重瓶颈,供水功能空间匹配度较差,全流域整体耦合协调度等级为濒临失调,适配性格局呈现显著的廊道效应,耦合协调度由近河道区域向流域腹地急剧衰减;滹沱河、武烈河等为制约防洪与供水功能的控制性河段。

关键词:河网功能;适配性评价;空间自相关;耦合协调;基尼系数;海河流域

Adaptability assessment of flood control and water supply functions of river network in the Haihe River Basin and diagnosis of key bottlenecks//Shi Shuhui¹, Li Fawen¹, Wang Xianling², Chen Xu³(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. Tianjin Hydraulic Science Research Institute; 3. Hydrology Bureau of Haihe Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources)

Abstract: To scientifically assess the adaptability of flood control and water supply functions of the river network in the Haihe River Basin, spatial data analysis, spatial matching equilibrium indexes, and a coupling coordination model were used to quantify the adaptability pattern between river network functions and demands. Network robustness analysis was then applied to identify the key bottlenecks that constrain functional adaptability. Results indicate a significant spatial mismatch between the function and demand of flood control of the river network in the Haihe River Basin. High-value areas of flood control of the river network are concentrated in the western mountainous regions, while high-risk areas with flood control demand are primarily located in the eastern plains; water supply hotspots are spatially separated from irrigation demand areas. The adaptability of flood control and water supply functions of the river basin network faces dual bottlenecks of spatial imbalance and systemic discoordination, with poor spatial match of water supply function and the overall coupling coordination degree nearing breakdown. The adaptability pattern exhibits a distinct corridor effect, with the coupling coordination degree decreasing sharply from near-river areas toward the interior regions of the basin. The Hutuo and Wulie rivers, etc. are the controlling sections that restrict the functions of flood control and water supply.

Key words: river network functions; adaptability assessment; spatial autocorrelation; coupling coordination; Gini coefficient; the Haihe River Basin

流域河网作为自然与社会水循环的关键纽带^[1-2],承载着防洪、供水、生态等多重功能。在国家水网建设全面提速的背景下^[3-4],科学提升河网功能适配性已成为紧迫需求。海河流域受季风气候和高强度人类活动影响,防洪安全与农业供水矛盾已演变为其河网功能适配性的核心矛盾^[5]。流域上游汇流迅猛而下游排泄不畅,汛期防洪形势严峻;同时作为国家重要粮食基地,其农业用水长期占总用水

量的 65% 以上,农业灌溉高度依赖天然河网的输配水能力。这种汛期高强度宣泄与非汛期精细化调配的二元需求,对河网的空间结构与功能布局提出了极高挑战。

海河流域受自然本底限制与长期高强度人工干预的累积效应影响,水循环演变复杂。传统单一视角评估方法难以全面揭示功能与需求的空间匹配关系,更无法精准识别制约流域水网效能的深层次结

基金项目:国家自然科学基金项目(52239004,52179020)
作者简介:史书汇(2000—),男,博士研究生,主要从事水网优化研究。E-mail:shishuhui372@163.com
通信作者:李发文(1976—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lifawen@tju.edu.cn

构性瓶颈^[6]。近年来,国内外学者围绕河网功能评估开展了诸多研究。在河网防洪功能方面,Karki等^[7]基于洪水过程线概念,发展了洪水衰减评估方法,通过分析洪水路径长度差异表征防洪功能;Luo等^[8]利用水文模型分析了1977—2018年河网变化对防洪功能的影响,发现海河流域防洪功能下降了12.34%。在河网供水功能方面,王淑良^[9]基于网络效率评估了供水网络的性能和脆弱性;Wang等^[10-11]揭示了塔里木河与黄河流域普遍存在的供水与需求之间的空间错配问题,强调水资源时空分布不均是关键制约因素。

然而,现有研究在探究河网功能时仍有待深化:一方面,多数工作侧重于评估单一功能^[12-13],忽视了防洪和供水两大功能间潜在的权衡协同关系^[14],且对功能与需求间的空间耦合及协调机制缺乏系统性刻画^[15-16];另一方面,现有空间数据分析方法与协调度模型等常被孤立使用^[17-18],且评估尺度多聚焦于流域的面状宏观特征,对构成河网骨架的关键线状单元与节点要素的精细化诊断关注不足^[19],难以精准识别制约功能适配性的结构性弱点。

针对上述不足,本文从河网功能与需求的多维视角出发,构建海河流域河网功能与需求的空间化评价指标体系,从空间维、系统维和拓扑维刻画河网防洪和供水功能的适配关系:空间维运用空间数据分析与空间匹配均衡性指标,评估河网防洪和供水功能与需求在空间分布上的匹配格局;系统维运用耦合协调度模型,量化河网功能系统与需求系统间的整体协调程度,二者集成为综合适配度指数;拓扑维则基于网络鲁棒性分析,识别制约河网功能适配性的关键瓶颈与控制性河段。

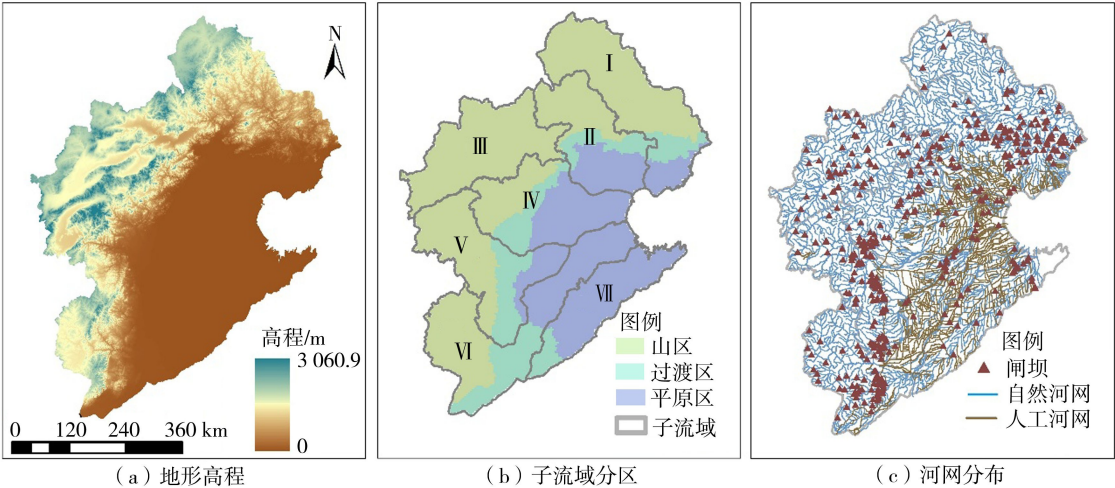


图1 海河流域概况

Fig.1 Overview of the Haihe River Basin

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海河流域处于 35°N~43°N、112°E~120°E,流域面积 31.82 万 km²。流域跨越北京、天津及河北等 8 个省(区、市),上游分布有太行山脉和燕山山脉,下游为粮食产区华北平原。海河流域形状为扇形,山区平原界限分明,上游至下游呈收缩趋势。海河水系发源于内蒙古高原、黄土高原、燕山和太行山,水网密集、水系分散,含 10 条骨干河流。按水系将海河流域划分为 7 个子流域:滦河子流域(Ⅰ),潮白、北运、蓟运河子流域(Ⅱ),永定河子流域(Ⅲ),大清河子流域(Ⅳ),子牙河子流域(Ⅴ),漳卫南运河子流域(Ⅵ),徒骇、马颊河子流域(Ⅶ),并依地形划分为山区、过渡区与平原区。海河流域概况如图 1 所示。

1.2 数据来源

河网数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://mulu.tianditu.gov.cn/catalog>) 1:100 万地理数据。DEM(2019 年)数据为 ASTER 全球数字高程模型(ASTER GDEM V3),下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。防洪数据采用联合国环境规划署(UNEP)和位于日内瓦的全球资源信息数据库(GRID-Geneva)提供的洪涝灾害风险度数据集。供水需求数据采用全球灌溉农田灌溉用水量遥感估算数据集(2011—2018 年),基于土壤水平衡模型,整合了卫星获取的土壤湿度、降水量、植被指数和气象数据,估算出实际灌溉用水量。

2 研究方法

2.1 河网功能量化与空间格局分析

为实现河网功能与需求在空间尺度上的统一量

化与精细匹配,采用规则格网作为基础评价单元。综合考虑海河流域的空间广度和多源数据的空间分辨率特征,构建了分辨率为 8 000 m×8 000 m 的标准格网体系,以此作为功能指数计算、空间自相关分析及耦合协调度评价的空间载体^[20]。在此基础上,选取河网结构、地形地貌及水利工程数据构建指标体系,反映河网主要功能,将水库、蓄滞洪区等调蓄工程纳入功能指数计算,闸坝枢纽则作为连通性控制节点纳入后续鲁棒性分析。基于空间数据分析河网功能空间聚集程度,识别空间错配问题。

2.1.1 防洪功能指数

河道行洪能力和水利工程的滞蓄调控能力共同决定了局部河道的防洪功能^[21],据此分 3 步计算防洪功能指数:

步骤 1 计算行洪能力指数 R 。基于河网矢量与高分辨率 DEM 提取河道断面,按明渠非均匀流采用曼宁公式估算断面过流流量;为平滑 DEM 地形噪声,在每个河段上游、中游、下游各取 1 个断面,以 3 个断面流量均值并经无量纲化处理后表征河段行洪能力,山区、平原糙率分别取 0.050 和 0.033。

步骤 2 计算上游调控提升指数 K 。水库与蓄滞洪区通过“上蓄”削峰滞洪,沿河网路径向上搜索至最近的调蓄工程,按其库容随路径长度衰减估算提升效应:

$$K = V/s \tag{1}$$

式中: V 为上游工程调蓄库容,涵盖水库与蓄滞洪区; s 为河段沿河网至该工程的路径长度。

步骤 3 计算防洪功能指数 H :

$$H = w_1R + w_2K \tag{2}$$

式中: w_1 、 w_2 分别为行洪能力指数和上游调控提升指数在防洪功能指数计算中的权重。考虑到河道自身排泄(中疏、下排)是防洪的基础,起决定性作用,而上游工程起辅助增强作用,经层次分析法及一致性检验,取 $w_1=0.7$ 、 $w_2=0.3$ 。

2.1.2 供水功能指数

鉴于海河流域农业用水占总用水量的 65% 以上,且密集河网主要服务于农业灌溉,城镇工业用水多依赖外调水与专用管网。因此,供水功能评估聚焦于河网的农业供水保障能力。该功能从网络连通、受水耕地、上游调控 3 方面表征,分 3 步计算供水功能指数:

步骤 1 计算网络效率指数 E 。基于网络拓扑表征河段在水网物质交换与连通中的重要性, E 为河段对应节点与其余各节点间最短路径长度倒数的平均值,计算方法见文献[9]。

步骤 2 计算受水区耕地指数 A 。基于河段两侧

5 km 缓冲区内的耕地面积计算其灌溉供水量,无量纲化后得到受水区耕地指数 A ,表征农业供水重要性。缓冲区根据海河平原灌区支斗渠平均控制范围及工程设计规范^[22]确定,耕地面积由河段缓冲区与耕地分布空间叠加分析统计得到。指数 A 越大,表明河段灌溉服务的耕地范围越广,农业供水地位越重要。

步骤 3 计算供水功能指数 W :

$$W = w_3E + w_4A + w_5K \tag{3}$$

式中: w_3 、 w_4 、 w_5 分别为网络效率指数、受水区耕地指数和上游调控提升指数在供水功能指数计算中的权重。网络效率指数为供水连通前提,影响较强,取 $w_3=0.4$;农业供水重要性与工程提升作用视为同等保障条件,取 $w_4=w_5=0.3$ 。

2.1.3 空间数据分析

空间自相关用于度量空间属性值的聚集程度,分为全局与局部两类。本文采用全局莫兰指数衡量研究区整体空间集聚趋势(正值表示集聚、负值表示离散),采用局部吉提斯-奥德指数进行冷热点分析,识别河网功能与需求的高值(热点)与低值(冷点)聚集区,计算公式见文献[23]。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,根据局部吉提斯-奥德指数的 Z 值及其对应的 P 值判定冷热点的统计显著性,并据此识别河网功能与需求的空间错配格局。

2.2 适配性评价模型构建

2.2.1 空间匹配均衡性评价

采用基尼系数评估全流域尺度河网功能与需求的总体空间匹配度^[24],并引入泰尔指数与对数离差均值量化各子流域河网功能分布的不均衡性^[25-26]。前者对极值差异更敏感,后者对中等数值变化更敏感。基尼系数、泰尔指数与对数离差均值共同构成空间匹配均衡性指数,用以从整体与局部两个层面刻画河网功能与需求的空间匹配均衡程度。

2.2.2 耦合协调度评价

耦合协调度反映相关要素间协调配合关系以及相互作用水平的高低,河网功能系统和需求系统构成耦合协调分析的两个子系统。为准确刻画防洪和供水功能指数各分项指标(如行洪能力指数、网络效率指数等)的相对重要性,采用主客观综合赋权法优化各指标权重:以优序图法计算主观权重^[27-28],改进熵权法计算客观权重^[29-31],实现主客观统一。在此基础上,采用耦合协调度模型计算河网功能与需求的耦合协调度。由耦合度度量功能系统与需求系统间相互作用的强弱,再结合反映二者协同水平的协调度,共同构成耦合协调度,以综合评价系统间的整体协调发展程度。因河网功能与需求同等重要,模型中两系统的权重均取 0.5^[32-33]。耦

合度与耦合协调度的等级划分如表 1 所示。

表 1 耦合度与耦合协调度等级划分

Table 1 Classification of coupling degree and coupling coordination degree		
数值区间	耦合度等级	耦合协调度等级
0~0.1	低度耦合	极度失调
>0.1~0.2	低度耦合	严重失调
>0.2~0.3	低度耦合	中度失调
>0.3~0.4	拮抗阶段	轻度失调
>0.4~0.5	拮抗阶段	濒临失调
>0.5~0.6	磨合阶段	勉强协调
>0.6~0.7	磨合阶段	初级协调
>0.7~0.8	磨合阶段	中级协调
>0.8~0.9	高度耦合	良好协调
>0.9~1.0	高度耦合	优质协调

2.2.3 综合适配度评价指标体系

为系统量化海河流域河网功能的整体适配水平,构建整合空间匹配与系统协调双重维度的综合适配度评价指标体系,旨在超越单一指标的局限性,从更宏观的视角诊断流域河网适配性的核心症结。综合适配度评价指标体系由系统耦合协调度和空间匹配均衡性两大准则层构成。评价指标体系中各级指标的权重均采用优序图法与熵权法相结合的主客观综合赋权法确定。综合适配度评价指标体系及权重分配结果如图 2 所示。

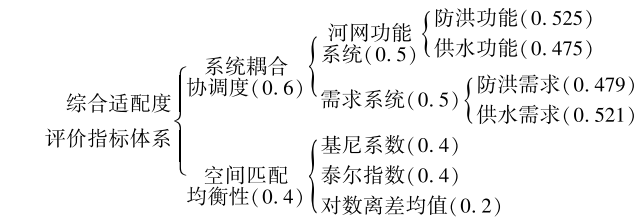


图 2 海河流域河网综合适配度评价指标体系

Fig. 2 Comprehensive adaptability evaluation indicator system of river network in the Haihe River Basin

赋权结果显示,系统耦合协调度的权重(0.6)高于空间匹配均衡性(0.4)。这一结果与相关研究结论相符,即系统动态协同是适配性的核心,而静态空间均衡是其重要补充^[34-37]。此权重设置旨在优先考虑河网功能与需求的协同发展,兼顾空间分布的均衡性,以实现适配性的全面评估。

综合适配度的计算公式为:
$$S = 0.6D + 0.4[0.4(1 - G) + 0.4(1 - T) + 0.2(1 - L)]$$
 (4)
式中: S 为综合适配度; D 为系统耦合协调度; G 、 T 、 L 分别为基尼系数、泰尔指数和对数离差均值。

2.3 关键瓶颈诊断方法

选取防洪和供水功能综合适配度均较低的子流域进行河段尺度的评估,采用基于连边移除的网络鲁棒性分析方法^[38],识别流域内的控制性河段。针

对选定的子流域,分别构建基于防洪和供水功能赋权的河网模型,将河段视为网络的边,将河段交汇点以及对水流连通性具有关键调控作用的闸坝枢纽视为网络的节点,河段的权重由其功能大小决定。网络鲁棒性分析采用静态攻击策略,从物理上模拟河段因淤堵、工程损毁或干旱断流导致的功能失效^[39]。鉴于河网受地形地貌严格约束,拓扑结构具有物理稳定性,短期内局部失效不会改变整体水系的连通层级,故未采用动态攻击策略。具体实现时,按照河段的功能权重从低到高依次移除河段,每次移除后网络恢复至初始状态,模拟单一河段失效对河网整体功能的影响。

为了衡量不同河段移除对河网整体功能的影响,对不同功能赋权的河网采用不同的评估指标。对于防洪功能赋权的河网,选择网络平均距离(即平均最短路径长度)作为评估指标,因为防洪功能指数计算中涉及了上下游河道的水力联系,而网络平均距离能够反映网络中节点间的平均连通程度,与防洪功能的性能密切相关;对于供水功能赋权的河网,选择网络效率指数作为评估指标,因为供水功能指数计算中采用了网络效率指数,该指标能够反映网络中物质和能量传输的效率,与供水功能直接相关。通过比较不同河段移除后河网性能指标的变化幅度,识别出对河网功能影响最大的控制性河段。

3 结果与分析

3.1 河网功能空间格局分析

3.1.1 河网功能空间分布特征

海河流域河网功能评估侧重于河道自身的行洪能力,同时考虑水库、蓄滞洪区等调蓄工程对下游河道的提升作用。河网防洪功能的空间分异显著(图 3(a)、图 4(a)),呈明显的地形梯度。西北部山区河道坡陡流急,防洪功能指数均值较高(滦河子流域为 0.417、永定河子流域为 0.444),中位数也较高且箱体集中,河网防洪功能较强;多数子流域均值高于中位数,表明少数行洪能力较强的河段抬高了整体均值;进入过渡区与平原区后,地形趋缓、水流分散,河网防洪功能下降,防洪功能指数中位数降低(徒骇、马颊河子流域为 0.289、大清河子流域为 0.336),异质性与不稳定性增加。河网供水功能评估综合考虑河段在河网中的物质交换效率、受水区耕地分布及上游水库、蓄滞洪区等调蓄工程的供水提升作用。供水功能指数在各子流域间差异明显(图 3(b)、图 4(b)):徒骇、马颊河和漳卫南运河子流域的供水功能指数均值相对较高(普遍超 0.080),河网供水功能较强,但箱体较宽,高值异常

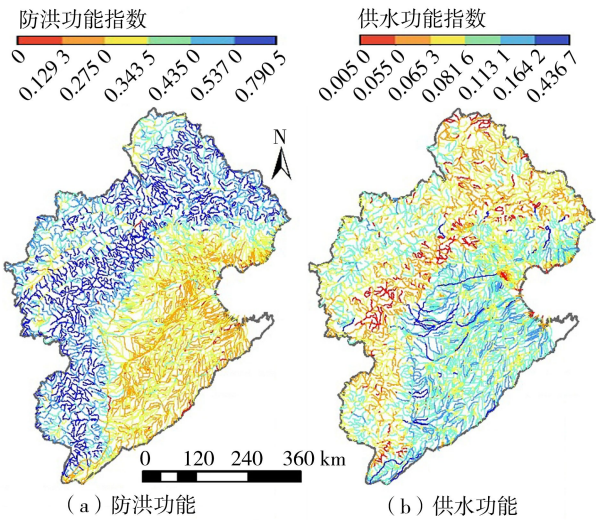


图3 海河流域河网功能空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of river network functions in the Haihe River Basin

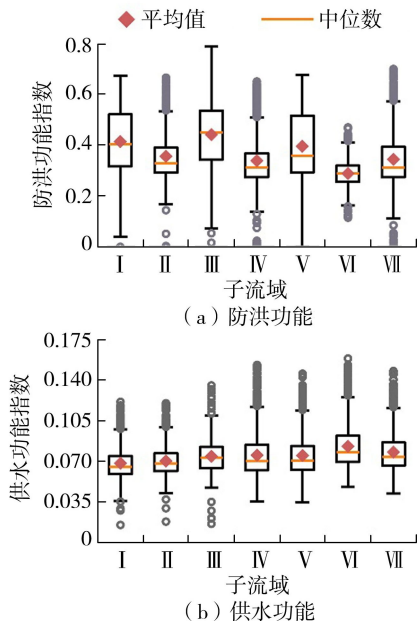


图4 海河流域河网功能指数分布特征
Fig. 4 Characteristics of function index distribution of river network in the Haihe River Basin

点较多,内部空间异质性大;各子流域供水功能指数均值普遍高于中位数,表明少数河网供水功能较强的区域抬高了整体均值;相比之下,永定河、滦河及潮白、北运、蓟运河等子流域均值偏低,低值异常点较多,存在河网供水功能显著偏弱的区域。

3.1.2 空间自相关及冷热点

为揭示海河流域河网功能与需求间空间关联特征,采用基于莫兰指数的全局空间自相关方法衡量研究区整体空间集聚程度(表2),结果表明,河网功能与需求均呈现显著的空间集聚模式($P<0.01$),但集聚强度存在差异。其中,供水需求表现出最强的空间集聚性(莫兰指数为0.981),而防洪需求集

聚性相对较弱(莫兰指数为0.369)。

表2 河网功能与需求全局空间自相关分析结果

Table 2 Results of global spatial autocorrelation analysis of river network functions and demands

功能与需求	莫兰指数	Z 值	P 值	聚类模式
防洪功能	0.571	58.415	0	高值聚类
防洪需求	0.369	37.760	0	高值聚类
供水功能	0.496	50.826	0	高值聚类
供水需求	0.981	100.452	0	高值聚类

采用吉提斯-奥德指数进行局部空间自相关分析,结果如图5所示。河网防洪功能热点区主要分布于流域西部山区,约占全流域河网防洪功能热点区的44.4%,该区域地势陡峭、河流比降大、行洪能力强;冷点区主要位于东部平原,约占全流域河网防洪功能冷点区的37.5%,该区域地形平坦、流速较缓、行洪能力较弱。河网防洪需求则相反,热点区集中于东部平原,冷点区位于西部山区,形成西冷东热的格局。河网供水功能热点区分布于大清河、子牙河子流域(约占其热点区的32.2%),而供水需求热点区位于徒骇、马颊河子流域,二者存在空间错位。

图例 ●冷点区 ●次冷点区 ●过渡区 ●次热点区 ●热点区

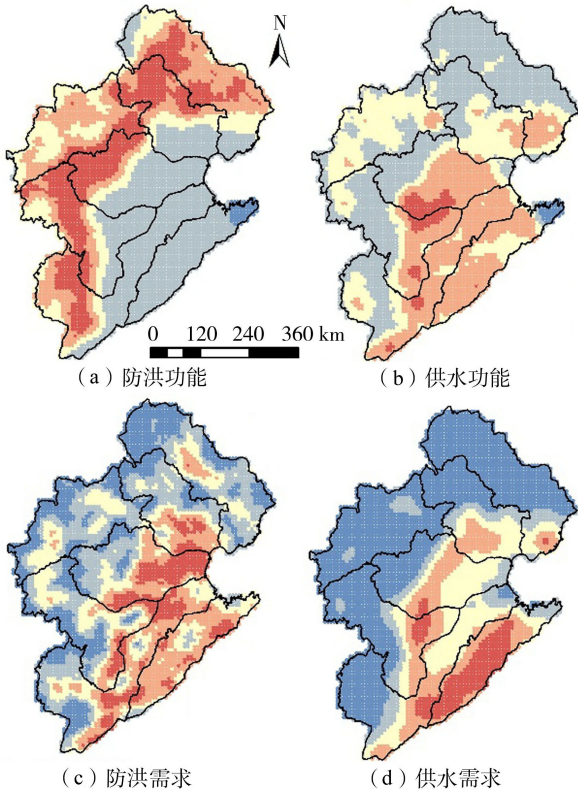


图5 河网功能与需求冷热点分析结果

Fig. 5 Analysis results of cold and hot spots of river network functions and demands

3.2 河网功能与需求的匹配均衡性与耦合协调性

3.2.1 空间匹配均衡性评价

图6为河网功能与需求空间匹配洛伦兹曲线,

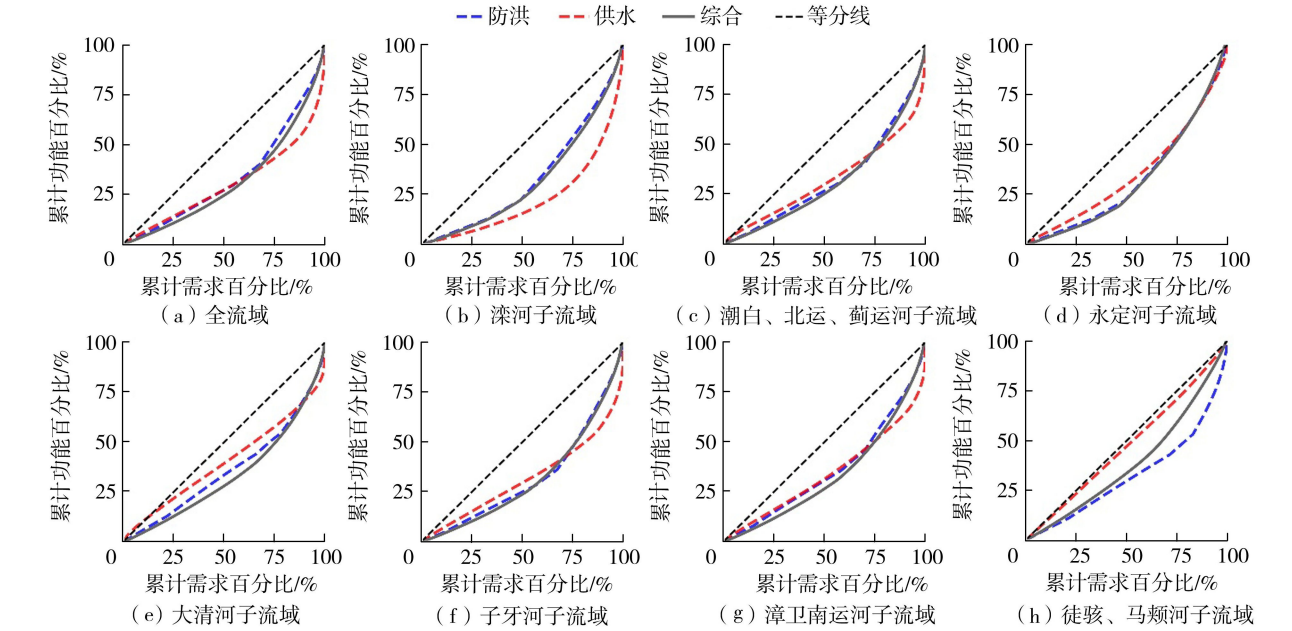


图 6 河网功能与需求空间匹配洛伦兹曲线

Fig. 6 Lorenz curves of spatial matching between river network functions and demands

表 3 为河网功能与需求空间匹配均衡性指数。在全流域层面,河网功能与需求的基尼系数为 0.3728。分功能来看,河网供水功能与需求的基尼系数为 0.3984,高于河网防洪功能与需求的基尼系数(0.3237),且供水功能与需求的洛伦兹曲线偏离等分线更远,表明在全流域层面,供水功能与需求的空间错配更加突出。相较于防洪体系的布局,如何优化水资源输配网络,以更加精准响应空间上高度异质的用水需求,是流域面临的更严峻挑战。

在子流域层面,空间匹配均衡性呈现显著的地域分异特征。滦河子流域河网供水功能与需求的空间错配最为突出,其河网供水功能与需求的基尼系数在所有子流域中最高,达 0.5517;其综合功能与需求的基尼系数为 0.3617,同样处于较高水平,反映出该子流域河网供水能力与需求在空间布局上严重脱节。徒骇、马颊河子流域河网功能与需求的基尼系数最低(0.2225),特别是其供水功能与需求的基尼系数仅为 0.0473,洛伦兹曲线几乎与等分线重

合,展现出极佳的空间匹配性,这得益于其完善的灌溉工程体系。

泰尔指数和对数离差均值揭示了各子流域河网功能分布的不均衡性,这两个指标呈现出相似的规律:大清河子流域河网供水功能内部不均衡性最为显著,其供水功能的泰尔指数(0.0878)和对数离差均值(0.0796)均为所有子流域中最高,这可能源于其内部地形复杂、上下游功能差异巨大。相比之下,徒骇、马颊河子流域和永定河子流域河网功能分布则相对均衡。综合来看,海河流域河网功能与需求空间匹配瓶颈主要体现在河网供水功能的整体错配以及滦河子流域的系统性失衡,同时大清河子流域河网功能布局不均的问题也值得关注。

3.2.2 耦合协调性评价

海河流域河网功能与需求的耦合协调度整体呈现出与骨干河道分布高度相关的空间格局分布(图 7(a))。从数值上看,全流域河网功能与需求的耦合协调度均值为 0.401,处于濒临失调等级,表

表 3 河网功能与需求空间匹配均衡性指数

Table 3 Spatial matching equilibrium indices between river network functions and demands

子流域	基尼系数			泰尔指数		对数离差均值	
	防洪功能与需求	供水功能与需求	综合功能与需求	防洪功能	供水功能	防洪功能	供水功能
滦河子流域	0.3373	0.5517	0.3617	0.0242	0.0283	0.0273	0.0273
潮白、北运、蓟运河子流域	0.3479	0.3521	0.3706	0.0384	0.0446	0.0401	0.0407
永定河子流域	0.3440	0.2902	0.3524	0.0190	0.0231	0.0201	0.0215
大清河子流域	0.2802	0.1975	0.3363	0.0490	0.0878	0.0484	0.0796
子牙河子流域	0.3587	0.3691	0.3728	0.0421	0.0478	0.0451	0.0454
漳卫南运河子流域	0.2867	0.3188	0.3386	0.0532	0.0394	0.0534	0.0371
徒骇、马颊河子流域	0.3473	0.0473	0.2225	0.0110	0.0188	0.0121	0.0184
全流域	0.3237	0.3984	0.3728	0.0338	0.0414	0.0352	0.0386

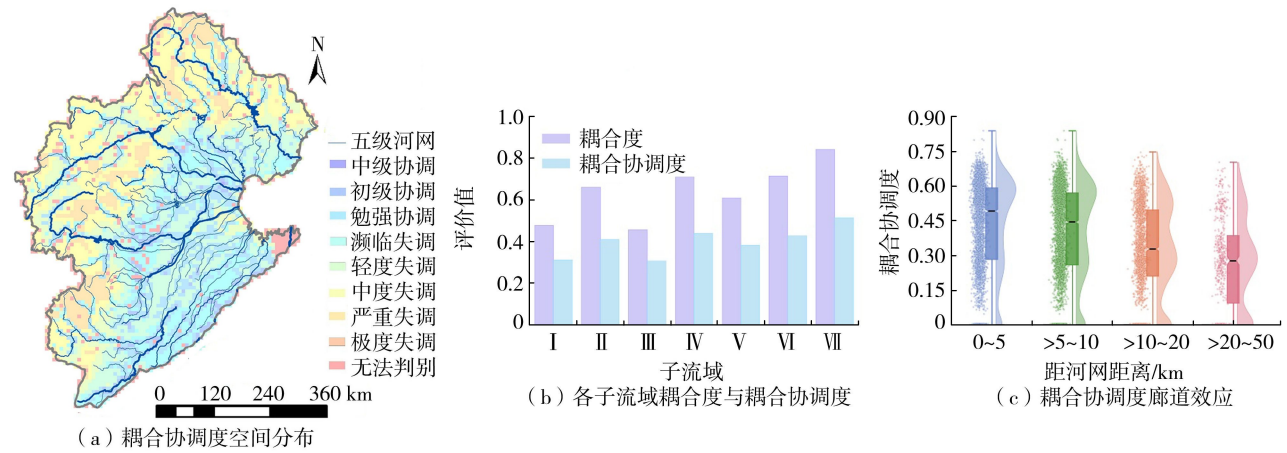


图7 海河流域河网功能与需求耦合协调分析结果

Fig. 7 Coupling coordination analysis results of river network functions and demands in the Haihe River Basin

明河网功能与需求间存在系统性不匹配。各子流域协调水平差异显著(图7(b)):徒骇、马颊河子流域的耦合度(0.842)与耦合协调度(0.515)均为最高,反映出其作为重要农业灌区,在长期水利工程建设与管理中,河网功能与需求的强相互作用在一定程度上转化为相对良性的协同发展;相比之下,滦河和永定河子流域的耦合协调度在所有子流域中最低,分别为0.311和0.307,均处于轻度失调等级,是制约全流域整体适配性水平提升的关键短板区域。

进一步分析耦合协调度的空间格局可以发现,大部分处于初级协调和中级协调等级的区域,其走向与五级河网的干支流脉络基本吻合,相反,耦合协调度较低的区域则广泛分布于远离主河道的流域腹地(图7(c))。耦合协调度存在显著的廊道效应,即协调水平与距河网的距离呈现负相关关系。在紧邻河道0~5 km缓冲区内,耦合协调度数值集中处于较高水平(中位数为0.5),显著优于其他区域。随着距离增加,耦合协调度中位数迅速下降,在>5~10 km范围内降至约0.45;而在>10~20 km和>20~50 km的区域则进一步下降至0.3及以下,且数据分布更趋离散,偏向低值区。骨干河道作为防洪和供水调配的核心载体,水利工程调控高度集中,因而在近河道廊道内实现了高强度协同;而广大腹地处于河网功能辐射末梢,耦合协调度显著偏低。未来水网规划应针对耦合协调度较低的腹地实施差异化策略,完善末级渠系配套与分散式调蓄设施,推广高效节水与优化种植结构,以降低其对骨干输水的依赖。

3.3 河网功能适配性瓶颈与控制性河段诊断

3.3.1 防洪功能适配性格局与瓶颈

在河网防洪功能方面,流域河网适配性瓶颈区域明确(图8(a))。计算结果显示,滦河和子牙河子流域河网防洪功能综合适配度分别为0.277和

0.270,在所有子流域中显著偏低,是全流域防洪体系的两大薄弱环节。滦河子流域受山区骤汇及径流分布不均的影响,防洪体系面临严峻挑战;子牙河子流域地势低平且承接巨量上游来水,其防洪调度关系到下游核心城市与交通干线安全。针对这些瓶颈,通过网络鲁棒性分析进一步诊断其结构性弱点(图9(a)(b))。滹沱河和冶河为子牙河子流域防洪体系的控制性河段,二者移除后剩余网络平均距离的变化最为剧烈,表明其对维持河网整体连通、保障系统洪水滞蓄与安全下泄能力至关重要;这一结果与历史灾害高度吻合——2023年海河流域“23·7”特大暴雨洪水中,滹沱河区域成为重灾区,受灾人口达51.2万人,耕地和居民区受灾面积909.8 km²,验证了该河段在极端洪水胁迫下的脆弱性与控制性地位。青龙河与伊逊河是滦河子流域河网防洪功能的关键控制性河段,其移除后同样引起剩余网络平均距离的显著变化,影响程度在该子流

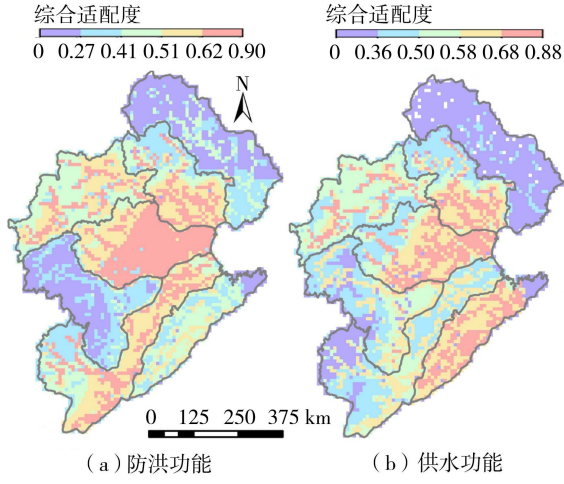


图8 海河流域河网防洪与供水功能综合适配度

Fig. 8 Comprehensive adaptability of flood control and water supply functions of river network in the Haihe River Basin

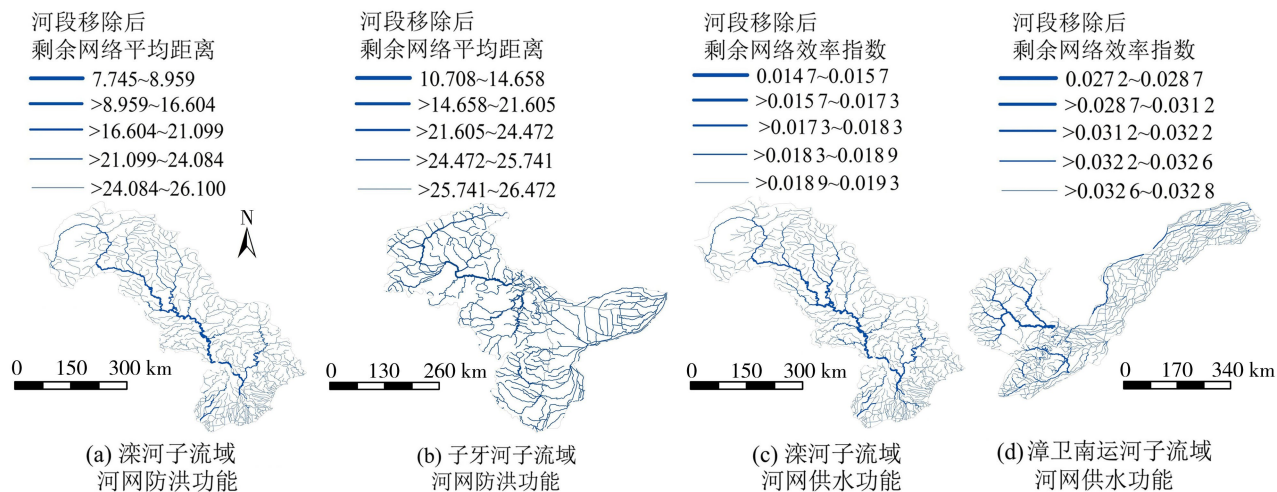


图 9 海河流域控制性河段鲁棒性诊断结果

Fig. 9 Robustness-based diagnosis of controlling reaches in the Haihe River Basin

域各河段中位居前列。为应对上述挑战,河北省正规划建设“一河九库”防洪体系,通过水库群联合调度强化调蓄能力,有望显著缓解青龙河、伊逊河等控制性河段下游的防洪压力。

3.3.2 供水功能适配性格局与瓶颈

在河网供水功能方面,流域河网适配性瓶颈主要集中在水资源禀赋与开发利用矛盾突出的区域(图 8(b))。滦河和漳卫南运河子流域河网供水功能综合适配度分别为 0.181 和 0.478,相对较低。滦河子流域受水资源衰减与大规模跨流域调水的叠加影响,农业和生态用水日趋紧张;漳卫南运河子流域属典型资源性缺水,河网供水功能与大规模农业需水的固有矛盾突出。针对这些供水瓶颈,网络鲁棒性分析进一步识别了控制性河段(图 9(c)(d))。武烈河和兴洲河为滦河子流域供水保障的控制性河段,模拟移除将使流域网络效率指数下降 10.6%;漳河和淇河是漳卫南运河子流域供水体系的控制性河段,移除将使流域网络效率指数下降 20.1%。为缓解该区域供水压力,西霞院跨区域调水等工程正发挥关键作用,通过引黄补水有效缓解了下游灌区的缺水困境,并可兼作南水北调中线干渠的应急备用水源,进而优化流域水资源空间配置格局。

4 结 论

a. 海河流域河网功能与需求在空间上存在显著错配。河网防洪功能呈现西强东弱的地形梯度格局,防洪需求则集中于东部平原,形成西冷东热的相反态势;河网供水功能与灌溉需求热点区存在明显的空间错配。

b. 海河流域河网适配性存在空间失衡与系统失调的双重瓶颈。空间匹配层面,全流域河网供水

功能与需求的基尼系数显著高于河网防洪功能与需求的基尼系数,表明供水错配是首要矛盾,其中滦河子流域供水匹配度最低。系统协调层面,全流域河网功能与需求的耦合协调度为 0.401,处于濒临失调等级,其中滦河与永定河子流域的系统失调问题最为严峻。

c. 海河流域河网功能与需求耦合协调度的空间分布呈现出与骨干河道高度相关的廊道效应。耦合协调度在紧邻河道 0~5 km 的缓冲区内最高,并随距河网距离的增加而急剧下降。证实了骨干河道作为流域河网功能与需求耦合的核心廊道,是维持流域河网功能适配性的关键。

d. 基于综合适配度与网络鲁棒性分析,精准识别了流域河网功能适配性瓶颈。滦河和子牙河子流域河网防洪功能综合适配度较低,而滦河与漳卫南运河子流域河网供水功能综合适配度较低。滦河子流域面临防洪、供水双重挑战,青龙河、伊逊河为其防洪控制性河段,武烈河、兴洲河为其供水控制性河段;子牙河子流域的滹沱河和冶河为防洪体系的薄弱环节;漳卫南运河子流域的漳河和淇河则为供水保障的控制性河段。

参考文献:

[1] Abbott B W, Bishop K, Zarnetske J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(7): 533-540.

[2] 李帅,曾凌,熊斌,等. 长江上游近 61 年来水文干旱演变特征及归因[J]. 水力发电学报, 2024, 43(2): 33-45. (Li Shuai, Zeng Ling, Xiong Bin, et al. Evolution and attribution of hydrological drought in upper Yangtze River Basin over the last 61 years[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(2): 33-45. (in Chinese))

- [3] 王梦晗,严登华,张鑫,等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 35-41. (Wang Menghan, Yan Denghua, Zhang Xin, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 35-41. (in Chinese))
- [4] 侯彩霞,陈柯成,付汉良. 西北地区水安全综合评价及障碍因子分析[J]. 水利经济, 2025, 43(2): 81-89. (Hou Caixia, Chen Kecheng, Fu Hanliang. Comprehensive evaluation of water security and obstacle factor analysis in Northwest China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 81-89. (in Chinese))
- [5] Kreibich H, Van Loon A F, Schröter K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management[J]. Nature, 2022, 608(7921): 80-86.
- [6] 乔建华. 海河流域“十五五”水安全保障关键问题及思路对策[J]. 中国水利, 2025(12): 1-7. (Qiao Jianhua. Key issues and measures for safeguarding water security of the 15th Five-Year Plan in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2025(12): 1-7. (in Chinese))
- [7] Karki S, Stewardson M J, Webb J A, et al. Does the topology of the river network influence the delivery of riverine ecosystem services? [J]. River Research and Applications, 2021, 37(2): 256-269.
- [8] Luo Kaisheng, Zhang Xuejun. Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 219: 104317.
- [9] 王淑良. 基于复杂网络理论的基础设施系统脆弱性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [10] Wang Fei, Chen Yaning, Li Zhi, et al. Assessment of the irrigation water requirement and water supply risk in the Tarim River Basin, Northwest China[J]. Sustainability, 2019, 11(18): 4941.
- [11] Liu Yang, Yang Yang, Wang Zhijie, et al. Quantifying water provision service supply, demand, and spatial flow in the Yellow River Basin[J]. Sustainability, 2022, 14(16): 10093.
- [12] 窦明,宋孙娟,石亚欣,等. 结构-功能耦合下的城市水系连通方案两阶段优化[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 79-90. (Dou Ming, Song Sunjuan, Shi Yaxin, et al. Two-stage optimization of urban water system connectivity scheme under structure-function coupling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 79-90. (in Chinese))
- [13] 李其峰,陈彩明,李冬晓,等. 基于系统动力学的平原河网型灌区多尺度下灌溉用水量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 25-29. (Li Qifeng, Chen Caiming, Li Dongxiao, et al. Research on the calculation method of multi-scale irrigation water use in the irrigation system of plain river network based on system dynamics[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(1): 25-29. (in Chinese))
- [14] Shen Jiak, Wang Yuncai, Guo Xiaolu. Identifying and setting linear water space priorities in co-urbanized area based on multiple levels and multiple ecosystem services[J]. Land, 2021, 10(8): 858.
- [15] Dong Yi, Zou Lei, Xia Jun, et al. Quantitative analysis of human-water system coevolution incorporating community perceptions: a case study of Wuhan City, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101784.
- [16] 朱诗洁,毛劲乔,戴会超. 资料缺乏地区水系连通工程效益评价方法研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 12-19. (Zhu Shijie, Mao Jingqiao, Dai Huichao. Assessment method of benefits of interconnected water systems in data-scarce regions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 12-19. (in Chinese))
- [17] Yang Yafeng, Wang Hongrui, Wang Cheng, et al. Coupling variable fuzzy sets and Gini coefficient to evaluate the spatial equilibrium of water resources[J]. Water Resources, 2022, 49(2): 292-300.
- [18] 齐泓玮,尚松浩,李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价[J]. 水力发电学报, 2020, 39(6): 28-38. (Qi Hongwei, Shang Songhao, Li Jiang. Quantitative evaluation on spatial heterogeneity of water resources in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(6): 28-38. (in Chinese))
- [19] Liu Yanhui, Carling P A, Wang Yuanjian, et al. An automatic graph-based method for characterizing multichannel networks[J]. Computers & Geosciences, 2022, 166: 105180.
- [20] Zhang Xingyuan, Li Fawen. Study on the correlation between river network patterns and topography in the Haihe River Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1124124.
- [21] Spinti R A, Condon L E, Zhang Jun. The evolution of dam induced river fragmentation in the United States[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 3820.
- [22] 于海龙. 淮河流域水系与城镇体系关联特征及耦合机理[D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- [23] 戴睿,闫岩,周迎平,等. 合肥都市圈地表温度时空变化及其驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(5): 1073-1084. (Dai Rui, Yan Yan, Zhou Yingping, et al. Spatial-temporal variation of land surface temperature and driving factors in Hefei metropolitan area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(5): 1073-1084. (in Chinese))
- [24] 王耕,李素娟,马奇飞. 中国生态文明建设效率空间均衡性及格局演变特征[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2198-2209. (Wang Geng, Li Sujuan, Ma Qifei. Spatial equilibrium and pattern evolution of ecological civilization construction efficiency in China[J]. Acta Geographica

- Sinica,2018,73(11):2198-2209. (in Chinese))
- [25] Liao T F. Individual components of three inequality measures for analyzing shapes of inequality [J]. Sociological Methods & Research, 2022, 51(3): 1325-1356.
- [26] 杨朝均,刘立菊. 中国低碳创新的地区差异及空间收敛性研究[J]. 技术经济, 2020, 39(1): 112-120. (Yang Chaojun, Liu Liju. Regional differences and spatial convergence of low-carbon innovation output in China[J]. Journal of Technology Economics, 2020, 39(1): 112-120. (in Chinese))
- [27] 邹铁方,谢荣荣. 基于聚类 and 优序图法的故事再现结果融合方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 219-229. (Zou Tiefang, Xie Rongrong. Fusion of accident reconstruction results using clustering and precedence ordering chart [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 219-229. (in Chinese))
- [28] 耿正霖,吴佳妮,程兴华,等. 基于权重的 AHP 判断矩阵一致性调整方法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(1): 179-186. (Geng Zhenglin, Wu Jiani, Cheng Xinghua, et al. Consistency adjustment method for pairwise comparison matrix in analytic hierarchy process based on weights [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(1): 179-186. (in Chinese))
- [29] 张超,吴水荣,孟贵,等. 基于主成分分析法的山西省生态文明建设成效评价[J]. 生态经济, 2023, 39(10): 217-220. (Zhang Chao, Wu Shuirong, Meng Gui, et al. Evaluation of the effectiveness of ecological civilization construction in Shanxi Province based on the principal component analysis [J]. Ecological Economy, 2023, 39(10): 217-220. (in Chinese))
- [30] 杨柳,王晨颖,冯畅,等. 考虑水系演变的湘江流域洪水风险四维评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 92-101. (Yang Liu, Wang Chenying, Feng Chang, et al. Four-dimensional assessment system for flood risks with the river network system evolution in Xiangjiang River Basin in Hunan of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(3): 92-101. (in Chinese))
- [31] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [32] 张兴源,李发文,赵勇. 基于小世界网络的海河流域河网结构及功能响应[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 541-552. (Zhang Xingyuan, Li Fawen, Zhao Yong. Structural characteristics of the river network and its functional responses in the Haihe River Basin based on small-world networks [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 541-552. (in Chinese))
- [33] 夏军,陈进,余敦先,等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617. (Xia Jun, Chen Jin, She Dunxian, et al. Opportunities and challenges of national water network construction under changing environment [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1608-1617. (in Chinese))
- [34] Wang Xiaoyan, Zhang Silong, Gao Chao, et al. Coupling coordination and driving mechanisms of water resources carrying capacity under the dynamic interaction of the water-social-economic-ecological environment system [J]. Science of the Total Environment, 2024, 920: 171011.
- [35] 王兆峰,张先甜. 中国人-地-粮复合系统适配性评价及影响[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 779-799. (Wang Zhaofeng, Zhang Xiantian. Evaluation and impact of adaptability of China's population-cultivated land-grain composite system [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 779-799. (in Chinese))
- [36] 周建平,刘程军,徐维祥,等. 中国新型城镇化与城市医疗资源空间适配性研究[J]. 地理科学, 2021, 41(7): 1168-1177. (Zhou Jianping, Liu Chengjun, Xu Weixiang, et al. Research on the spatial adaptability of China's new urbanization and urban medical resources [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(7): 1168-1177. (in Chinese))
- [37] 刘欢,甘永德,杨钦,等. 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 62-68. (Liu Huan, Gan Yongde, Yang Qin, et al. Adaptability evaluation of water resources and associated elements based on perspective of water network [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 62-68. (in Chinese))
- [38] Si Weisheng, Mburano B, Zheng Weixing, et al. Measuring network robustness by average network flow [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(3): 1697-1712.
- [39] 范志鹏,李云玲,马睿,等. 长江黄河跨流域多线路水网韧性评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 27-34. (Fan Zhipeng, Li Yunling, Ma Rui, et al. Resilience evaluation for the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route water network [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 27-34. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-28 编辑:施业)