

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0036

梁霄,巨文慧,孙博闻,等.基于AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价:以廊坊市为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):352-364. LIANG X, JU W H, SUN B W, et al. Water system connectivity evaluation in plain urban river network based on AHP-entropy weight method: A case study of Langfang City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 352-364. (in Chinese)

基于 AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价

——以廊坊市为例

梁霄¹, 巨文慧², 孙博闻¹, 胡泽¹, 高学平¹, 张晶³, 赵进勇³

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100089)

摘要:在对近年国内外城市水系连通典型案例总结的基础上,构建包含水系格局、结构连通性和水力连通性3个准则层的平原城市河网水系连通性评价体系,改进水力连通性准则层中水力连通能力指标的计算方法,使其适用于整个河网计算。为避免主、客观单一权重法的不足,采用AHP-熵综合权重法对评价指标赋权。针对通过指标值评价水系连通状况不能兼顾多因素影响的局限性,采用综合评价法对廊坊城区不同水系连通方案的水系连通状况进行评价。结果表明,该体系能够较全面地对平原城市河网进行水系连通性评价,为我国平原城市河网水系连通性评价提供参考。

关键词:水系连通性;评价体系;水力连通性;综合评价;平原城市河网

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



城市化进程影响着水系的特征和空间分布^[1],由人类活动引起的水系衰减、水面率下降、支流退化以及河网复杂度下降等因素显著影响着城市水系的蓄滞洪能力、水环境健康和水文过程。水系的功能与水系连通程度存在密切联系^[2],具体表现为:水系连通促进物质的迁移转化,为能量流动提供基本场所;水系连通能够维持河湖生态演化功能^[3]。目前对水系连通性尚未形成统一定义,依据应用广泛程度采用长江水利委员会在《维护健康长江,促进人水和谐研究报告》中对水系连通性的定义:河流干支流、湖泊及其湿地等水系的连通状况,反映水流的连续性和水系的连通状况^[4]。因此,对平原城市河网水系连通性评价展开研究具有重要意义。

国内外已有研究多基于水系形态、图论与水文

过程的某些指标进行评价,评价指标包括水系格局、结构连通性和水力连通性3个方面。其中,水系格局与结构连通性两方面指标应用较多,而水力连通性研究相对较少。

在水系格局与结构连通性评价方面的研究有:Cui等^[5]基于图论理论从结构连通性方面对比分析高流量和低流量两种城市河网的水系连通性;周振民等^[6]从水系格局和结构连通性两方面选取部分特征指标构建城市河网水系结构评价体系,分别对规划前后的郑州市河网水系连通性进行评价;窦明等^[7]从水系的形态和连通形态两个层面构建了一套描述水系形态演变特征的评价体系,并对郑州市水系进行实例应用;夏敏等^[8]对表征河网连通度的主要指标进行了概括,得到水系格局连通度,在

收稿日期:2021-07-16 修回日期:2021-11-02 网络出版时间:2021-11-11

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211110.1842.004.html

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105);国家自然科学基金创新群体项目(51621092)

作者简介:梁霄(1997—),女,内蒙古赤峰人,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:liangxiao2019@tju.edu.cn

通信作者:孙博闻(1987—),男,河北唐山人,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:bwsun@tju.edu.cn

此基础上综合结构连通性指标构建评价体系,对巢湖环湖区水系连通性进行评价;傅春等^[9]建立水系格局与结构连通性评价体系,对城市化进程下南昌市城区水系特征变化与河流连通性进行初步探讨;李普林等^[10]从水系格局和结构连通性角度出发,选取 6 项指标建立水系连通性评价体系,对研究区水系规划前后进行连通性评价;马栋等^[11]基于图论边连通度方法,从结构连通性方面对扬州市主城区水系结构连通状况进行评价。

在水力连通性评价方面的研究有:孟祥永等^[12]在水系格局和结构连通性基础上增加水力连通性评价内容,构建区域尺度下城市水系连通性评价体系;Phillips 等^[13]建立基于水流阻力及水文过程的城市河流水力连通性评价体系;崔广柏等^[14]综合考量平原城市河网的水系特点,从水系格局与水力连通性等方面选取较为关键的指标构建水系连通性评价体系;李景保等^[15]从结构连通性方面构建水系连通性评价体系,并以水位为研究对象,增加水力连通性方面评价内容,从结构连通性和水力连通性两方面综合分析研究区水系连通变化过程。

以上对于平原城市河网水系连通性评价的研究,不同学者侧重点均有不同,目前并未系统地构建水系连通性评价体系。由于平原城市河网水系密布,在闸门、水泵等水利工程的控制下,水流运动复杂,水系连通不畅,影响河道自净能力^[14]。同时,影响水系连通的因子是多样的,闸坝的调控使其影响更具不确定性。因此,对于平原城市河网的连通性

评价在考虑水系格局和结构连通性基础上还需要考虑水力流动性,从而更为科学地分析评价城区水系的连通状况。基于此,本文以廊坊城区水系为例,选取能够代表城区水系连通性的关键因子,从水系格局、结构连通性、水力连通性 3 个方面构建平原城市河网水系连通性评价体系,定量评价不同水系连通方案的水系连通状况,确定最优水系连通方案。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域

研究区为廊坊市区(广阳区、安次区),包括整个未来规划区中心城区、都市区北部,总面积 942 km²,地处永定河冲积平原,属于平原河网区,以平原和洼地为主,自北向南倾斜,海拔 0~20 m,地势平缓。区域多年平均气温 11.8 ℃,年平均蒸发量 1 909.6 mm,年平均日照 2 689 h,日照率为 60%。区域内主要河流包括北部的凤河、中部的龙河以及南部的永定河,其中环城河流包括五千渠、六千渠等 8 条支渠。永定河泛区河流包括天堂河、胜天渠等 6 条支渠,见图 1。区域内水量分布不均,其中北部的凤河水量丰沛,而中部的环城河道、龙河、南部的永定河泛区缺水严重,龙河出境处多年断流,泛区断流 30 年以上。因此,有必要对该区域制定合适的水系连通方案,通过构建水系连通性评价体系对不同连通方案的水系连通性进行分析评价,以得到该区域水系连通最优方案,从而缓解该区域水资源短缺等问题,提升廊坊城区水资源均衡程度。



图 1 研究区域河流水系

Fig. 1 Schematic diagram of river system in the study area

1.2 数据来源

廊坊市河网水系的河道特征、水文参数、水力特性、闸坝过流能力等数据来源于《廊坊市水文水资源实用指南》《廊坊市生态水系总体规划(2016—2030)》《2019 年廊坊市水资源公报》《廊坊市河道等级分类表》等相关资料。

2 研究方法

2.1 水系连通性评价体系构建方法

城市水系是一个复杂的水网系统,为描述城市水系不同连通方案的水系连通状况,需构建一套评价体系对城市水系连通性进行评价。选取国内近年来几个代表性的城市水系连通性评价研究案例,对其指标选用进行总结,发现对于水系连通性评价指标的选用较为复杂,不同学者侧重点有所不同,详见表 1。其中:水系格局方面主要是以河网密度来描述区域水系的河流特征,水面率和河频率的选用也

相对较多^[6,9,11];结构连通性方面更多基于景观生态学和图论理论进行评价,主要采用水系连通度指标来评价水系的结构连通性^[8,12],部分学者基于河流分级标准^[9]或从定性角度^[14]采用能够反映河道自身结构属性的指标,以衡量水系结构连通性强弱;水力连通性方面只有个别学者有所涉及,指标选用也相对欠缺,几乎忽略了水力连通性对城市水系连通的影响。为定量评价平原城市河网的水系连通状况,根据城市水系特点对表 1 中各准则层相应的指标进行筛选或改进,构建一套适合平原城市河网的水系连通性评价体系。为提高城市水系连通性评价体系适用性、兼顾资料获取难易等情况,将表 1 中评价指标按照使用频率进行排序后分为必选指标与可选指标,方便在不同研究区域进行评价时能够灵活选取。考虑到水力连通性对河网水系的影响,建议在构建水系连通性评价体系时至少选取一个水力连通性指标。

表 1 城市水系连通性评价体系指标

Tab. 1 Index of urban water system connectivity evaluation system

目标层	准则层	指标层	孟祥永等 ^[12]	周振民等 ^[6]	窦明等 ^[7]	夏敏等 ^[8]	傅春等 ^[9]	崔广柏等 ^[14]	李普林等 ^[10]	马栋等 ^[11]	李景保等 ^[15]	
水系格局		水面率*	×	√	√	×	√	×	√	×	×	
		河网密度*	√	√	√	√	√	×	√	×	×	
		河频率*	√	√	×	×	√	×	√	×	×	
		河道槽蓄量	×	×	√	×	×	×	×	×	×	
水系连通性	结构连通性	水系环度*	×	×	√	×	×	×	√	×	√	
		节点连接率*	×	×	√	×	×	×	√	×	√	
		水系连通度*	√	×	√	√	×	×	√	×	√	
		边连通度	×	√	×	×	×	×	×	×	√	×
		河网复杂度	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×
		河网发育系数	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×
		河道断面尺寸	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×
		河道功能定位	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×
水力连通性		河道空间位置	×	×	×	×	×	√	×	×	×	
		流速	×	×	×	×	×	√	×	×	×	
		水流动势	√	×	×	×	×	×	×	×	×	
		河道输水能力	√	×	×	×	×	×	×	×	×	
		河道换水周期	×	×	×	×	×	√	×	×	×	
		水位	×	×	×	×	×	×	×	×	√	

注:带*的指标为必选指标,其余为可选指标。

2.1.1 水系格局评价

现有的水系格局指标主要从河流地貌学等角度出发,采用河网密度、水面率、河频率反映水系的形态特征。河网密度、河频率分别表示单位面积上河流的长度和数量,水面率反映区域水域面积的大小,3 项指标虽能表征区域的水系规模,但侧重点均局

限于静态的反映水系的发展现状。对于动态评价方面,如河道能否发挥其容蓄洪水的作用等方面有所欠缺,导致目前人们改造城市河流水系对河网产生的负面影响存在很多未知。城市水系不同于一般水系,在城市发展建设的同时应重点兼顾城市水系防洪排涝等问题。河道槽蓄量是评价河道防洪排涝能

力的重要指标,可以直接反映河网容蓄洪水量及水资源调度能力^[16]。鉴于此,在静态评价基础上增加动态评价,计算河道槽蓄量。综合考虑静态和动态两方面因素,选取水面率、河网密度、河频率和河道槽蓄量^[6,8,12]4项指标,更全面地评价城市水系的形态特征。

2.1.2 结构连通性评价

平原城市河网水系密布、水流运动复杂,并且地势平坦、河道水流流向不定,加之城市水系人工改造程度高,不符合 Horton、Strahler 等^[17]提出的河流分级规律,而人为根据河流宽度进行水系分级时主观性较强,并且缺乏足够的经验,因此采用基于河流分级准则的河网复杂度、河网发育系数等指标来评价平原城市河网水系结构连通性明显不足。图论理论中边连通度主要适用于分析同一研究区不同年份河网连通性的变化特征^[6];崔广柏等^[14]只侧重于从定性角度分析河道级别的高低。为将结构连通性以量化形式体现,引入网络结构连通性,其来源于景观生态学中景观生态网络连接度的概念^[18],依据图论理论^[19]对区域河网内水系进行结构连通性评价。目前,多指标评价法是景观生态网络连接度的常用评价方法,依据网络结构中“点-线”的数量关系来评价结构连通性。景观生态网络连接度一般采用节点度数、廊道密度、水系环度、节点连接率和水系连通度等指标,节点度数一般不用于水系连通,廊道密度等同于水系格局准则层下的河网密度^[20],加之城区河网水系复杂,网络结构中点、线数量较多,在选取指标时应将点与点、线与线、点与线之间的关系对网络结构的影响因素都包含其中。鉴于此,选取水系环度(α 指数)、节点连接率(β 指数)和水系连通度(γ 指数)^[7-8,21]来进行结构连通性评价。因此,结构连通性评价方法体现了水系图中点、线之间的相互联系,适用于平原城市河网水系结构连通性评价。

2.1.3 水力连通性评价

水系连通性应包括水系格局、结构连通性和水力连通性^[2]。水力连通性与结构连通性密切相关,结构连通性是水系连通调控的基础,而水力连通性是水系连通的内在目标,良好的结构连通性有利于河网的规划、修建合理的水利工程,从而提高水力连通性^[20]。现有研究往往着重于河网结构的特征变化,而忽略水体流动能力的强弱,故本文在结构连通性基础上,充分考虑水体流动能力对水系连通性的

影响,采用流速、水流动势、水位3个指标进行水力连通性评价。其中:流速取河网各河段的平均流速,由于平原城市河网地势平坦、流速平缓,因此在一定程度上可认为河道平均流速越大,河网各河段之间水流置换效果越佳,水力连通性越强^[14];水流动势可反映水体流动能力的强弱^[12],与河道坡降、河道断面形态等有关,坡降决定了水体流速,河道断面形态决定了水体体积;对于不同区域水系的地形、地貌、土壤和气候等都有所差异,因此对于水体流动能力的定量计算方法也就有所差异,而本区域属于平原河网区,地势平坦、流速平缓,水位高低直接反映了各水系的水体流动能力,故采用水位来量化水力连通能力。李景保等^[15]用两个水位站点之间的水位差来表征水力连通能力,其计算公式为

$$C = \frac{1}{|\Delta Z| + 1} \quad (1)$$

式中: C 为同一河流上下游水位站点之间的水力连通能力, m^{-1} ; ΔZ 为两站点之间的水位差, m 。但此方法只能计算一条河流内的上下游水力连通能力,对于整个河网则无法计算。为定量计算平原城市河网的水力连通能力,将该方法进行改进为

$$C_h = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta Z_i| + 1} \quad (2)$$

式中: C_h 为整个河网各河段的平均水力连通能力, m^{-1} ; $|\Delta Z_i|$ 为第*i*条河段上下游站点之间的水位差, m ; N 为整个河网的河段总数,条。

2.1.4 水系连通性评价体系构建

为改善城市水资源短缺等问题,通过比选不同水系连通方案的水系连通效果来确定水系连通最优方案,因此以水系连通最优方案为目标层,以水系格局、结构连通性、水力连通性为准则层,以10项评价指标为指标层,构建水系连通性评价体系见表2。

2.2 水系连通评价指标计算方法

2.2.1 图论法

将河网水系中河流交汇点定义为水系图模型中的节点,将连接节点之间的河流定义为水系图模型中的河链,从而将河网水系概化为由节点和河链共同组成的图形^[9]。采用图论法可以获取区域水网河流长度、河流数量、节点数及河链数,从而对结构连通性准则层下各指标进行计算。

表 2 平原城市河网水系连通性评价体系

Tab. 2 Evaluation system of water system connectivity of plain urban river network

目标层	准则层	指标层	计算公式	物理意义
水系格局		水面率/%	$S = \frac{A_w}{A_r}$	反映区域水域面积大小
		河网密度/(km·km ⁻²)	$D = \frac{L}{A_r}$	反映区域河流长度的发育程度
		河频率/(条·km ⁻²)	$R = \frac{N}{A_r}$	反映区域河流数量的发育程度
		河道槽蓄量/10 ³ m ³	—	反映区域水系水资源存储能力的大小
水系连通最优方案	结构连通性	水系环度	$\alpha = \frac{n-v+1}{2v-5}$	反映河网中每个节点物质能量交换能力
		节点连接率	$\beta = \frac{n}{v}$	反映河网水系中每个节点连接水系强弱的能力
	水系连通度	$\gamma = \frac{n}{3(v-2)}$	反映河网水系之间连通性强弱和水分输移的能力	
	河道平均流速/(m·s ⁻¹)	$V = \sum_{i=1}^N V_i / N$	反映河网中各河段水系的平均流速	
	水力连通性	水流动势/J	$E_p = \frac{\rho_w g \sum \frac{h_i(h_{i上} - h_{i下}) D_i}{L_i}}{2A_r}$	反映河网水系水体的流动能力
		水力连通能力/m ⁻¹	$C_h = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta Z_i + 1}$	反映河网河道的水力连通能力

注: A_r 为研究区域面积, km²; A_w 为研究区域水面面积, km²; L 为研究区域河流总长度, km; N 为研究区域河流数量, 条; n 、 v 分别为水系图模型中的河链数和节点数; V 为河道平均流速, m/s; V_i 为第 i 条河段的平均流速, m/s; ρ_w 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; h_i 为第 i 条河段的平均水深, m; $h_{i上}$ 、 $h_{i下}$ 分别为第 i 条河段的初、末断面水位, m; D_i 为第 i 条河段的水面面积, m²; L_i 为第 i 条河段的长度, m。

2.2.2 水动力数学模型

采用水动力数学模型计算水力连通性准则层下各指标。由于研究区域河网复杂, 河流实测资料有限, 选取与本区域类似、同属海河流域的某小运河段进行模型参数率定, 小运河段全衬砌段和非衬砌段糙率分别为 0.015 和 0.025, 本模型中大皮营引渠为全衬砌段, 故糙率取 0.015, 其他河段为非衬砌段, 糙率取 0.025。小运河段设计流量 50 m³/s, 下游设计水位为 31.25 m, 以此为边界条件对模型进行验证。小运河段计算水深和设计水深对比见图 2, 其最大误差 0.160 m, 均方根误差 REMS 为 6.640%, 计算水深和设计水深拟合效果好, 该水动力模型可以用于河流水动力数值模拟。模型控制方程为非恒定流 Saint-Venant 方程组, 采用加权四点隐格式有限差分法求解。

连续性方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (4)$$

式中: q_1 为单位长度侧向入流量, m²/s; Q 为流量, m³/s; t 为时间, s; v 为流速, m/s; x 为纵轴坐标, m; g 为重力加速度, m/s²; A 为过水断面面积, m²; Z 为水位, m; $S_f = Q|Q|/K^2$, m³/s; K 为流量模数。

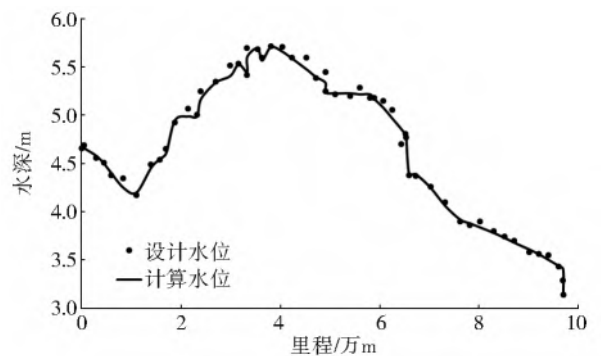


图 2 小运河段计算水深与设计水深对比

Fig. 2 Comparisons between calculated and designed water depths of Xiaoyunhe section

2.3 水系连通性评价方法

已有水系连通性评价研究多基于某些指标进行水系连通性评价^[8], 而仅通过指标值对水系连通性进行评价缺乏综合性可能存在某一方面指标较优, 而另一方面指标较劣的现象。为综合评价不同方案

的水系连通性,采用综合评价法对 10 项指标赋权,进而对不同水系连通方案进行综合评价。

2.3.1 指标权重计算

目前,层次分析法和熵权法在确定指标权重时应用较为广泛。层次分析法基于个人定性观点,通过建立层次树模型对各层指标进行相对重要程度的比较,从而确定指标权重,属于主观赋权法^[22]。熵权法基于指标数值,定量计算各指标对应的熵值,进而得到各指标对应的熵权,属于客观赋权法^[23]。主观赋权法人为因素影响较大,主观性较强,而客观赋权法完全依赖数据自有特征,容易忽略指标特性。为解决主、客观权重计算方法存在的问题,在确定评价指标权重时采用 AHP-熵综合权重法^[24],权重计算过程如下:

AHP 权重计算。计算公式为

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (5)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (6)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; m 为判断矩阵的阶数; R_1 为一致性指标标准值。若 $C_R < 0.1$,则检验通过。借助 MATLAB 程序计算 λ_{\max} 对应的特征向量,得到各层次元素权重。将各层次元素权重相乘即可得到评价指标相对准则层的权重,即 AHP 权重。

熵权计算。首先对评价指标数值进行归一化处理,得到归一化矩阵,然后定量计算各评价指标对应的熵值,得到指标对应的熵权。

指标归一化处理。计算公式为

$$\text{正向指标 } x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (7)$$

$$\text{负向指标 } x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (8)$$

式中: $x(i, j)$ 为第 i 个评价方案第 j 个评价指标归一化后的值; $x_{\max}(j)$ 和 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个评价指标的最大值和最小值; $x^*(i, j)$ 为第 i 个评价方案第 j 个评价指标的实际值。

熵值计算公式为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^N f_{ij} \ln f_{ij} \quad (9)$$

$$f_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{i=1}^N g_{ij}} \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{\ln N} \quad (11)$$

式中: H_j 为评价指标 j 的熵值,在此假定当 $f_{ij} = 0$

时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; g_{ij} 为评价指标的归一化矩阵; k 为玻尔兹曼常量; N 为评价方案的总个数。

熵权计算公式为

$$w'_j = \frac{1 - H_j}{M - \sum_{j=1}^M H_j} \quad (0 \leq w'_j \leq 1, \sum_{j=1}^M w'_j = 1) \quad (12)$$

式中: M 为评价指标的总个数。

综合权重计算(AHP-熵权法)。将 AHP 法计算得到的指标权重值记为 w^* ,熵权法计算得到的指标权重记为 w' ,评价指标的个数记为 $j(j=1, 2, \dots, M)$,计算得出的综合权重

$$w_j = \frac{(w'_j w_j^*)^{0.5}}{\sum_{j=1}^M (w'_j w_j^*)^{0.5}} \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (13)$$

2.3.2 综合评价步骤

通过各方案评价指标数值建立初始决策矩阵 \mathbf{X} ,根据式(14)对矩阵 \mathbf{X} 进行标准化处理得到规范化矩阵 \mathbf{Y} ;由评价指标权重计算结果得到权重矩阵 \mathbf{W} ;通过规范化矩阵 \mathbf{Y} 和权重矩阵 \mathbf{W} 计算得出决策值矩阵 \mathbf{V} ,即 $\mathbf{V} = \mathbf{Y}\mathbf{W}$ ^[25-26]。设连通方案有 N 个,每个待评价方案有 M 个评价指标, x_{ij} 代表第 i 个待评价方案中的第 j 个指标值,则初始决策矩阵 \mathbf{X} 、规范化矩阵 \mathbf{Y} 、权重矩阵 \mathbf{W} 及决策值矩阵 \mathbf{V} 分别表示为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NM} \end{pmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NM} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdots \\ w_M \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}\mathbf{W} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdots \\ w_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdots \\ z_N \end{pmatrix}^T$$

指标标准化计算公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij} + \min x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

2.4 水系连通方案拟定

根据研究区域的相关规划,对污染较严重的胜

利支渠、胜丰支渠与小刘庄支渠进行疏通或填埋等改造工程。在 3 条支渠水流方向为自流的前提下, 初拟 8 种水系连通工况, 各工况条件见表 3。

表 3 关键支渠不同启闭工况

Tab. 3 Working conditions of different opening and closing of key branch canal

连通工况	胜利支渠	胜丰支渠	小刘庄支渠
工况一	—	—	—
工况二	—	✓	✓
工况三	✓	—	✓
工况四	✓	✓	—
工况五	—	✓	—
工况六	✓	—	—
工况七	—	—	✓
工况八	✓	✓	✓

注:“✓”表示支渠连通;“—”表示支渠关闭。

用水动力数学模型进行模拟, 从而得到各工况河网的水面率及河道槽蓄量, 在此基础上进一步统计各河道流速、上下游水位等计算结果并对水力连通性指标进行计算。各工况水系连通性评价指标计算结果见表 4。

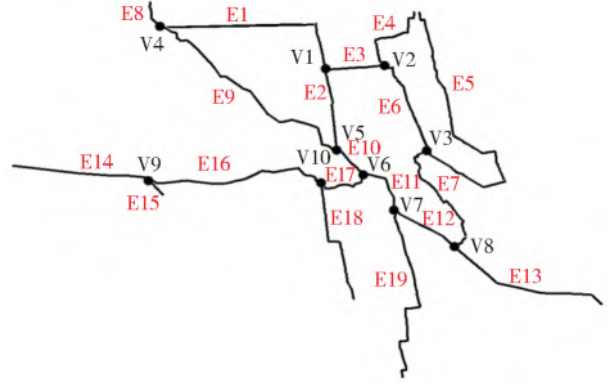


图 3 工况一水系模型

Fig. 3 Water system model diagram of working condition 1

3 结果与讨论

3.1 水系连通评价指标计算结果

基于 GIS 平台分别构建 8 种连通工况的水系图模型, 其中工况一的水系模型见图 3。采用图论法统计各工况对应河网的河流长度、河流数量、节点数及河链数, 对水系格局准则层的河网密度、河频率及结构连通性准则层各指标进行计算。同时, 基于研究区域基础数据, 对研究区域进行水量平衡分析确定水动力数学模型边界条件, 其中工况二水动力模型见图 4。在相同流量边界条件下, 应



图 4 工况二水动力模型

Fig. 4 Hydrodynamic model diagram of working condition 2

表 4 各工况水系连通性评价指标计算结果

Tab. 4 Calculation results of water system connectivity evaluation indexes under various working conditions

准则层	指标层及单位	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
水系格局	水面率/%	0.370	0.376	0.384	0.383	0.372	0.380	0.373	0.386
	河网密度/(km · km ⁻²)	0.171	0.183	0.182	0.181	0.176	0.175	0.178	0.188
	河频率/(条 · km ⁻²)	0.020	0.027	0.027	0.027	0.023	0.023	0.023	0.030
	河道槽蓄量/10 ³ m ³	1 217.98	1 225.33	1 280.65	1 273.77	1 217.66	1 273.77	1 224.53	1 281.45
结构连通性	水系环度	0.667	0.522	0.522	0.522	0.579	0.579	0.579	0.481
	节点连接率	1.900	1.786	1.786	1.786	1.833	1.833	1.833	1.750
	水系连通度	0.792	0.694	0.694	0.694	0.733	0.733	0.733	0.667
水力连通性	河道平均流速/(m · s ⁻¹)	0.158	0.149	0.148	0.151	0.155	0.154	0.152	0.169
	水流动势/J	8.701	8.758	8.811	8.927	8.787	8.841	8.671	10.127
	水力连通能力/m ⁻¹	0.550	0.551	0.565	0.548	0.541	0.557	0.558	0.587

3.2 水系连通方案评价结果

对各层次评价指标进行比较, 定性分析确定指标的相对重要程度, 建立判断矩阵, 对依据定性观点构成的判断矩阵进行检验, 满足一致性检验^[23], 说

明判断矩阵的一致性可以接受, 指标赋权结果可靠。本研究在咨询海河流域专家的基础上, 将水系格局、结构连通性和水力连通性 3 个准则层及各准则层下属指标赋予相同权重, 进而得出准则层相对于目标

层权重向量为 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$,水系格局、结构连通性与水力连通性下属指标层相对准则层权重向量分别为 $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}$ 和 $\frac{1}{3}$,计算结果表明所构建的判断矩阵可以通过一致性检验。为避免单一应用主观权重带来的误差,将各指标层权重分别与其对应的准则层权重相乘得到各指标 AHP 权重;对表 4 中指标数值进行归一化分析,得到归一化矩阵,进而定量计算各指标熵值和熵权。根据式(13),由 AHP 权重和熵权权重计算综合权重,结果见表 5。

表 5 水系连通性评价指标权重计算结果
Tab. 5 Weight calculation results of water system connectivity evaluation index

准则层	指标层	权重		
		AHP	熵权	综合权重
水系格局 ($\frac{1}{3}$)	水面率($\frac{1}{4}$)	0.083	0.083	0.085
	河网密度($\frac{1}{4}$)	0.083	0.060	0.072
	河频率($\frac{1}{4}$)	0.083	0.058	0.071
	河道槽蓄量($\frac{1}{4}$)	0.083	0.137	0.109
结构连通性 ($\frac{1}{3}$)	水系环度($\frac{1}{3}$)	0.111	0.077	0.094
	节点连接率($\frac{1}{3}$)	0.111	0.073	0.092
	水系连通度($\frac{1}{3}$)	0.111	0.076	0.094
水力连通性 ($\frac{1}{3}$)	河道流速($\frac{1}{3}$)	0.111	0.119	0.117
	水流动势($\frac{1}{3}$)	0.111	0.229	0.163
	水力连通能力($\frac{1}{3}$)	0.111	0.089	0.102

参考关于水系连通评价指标等级划分的相关研究^[21,27-28],制定适用于本区域的水系连通等级划分标准。根据指标值计算结果将其划分为 I~X 共 10 个等级,表示水系连通效果逐渐降低,各指标等级划分标准见表 6。将指标等级标准值进行标准化处理,结合评价指标综合权重计算结果,得到适用于本区域的水系连通等级分界线值,其中 9 项等级分界线值由高到底依次为:0.536、0.527、0.518、0.509、0.500、0.490、0.481、0.472、0.463。对表 4 指标数值进行标准化处理得到规范化矩阵 Y,根据表 5 得到权重矩阵 W,利用规范化矩阵 Y、权重矩阵 W 计算得到决策值矩阵 V,见式(15)至(17)。各工况最终的决策值与其对应的评价等级结果见表 7。

$$Y = (0.490 \ 0.477 \ 0.404 \ 0.487 \ 0.581 \ 0.521 \ 0.543 \ 0.498 \ 0.463 \ 0.488 \ 0.497 \ 0.510 \ 0.532 \ 0.490 \ 0.454 \ 0.489 \ 0.476 \ 0.470 \ 0.466 \ 0.488 \ 0.507 \ 0.508 \ 0.532 \ 0.512 \ 0.454 \ 0.489 \ 0.476 \ 0.467 \ 0.469 \ 0.501 \ 0.506 \ 0.505 \ 0.532 \ 0.510 \ 0.454 \ 0.489 \ 0.503 \ 0.476 \ 0.475 \ 0.486 \ 0.493 \ 0.492 \ 0.468 \ 0.487 \ 0.504 \ 0.502 \ 0.503 \ 0.489 \ 0.467 \ 0.480 \ 0.503 \ 0.490 \ 0.468 \ 0.510 \ 0.504 \ 0.502 \ 0.503 \ 0.486 \ 0.470 \ 0.494 \ 0.494 \ 0.495 \ 0.468 \ 0.490 \ 0.504 \ 0.502 \ 0.503 \ 0.479 \ 0.461 \ 0.495 \ 0.510 \ 0.523 \ 0.596 \ 0.513 \ 0.419 \ 0.479 \ 0.457 \ 0.533 \ 0.539 \ 0.520)^T \quad (15)$$

$$W = (0.085 \ 0.072 \ 0.071 \ 0.109 \ 0.094 \ 0.092 \ 0.094 \ 0.117 \ 0.163 \ 0.102)^T \quad (16)$$

$$V = YW = (0.495 \ 0.494 \ 0.488 \ 0.488 \ 0.487 \ 0.492 \ 0.487 \ 0.509)^T$$

表 6 水系连通评价指标体系等级划分标准

Tab. 6 Classification standard of water system connectivity evaluation index system

指标位	水面率/ %	河网密度/ (km·km ⁻²)	河频率/ (条·km ⁻²)	河流槽蓄量/ (10 ³ m ³)	水系环度	节点 连接率	水系 连通度	河道流速/ (m·s ⁻¹)	水流 动势/J	水力连 通能力/m ⁻¹
I	≥0.386	≥0.187	≥0.028	≥1 218.452	≥0.665	≥1.902	≥0.795	≥0.172	≥10.127	≥0.589
II	0.384~ 0.386	0.185~ 0.187	0.027~ 0.028	1 273.478~ 1 281.452	0.642~ 0.665	1.883~ 1.902	0.779~ 0.795	0.169~ 0.172	9.945~ 10.127	0.583~ 0.589
	0.382~ 0.384	0.183~ 0.185	0.026~ 0.027	1 265.504~ 1 273.478	0.619~ 0.642	1.864~ 1.883	0.763~ 0.779	0.166~ 0.169	9.763~ 9.945	0.577~ 0.583
IV	0.380~ 0.382	0.181~ 0.183	0.025~ 0.026	1 257.530~ 1 265.504	0.596~ 0.619	1.845~ 1.864	0.747~ 0.763	0.163~ 0.166	9.581~ 9.763	0.571~ 0.577
	0.378~ 0.380	0.179~ 0.181	0.024~ 0.025	1 249.556~ 1257.530	0.573~ 0.596	1.826~ 1.845	0.731~ 0.747	0.160~ 0.163	9.399~ 9.581	0.565~ 0.571
VI	0.376~ 0.378	0.177~ 0.179	0.023~ 0.024	1 241.582~ 1 249.556	0.550~ 0.573	1.807~ 1.826	0.715~ 0.731	0.157~ 0.160	9.217~ 9.399	0.559~ 0.565
	0.374~ 0.376	0.175~ 0.177	0.022~ 0.023	1 233.608~ 1 241.582	0.527~ 0.550	1.788~ 1.807	0.699~ 0.715	0.154~ 0.157	9.035~ 9.217	0.553~ 0.559
VIII	0.372~ 0.374	0.173~ 0.175	0.021~ 0.022	1 225.634~ 1 233.608	0.504~ 0.527	1.769~ 1.788	0.683~ 0.699	0.151~ 0.154	8.853~ 9.035	0.547~ 0.553
	0.370~ 0.372	0.171~ 0.173	0.020~ 0.021	1 217.660~ 1 225.634	0.481~ 0.504	1.750~ 1.769	0.667~ 0.683	0.148~ 0.151	8.671~ 8.853	0.541~ 0.547
X	<0.370	<0.171	<0.020	<1 217.660	<0.481	<1.750	<0.667	<0.148	<8.671	<0.541

表 7 各工况决策值与其对应评价等级

Tab. 7 The decision values of each working condition and its corresponding evaluation grade

工况	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
决策值	0.495	0.494	0.488	0.488	0.487	0.492	0.487	0.509
评价等级	VI	VI	VII	VII	VII	VI	VII	IV

3.3 最优连通方案分析

对评价体系中水系格局准则层下新增的河道槽蓄量以及水力连通性准则层下改进的水力连通能力两项指标评价结果进行初步分析,利用 SPSS 软件采用双变量相关分析法分析指标间的相关性,趋势分析结果见图 5、图 6,相关性分析结果见表 8。河道槽蓄量、水力连通能力分别与能反映水系格局和水力连通性的水面率、水流动势变化趋势基本一致,河道槽蓄量与水面率、水力连通能力与水流动势两对指标间的相关系数分别为 0.957、0.836,指标间均呈高度相关关系,且显著性系数均小于 0.05,表明两对指标间相关关系显著。指标相关性分析结果说明新增的河道槽蓄量和改进的水力连通能力均适用于平原城市河网水系连通性评价体系。

表 8 评价指标相关性分析

Tab. 8 Correlation analysis of evaluation indexes

评价指标		参数	
新增/改进指标	典型指标	r	a
河道槽蓄量	水面率	0.957**	0.000 2
水力连通能力	水流动势	0.836**	0.010 0

注: r 为相关系数; a 为显著性系数。 $r>0$,变量间正相关; $r<0$,变量间负相关; $r=0$,变量间不相关。其中: $r\leq 0.3$,微弱相关; $0.3<r\leq 0.5$,低度相关; $0.5<r\leq 0.8$,显著相关; $0.8<r\leq 1$,高度相关。若 $a<0.05$,说明变量间显著相关。**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从水系格局评价结果可以看出:工况八的 4 项指标均处于最高水平,说明在开启 3 条支渠后,河网的水系规模最大;其中,河道槽蓄量、水面率分别较关闭 3 条支渠后提高 5.21%、4.32%,河网存储水资源能力增强。表 4 中结构连通性评价结果表明:工况一在关闭 3 条支渠后,水系环度、节点连接率、水系连通度最大,分别达到 0.667、1.900、0.792,其结构连通性最强;工况八在开启 3 条支渠后,结构连通性最弱,3 项指标分别降低至 0.481、1.750、0.667。这是由于结构连通性准则层下指标数值与水系节点数与河链数密切相关,如水系连通度是由水系图的连接河段数与最大可能连接河段数之比计算得到,能够反映河网水系之间连通性强弱和水分输移能力。从结构连通性角度而言,当 3 条支渠均连通时,水系网状结构相对复杂,在节点增多的同时,其最大可能连接河段数也在增多,导致节点未能充分发挥连接河段的能力。此外,平原城市河网水系人工改造程度高,受人类活动影响显著。新开部分河道后,河流间水流交汇困难,因此结构连通性较差。表 4 中工况八的河网平均流速最大,为 $0.169 \text{ m}^3/\text{s}$,高于其他工况约 7%~14.2%,水力连通能力明显增强。其中:水流动势较最低工况提高 16.4%,这说明水系连通能够促进河流间的水动力交换,将所有河网支渠进行连通后,水流循环更加通畅,河流间水流置换效果更佳,河网调蓄能力有所增强;同时由于地形等因素影响,连通后的水系具有较好的水动力条件。

由各工况的评价结果可知,不同的工况在水系格局、结构连通性和水力连通性 3 个准则层均存在差异。以往研究多通过指标值评价方案在某一准则

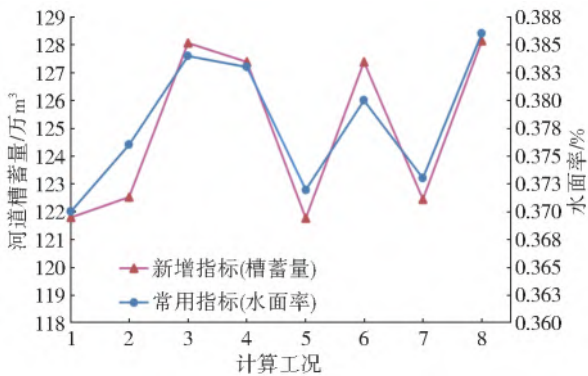


图 5 廊坊市水系格局新增指标变化趋势

Fig. 5 Change trend chart of new indicators of water system pattern in Langfang

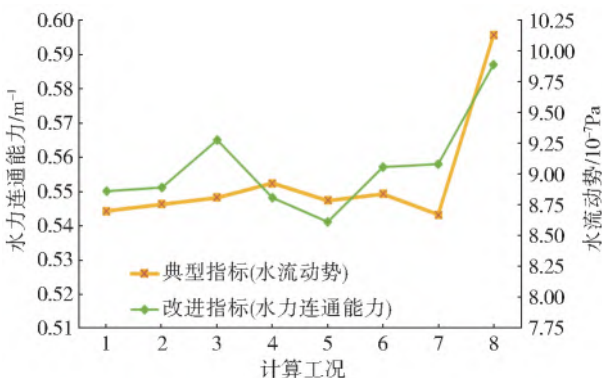


图 6 廊坊市水力连通性改进指标变化趋势

Fig. 6 Change trend chart of hydraulic connectivity improvement index in Langfang

层的连通状况,例如工况一水力连通性较差,但其结构连通性最强,而工况八反之。需要指出的是,并非在所有水系连接的情况下区域河网水系结构连通性最好,而本研究得到的水系连通最优方案其结构连通性也并非最优,这也说明不能仅依靠结构连通性下指标大小决定各方案水系连通情况,需要从多个准则层出发选取相关指标构建河网水系连通性评价体系。因此,为兼顾水系连通性 3 大准则层,采用综合评价法对各项指标赋权,进而对各工况进行综合评价,结合式(17)中综合评价得分值和等级分界线值得:工况八得分值为 0.509,连通等级为Ⅳ级,连通效果最优;工况五、工况七得分值为 0.487,连通等级为Ⅶ级,连通效果最差;其他工况连通等级介于两者之间。可见,由于所有水系连通后河网规模较大,所带来的水系格局与水动力交换优势在一定程度上弥补了水系网状结构复杂造成的结构连通性不足。需要说明,由于区域水系连通目标与关注指标的侧重点不同,在不同研究区域或同一研究区域不同指标赋权结果下,最优连通方案可能会存在差异。

综上,确定工况八为廊坊城区水系连通最优方案,建议河网在输水过程中开启胜利支渠、胜丰支渠和小刘庄支渠,并根据当地实际情况分别对污染严重的 3 条支渠进行相应的疏通和清淤,以提高整个河网的水系连通性。

4 结 论

围绕平原城市河网水系连通性评价问题,在总结相关研究案例基础上,构建了包含水系格局、结构连通性和水力连通性 3 大准则层共 10 项指标的能够反映平原城市河网水系特点的水系连通性评价体系。研究结论如下:

该体系能够较全面地进行平原城市河网水系连通性评价,综合反映不同水系连通方案的水系连通状况。其中水系格局指标反映了城区河网水系的特征,新增的河道槽蓄量与水面率指标间呈显著相关性,其能够较好地反映河网水系存储水资源的能力。

水力连通性指标可反映水系水体流动性,对水力连通性准则层中水力连通能力指标计算方法进行了改进,使其适用于整个河网计算,弥补了以往该项指标只适用于单条河流计算的局限性,但在今后的研究中仍需加强该指标在其他城区水系的应用研究。

针对仅通过指标值评价水系连通状况不能兼顾多因素影响的局限性,基于水系连通性评价体系,采用 AHP-熵综合评价法从水系格局、结构连通性和水力连通性 3 方面对不同水系连通方案进行评价,

得到不同水系连通方案的最终评价得分值,以确定水系连通最优方案,并对整个河网提出合理的规划建议。

通过综合评价法确定工况八为廊坊城区水系连通最优方案,即将 3 条污染严重的河道与其他河道进行连通后河网整体连通效果最优。目前河网内该 3 条河道已通水,周边水质已有所改善,而本文由于水质资料有限并未对连通前后该区水质情况进行模拟,故今后研究中可进一步分析连通该 3 条河道后可能会对河网造成的污染扩散风险。

参考文献(References):

- [1] 韩龙飞,许有鹏,杨柳,等.近 50 年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J].地理学报,2015,70(5):819-827. (HAN L F, XU Y P, YANG L, et al. Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces during 1960s-2010s[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 819-827. (in Chinese))
- [2] 符传君,陈成豪,李龙兵,等.河湖水系连通内涵及评价指标体系研究[J].水力发电,2016,42(7):2-7. (FU C J, CHEN C H, LI L B, et al. Research on the connectivity connotation and evaluation index systems of river and lake water systems[J]. Water Power, 2016, 42(7): 2-7. (in Chinese))
- [3] 赵军凯,李立现,张爱社,等.再论河湖连通关系[J].华东师范大学学报(自然科学版),2016,1(4):118-128. (ZHAO J K, LI L X, ZHANG A S, et al. On the connection between rivers and lakes again[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2016, 1(4): 118-128. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2016.04.014.
- [4] 维护健康长江,促进人水和谐研究报告[R].武汉:长江水利委员会,2005. (Research report on maintaining healthy Yangtze River and promoting harmony between man and water[R]. Wuhan: Yangtze River Water Resources Commission, 2005. (in Chinese))
- [5] CUI B, WANG C, TAO W, et al. River channel network design for drought and flood control: A case study of Xiaoqing River basin, Jinan City, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3675-3686. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.07.010.
- [6] 周振民,刘俊秀,郭威.郑州市水系格局与连通性评价[J].人民黄河,2015,37(10):54-57. (ZHOU Z M, LIU J X, GUO W. Evaluation of water system pattern and connectivity in Zhengzhou City [J]. Yellow River, 2015, 37(10): 54-57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.

- issn. 1000-1379. 2015. 10. 014.
- [7] 窦明, 靳梦, 牛晓太, 等. 基于遥感数据的城市水系形态演变特征分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 16-21. (DOU M, JIN M, NIU X T, et al. Analysis of urban water system morphological evolution based on remote sensing data[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 16-21. (in Chinese)) DOI:10.14188/j.1671-8844.2016-01-003.
- [8] 夏敏, 周震, 赵海霞. 基于多指标综合的巢湖环湖区水系连通性评价[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 73-77. (XIA M, ZHOU Z, ZHAO H X. Evaluation of water system connectivity in Chaohu Lake region based on multi-index synthesis[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(1): 73-77. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-0504.2017.01.013.
- [9] 傅春, 李云翊, 王世涛. 城市化进程下南昌市主城区水系格局与连通性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1042-1048. (FU C, LI Y Y, WANG S T. Analysis of water system pattern and connectivity in the main urban area of Nanchang during urbanization[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2017, 26(7): 1042-1048. (in Chinese)) DOI:10.11870/cjlyzyyhj201707010.
- [10] 李普林, 陈菁, 孙炳香, 等. 基于连通性的城镇水系规划研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 31-35, 49. (LI P L, CHEN J, SUN B X, et al. Research on urban water system planning based on connectivity [J]. Yellow River, 2018, 40(1): 31-35, 49. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2018.01.008.
- [11] 马栋, 张晶, 赵进勇, 等. 扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 34-40. (MA D, ZHANG J, ZHAO J Y, et al. Quantitative evaluation and improvement measures of water system connectivity in Yangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 34-40. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.06.
- [12] 孟祥永, 陈星, 陈栋一, 等. 城市水系连通性评价体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 24-28. (MENG X Y, CHEN X, CHEN D Y, et al. Study on evaluation system of urban water system connectivity[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(1): 24-28. (in Chinese)) DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.005.
- [13] PHILLIPS R, SPENCE C, POMEROY J. Connectivity and runoff dynamics in heterogeneous basins[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(19): 3061-3075. DOI:10.1002/hyp.8123.
- [14] 崔广柏, 陈星, 向龙, 等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1429-1437. (CUI G B, CHEN X, XIANG L, et al. Evaluation of water environment improvement by river system connection in plain river network area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1429-1437. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20170576.
- [15] 李景保, 于丹丹, 张瑞, 等. 近 61 年来长江荆南三口水系连通性演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1214-1224. (LI J B, YU D D, ZHANG R, et al. Evolution characteristics of river network of the three estuaries of southern Jing River in the past 61 years, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1214-1224. (in Chinese)) DOI:10.11870/cjlyzyyhj201905021.
- [16] 侯鑫, 潘威. 20 世纪 30 年代珠江三角洲平原河网结构重建及最大槽蓄容量[J]. 热带地理, 2015, 35(6): 883-889. (HOU X, PAN W. The structure reconstruction of plain river network and the maximum tank storage capacity of the Pearl River Delta in the 1930s [J]. Tropical Geography, 2015, 35(6): 883-889. (in Chinese)) DOI:10.13284/j.cnki.rddl.002782.
- [17] 魏莹莹, 李一平, 翁晟琳, 等. 太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 553-563. (WEI Y Y, LI Y P, WENG S L, et al. The influence of Taihu basin urbanization on the structure and connectivity of plain river network [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 553-563. (in Chinese)) DOI:10.18307/2020.0223.
- [18] 郭晋平, 周志翔. 景观生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 78-80. (GUO J P, ZHOU Z X. Landscape ecology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 78-80. (in Chinese))
- [19] 赵进勇, 董哲仁, 杨晓敏, 等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 1-6. (ZHAO J Y, DONG Z R, YANG X M, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5): 1-6. (in Chinese)) DOI:10.15928/j.1674-3075.2017.05.001.
- [20] 赵思远, 陈菁, 涂建琴, 等. 城镇化进程中低丘山区水系连通性的初步研究与实践[J]. 中国农村水利水电, 2020(2): 34-39. (ZHAO S Y, CHEN J, TU J Q, et al. Preliminary study and practice of water system connectivity in low hills and mountains during urbanization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(2): 34-39. (in Chinese))
- [21] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 661-672. (HUANG C, CHEN Y H, LI Z W, et al. Optimization

- of water system pattern and connectivity in Dongting Lake district[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 661-672. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2019. 05. 006.
- [22] LIANG R, SONG S, SHI Y, et al. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soil based on the analytic hierarchy process: Assessment system construction and case demonstration[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 618-625. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 06. 150.
- [23] 黎枫, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用: 以塔里木河三源流地区为例[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 723-730. (LI F CHEN Y N, LI W H, et al. The application of set pair analysis method based on entropy weight in the evaluation of sustainable use of water resources: A case study of the three sources of Tarim River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 723-730. (in Chinese))
- [24] GAO X, CHEN L, SUN B, et al. Employing SWOT analysis and normal cloud model for water resource sustainable utilization assessment and strategy development[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1439. DOI: 10. 3390/su9081439.
- [25] 洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 等. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 8016-8027. (HONG H K, LIAO H P, WEI C F, et al. Health evaluation of land use system in ecologically sensitive areas in the Three Gorges Reservoir area based on improved TOPSIS method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 8016-8027. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201406301353.
- [26] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 217-227. (LI C, ZHANG F R, ZHU T F, et al. Land use performance evaluation and correlation analysis based on entropy weight TOPSIS model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese))
- [27] 靳梦, 窦明. 城市化对水系连通功能影响评价研究: 以郑州市为例[J]. *中国农村水利水电*, 2013(12): 41-44. (JIN M, DOU M. Research on the function of interconnected river system network evaluation under the influence of urbanization: Taking Zhengzhou City as an example[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(12): 41-44. (in Chinese))
- [28] 李凯轩, 李志威, 胡旭跃, 等. 洞庭湖区水系连通工程指标体系与评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(6): 6-10. (LI K X, LI Z W, HU X Y, et al. An index system and evaluation method for water network connection projects in Dongting Lake area[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(6): 6-10. (in Chinese))

Water system connectivity evaluation in plain urban river network based on AHP-entropy weight method: A case study of Langfang City

LIANG Xiao¹, JU Wenhui², SUN Bowen¹, HU Ze¹, GAO Xueping¹, ZHANG Jing³, ZHAO Jinyong³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100089, China)

Abstract: Under water conservancy projects control such as gates and pumps, the complex river network in plain cities has a complicated water flow and a blocked water system, which affects its self-purification capacity. Instead, there are diverse factors that affect water system connectivity, makes more uncertain due to the regulation of dam gates. Therefore, the system pattern, structural connectivity, and hydraulic connectivity should be integrally considered to evaluate the connectivity of river networks in plain cities.

Taking the optimal solution of water system connectivity as the target layer and water system pattern, structural connectivity, and hydraulic connectivity as the criterion layer, considering both static and dynamic factors, four indicators of water surface rate, river network density, river frequency, and river channel storage were selected to evaluate the morphological characteristics of urban water system more comprehensively. Water system ring degree, node connection rate, and water system connectivity were selected to evaluate structural connectivity. Based on structural connectivity, the influence of water flow capacity on the connectivity of the water system was fully considered, and three indicators of flow velocity, water flow potential, and water level are used for hydraulic connectivity evaluation. The above 10 evaluation indicators are used as the index layer to build the water system connectivity evaluation system. To comprehensively evaluate the water system connectivity of different schemes, a comprehensive evaluation method is used to assign weights to the 10 indicators, and then to comprehensively evaluate different water system connectivity schemes.

Taking Langfang urban water system as an example, the water system connectivity evaluation system of the plain city river network was constructed to quantitatively evaluate the water system connectivity status of eight water system connectivity schemes. The results showed that there were differences in the three criterion levels of water system pattern, structural connectivity, and hydraulic connectivity for different working conditions. Combining the comprehensive evaluation scores and the grade cut-off values, the optimal water system connectivity solution can be obtained to improve the water system connectivity of the whole river network for Langfang city and could suggest that the river network should open the Shengli branch canal, Shengfeng branch canal, and Xiaoliuzhuang branch canal in the water transmission process, and dredge and desilt of the three branch canals with serious pollution according to the local actual situation.

The system can evaluate the water system connectivity of the plain city river network in a more comprehensive way, and reflect the water system connectivity status of different water system connectivity schemes. The hydraulic connectivity index can reflect the mobility of water bodies in water systems. The calculation method of the hydraulic connectivity index in the hydraulic connectivity criterion layer was improved, so that it can be applied to the whole river network, making up for the limitation that the index was only applicable to the calculation of a single river in the past. To address the limitations, the evaluation of water system connectivity by index values can not take into account the influence of multiple factors, based on the water system connectivity evaluation system. The AHP-entropy integrated evaluation method was used to evaluate different water system connectivity schemes in terms of water system pattern, structural connectivity, and hydraulic connectivity to obtain the final evaluation scores of different water system connectivity schemes, to determine the optimal solution for water system connectivity and to make reasonable planning suggestions for the whole river network. The overall connectivity of the river network is optimal after connecting the three heavily polluted rivers with other rivers.

Key words: water system connectivity; evaluation system; hydraulic connectivity; comprehensive evaluation; plain urban river network

(上接第 337 页)

trend for all the stations, and reaches a 0.05 significant level in Dazhong and Zimei Stations. $R_{25\text{ mm}}$ showed a downward trend for the stations in the exception of the Dongguan and Shanmei Stations while the trend was not significant. The $R_{50\text{ mm}}$ and extreme precipitation intensity indices showed an upward trend in the southeastern part of the basin (Yongchun Station, Huyang Station, Dongguan Station, and Shanmei Station), and the trend was significant. The P_{RCPTOT} had decreased significantly in the northwest of the basin. The GAMLSS model was fitted well to each precipitation station, and the Filliben coefficient passed the 0.05 significance level. $R_{10\text{ mm}}$ and $R_{25\text{ mm}}$ showed stationary characteristics. The $R_{50\text{ mm}}$ showed non-stationary characteristics at 50% of the stations in the basin, and that was dominated by mean non-stationary. Except for P_{RCPTOT} , the other intensity indices mainly showed non-stationary characteristics which mainly manifested as the mean non-stationary. Under the non-stationary conditions, the mean and variance of the extreme precipitation indices was mainly characterized by an increasing trend in the southeastern basin, and mainly showed a decreasing trend in the northwest.

In light of climate variability and anthropogenic activities, the stable environment of extreme precipitation events in the Shanmei reservoir basin had been disturbed. The intensity of extreme precipitation and $R_{50\text{ mm}}$ increased significantly in the Shanmei reservoir basin, especially in the southeastern part of the basin. This showed non-stationary characteristics in the study area. The intensity of extreme precipitations as well as uncertainty would increase, which may lead to more related disasters in the future.

Key words: extreme precipitation; temporal and spatial variation; non-stationarity; GAMLSS model; Shanmei reservoir basin