

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.006

考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用

高学平, 胡 泽, 闫晨丹, 孙博闻

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:在水系形态特征与水系结构连通性基础上,增加了包含水工建筑物数量、下游收水量和换水周期在内的水力连通性评价指标,构建了更加全面的水系连通评价指标体系。通过层次分析与熵权法相结合的综合评价法确定各指标权重,并利用该评价指标体系对廊坊市北运河-永定河区域水网 3 种水系连通方案进行了评价,得到最优水系连通方案。评价结果表明,构建的评价指标体系能够更加全面地表征水系连通情况,可用于河网水系连通评价。

关键词:水系连通评价;水力连通性;区域水网;北运河-永定河

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0041-07

Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity // GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, SUN Bowen (*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Based on the morphological characteristics of water system and the connectivity of water system structure, with the addition of hydraulic connectivity evaluation indexes including the number of hydraulic buildings, downstream water intake and water exchange period, a more comprehensive evaluation index system of water system connectivity was constructed. The weight of each index was determined by the comprehensive evaluation method combining analytic hierarchy process and entropy weight method. The evaluation index system was used to evaluate three water system connectivity schemes of the North Canal and Yongding River regional water network in Langfang City, and the optimal water system connectivity scheme was obtained. The evaluation results show that the constructed evaluation index system can represent the water system connectivity more comprehensively, and the results can provide reference for the water system connectivity evaluation in the river network.

Key words: water system connectivity evaluation; hydraulic connectivity; regional water network; North Canal-Yongding River

河湖水系连通是指通过水库、闸坝、泵站等必要的水利工程维系、修复和构建江河湖库之间的水力联系,调整和优化河湖水系格局,从而形成江河湖库水网体系^[1]。河湖水系连通是提高水资源配置能力的有效途径,是改善河湖生态环境的有效手段,也是增强抵御水旱灾害能力的有力举措^[2]。近年来,日渐增多的河湖水系连通工程,亟须构建能够描述水系连通效果的评价指标体系和方法。Phillips 等^[3]建立了基于水流阻力及水文过程的河流连通评价指标体系来评价河流的水文连通性。Jain 等^[4]认为河流水系连通从属性上可以分成物质疏通和物

理连通,建立了基于河流水系连通的恒河健康评价指标体系。崔广柏等^[5]根据区域特点探索河网水力连通的方法,提出了适用于平原河网地区的水系连通评价指标体系。窦明等^[6-7]从水系形态特征方面用盒维数来描述水系发育情况,从水系结构连通方面用连通度定量评价水系连通程度,并且从水系连通形态和结构形态两个层面构建了一套评价指标体系,用来描述城市化对郑州市水系连通形态格局演变的影响。孟慧芳等^[8]基于水流阻力与水文过程,建立了平原河网河流连通性的评价指标体系,并以鄞东南平原河网为例开展了应用分析。黄草

基金项目: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:高学平(1962—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

通信作者:孙博闻(1987—),男,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

等^[9]从水系格局和水系结构连通性两方面构建了一套评价指标体系,并用该体系对洞庭湖不同片区的现状和规划水系进行了分析与评价。从上述研究可以看出,目前水系连通评价指标体系的构建主要关注水系形态与水系结构连通性,但这些研究中均未考虑水系水力连通性对评价效果的影响。水系水力连通性评价与结构连通性评价有着密切的关系,在河道中建立水闸、大坝和泵站等水工建筑物后,虽然河道在结构上仍处于连通状态,但这些水工建筑物会影响和限制水体中的物质能量传递^[10],并导致水系连通程度也发生变化。

为将水力连通性的作用体现到水系连通评价中,本文在目前常用的水系连通评价指标体系基础上,增加包含水工建筑物数量在内的可体现水系水力连通性的评价指标构建水系连通评价指标体系,并利用该体系对廊坊市北运河-永定河区域水网不同水系连通方案进行评价。

1 水系连通评价指标体系与评价步骤

1.1 水系连通评价指标体系

根据水系连通评价体系构建原则,参考已有研究,在常用的水系形态特征、水系结构连通性评价指标的基础上,增加水系水力连通性评价指标构建水系连通评价指标体系如图 1 所示。

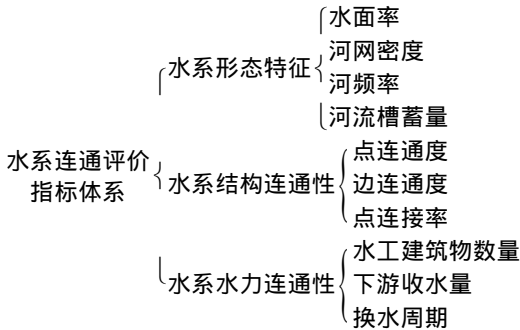


图 1 水系连通评价指标体系

Fig.1 Water system connectivity evaluation index system

a. 水系形态特征评价指标。根据景观生态学中将河流比作廊道的观点,从描述水系本身形态特点的角度出发进行评价指标的选取,用以反映区域当前水系的发育程度和水系本身的形态,选取的指标有水面率、河网密度、河频率以及河流槽蓄量^[7,11]。水面率为区域内河道和湖泊等水体多年平均水位下的水面面积占总面积的比例,反映区域水域面积;河网密度为单位面积河流的总长度,反映区域水系的发育程度;河频率为研究区域内河流数量与区域总面积的比值,反映河网数量的发育程度;河流槽蓄量为区域内河道在设计水位下的蓄水总量,反映区域水系水资源存储能力。

b. 水系结构连通性评价指标。基于图论理论,采用景观生态学中描述廊道之间连通性的一些指标来表征水系的连通情况,选取的指标有连通度和点连接率^[7]。根据区域水系均存在悬挂点的特征,将连通度进一步划分为点连通度和边连通度,采用图论方法中的割点、割边来描述区域水系的连通情况。其中点连通度为水系图模型中割点数与总点数之比,反映水系河流的交汇情况^[12];边连通度为水系图模型中割边数与总边数之比,反映水系的网状程度^[13];点连接率为水系图模型中总边数与总点数的比值,反映节点之间连接的难易程度。

c. 水系水力连通性评价指标。水力连通性对保障平原河网水环境与调水能力十分重要,因此首先选择换水周期^[5]和下游收水量作为水系水力连通性评价指标。换水周期为区域河流槽蓄量与平均流量的比值,能够较好地反映水系的水体质量;下游收水量为单位时间内区域内水系的上游引水量去除河道沿线用水量后能够调入下游的剩余水量,该指标可在一定程度上反映水系从上游向下游的调水能力。此外,水系水力连通性与结构连通性紧密相连,在河道中修建水闸、大坝和泵站等水工建筑物后,虽然河道在结构上仍处于连通状态,但受这些水工建筑物的影响,水系连通度会发生不同程度的变化。在拟定水系水力连通性方面评价指标的过程中应注重水闸、大坝和泵站的影响,这对于保证水系连通性有重要意义,因此将水工建筑物数量作为影响水系连通度的评价指标。

1.2 水系连通评价步骤

a. 制定连通方案。根据研究区域相关规划,结合对现状水系的分析,拟定可行的水系连通方案。

b. 计算评价指标值。水系结构连通性评价指标值通过图论理论建立图模型,在此基础上建立图矩阵,采用 MATLAB 对各方案连通性进行判断,由无向图的连通度计算方法得到;水系水力连通性评价指标值根据河道实测资料,建立水系水动力模型,然后针对河道内生态环境用水进行水量平衡分析得到模型边界条件,进而对水系进行水动力数值模拟得出。一维水动力模型水流运动控制方程为非恒定流 Saint-Venant 方程组,由连续性方程和动量方程构成,一维非恒定流计算时采用加权四点隐格式有限差分法求解 Saint-Venant 方程组。

c. 计算评价指标权重。主观权重法确定权重时主观性因素对权重影响较大;客观权重法没有主观因素的干预,完全依赖数据自有的特征确定权重,但容易忽略评价指标的特性,使得指标权重有可能与指标真实作用程度有所差异。为解决主、客观单

一计算权重方法存在的问题,本文采用层次分析(AHP)-熵综合权重法^[14]确定评价指标权重。

d. 构建决策矩阵。由计算出的各方案评价指标数据构建初始决策矩阵 X , 对其进行标准化处理后得到规范化矩阵 Y , 由评价指标权重的计算结果可以得到权重矩阵 W 。利用规范化矩阵 Y 、权重矩阵 W , 计算得到决策值矩阵 V , 即 $V = YW^{[15-16]}$ 。

e. 评价连通方案。根据等级划分标准值, 形成判断各方案连通性的依据, 从而确定各方案连通性效果, 得到水系连通推荐方案。

2 实例应用

2.1 研究区概况

廊坊市北运河-永定河区域水网涉及廊坊市市区(广阳区、安次区)以及香河县南部, 地处永定河冲积平原, 以平原和洼地为主, 海拔 $0 \sim 20\text{ m}$, 地势平缓。区域地处北温带, 属大陆性季风气候, 四季分明, 多年平均气温为 $11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量为 593.4 mm , 年平均蒸发量为 $1\,909.6\text{ mm}$ 。区域内主要河流有永定河、北运河、龙河和凤河(图2), 水源分布不均, 北运河香河段水量丰沛, 多年平均径流量为 6.84 亿 m^3 , 而城区河段、龙河、永定河泛区水资源短缺, 龙河出境断面多年断流, 永定河断流30年以上。为改变廊坊市区缺水现状, 实施引运济廊水系连通工程十分必要。



图2 研究区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of study area

2.2 评价指标计算

根据《廊坊市城市总体规划(2016—2030)》, 针对区域实际情况, 在现状水系的基础上考虑河渠水系连通性, 在引运济廊主输水河道连通基础上(方案1), 又拟定了两种水系连通方案, 如图3所示。

2.2.1 水系形态特征评价指标

基于研究区概况和区域河道数据, 结合不同方案水系图模型中边的总数, 计算得出水系形态特征评价指标值。



图3 水系连通方案

Fig. 3 Water system connectivity schemes

2.2.2 水系结构连通性评价指标

利用 Google Earth 提取水系, 再通过 ArcGIS 将栅格数据二值化并完成水系的矢量化(图3), 所构建的图模型如图4(图中 e 表示河段概化而成的割边, v 表示河段交汇点概化而成的割点)所示。基于图模型计算水系结构连通性评价指标值。

在水系连通度计算过程中, 发现各方案中均存在悬挂点, 如果将悬挂点或者悬挂点所连接的边删除, 水系就不连通了。根据图论理论中对点连通度和边连通度的定义, 3种方案的整体点连通度和边

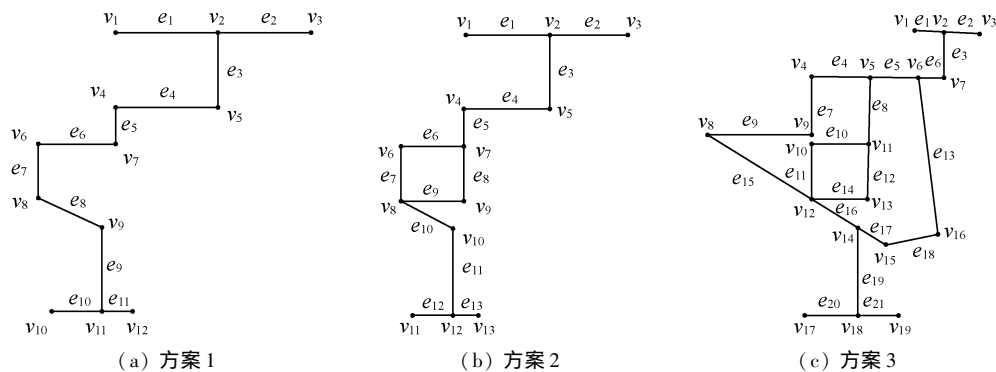


图4 水系连通方案图模型

Fig.4 Diagram model of water system connectivity schemes

连通度均为1。由图模型可知,方案2和方案3均在方案1基础上增加了点与边,中心城区部分水系连通度是存在差异的,但由于图模型的边界没有改变,因此整体水系的点连通度和边连通度没有改变。为判断各方案水系连通程度,采用水系图模型中割点与割边数对方案的连通度进行评价^[17],从而实现不同方案的连通度分析比较。水系点连通度、边连通度及点连接率计算结果见表1。

表1 水系结构连通性评价指标值

Table 1 Evaluation index value of the connectivity of water system structure

水系连通方案	割点数	总点数	割边数	总边数	点连通度	边连通度	点连接率
方案1	8	12	11	11	0.667	1.000	0.917
方案2	7	13	9	13	0.538	0.692	1.000
方案3	5	19	7	21	0.263	0.333	1.105

2.2.3 水系水力连通性评价指标

基于区域地形数据对河道进行断面划分,建立水系水动力模型(图5),然后进行参数率定和模型验证。水工建筑物数量由水系实际水闸、大坝和泵站数量确定,换水周期采用水动力模型流量和水位

计算结果求得,下游收水量通过对研究区域进行水量平衡分析后得出。

由于研究区域下游永定河泛区水资源严重短缺,在进行水系连通方案评价过程中,要保证下游收水量不低于2 000万 m^3 ,因此以下游收水量至少2 000万 m^3 为约束条件,对3种水系连通方案分别进行水量平衡分析,确定上游引水量,进而计算下游收水量。由区域基础数据计算得到3种方案需水量分别为179.064万 m^3 、344.517万 m^3 和799.597万 m^3 。此外还需考虑各方案中主输水河道在承担水系连通调水任务的同时,还要承担分水任务,以供给城市生活、工业和农业用水,主输水河道分水量由《廊坊城市总体规划(2016—2030)》获得,3种方案主输水河道分水量共计10 480万 m^3 ,其中包括凤河上游河段400万 m^3 、永定河2 000万 m^3 等。因此3种方案总需水量分别为10 659.064万 m^3 、10 824.517万 m^3 和11 279.597万 m^3 。根据计算结果,上游引水量取11 280万 m^3 。下游收水量由上游引水量与总需水量相减,再加上永定河2 000万 m^3 的分水量得出,计算结果见表2。各方案10项水系连通评价指标计算结果如表3所示。

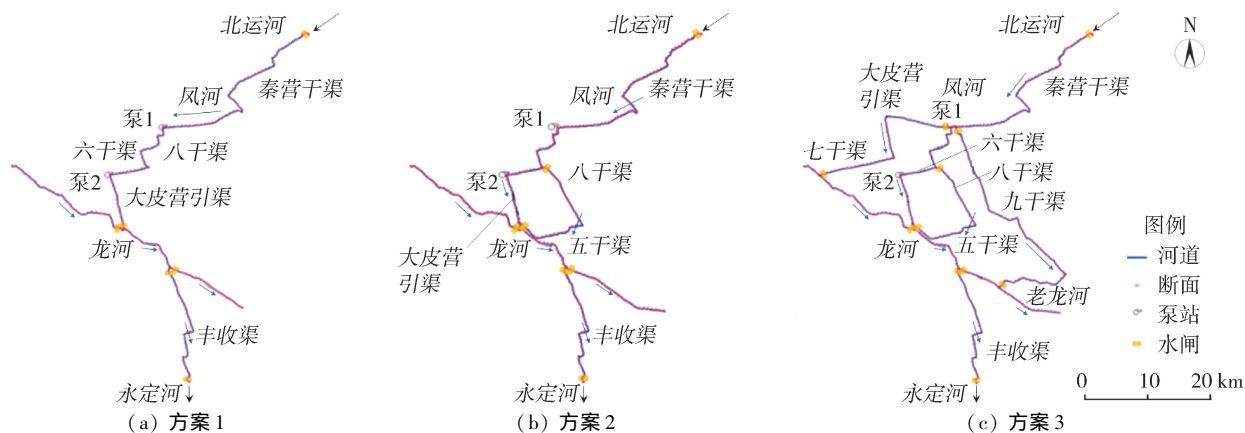


图5 水系水动力模型

Fig.5 Hydrodynamic model of water system

表 2 不同水系连通方案水量分配情况

单位:万 m³

Table 2 Water distribution in different water system connectivity schemes

unit: 10⁴ m³

水系连通方案	上游引水量	主输水河道分水量	需水量	总需水量	永定河分水量	下游收水量
方案 1	11 280	10 480	179. 064	10 659. 064	2 000	2 620. 936
方案 2	11 280	10 480	344. 517	10 824. 517	2 000	2 455. 483
方案 3	11 280	10 480	799. 597	11 279. 597	2 000	2 000. 403

表 3 水系连通评价指标计算结果

Table 3 Calculation results of water system connectivity evaluation index

水系连通方案	水面率/%	河网密度/(km·km ⁻²)	河频率/(条·km ⁻²)	河流槽蓄量/万 m ³	点连通度	边连通度	点连接率	水工建筑物数量/个	下游收水量/万 m ³	换水周期/d
方案 1	0. 493	0. 165	0. 018	786. 709	0. 667	1. 000	0. 917	8	2 620. 936	4. 191
方案 2	0. 556	0. 200	0. 020	838. 713	0. 538	0. 692	1. 000	10	2 455. 483	8. 215
方案 3	0. 722	0. 313	0. 037	1 109. 194	0. 263	0. 333	1. 105	14	2 000. 403	27. 342

2.3 评价指标权重计算

2.3.1 AHP 权重计算

根据 AHP 法^[18] 检验公式,通过对准则层指标构建的判断矩阵进行一致性检验,结果满足一致性要求,说明基于定性观点构建的判断矩阵具有一定的科学性,进而求出准则层水系形态特征、水系结构连通性、水系水力连通性相对目标层水系连通性评价的权重分别为 0.333、0.333 和 0.333;同理水面率、河网密度、河频率、河流槽蓄量相对水系形态特征的权重分别为 0.204、0.346、0.246 和 0.204;点连通度、边连通度、点连接率相对水系结构连通性的权重分别为 0.250、0.500 和 0.250;水工建筑物数量、下游收水量、换水周期相对水系水力连通性的权重分别为 0.328、0.411 和 0.261。将各指标层权重分别与其对应的准则层权重相乘得到评价指标相对评价目标的 AHP 权重,结果见表 4。

表 4 水系连通方案评价指标的权重

Table 4 Weight of evaluation index of water system connectivity scheme

评价指标	AHP 权重	熵权权重	综合权重
水面率	0. 068	0. 098	0. 087
河网密度	0. 115	0. 103	0. 112
河频率	0. 082	0. 131	0. 117
河流槽蓄量	0. 068	0. 117	0. 096
点连通度	0. 083	0. 108	0. 099
边连通度	0. 167	0. 105	0. 137
点连接率	0. 083	0. 081	0. 082
水工建筑物数量	0. 109	0. 072	0. 086
下游收水量	0. 137	0. 070	0. 092
换水周期	0. 087	0. 115	0. 092

2.3.2 熵权权重计算

熵权法^[19]是一种客观赋权方法。对表 3 中的评价指标数值进行归一化分析,得到归一化矩阵,然后定量计算各评价指标对应的熵值,进而得到指标对应的熵权,结果见表 4。

2.3.3 综合权重计算

采用综合权重法,利用 AHP 权重和熵权权重结果,计算得到最终评价指标综合权重值,结果见表 4。

2.4 水系连通方案评价

采用同样方法,将表 3 中指标数进行归一化处理,结合综合权重计算结果,得到等级 I、II、III、IV、V 的分界线值分别为 0.798、0.596、0.395 和 0.193。方案 3 评价得分 0.730,属于 II 级,连通效果良好;方案 1 评价得分 0.271,属于 IV 级,连通效果差;方案 2 评价得分 0.401,属于 III 级,连通效果处于中等水平。因此,确定方案 3 即采用“引运济廊主输水河道+内环河道+外环河道”的连通方案为推荐方案。

2.5 水系连通性影响因素分析

2.5.1 水工建筑物对水系连通性的影响

选取主要河流及河道上的水闸、大坝和泵站作为研究对象,在主输水河道共选取 6 座水闸(表 5)分析水工建筑物对水系连通性的影响。基于图论理论,水工建筑物可以概化为水系图模型中的顶点,能够较为灵敏地反映对水系点连通度的影响情况,从而影响水系连通性。因此,选择水系点连通度来分析水工建筑物对水系连通性的影响。考虑水工建筑物影响的点连通度计算与天然河流交汇点不同,还需考虑水工建筑物的规模、过水流量、调控能力以及对水系连通影响程度等方面的差异,赋予各类型水闸不同的割点系数^[17],大、中、小型水闸分别赋予 0.8、0.5 和 0.2 的割点系数。割点数为原水系图模型割点和所选取的水闸割点系数之和,顶点数为原水系图模型顶点和所选取的水闸割点系数之和,考虑水闸对水系连通性影响下的点连通度为割点系数与顶点数之比,计算结果见表 5。根据表 5,不考虑水闸影响下水系主输水河道的点连通度为 0.667,考虑水闸影响后,连通度具有不同程度的下降,随着水

表5 主要水闸对主输水河道点连通度的影响

Table 5 Influence of main sluice on point connectivity of main water channel

河流	选取的水闸	类型	闸泵割点系数	累计割点数	累计顶点数	点连通度	连通度下降/%
北运河	秦营干渠闸	大型	0.8	8.8	12.8	0.688	3.07
凤河	八干渠闸	小型	0.2	9.0	13.0	0.692	3.79
六干渠	大皮营引渠闸	小型	0.2	9.2	13.2	0.697	4.49
大皮营引渠	龙河闸	中型	0.5	9.7	13.7	0.708	6.15
丰收渠	丰收渠闸	中型	0.5	10.2	14.2	0.718	7.69
	永定河闸	大型	0.8	11.0	15.0	0.733	9.95

闸数量增多,水系连通度下降程度增大。当只考虑秦营干渠闸时,连通度下降 3.07%,而将主输水河道中 6 座水闸均考虑在内时,连通度下降 9.95%。这说明水工建筑物的布设、调度运行等会影响水系的连通度,加之水闸数量增多,导致结构连通性下降,对水系连通造成阻碍。

2.5.2 换水周期对水系连通性的影响

换水周期与水位有直接关系,可以表现为输水过程中,河道实际蓄水量与水系平均流量之比。为分析换水周期对水力连通性的影响,选取水位表征水力连通能力^[20],计算公式为

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

式中: C_h 为同一河流内上游起点至下游终点的水力连通能力,取值在 0~1 之间,其值越大,表明水力连通能力越强; ΔZ 为两水位站点之间的水位差,其值越大,表明两个水位站点之间的水力连通能力越弱。

采用水动力模型模拟结果,计算得到方案 1、方案 2、方案 3 主输水河道的水力连通能力分别为 0.5007、0.5008 和 0.5045,方案 2 和方案 3 较方案 1 的水力连通能力分别下降 0.73% 和 0.75%。方案 1、方案 2、方案 3 的换水周期分别为 4.191 d、8.215 d 和 27.342 d,换水周期越大,其水力连通能力越弱。由于研究区域地处平原河网,河道间的水力坡降变化较小,因此 3 种水系连通方案换水周期相差较大,但水力连通能力变化不大。

2.6 结果分析

由上述分析可知,方案 3 的整体水系连通效果最优。前人对水系连通评价研究多是注重水系形态特征和水系结构连通性两方面,方案 3 在水系形态特征和水系结构连通性两方面的指标值均处于较高水平,若只考虑水系形态特征和水系结构连通性也可以说明方案 3 的连通效果更优,但是无法了解该方案存在的问题,同时也无法给出相应的改进措施。如方案 3 在水系水力连通性方面的换水周期指标表现较差,并且由于水工建筑物数量较多,对整个河网结构连通性产生较大的负面影响,因此方案 3 需要

提高和关注水系流动性。本文构建的水系连通评价指标体系,可从多角度评价不同水系连通方案的连通效果,为平原河网区水系连通方案评价工作提供了新思路。

3 结 语

本文在水系形态特征与水系结构连通性基础上增加水力连通性评价指标,构建了更加全面的水系连通评价指标体系,利用该评价指标体系对廊坊市北运河-永定河区域水网 3 种水系连通方案进行了评价。结果表明,构建的评价指标体系能够更加全面地表征水系连通情况,可为河网水系连通评价提供参考。但本文的水力连通性评价指标中只采用换水周期反映水系生态环境情况,后续研究可增加相关水质指标以更好地反映水力连通性对水系水质的影响;此外本文着重从结构连通性角度表现水工建筑物对水系连通性的影响,今后研究中还可考虑水工建筑物调度方式(如闸门开度变化)对水系连通特性的影响,使评价结果更加科学、准确。

参考文献:

- [1] 李原园,酆建强,李宗礼,等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 386-391. (LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Some problems and challenges in the study of river and lake water system connectivity[J]. Resource Science, 2011, 33(3): 386-391. (in Chinese))
- [2] 李宗礼,李原园,王中根,等. 河湖水系连通研究:概念框架[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 513-522. (LI Zongli, LI Yuanyuan, WANG Zhonggen, et al. Study on the connectivity of river and lake systems: conceptual framework[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese))
- [3] PHILLIPS R, SPENCE C, POMEROY J. Connectivity and runoff dynamics in heterogeneous basins[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(19): 3061-3075.
- [4] JAIN V, TANDON S K. Conceptual assessment of (dis) connectivity and its application to the Ganga River dispersal system[J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4):

- [5] 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 Guangbo, CHEN Xing, XIANG Long, et al. Assessment of the effect of water system connection on water environment improvement in plain river network area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (12): 1429-1437. (in Chinese))
- [6] 窦明,于璐,靳梦,等.淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究[J].水利学报,2019,50(6):670-678. (DOU Ming, YU Lu, JIN Meng, et al. Study on correlation between connectivity and box dimension of river system in Huaihe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6):670-678. (in Chinese))
- [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 Ming, JIN Meng, NIU Xiaotai, et al. Analysis of urban water system morphological evolution based on remote sensing data [J]. Journal of Wuhan University (Engineering), 2016, 49 (1): 16-21. (in Chinese))
- [8] 孟慧芳,许有鹏,徐光来,等.平原河网区河流连通性评价研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):626-631. (MENG Huifang, XU Youpeng, XU Guanglai, et al. Study on river connectivity evaluation in plain river network area [J]. Resources and Environment on the Yangtze River Basin, 2014, 23 (5): 626-631. (in Chinese))
- [9] 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 Cao, CHEN Yehua, LI Zhiwei, et al. Dongting Lake area water system pattern and connectivity optimization [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (5): 661-672. (in Chinese))
- [10] 崔国韬,左其亭.人类活动对河湖水系连通关系的影响及量化评估[J].水资源研究,2012,1(5):326-333. (CUI Guotao, ZUO Qiting. Effects of human activities on the connectivity of rivers and lakes and their quantitative evaluation [J]. Water Resources Research, 2012, 1 (5): 326-333. (in Chinese))
- [11] 傅春,李云翊,王世涛.城市化进程下南昌市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 Chun, LI Yunyi, WANG Shitao. Analysis of urban water system pattern and connectivity in Nanchang City during urbanization [J]. Resources and Environment on the Yangtze River Basin, 2017, 26 (7): 1042-1048. (in Chinese))
- [12] 赵进勇,董哲仁,翟正丽,等.基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J].水利学报,2011,42(5):537-543. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, ZHAI Zhengli, et al. Evaluation method of river-shoal system connectivity based on graph theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5):537-543. (in Chinese))
- [13] 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 Jinyong, DONG Zheren, YANG Xiaomin, et al. Quantitative evaluation of water system connectivity in plain water network areas based on graph theory edge connectivity [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5):1-6. (in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 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 Huikun, LIAO Heping, WEI Chaofu, et al. Health evaluation of land use system in ecologically sensitive area of Three Gorges Reservoir area based on improved TOPSIS method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (24): 8016-8027. (in Chinese))
- [16] 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 Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Land use performance evaluation and correlation analysis based on entropy weight TOPSIS model [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 29 (5): 217-227. (in Chinese))
- [17] 于璐.淮河流域水系形态结构及连通性研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [18] LIANG R, SONG S, SHI Y, et al. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soils based on the analytic hierarchy process: assessment system construction and case demonstration [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605:618-625.
- [19] 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 Feng, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Application of set pair analysis method based on entropy weight to sustainable water resources assessment: taking the three sources of Tarim River as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4):723-730. (in Chinese))
- [20] 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 Jingbao, YU Dandan, ZHANG Rui, et al. Evolution characteristics of the connectivity of the three river systems of Jingnan in the Yangtze River in the past 61 years [J]. Yangtze River Basin Resources and Environment, 2019, 28(5):1214-1224. (in Chinese))