

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.06

扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施

马栋¹, 张晶¹, 赵进勇¹, 刘业森¹, 董哲仁¹, 蒋咏²

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为研究扬州市主城区水系连通状况,基于图论边连通度方法,利用GIS技术提取水系,建立了扬州市主城区水系图模型并计算了水系边连通度。结果表明:扬州市主城区水系连通度为2;影响水系整体连通性的关键河段为七里河与沙施河交汇口至古运河段、仪扬河与赵家支沟交汇口至西银沟段、揽月河闸至赵家支沟段以及老沙河与沙施河交汇口至曲江公园段;关键水闸为扬州闸、黄金坝闸、平山堂泵站、明月湖闸,这4个闸站关闭后分别使整体的连通度降低了50%;可采用河道清淤、生态护坡、水闸调控等措施来改善扬州市主城区水系连通性。

关键词:水系;连通性;图论;边连通度;扬州市主城区

中图分类号:TV212;P343.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)05-0034-07

Quantitative evaluation and improvement measures of water connectivity in main urban area of Yangzhou

MA Dong¹, ZHANG Jing¹, ZHAO Jinyong¹, LIU Yesen¹, DONG Zheren¹, JIANG Yong²

(1. The Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the water connectivity in the main urban area of Yangzhou, this paper extracts the water system based on the method of graph theory edge connectivity and uses GIS technology to establish the water system graph model of the main urban area of Yangzhou and calculate the water system edge connectivity. The results show that the water connectivity of the main urban area of Yangzhou is 2. The key sections affecting the overall connectivity of water system include the section from the junction of Qili River and Shashi River to the ancient canal, the section from the junction of Yiyang River and Zhaojiashigou to the Xiyingou, the section from the Lanyue River to Zhaojiashigou, and the section from the junction of Laosha River and Shashi River to Qujiang Park. The key gates and dams are Yangzhou Gate, Golden Dam Gate, Pingshantang Pumping Station and Mingyue Lake Gate. After the four gates are closed, the overall connectivity is reduced by 50%. Measures such as river dredging, ecological slope protection, and sluice control can be used to improve the water connectivity in the main urban area of Yangzhou.

Key words: water system; connectivity; graph theory; edge connectivity; main urban area of Yangzhou

水系是维系自然生态系统的重要组成部分,也是社会发展的重要支撑。随着经济社会的发展,水系的连通格局发生了重大变化。水系连通的

概念源于对生态系统的认识,目前已从景观生态学的角度延伸到对河湖、湿地水生态系统的结构和功能的研究。河流系统内部存在横向、纵向和垂向的

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501030);国家自然科学基金(51509271,51279113)

作者简介:马栋(1990—),男,硕士,主要从事河湖水系连通研究。E-mail:755797687@qq.com

通信作者:张晶,高级工程师。E-mail:Zhangjing.iwhr@gmail.com

连接和联系,水系连通是一个普遍意义上的连接^[1],是流域内河流与湖泊、河道与河漫滩之间物质流、能量流、信息流和物种流保持畅通的基本条件^[2-4]。连通既是水文学的概念,也是景观生态学的概念,是河流生态系统完备性和多样性自我维持的基础^[5]。在结构上,主要通过维系、重塑或新建满足一定功能目标的水流连接通道^[6],通过科学的调水、疏导、连通、调度等措施,对现有水体建立新的水力联系^[7-8],以维持相对稳定的流动水体及其联系的物质循环的状况^[9]。从景观生态学的角度,连通度指斑块间通过廊道、网络而连接在一起的程度^[10],水文连通是水流从景观的一处转移到另一处的能力^[11]。

图论方法已逐步应用于水系连通性定量评价。将图论方法应用于河网连通性定量评价,主要是考虑河网的拓扑特征,基于网络图连通性的判定法则,用点连通度或边连通度表征河网结构连通性。Merriam^[12]基于图论方法,探讨了葡萄牙塔霍河的中心度连通性和连通性指数的变化。赵进勇等^[13-14]应用图论方法,对水系的连通性进行了定量分析,为研究河湖水生态状况及区域水资源合理配置提供了科学依据。

扬州市地处长江下游平原地带,河网交错密布,水系发达,充沛的水量为当地的生产生活带来了极大的便利,也形成了独特的水景观。然而,在城市发展过程中,人们通过围湖造田、填埋河道、修建堤坝等,改变了水系原有的连通状态,出现了一系列的水生态问题。城市水系坡降较小,水流缓慢,主要依靠闸门、泵站来调节水流和改变水流方向。由于城市化及工业化影响,城市河流大多存在淤积、断流的情况,打破了原有的水力连接,水系连通度受到了影响。本文基于图论方法,利用 GIS 技术提取水系,建立水系图模型,通过自主开发的计算机程序自动计算连通度来定量反映扬州市目前的水系连通程度,并提出了改善水系连通性的措施,可为改善扬州市水生态环境提供参考。

1 研究方法

1.1 平原水系的图模型概化

水系图模型概化的重点是将水系中的不同地貌特点利用图论中的相关元素进行表征^[14]。平原河网地区河流纵横交错,结构复杂,为满足工农业发展,通常会在中下游建立圩堤,在河道上修建闸门、泵站,控制水量和水流的方向,导致平原水系与自然状态下的河流地貌类型有很大的区别。可采用无向图的图模型来表示平原水系系统,用边表示河道或

者受水流冲积形成的河网,用顶点表示各条河道的汇合点,用悬挂点表示仅与一条河道相通的小型水域;两点间有边连接,表明两点相邻,并且说明两点间有河道通过。本文计算的水系连通性未考虑河道的形状,因此河流通道的宽度与深度并不影响河流系统中点与点之间的邻接关系。图模型概化的流程首先是根据研究区水系特点,选择适宜的水系提取方法;其次是基于 GIS 水系图形成图模型。

1.1.1 水系的提取

目前比较常用的水系提取方法主要有 3 种:一是基于 DEM 高程数据进行水文分析,二是基于遥感影像自动或半自动提取,三是基于 Google Earth 对水系进行数字化提取。前两种方法的使用频率较高,但是 DEM 方法对于研究尺度小、坡度小的平原城市河网地带准确度较差;遥感影像方法则易受到城区众多建筑物的影响,产生较多杂质信息,处理复杂。针对城市平原河网,利用 Google Earth 工具提取水系方法可避免城市水系自然环境因素的影响,提取精度较高,方法简单易用。在不考虑水系面积和长度的情况下,本文选用 Google Earth 方法提取水系,利用多边形工具描绘影像中的水系,通过 ArcGIS 中的 shp 转换工具获取水系,并对水系的符号系统及属性字段进行编辑^[15-17]。

1.1.2 图模型的建立

根据已提取的矢量水系数据,利用 ArcGIS 中的数据转换及矢量分析工具,生成初步的图模型。在图模型中,将河道用平滑的细线条表示,在河流的交汇处设置节点,并用空心圆表示,湖泊或闭合的小水域也用空心圆表示。由于本文仅考虑图模型中点线之间的连接关系,在由水系图初步生成的图模型基础上,对部分边的长度进行了调整,同时由于瘦西湖的形状过于狭长,选择用线来表示,形成最终的图模型。闸坝作为控制水流的重要设施,其开启或者关闭都会对图模型的形状产生影响,甚至会使得连通度发生改变。当某闸坝关闭时,则该闸坝控制的两个河段就失去了水力联系,在图模型中表现为去除了一条边。

1.2 邻接矩阵的建立

在 ArcGIS 中,根据属性表中点线的相关关系可以判断它们之间的邻接关系,建立邻接矩阵。建立邻接矩阵步骤如下:①生成节点的缓冲区,当河流的两个端点距离小于 0.01 m 时,认为这两个端点是重合的,因此设置缓冲距离为 0.01 m;②利用生成的缓冲区数据和水文模型中的线数据进行相交分析,若点和相邻的线相交,在邻接矩阵中就记为 1,若不相交则记为 0;③从所得结果的属性表中找到点线

之间的“一对一”或“一对多”的映射关系,在邻接矩阵中,有映射关系的值为1,没有映射关系的值为0,据此构建邻接矩阵。

1.3 边连通度的计算

利用生成的邻接矩阵,编写计算机程序来计算边连通度。依据图的连通性判定准则,判断矩阵是否连通,如不连通,则该图的边连通度为零;如矩阵连通,则去除图模型中的任意1条边,生成新的邻接矩阵。判断新图是否连通,若新图不连通,则原图的边连通度为1;若新图仍然连通,则再任意删除原图中的1条边,再次生成新的邻接矩阵,依次类推,当删除 n 条边后得到的新图不连通,那么原图的边连通度就为 n 。

2 研究区概况

扬州市位于江苏省中部,地势平坦、河网稠密,南临长江,是国家重点工程南水北调东线水源地。扬州市重要河流有京杭大运河、古运河、邗沟、唐子城河、新城河、七里河、小秦淮河等共计26条河。本文选择扬州市主城区为研究区,研究对象为主城区范围内的所有水系。扬州市主城区水系如图1所示。扬州市主城区水系上水闸众多,目前共计17个闸站和5个泵站。近年来部分河道由于淤积、阻水坝涵的影响,导致河道流水不畅,城区水环境、水生

态、水安全面临较大压力。2015年扬州市城区实施了“九闸同开、活水润城”工程,通过节点控制工程,同时开启扬州闸、黄金坝闸、象鼻桥泵站、平山堂泵站、新城河闸、明月湖闸、四望亭闸、江阳路节制闸、通运闸等9闸,从高邮湖、邵伯湖引入活水,经由古运河各闸分流进入主城区,使得主城区范围内的河流实现了活水环绕,水生态环境得以有效改善。

3 水系连通性评价

选择2016年8月28日的Google Earth影像,分辨率为1m,可以清晰分辨扬州市城区的主要河流。根据Google Earth影像提取扬州市主城区水系,依据提取的矢量水系数据,通过实地调查校核主城区水系的实际连接状况,对于不符合实际连通情况的地方进行调整,如西沙河在地图上显示为断头河,现状是通过暗涵与蒿草河连接。经过调整后建立图模型如图2所示。

图2所示图模型共计50个节点72条边,将水系图矢量数据输入到编写好的计算程序中,根据点线的连接关系,自动生成邻接矩阵,相比手动输入邻接矩阵更加高效、便捷。

根据邻接矩阵连通性判定准则,计算得到扬州市主城区水系边连通度为2,即至少删除2条边时

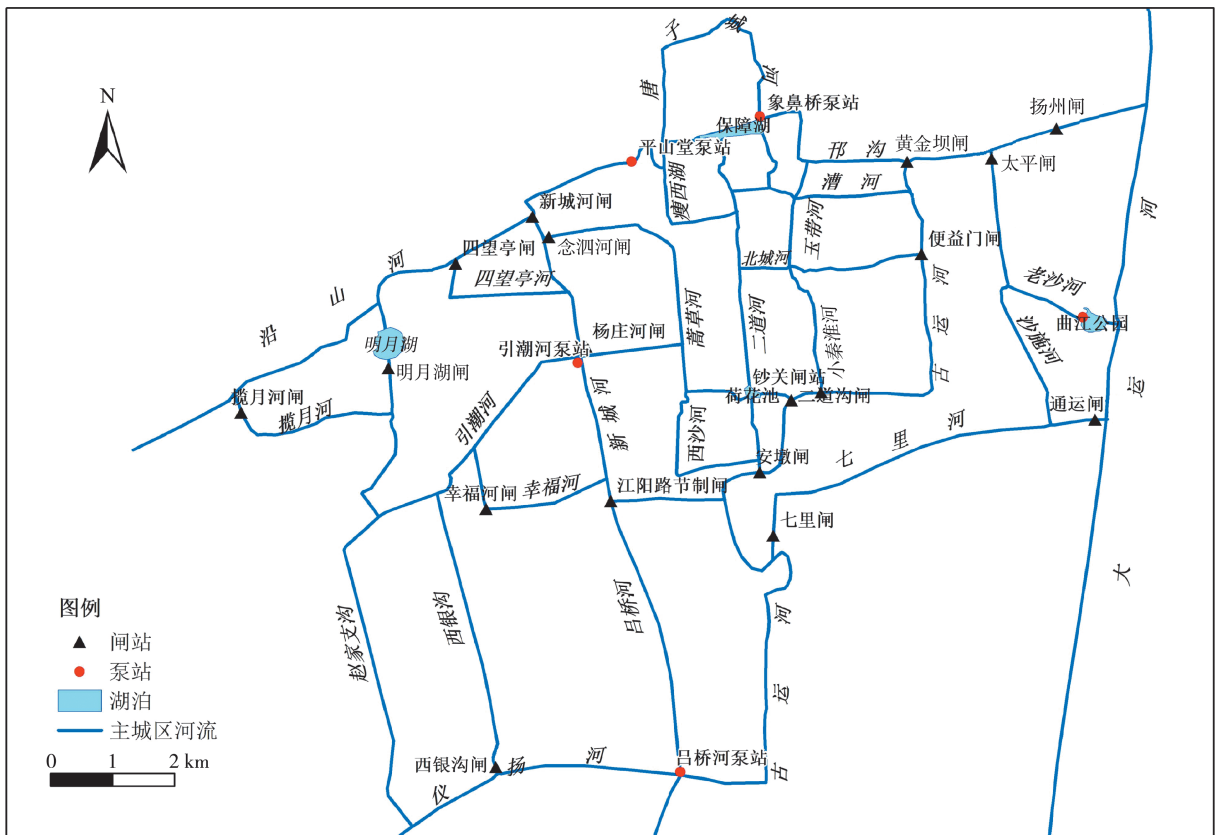


图1 扬州市主城区水系

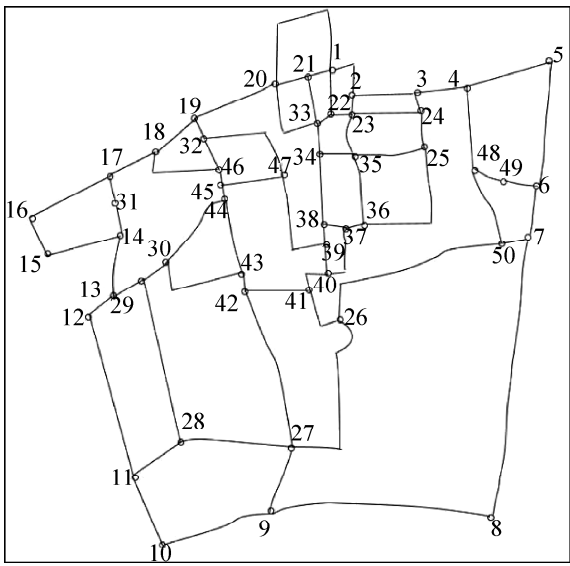


图2 扬州市主城区水系图模型

水系不连通。

根据算法运行结果,有7种删除边的组合形成了孤立节点(图3~9),从而使连通图变为不连通图;另外有7种删除边的组合形成了悬挂节点(图10~16),根据当地东高西低、北高南低的水流特点,水系无法连通。

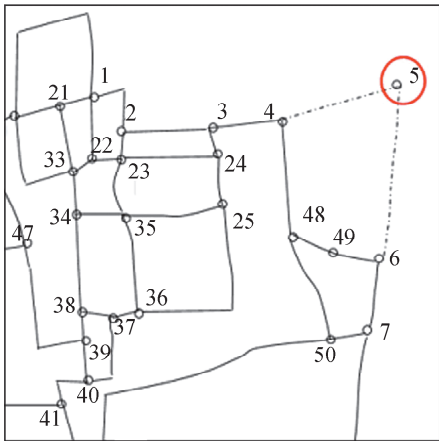


图3 大运河与古运河交汇处不连通

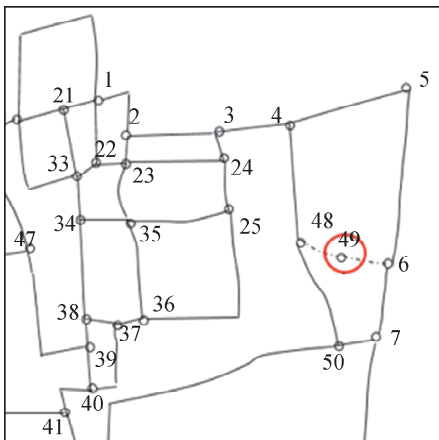


图4 曲江公园处不连通

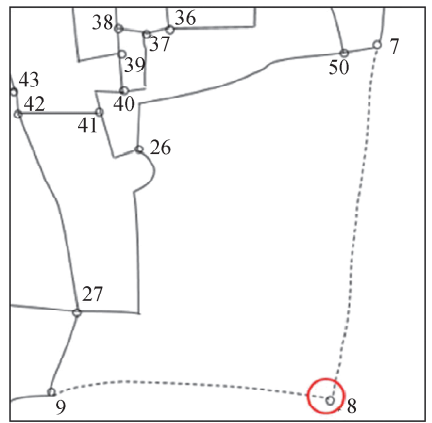


图5 运河与长江交汇处不连通

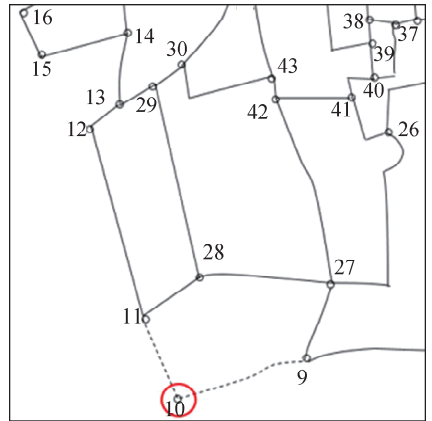


图6 仪扬河与长江交汇处不连通

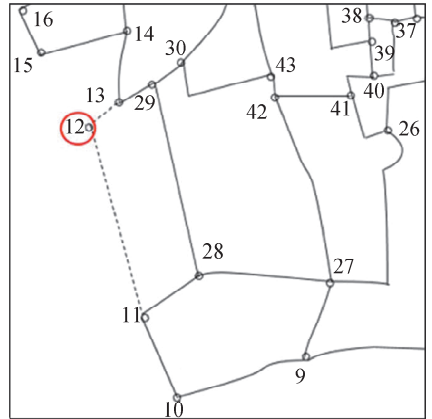


图7 引潮河与赵家支沟交汇处不连通

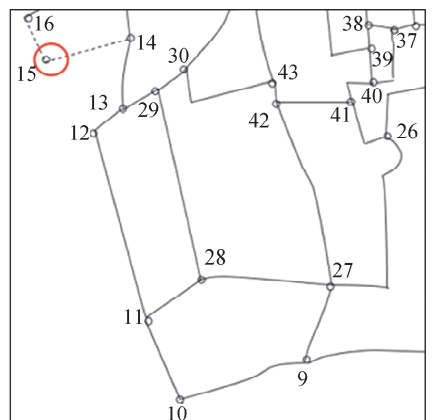


图8 真州河与揽月河交汇处不连通

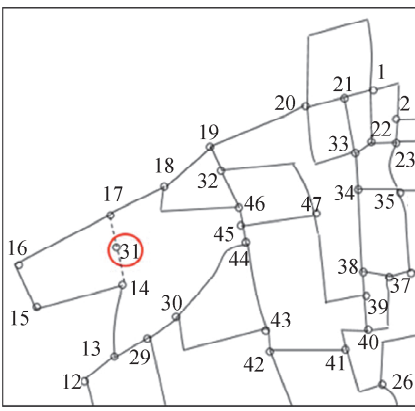


图 9 明月湖处不连通

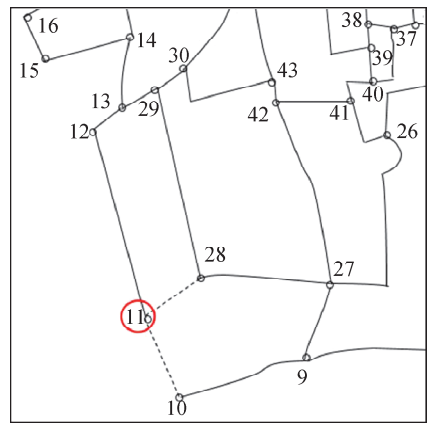


图 13 仪扬河与赵家支沟交汇处不连通

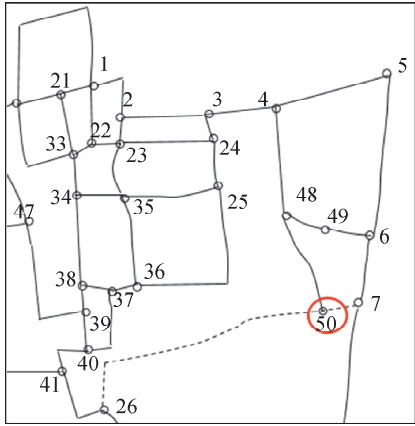


图 10 七里河与沙施河交汇处不连通

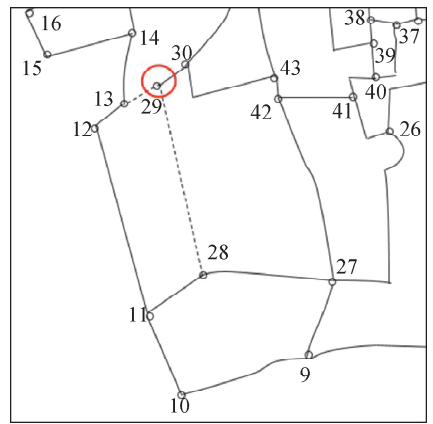


图 14 西银沟与引潮河交汇处不连通

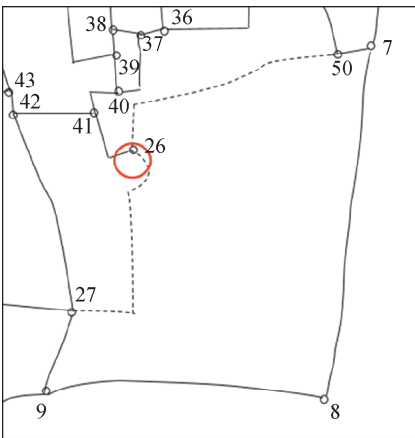


图 11 七里河与古运河交汇处不连通

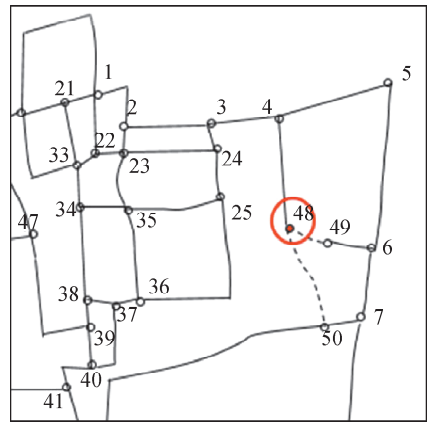


图 15 沙施河与老沙河交汇处不连通

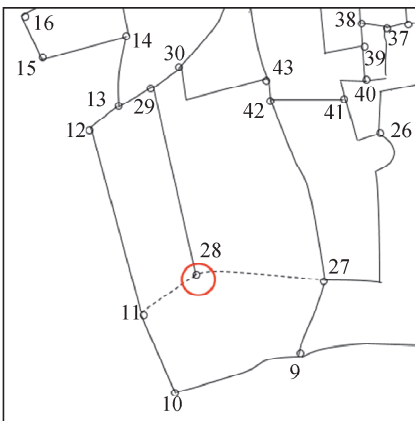


图 12 西银沟与仪扬河交汇处不连通

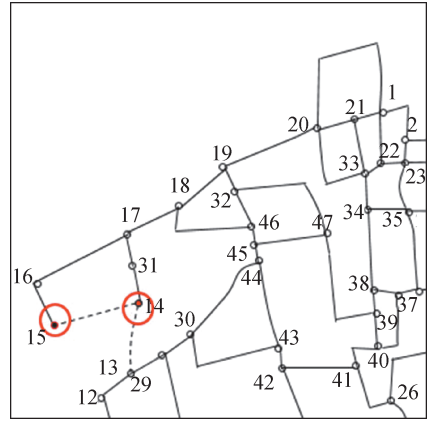


图 16 揽月河与引潮河交汇处不连通

4 水系连通性影响因素分析

4.1 影响水系连通的重要河流

通过对不连通情形的分析,在 14 种不连通组合中,七里河与沙施河交汇口至古运河段、仪扬河与赵家支沟交汇口至西银沟段、揽月河闸至赵家支沟段以及老沙河与沙施河交汇口至曲江公园段分别出现了 2 次。可见,当这 4 段河段出现阻塞时,对主城区水系连通格局的影响最大。七里河段是沟通京杭大运河、沙施河、古运河的重要桥梁,且七里河位于扬州市的主城区,人口密集、工业企业较多,生态环境较为脆弱,现状河道存在过水不畅、行洪能力不足、汛期排水受阻、水质不达标(发黑发臭)等问题,严重影响沿河的环境和景观,亟待整治。仪扬河段作为扬州西部城区的重要防洪通道,担负着疏解洪水、排解城市内涝的关键职能,维持该河段的水流畅通对于防御洪涝及内涝灾害起着非常重要的作用。揽月河段沿岸现已建成健身步道以及生态公园,是城区西北部主要的观光、休闲、健身场所,保证该河段的水流畅通,对于发挥其自身功能,保障居民良好的生活环境有非常重要的作用。老沙河是东部城区的主要河流之一,目前已有上千年历史,刚建成时,主要发挥漕运作用,现作为东部城区的重要排水沟渠,担负着城区防洪排涝的重任。

4.2 水闸对水系连通度的影响

研究区地处平原河网地带,河流坡降很小,主要依闸坝来调节水流。选择扬州市主城区“九闸同开”涉及的扬州闸、通运闸、黄金坝闸等 9 个闸站,建立不同闸站关闭情景下的水系图模型,计算这 9 种情景下的连通度,结果如表 1 所示。

表 1 关闭不同闸站时的水系连通度

关闭的闸站	连通度	连通度变化情况
扬州闸	1	降低
通运闸	2	不变
黄金坝闸	1	降低
象鼻桥泵站	2	不变
平山堂泵站	1	降低
新城河闸	2	不变
四望亭闸	2	不变
江阳路节制闸	2	不变
明月湖闸	1	降低

从表 1 可知,扬州闸、黄金坝闸、平山堂泵站、明月湖闸等 4 个闸站的关闭分别使整体的连通度降低了 50%。位于古运河上的扬州闸是扬州市生产、生态用水的主要引水口门,当扬州闸关闭时,不仅连通度下降,还会造成城区河道水量大幅减少,流速变

缓,容易形成淤积。2014 年扬州市实施了黄金坝闸站扩建工程,使得邗沟与古运河得以连通,为古运河以西的区域特别是瘦西湖水系补充生态水源,改善水动力条件;实施了平山堂取水泵站工程,由平山堂取水站抽取瘦西湖水体进入沿山河后,同时在明月湖闸开启的情况下,利用沿山河的水位优势,自流补充进入新城河、赵家支沟、揽月河等主城区西部水系,促进了水生态系统的良性循环。

5 水系连通性改善措施

虽然扬州市主城区局部地区水系连通性较好,但是城区水系整体连通度偏低,当至少有 2 条河流不连通时,整个扬州市主城区的水系连通度降为 0,这将使得城区河道系统内的水流不能正常流通,会影响城区水系的生态过程,削弱整个水系的纳污能力。七里河与沙施河交汇口至古运河段和仪扬河与赵家支沟交汇口至西银沟段为影响主城区水系连通的敏感河段,为维持主城区水系较好的连通性,对这两个敏感河段要重点监管、整治,保障河道水流畅通。主要的改善措施可分为工程措施和非工程措施两类。

a. 河道清淤。七里河面临的主要问题是河道被侵占严重,河道断面变窄。另外,河道久未疏浚整治,干支河道淤积严重,目前淤泥深度可达 1.8 m,同时岸坡杂物堆积,河道内还存在卡口建筑物,导致河道过流能力不足。因此,首先要清除河道内的固体垃圾和淤积物,拓宽重要的过水断面,增加水流的通畅性,提高沙施河、七里河、古运河与京杭大运河之间的水系连通性。

b. 生态护坡建设。仪扬河是连接长江、古运河、乌塔沟等众多城区河流的纽带,同时担负着西部城区防洪的重要任务。仪扬河段偏离市中心,受到的人为干扰较小,目前的主要问题是河道两侧的边坡多为自然边坡,水土流失较为严重,加重了西部城区的防洪风险。因此,仪扬河段宜主要实施生态护坡工程,做好两岸的水土保持工作,建立起生态长廊。

c. 水闸调控。为保证扬州市主城区水系的整体连通情况,应使扬州闸、黄金坝闸、明月湖闸、平山堂泵站处于常年开启状态,其他闸站不宜同时关闭。

6 结论

a. 基于图论边连通度方法,充分运用 GIS 技术,根据提取的水系数据,自动建立邻接矩阵,相比传统的手动输入邻接矩阵的方法大大提高了运算效

率。同时,利用 GIS 方法,可以模拟城市水系中不同闸坝开启或关闭的状态,形成新的图模型,计算不同情景下的水系边连通度,从而提出维持较好连通性的闸坝调控方案。

b. 计算得出扬州市主城区水系连通度为 2,影响水系整体连通度的 4 段关键河段为七里河与沙施河交汇口至古运河段、仪扬河与赵家支沟交汇口至西银沟段、揽月闸至赵家支沟段以及老沙河与沙施河交汇口至曲江公园段;关键水闸有扬州闸、黄金坝闸、平山堂泵站、明月湖闸,这 4 个闸站关闭后分别使整体的连通度降低了 50%。

c. 根据七里河与仪扬河不同的自然条件,宜分别采用河道清淤和生态护坡等措施来改善扬州市主城区的水系连通性。

参考文献:

[1] VANNOTE R L, MINSHALI G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37: 130-137.

[2] 董哲仁. 河流生态系统结构功能模型研究 [J]. 水生态学杂志, 2008, 28 (5): 1-7. (DONG Zheren. The research on structure and function model of river ecosystem [J]. Journal of Hydroecology, 2008, 28 (5): 1-7. (in Chinese))

[3] 董哲仁, 赵进勇, 张晶, 等. 河流生态修复 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[4] 董哲仁, 王宏涛, 赵进勇, 等. 恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法 [J]. 水利水电技术, 2013, 44 (11): 8-11. (DONG Zheren, WANG Hongtao, ZHAO Jingyong, et al. Eco-survey and planning method for rehabilitation of connectivity of river-lake water system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44 (11): 8-11. (in Chinese))

[5] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 213-256.

[6] 李原园, 酆建强. 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. Issues and challenges for the study of the interconnected river system network [J]. Resources Science, 2011, 33 (3): 386-391. (in Chinese))

[7] 徐宗学, 庞博. 河湖水系连通的理论基础与关键技术研究 [R]. 北京: 北京师范大学水科学研究院, 2011.

[8] 刘家海. 黑龙江省河湖水系连通战略构想 [J]. 黑龙江水利科技, 2011, 39 (6): 1-5. (LIU Jiahai. Strategic vision of connecting river and lake system in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2011, 39 (6): 1-5. (in Chinese))

[9] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊

[J]. 地理科学进展, 2012, 31 (1): 16-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 16-31. (in Chinese))

[10] JAIN V, TANDON S K. Conceptual assessment of connectivity and its application to the Ganga River dispersal system [J]. Geomorphology, 2010, 118: 349-358.

[11] BRACKEN L J, CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems [J]. Hydrological Process, 2007, 21 (13): 1749-1763.

[12] MERRIAM G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern [J]. Proceedings of the International Association for Landscape Ecology, 1984 (1): 5-15.

[13] 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 for river floodplain system connectivity based on graph theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (5): 537-543. (in Chinese))

[14] 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): 49-54. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, YANG Xiaomin, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38 (5): 49-54. (in Chinese))

[15] 孙艳玲, 刘洪斌, 谢德体, 等. 基于 DEM 流域河网水系的提取研究 [J]. 华东地质, 2004, 25 (1): 18-22. (SUN Yanling, LIU Hongbin, XIE Deti, et al. Study of extracting drainage network of watershed from digital elevation model [J]. East China Geology, 2004, 25 (1): 18-22. (in Chinese))

[16] 许捍卫, 何江, 余远见. 基于 DEM 与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2008, 36 (4): 443-447. (XU Hanwei, HE Jiang, SHE Yuanjian. Method for extraction of digital drainage network in the Qinhuai River basin based on DEM and remote sensing [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36 (4): 443-447. (in Chinese))

[17] 陆丁澍, 吴虹, 郭琪, 等. 基于 Google Earth 影像的漓江水系形态特征提取与分析 [J]. 国土资源遥感, 2016, 28 (2): 161-167. (LU Dingge, WU Hong, GUO Qi, et al. Feature extraction and analysis of the Lijiang River water system form based on the Google Earth image [J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2016, 28 (2): 161-167. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-11-22 编辑: 熊水斌)