

芭蕉湖-南湖连通工程的连通性评价

陈叶华¹ 李志威^{1, 2} 沈小雄^{1, 21}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

【摘要】: 江湖水系连通是改善水环境、修复水生态和提高人居环境的重要措施,但有关城市内湖水系连通工程的动态连通性定量评价不够完善。基于岳阳城区芭蕉湖-南湖连通工程方案,从长江引水至芭蕉湖通过王家河流域新开挖河道自流至南湖,以改善王家河和南湖水质状况与修复水生态功能。采用 MIKE21 水动力模型分别模拟汛期和非汛期时 6、12 和 24m³/s 的流量条件下,南湖出口最低控制水位为 25.86m 和 26.06m 的 12 种工况,分析不同引水条件下两湖的连通性,并提出一个定量评价指标。结果表明:引水初期流量取 24m³/s 和控制南湖出口最低水位为 25.86m 时,汛期和非汛期连通性均达最佳状态,此时换水周期分别缩短至 5.59、5.17d。从连通性指数的变化来看,“引江济湖”和“两湖连通”增强了水系连通性,可提高水体自循环能力。

【关键词】: 水系连通性 水动力模拟 引水流量 连通性指数 换水效率

【中图分类号】: P333;X143 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2019) 03-0731-08

江河湖库水系是水资源的重要载体,是水环境的重要组成部分,更是区域经济发展的重要支柱,其连通和分布对水循环具有重要影响。随着人类社会活动对水系格局影响加深,一些地区出现水生态退化、水环境承载能力不足、水系连通性削弱、洪水宣泄不畅等问题。这些问题直接或间接地作用于湖泊水系,使得水系的纵向、横向连通状况与格局不断发生变化。良性的水系连通条件和丰富的可调配水源是城市水系发挥功能的基础^[1~4]。

江河湖库水系的水体运动复杂,加上水利工程运行和控制,水系连通受阻,导致河道自净能力衰退。近年来,国内外许多城市通过引水调度方式人工改善城市水环境,从而合理有效地解决水生态环境问题^[5,6]。通过综合调水,合理调控河网水流,引入洁净水增强水体流动性,在一定区域内可以减缓水质恶化问题^[7]。目前针对水利工程调度下的引水效率以及连通性评价体系有待进一步研究。国内外许多学者从不同角度探讨了河流水系连通度的计算与评价方法,如将河流水系概化为河网的方式,计算水系连通度的图论法^[8,9];根据水体过流能力和阻力特征来定量水系连通度的水文-水力学法^[10~12];采用景观分析法对城市水系连通性进行度量的景观法^[13];通过生物迁移及扩散能力反映水系连通度的生物法^[14]等。虽然这些评价方法实现了河流连通性定量评价,但针对水利工程调度模式下的水体连通性评价不多,且未考虑引水调度的动态过程。

开展引水工程调度模式与连通性评价的研究,可为优化水利工程调度运行方式提供理论支持。以位于岳阳市的王家河流域治理工程为例,结合 MIKE21 水动力模型讨论不同引水效率下河湖连通关系。通过提出连通性指数定量评价芭蕉湖-南湖连通度,找出该区域水利工程合理的调度方式,改善水系连通性,提高河网自循环能力,为岳阳市河湖水系实施连通工程提供科学的依据与

作者简介: 陈叶华(1994-),女,硕士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:329903327@qq.com;李志威, E-mail:lzhiwei2009@163.com。

基金项目: 湖南省科技重大专项(2018SK1010);国家自然科学基金资助项目(51709020);长沙市科技计划项目(kq1701075);湖南省教育厅优秀青年项目(16B010)。

决策。

1 研究区域概况

岳阳市地处湖南省东北部,长江与洞庭湖汇集处东岸,城区水系发达,河网交织密布,中心城区范围内湖面积多达 65km²,属滨湖滨江城市。岳阳市内有着多个形态各异的湖泊,如芭蕉湖、南湖、东风湖、吉家湖等,其中最大的两个湖体分别是芭蕉湖和南湖,位于主城区北部与南部。

芭蕉湖西靠长江水,位于湖南省岳阳市城陵矶东侧,为长江直入水系,属于外流淡水湖,流域面积达 136km²,湖水的平均深度为 3.5m。芭蕉湖作为华能电厂取排水的循环调控湖泊,其水位主要受华能电厂取排水系统控制,水源来自于清港径流。

南湖多湾多汊,西接洞庭湖,东南靠近龟山、赶山,北接白鹤山和金鄂山,是调蓄洪水的出口。作为城市内湖水体,南湖承担着调控城区暴雨的作用,水位由南津港电排站控制。南湖集雨面积 163km²,常年水面面积约 15.64km²。采用 1985 国家高程基准面,南湖最低控制水位为 25.86m,最高控制水位为 27.76m,设计水位为 26.26m,水源来自于地表径流。

王家河位于主城区中部,南北流向,王家河是南湖的主要支汊,它是连接南湖与芭蕉湖的重要载体,全线水深在 2~3m 之间。流域总面积达 285km²,干流总长度 48.2km,水源以地表径流为主。

近年来王家河流域因环境污染导致水生态环境质量降低。为治理该流域及南湖水质污染问题,通过水库、沟渠、闸坝、泵站等一系列水利工程,以“明渠+隧洞”的形式连通芭蕉湖和南湖。连通段全长 5.1km,其中明渠 3.2km,隧洞 1.9km,形成长江-芭蕉湖-王家河-南湖-洞庭湖的环城水系(图 1)。工程北起芭蕉湖,经王家河南至南湖的螺丝岛,全长 11km,部分低洼地形采用开挖河道方式解决,新开挖河道通航部分采用 2m 水深,其余地段采用 0.5~1.0m 水深。工程利用芭蕉湖自北向南先后低的地势,通过华能岳阳电厂冷却循环水系统从长江取水,流入芭蕉湖,抬高芭蕉湖水位,形成与王家河、南湖的水位差,使水流能经王家河自流至南湖。该工程旨在改变湖泊水动力条件,使原有水体加速流动,增强连通性,提升换水效率和水体自循环能力,以强化该区域水资源承载能力。

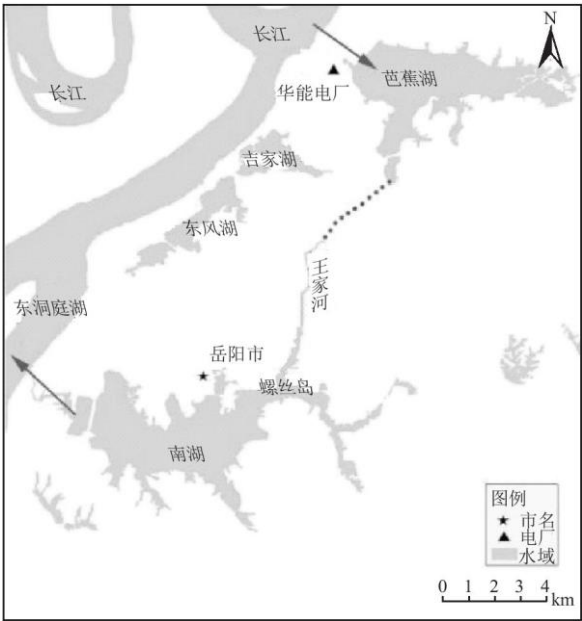


图 1 岳阳市城区芭蕉湖-南湖连通水系示意图

2 两湖连通工程的水动力模型

基于 MIKE21 的平面二维水动力模型,即(Hydrodynamics Module-HD)模拟二维自由表面流的水位及水流变化。以岳阳市芭蕉湖和南湖及王家河流域形成的环城水系为研究对象,现有的实测地形和遥感影像资料为基础,将边界和地形点数据导入 MIKEZERO。结合河湖实际情况对地形和边界做处理,定义开边界,生成非结构化三角形网格,插值得到数值地形。由于工程尚未施完工,结合实际情况概化王家河新开河道(图 2)。

根据模型实际情况选取,进口边界设定在华能电厂取水入芭蕉湖处及清港径流汇入处。华能电厂取水采用泵站抽取形式,采用流量边界,清港径流汇入芭蕉湖入口处根据实测年流量值也采用流量边界。出口边界设定在南湖西侧南津港电排站,南湖的南津港电排站主要作用是控制南湖水位,采用水位边界。模型结合水系实际情况经多次调试,得出适合芭蕉湖和南湖的二维水动力模型参数。根据模拟结果,整体水位均在 60d 内达稳定效果,因此模拟时间步长为 600s,模拟步数 8640 步;水位流量数据参考《岳阳市中心城区河湖水系连通综合规划》分几种不同工况进行设定。水体从芭蕉湖自流至南湖的最低水位为 25.46m,预降城区整体水系水位至 25.46m,即初始水位设为 25.46m,并假定整个模拟区域均从静止条件下开始,即初始流速为 0。由于王家河流域治理工程尚在实施中,根据工程规划,河道内做疏浚、护砌处理,经修整后断面规划较好,水流顺畅。但河道下游存在部分淤滩、草地,故王家河糙率参考天然河道糙率表定为 0.045。芭蕉湖和南湖地形平坦,无孤石,根据湖底情况糙率定为 0.03;涡粘系数采用 Smagorinsky 公式计算, C_s 取值为 0.28。为防止模型在干涸地区溢出,水陆边界采用水深干湿动态边界判断技术,干水深 0.01m,湿水深 0.1m。

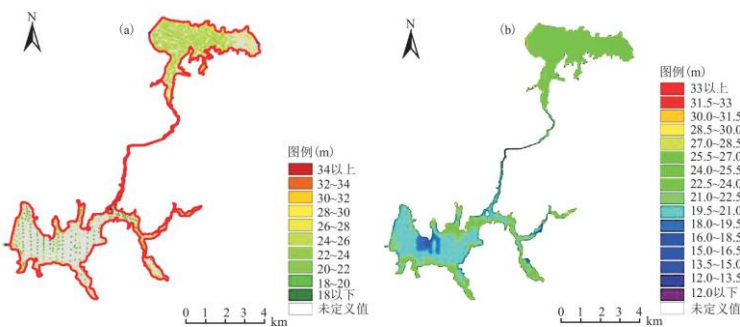


图 2(a)两湖水系网络;(b)两湖水深平面地形

根据王家河流域综合治理工程规划,两湖连通前南湖最低控制水位为 26.06m,连通后南湖最低控制水位为 25.86m,最高控制水位为 27.56m,对应的水面面积为 14.32 m^2 。汛期芭蕉湖主要径流来源考虑清港径流。用清水站和螺岭桥水文站计算芭蕉湖多年平均径流分别为 $8752 \times 10^4 \text{m}^3$, $9299 \times 10^4 \text{m}^3$,两者计算结果相差近 5%。相较于清水站,螺岭桥水文站集雨面积、下垫面特征、流域植被分布情况及取耗水在控制面积上的情况更接近芭蕉湖。因此采用螺岭桥水文站计算成果,取清港径流流量值 $3 \text{m}^3/\text{s}$,非汛期不考虑芭蕉湖径流影响。根据实际情况,华能电厂模拟设置 3 种取水流量分别为 6, 12, $24 \text{m}^3/\text{s}$,控制南湖出口水位分别为 25.86, 26.06m。其中 1~6 工况为非汛期,7~12 工况考虑汛期情况下的引水调度方案,具体工况如表 1。

表 1 水动力模拟的不同工况

南湖出口水位 H(m)	华能电厂取水流量 $Q(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	清港径流流量 $Q(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	工况
26.06	6	/	1
	12	/	2

	24	/	3
25.86	6	/	4
	12	/	5
	24	/	6
26.06	6	3	7
	12	3	8
	24	3	9
25.86	6	3	10
	12	3	11
	24	3	12

3 结果研究

3.1 水动力模拟结果分析

经过模拟计算,选取南湖内均匀分布的6个点进行水位分析(图5a)。由于引水流量较小,南湖内部流速过小,选取靠近南湖出口断面平均分布的5个流速较大的点进行流速分析,分别计算非汛期和汛期各工况下的平均水位和平均流速。

引水期水位随连通时间增加而抬升至一定高度后处于稳定状态(图3)。稳定前,水流自芭蕉湖自流至南湖蓄水抬高水位,前期水位涌高速度较快,至控制水位时开始输出流量,南湖出口水位通过南津港电排站限制在26.06~25.86m之间。由于水体要一直保持流动状态,南湖水位处于平衡时湖区水位与出口存在水位差在0.18~0.44m之间。排除中间误差,水位-时间曲线的斜率为0的情况下视为流体稳定。考虑连通动态性,从引水开始至图3曲线斜率为0时即流体稳定视为连通时间。后期水位仍以极小幅度提升,直至最终稳定,这一部分由于提升量小至万分之一可忽略不计。水流趋于稳定的过程中,进水总量和出水总量存在差异,稳定时进水总量和出水总量基本保持一致,主要考虑水流稳定过程中的换水效率。

水流自芭蕉湖自流至南湖需要一定时间,引水初期流速几乎为0m/s(图5b),当水体流经出口流速开始增大。期间,南湖内水位升高且断面不变情况下,流速处于急剧增长状态。当南湖水位达到控制水位时出口输出流量(图5c),引水量与出水量差值逐渐减小的过程中流速增长速度减缓,引水量与出水量相等时流速达最大值(图5d),此时的平均流速可视为换水效率。引水流量越大,断面不变的情况下流速越早趋于稳定,稳定时流速越大(图4)。

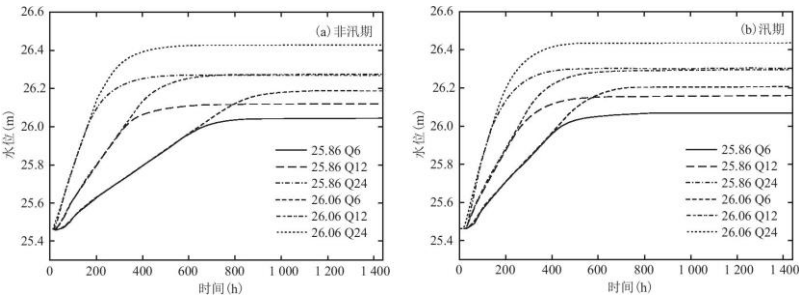


图 3 各调度方案下水位变化

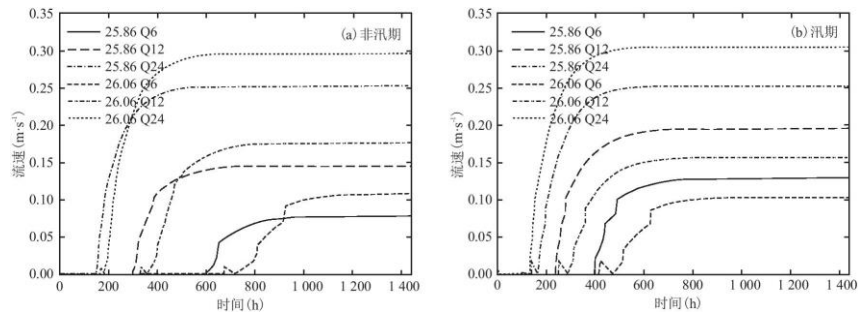


图 4 各调度方案下流速变化

非汛期南湖出口控制水位相同的情况下,随着引水流量的增大,连通至稳定所需时间缩短,稳定时南湖水位升高,湖面平均流速显著增大,换水效率提高(表 2)。对比工况 1 和 4、2 和 5、3 和 6,引水流量相同,南湖出口控制水位处于 26.06m 时,稳定时南湖水位和湖面平均流速较大。相较引水流量,出口水位的不同对稳定时的换水效率影响稍小,两者相差分别为 41.33%、20.98%、17.06%,大的引水流量可以降低出口水位对换水效率的影响。

汛期随着引水流量增大,稳定时南湖水位升高,湖面平均流速增大,换水效率提高(表 2)。相较于非汛期,从引水到稳定的时长显著缩短,南湖整体稳定时的平均水位升高 0.15%,出口平均流速升高 6.70%,水动力条件获得明显改善。这是由于汛期时入湖总流量增大,在断面不变的情况下水体流动加快。对比工况 7 和 10、8 和 11、9 和 12,整体变化情况和汛期基本一致,不同出口水位换水效率影响各相差 22%、26.67%、20.8%,引水流量增大不能改变出口水位对换水效率的影响。但汛期南湖出口控制水位的降低可以提高水体换水效率。

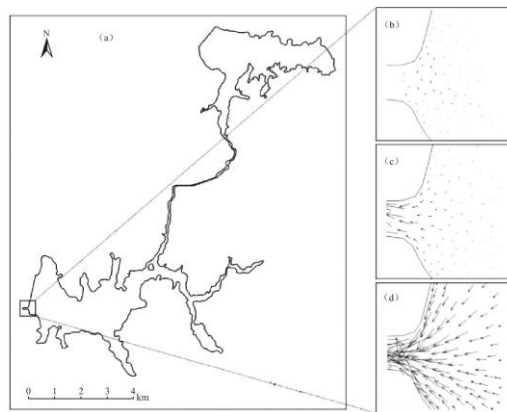


图 5(a)出口流速取点位置;(b)初始平均流速;(c)出口输出流量时平均流速;(d)水流达到稳定时平均流速

表 2 不同工况下稳定时的平均水位和平均流速

时期	南湖出口水位 H(m)	华能电厂取水流量 Q(m ³ /s)	清港径流量 Q(m ³ /s)	连通时间 t(s)	平衡时南湖水位 H(m)	工 况	平均流速 V(m/s)
非汛	26.06	6	/	4053600	26.19	1	0.11

期		12	/	2800800	26.27	2	0.17
		24	/	2246400	26.43	3	0.30
	25.86	6	/	3225600	26.04	4	0.08
		12	/	2440800	26.11	5	0.14
		24	/	2066400	26.27	6	0.25
汛期	26.06	6	3	2689200	26.20	7	0.10
		12	3	2260800	26.29	8	0.15
		24	3	1947600	26.43	9	0.25
	25.86	6	3	2365200	26.06	10	0.12
		12	3	2041200	26.15	11	0.19
		24	3	1879200	26.30	12	0.30

3.2 水系连通性评价

河湖连通性主要是指综合考虑水利工程调度方式对河湖水系连通性的影响, 从中选出能够较为灵活反映水系连通动态变化的关键性指标(表 3)。引水流量表达为 $Q(\text{m}^3/\text{s})$; 连通时间表达为 $t(\text{s})$ 。南湖稳定时平均水位和初始水位之差与水面面积的乘积视为流体稳定时南湖增蓄水量, 表达为 $W(\text{m}^3)$ 。将水系连通性定义为通过引排水提高的水体换水效率, 即进水总量占水体平衡时南湖增蓄水量的比值, 为连通程度, 得到以提升水体自净能力为目标的水系连通度, 用无量纲常数 C 表征水系连通程度。 C 值小于 1, 引水调度过程中无法实现换水目的, C 值大于 1, 引水过程中可达到换水提高水体自净目的。其计算式为:

$$C = Qt/W \quad (1)$$

式中: C 表示连通度; Q 表示引水流量; t 表示连通时间; W 表示稳定时南湖增蓄水量。

通过引水调度模式可以在一定时间内达到换水净水的目的, 稳定时南湖增蓄水量与引水流量的比值为水体的换水周期^[1], 其计算式为:

$$T = W/(24 \times 3600 \times Q) \quad (2)$$

式中: T 表示换水周期, 单位 d 。

表 3 中工况 3、6、9、12 的连通性指数高于其他工况且换水周期显著缩短, 主要是引水流量增大对连通性的作用效果较明显, 提高了水体连通性。非汛期情况下, 参考连通性指数和换水周期, 连通初期出口水位控制在 25.86m 时连通性有优势, 可以在最短时间内达到换水目的。当水体处于平衡时考虑将出口水位改为控制在 26.06m, 在此水位下水体达平衡时的换水效率比在 25.86m 时的换水效率提升 20%。汛期情况下, 当出口最低控制水位在 25.86m 时, 连通度最高, 稳定后水体换水效率也最高, 为 0.30m/s, 大

大提升水体自循环能力。因此,合理调控引水调度模式可以提高整体水系连通度,强化水体自净能力,改善水环境。

表 3 不同工况下的连通度计算值和换水周期

时期	南湖出口水位 H(m)	华能电厂取水流量 Q (m ³ /s)	清港径流量 Q (m ³ /s)	连通时间 t (s)	平衡时南湖水量 W (m ³)	工 况	连通度 C	换水周期 T (d)
非汛期	26.06	6	/	4053600	10429256	1	2.33	20.12
		12	/	2800800	11627840	2	2.89	11.22
		24	/	2246400	13857464	3	3.89	6.68
	25.86	6	/	3225600	8304168	4	2.33	16.02
		12	/	2440800	9345232	5	3.13	9.01
		24	/	2066400	11570560	6	4.29	5.58
汛期	26.06	6	3	2689200	10601096	7	2.28	13.63
		12	3	2260800	11861256	8	2.86	9.15
		24	3	1947600	13941952	9	3.77	5.58
	25.86	6	3	2365200	8570520	10	2.48	11.02
		12	3	2041200	9890824	11	3.10	7.63
		24	3	1879200	12053144	12	4.21	5.17

该工程下水系整体连通性主要受引水流量和南湖出口水位控制,同时,径流的存在也使水体自循环效率加快。该区域水体连通性还可能受人类活动、气候变化等影响。人类活动对水系连通性在多方面起决定性的作用,除文中所提通过闸坝工程提高水体连通性,河道两岸筑堤、生活污水排放、湖泊周围大面积的围垦等均可阻碍水系连通。气候变化可使湖泊入流条件发生变化或改变降雨、影响径流汇入量,降雨较大可能提高水系整体水位,加快水体流动速度,也可能致使洪峰过后水体携带泥沙淤积于入汇湖泊的支流或阻塞河湖连通通道,水系连通性变差,这些问题有待增加实测数据和深入分析以进一步解决。

4 结论

(1)通过 MIKE21 模拟计算结果得出,实施该连通方案后,形成长江-芭蕉湖-王家河-南湖-洞庭湖的环城水系,可提高水系整体平均水位,城区水系水体流动性增强,湖泊水动力条件得到改善。

(2)在引水调度的动态过程中,结合水动力模型,用无量纲常数 C 表征水系连通度可以定量评价河湖连通性。在引水条件下,非汛期和汛期河湖连通性均受引水流量和南湖出口控制水位共同作用,初期增大引水流量和降低南湖出口控制水位均可提高河湖连通性。

(3)确定引水调度初期引水流量控制在 24m³/s,非汛期和汛期南湖出口控制水位在 25.86m。水体处于稳定状态时非汛期的南

湖出口控制水位调整至 26.06m,汛期不变,水系整体连通度最佳。评价结果可为“引江济湖”工程确定合理的水利工程调度方式,提供科学的理论依据。

本评价方法未能从水质角度来佐证引水调度对自净能力的提高程度,且河湖连通性还与降水、周边人类活动等因素有关,具体情况还有待进一步研究。

参考文献:

- [1]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.
- [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.
- [3]唐传利.关于开展河湖连通研究有关问题的探讨[J].中国水利,2011(6):86-89.
- [4]夏军,高扬,左其亨,等.河湖水系连通特征及其利弊[J].地理科学进展,2012,31(1):26-31.
- [5]左其亨,崔国韬.河湖水系连通理论体系框架研究[J].水电能源科学,2012,30(1):1-5.
- [6]徐宗学,庞博.科学认识河湖水系连通问题[J].中国水利,2011(16):13-16.
- [7]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.
- [8]徐光来,许有鹏,王柳艳.基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J].水科学进展,2012,23(6):776-781.
- [9]陈星,许伟,李昆朋,等.基于图论的平原河网区水系连通性评价——以常熟市燕泾圩为例[J].水资源保护,2016,32(2):26-29.
- [10]高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等.基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J].水资源保护,2018,34(1):18-23.
- [11]FREEMAN M C, PRINGLE C M, JACKSON C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1):5-14.
- [12]茹彪,陈星,张其成,等.平原河网区水系结构连通性评价[J].水电能源科学,2013,31(5):9-12.
- [13]JACKSON C R, PRINGLE C M. Ecological benefits of reduced hydrologic connectivity in intensively developed landscapes[J]. Bioscience, 2010, 60(1):37-46.
- [14]PASCUAL-HORTAL L, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(7):959-967.