

洞庭湖区水系连通工程指标体系与评价方法

李凯轩¹,李志威^{1,2},胡旭跃^{1,2},陈 帮¹,钱 湛³,王赞成⁴

(1.长沙理工大学水利工程学院,湖南 长沙 410114; 2.洞庭湖水环境治理与水生态修复湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114; 3.湖南省水利水电勘测设计研究总院,湖南 长沙 410007; 4.湖南百舸水利建设股份有限公司,湖南 长沙 410007)

摘要:构建与洞庭湖区水系连通工程综合评价相适应的指标体系,包括结构连通性、水力连通性、生态环境效益和社会经济效益等4个主要要素层,共计12个关键指标;提出定量评价方法,并运用于澧县城区水系连通工程的综合评价。结果表明:澧县城区水系连通工程可评定为优秀等级,评价结果与工程实际相符,未来应进一步优化河渠结构连通格局,促进生态环境效益向社会经济效益转化。

关键词:洞庭湖区;水系连通;连通工程;指标体系;综合评价

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0006-05

An index system and evaluation method for water network connection projects in Dongting Lake area// LI Kaixuan¹, LI Zhiwei^{1,2}, HU Xuyue^{1,2}, CHEN Bang¹, QIAN Zhan³, WANG Zancheng⁴ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration, Changsha 410114, China; 3. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha 410007, China; 4. Hunan Bestall Water Conservancy Construction, Co., Ltd, Changsha 410007, China)

Abstract: An index system suitable for the evaluation of water network connection projects in the Dongting Lake area is proposed, which includes 12 key indexes in four factor layers, i. e., structural connectivity, functional connectivity, ecological and environmental benefits, and socioeconomic benefits. This evaluation method is applied to comprehensively assess the water network connection project in the urban area of Lixian County. The results show that this project is excellent and the evaluated result is consistent with engineering practice. The structure and connectivity pattern of rivers and canals should be further optimized, and the transformation of ecological and environmental benefits to socioeconomic benefits should be promoted.

Key words: Dongting Lake area; water network connection; connection project; index system; comprehensive evaluation

洞庭湖区的水资源在时空上分布不均匀,局部水系状况与当地经济发展要求不相匹配,未发挥应有的连通功能,导致洞庭湖区局部出现较严重的洪涝灾害、水环境污染和水生态问题。实施河湖水系连通工程是实现洞庭湖区水资源统一调配和防洪排涝的重要途径,是改善洞庭湖区水质和修复水生态系统的有效措施,对社会经济发展起到推动作用^[1]。目前洞庭湖区(湖南省部分)已规划和在建24个水系连通工程,以改善当前河湖的亚健康状况^[2]。这些工程虽已通过前期的工程规划和可行性研究论证,但由于投资额度较大,对工程区域也将产生较大影响,其科学性和合理性应得到更多定量评价。

水系连通作为维持、改善和构建健康河湖关系以及合理配置水资源的有效举措,在国内外已得到

较多工程实践和理论研究^[3-5]。近年来,诸多学者运用指标法分析和评价特定区域的水系连通状况及其变化。Bracken等^[6]运用评价指标探讨和预测宏观尺度下河流的水文连通性,Rivers-Moore等^[7]选取指标从纵向、横向和时间3个维度,分析局部河段或断面尺度的综合连通性。在国内,构建水系连通性评价指标体系是最常用的方法之一。体系的层次构建大多按照相同的步骤,即首先确定水系连通性评价的最终目标层,再从水系连通格局^[8]、结构连通性^[9-11]、水力连通性^[9-10]、自然功能^[12-13]、社会功能^[10,12-13]、社会经济^[14-15]和生态环境^[9,10,14-15]等方面设置准则层,最后选取与准则层相关的指标组成指标层。前人还讨论了指标权重的设置^[9]、水系连通形态指标与功能指标之间的内在相关性^[8]以及城

基金项目:湖南省科技重大专项(2018SK1010);湖南省教育厅重点项目(19A017);长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升计划(SJ CX201938)

作者简介:李凯轩(1996—),男,硕士研究生,主要从事河湖水系连通研究。E-mail:744964690@qq.com

通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,博士,主要从事河流动力学研究。E-mail:lizw2003@whu.edu.cn

镇化进程与水利工程建设对水系连通形态和功能的影响^[10,12]。评价指标可以作为一种理论工具,指导综合合理运用经济和社会资源,使得水系连通工程获得最大收益^[7]。现有的水系连通性评价指标体系具有一定的客观性和通用性,但并不完全适用于洞庭湖区的特定水系连通工程的综合评价。

当前对洞庭湖区水系连通工程的理论研究落后于实践,主要研究水系连通工程实施前后水系的形态格局和连通性变化^[16],对洞庭湖区水系连通工程实施效果的综合评价尚缺少相关阐述。本文构建了与洞庭湖区社会经济发展和生态文明建设要求相适应的水系连通工程指标体系与评价方法,并应用于水系连通示范工程,评价其对水系格局、水资源配置、水生态环境和社会经济发展的综合影响,可为现有水系连通工程的评估提供定量方法,也为实施新的水系连通工程提供参考。

1 洞庭湖区水系连通工程指标体系

1.1 指标体系构建的基本原则

①适用性:指标体系的构建最终服务于洞庭湖区水系连通工程评价,不仅要考虑目前已规划和在建的水系连通工程,还应符合洞庭湖区社会经济发展和生态文明建设要求,适用于洞庭湖区未来新的水系连通工程评价;②层次性:指标体系应由主到次,逐层细化,用清晰明了的方式呈现;③关键性:选取的指标应能描述水系连通工程的关键特点和主要实施效果;④定性和定量结合:应包含定量评价指标,保证结果的客观性,又能将难以量化的指标通过定性分析予以评价。

1.2 指标选取与体系构建

充分参考已有研究中的指标,综合考虑洞庭湖

区已有水系连通工程的性质、特征和目的,寻找其中的共性和差异,最终确定 4 个主要评价要素,共 12 个指标,构建指标体系如表 1 所示^[8,15,17]。

2 水系连通工程综合评价方法

2.1 确定指标的权重

洞庭湖区水系连通工程主要有城市水系连通工程、跨水系跨垸连通工程和垸内水系连通工程 3 类。城市水系连通工程通常会新增连通渠道,应将表征水系形态格局的结构连通性纳入综合评价中。跨水系跨垸连通工程主要通过长距离水资源调度进行定向补水,垸内水系连通工程主要通过清淤疏浚的方式加强水体流通,二者通常未新增连通渠道,因此在综合评价中不考虑结构连通性。根据 4 类指标与各类水系连通工程实施目标的相关性及其重要程度确定单类指标权重(表 2)。根据单个指标在单类指标评价中的重要程度,确定单类指标中单个指标的权重(表 1)。

表 2 洞庭湖区水系连通工程单类指标权重

工程类型	结构 连通性	水力 连通性	生态 环境效益	社会 经济效益
城市水系连通工程	0.1	0.2	0.4	0.3
跨水系跨垸连通工程	0	0.2	0.35	0.45
垸内水系连通工程	0	0.4	0.3	0.3

2.2 确定指标的评分规则

总结相关已有研究^[12,16,18],制定适用于洞庭湖区水系连通工程定量指标的评分标准(表 3)。对于定性指标的评价,首先分析该水系连通工程的实施是否符合洞庭湖生态经济区规划的总体要求,其次是否符合当地独有的社会经济发展要求,最后考量符合要求的程度,同样分好、良、中和差 4 个等级,依

表 1 洞庭湖区水系连通工程指标体系

要素层	指标层	指标权重	计算方法	指标说明
结构 连通性 A	河网密度 R_r	0.3	$R_r = \sum_{i=1}^n L_i / A_r$	描述区域内水系的通达程度和发育水平。 L_i 为单条水系长度; n 为水系数量; A_r 为区域面积
	水系环度 α	0.4	$\alpha = \frac{n-v+1}{2v-5}$	区域内水系连接成环的水平,与水体循环交换的程度成正比。 v 为节点个数
	水系连通度 γ	0.3	$\gamma = \frac{n}{3(v-2)}$	水系之间形成连通通道,实现互联互通的能力
水力 连通性 B	换水周期 T	0.4	$T = 365M/W$	污染物被新水置换出某一区域所需要的时间。 M 为河湖纳污能力; W 为排入河湖污染量
	河道流速	0.3		反映水体流通快慢的指标
	河道流量	0.3		反映河道的生活、生产供水能力
生态环境 效益 C	水体纳污能力 M	0.4	$M = (c_s - c_0) V$	满足特定水质要求,河(渠)能容纳某种污染物的最大数量。 c_s 为水质目标浓度; c_0 为水质初始浓度; V 为水体体积
	最小换水流量	0.2	河道生态保护所需的最小流量	达到特定生态环境要求所需的最小流量
	水功能区达标率	0.4	达标河流长度占比	工程实施后水体达到水质目标的程度
社会经济 效益 D	土地增值效益	0.3	每年土地价值增加额	工程实施后的土地升值水平
	防洪效益	0.4	工程相关洪涝收益估算值	工程实施后可减少的洪水灾害损失
	灌溉效益	0.3	工程相关灌溉收益估算值	工程实施增加灌溉面积及农作物带来的收益

表 3 定量指标评分标准

等级	评分	R_d	α	γ	$C/\%$
好	10	$(2.5, +\infty)$	$(0.5, 1]$	$(0.7, 1]$	$(90, 100]$
良	8	$(1.5, 2.5]$	$(0.3, 0.5]$	$(0.5, 0.7]$	$(75, 90]$
中	6	$(1, 1.5]$	$(0, 0.3]$	$(0.3, 0.5]$	$(60, 75]$
差	4	$(0, 1]$	$(-1, 0]$	$(0, 0.3]$	$(0, 60]$

2.3 水系连通工程综合评分计算方法

从水系连通工程相关报告中提取基础数据,依据相应计算方法得到指标值,对照前文提到的指标评分规则进行指标计分。单个工程若限于数据完整性,遇到难以评价的指标时可适当采用相似指标进行替代评价^[15]。单类指标得分 A 和综合评价得分 Z 的计算公式为

$$A = \beta_{A1}A_1 + \beta_{A2}A_2 + \beta_{A3}A_3 \tag{1}$$

$$Z = \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4D \tag{2}$$

式中: A_n 为 A 类指标中单个指标得分; β_{An} 为单个指标在 A 类指标评价中所占权重; β_n 为单类指标在综合评价中所占权重。 $B、C、D$ 的计分方式与 A 相同。若 $Z < 6$,认为工程合理性较差;若 $6 \leq Z < 8$,认为工程合理性良好;若 $Z \geq 8$,则可评定为优秀等级(图 1)。

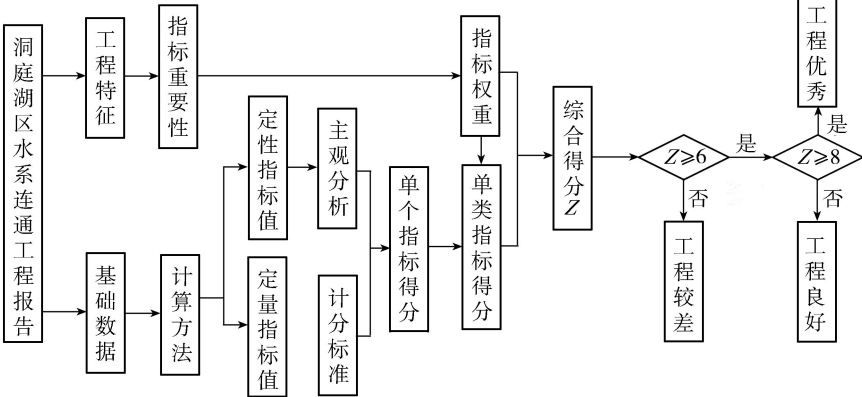


图 1 水系连通工程综合评价逻辑流程

3 案例分析

由于部分工程的资料收集困难,难以对洞庭湖区(湖南省部分)已规划和在建的 24 个水系连通工程逐个分析评价。本研究选取资料较完整的澧县城区水系连通工程为典型案例,对指标体系和评价方法进行验证和应用,为城市水系连通工程及其他类型的水系连通工程的评价提供参考。

3.1 工程简介

湖南省澧县城区水资源总量丰富,但水系未整体连通,加之部分工业废水和生活污水汇入其中,导致局部水环境恶化。尤其是在枯水干旱季节,澧水、栗河、襄阳河及部分灌排沟渠污染严重,制约了城区社会经济发展。为适应洞庭湖区城市发展和治水理念,创造良好的生态环境,满足澧县海绵城市发展和社会公众的水环境需要,当地启动了澧县城区水系连通工程。该工程规划了引澧济澧济澧片、老城区 3 线活水片和主城区活水片 3 个项目分片,共 5 条引水线路(图 2)。其中,老城区活水南线分为东、西两段,西是回水渠渡槽出口—栗河凤凰堰段,东是栗河凤凰堰—黄沙湾自排闸引水渠段。项目区总面积

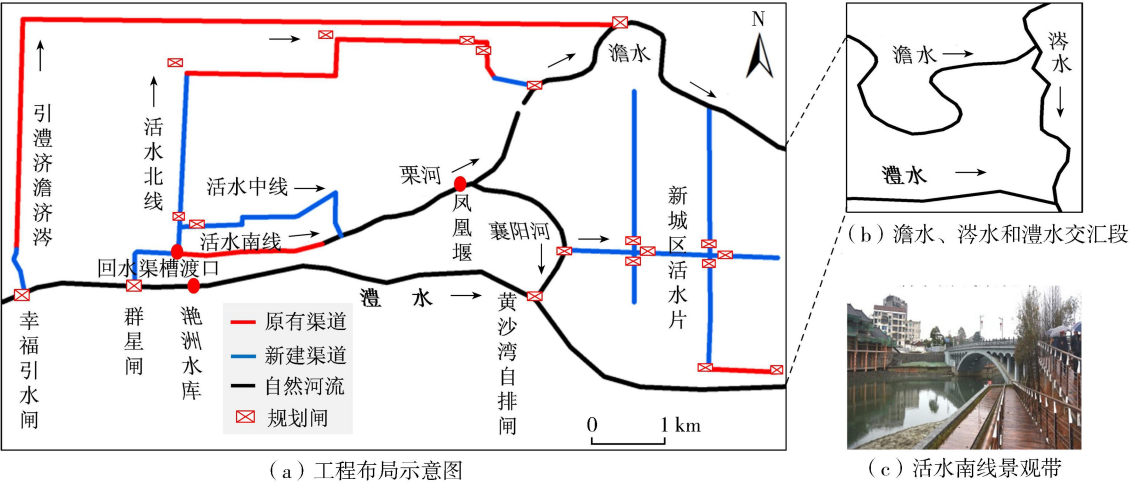


图 2 澧县城区水系连通工程

为 61 km²,人口为 20 多万人。

3.2 评价结果

3.2.1 结构连通性评价

经计算结构连通性评价指标, $R_t = 1.85$, $\alpha=0.06,\gamma=0.38$ 。工程实施后,区域内每 1 km² 面积上分布河、渠约 2 km,水系发育水平和通达情况较好,但水系之间仍未能形成较好的连通通道,连接成环的水平一般。

3.2.2 水力连通性评价

通过幸福引水闸从澧水干流引流 9 m³/s 进入澧水,可解决引澧济澧济涔活水线路水源问题。澧水流经涔水后又汇入澧水,以循环利用区域的水资源。由表 4 可知,工程实施后澧县新、老城区各活水路线的换水周期都大幅度缩短,特别是老城区活水中线的换水周期缩短至工程前的 1/8,表明工程实施后水体置换效率提高。各路线常年保证 2.00 ~ 5.00 m³/s 的适宜流量和 0.30 ~ 0.50 m/s 的适宜流速(老城区活水南线的栗河及襄阳河水面宽、水深大,流速维持在 0.02 ~ 0.03 m/s),可较好实现交换自如和余缺互补的水力连通。

3.2.3 生态环境效益评价

栗河和襄阳河是贯穿澧县城区的主要排涝内河,据《澧县水功能区划》为Ⅲ类水质功能区。工程对其进行清淤截污,并保证流量为 5.00 m³/s,可将原Ⅴ类水质提升至Ⅲ类,水功能区达标率为 100%。由表 4 可得,工程实施后新、老城区各活水路线的最小换水流量提升至工程前的 3 倍以上,水体纳污能力强,表明河流水生态环境得到较好改善。

3.2.4 社会经济效益评价

工程实施后项目区周边土地预计升值 2.7 亿元,按 50 a 的正常使用期计算,年化收益为 1 466 万元。工程实施前灌溉保证率低,导致粮食减产约 1 200 kg/hm²,按 2.5 元/kg 计算,年损失 6810 万元,工程实施后可为耕地提供灌溉需水,增加灌溉效益 2 724 万元^[19]。栗河和襄阳河同时也是城区的主要防洪内河,但二者在实际中主要用于打造水生态休闲景观,尚未见明显的防洪效益。

3.2.5 案例综合评价

将定量指标值对比表 3 的评价标准,以洞庭湖区和澧县当地对生态经济区和特定工程区域的规划要求为定性评价依据,综合工程实施的实际效果,按照前文提出的评分规则和计算方法进行计分。其中,单类指标的权重是以表 2 中的城市水系连通工程为准。如表 5 所示,综合得分 $Z=9.4>8$,可评定为优秀等级。该工程主要是由幸福引水闸和群星闸从澧水干流引水,分别对新、老城区及澧水进行水资源调配,以创造良好的生态环境,打造澧县水域靓城,因此水力连通性和生态环境效益评分最高,各项评价结果符合工程实际。在未来应以提高 α 和 γ 为重点,继续优化水系连通格局设计,并促进生态效益转化为社会效益。

表 5 澧县城区水系连通工程综合评价评分

要素层	指标层	单个指标得分	单类指标得分
结构 连通性 A	河网密度	8	6.6
	水系环度	6	
	水系连通度	6	
水力 连通性 B	换水周期	10	10
	河道流速	10	
	河道流量	10	
生态环境 效益 C	水体纳污能力	10	10
	最小换水流量	10	
	水功能区达标率	10	
社会经济 效益 D	土地增值效益	10	9.2
	防洪效益	8	
	灌溉效益	10	

4 结 论

a. 选取了结构连通性、水力连通性、生态环境效益和社会经济效益 4 大要素的 12 个评价指标,构建评价指标体系。根据实际工程类型不同,对单类指标赋相应权值,并确定了单个指标在单类指标评价中的权重。制定了综合评价方法,可用于评价洞庭湖区水系连通工程实施的综合影响,也为其他区域的水系连通工程综合评价提供参考。

b. 澧县城区水系连通工程可评定为优秀等级,其评价结果与规划设计目标和工程实际情况相符。该区域的水系结构连通性较差,未来应调整水系的整

表 4 澧县新、老城区各活水路线部分评价指标

引水区间	水力连通性评价指标				生态环境效益评价指标		
	换水周期/d		工程后流速/ (m·s ⁻¹)	工程后流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	工程后水体 纳污能力/t	最小换水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	
	工程前	工程后				工程前	工程后
老城区活水北线	14.72	4.92	0.30 ~ 0.50	2.00	0.35	0.10	0.30
老城区活水中线	8.44	1.04	0.30 ~ 0.50	3.00	0.05	0.05	0.37
老城区活水南线西段	22.08	6.49	0.02 ~ 0.03	共 5.00	1.25	0.43	1.47
老城区活水南线东段	21.73	5.59	0.02 ~ 0.03		1.32	0.54	2.11
新城区引水线	15.31	4.45	0.30 ~ 0.50	4.00	0.18	0.10	0.34

体规划布局,并逐渐将生态效益转化为社会效益。

c. 本文采用的指标加权计算方法具有较好的可操作性和适用性,计算过程较为简单,下一步仍需结合水系连通工程实践,进一步探索科学的计算方法。

参考文献:

- [1] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(3):523-529. (WANG Zhonggen, LI Zongli, LIU Changming, et al. Discussion on water cycle mechanism of interconnected river system network[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 523-529. (in Chinese))
- [2] 湖南省洞庭湖水利工程管理局. 湖南省洞庭湖区河湖连通生态水利规划报告[R]. 长沙: 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 2017.
- [3] 杨志,冯民权. 基于图论的强人工干扰流域综合连通性量化的改进方法[J]. 水资源保护,2020,36(4):52-59. (YANG Zhi, FENG Minquan. An improved method based on graph theory to quantify comprehensive connectivity of basins with strong artificial disturbance [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 52-59. (in Chinese))
- [4] 夏继红,陈永明,周子晔,等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展,2017,28(5):780-787. (XIA Jihong, CHEN Yongming, ZHOU Ziyue, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))
- [5] 陈传友,沈镭,胡长顺,等. 我国大西线“江河连通”调水新格局的设想与评析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):1-8. (CHEN Chuanyou, SHEN Lei, HU Changshun, et al. Analysis of and preliminary comments on new pattern of rivers-connected water transfer along Great Western Line of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 1-8. (in Chinese))
- [6] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119:17-34.
- [7] RIVERS-MOORE N, MANTEL S, RAMULIFO P, et al. A disconnectivity index for improving choices in managing protected areas for rivers [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2016, 26:29-38.
- [8] 翟正丽,桑学锋,顾世祥,等. 基于水资源配置平衡的云南省水系连通格局效果分析[J]. 水资源保护,2019,35(3):48-52. (ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, GU Sixiang, et al. Effect analysis of water system connectivity pattern in Yunnan Province based on water resources allocation balance [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 48-52. (in Chinese))
- [9] 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 Guangbai, CHEN Xing, XIANG Long, et al. Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1429-1437. (in Chinese))
- [10] 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 Chuanjun, CHEN Chenghao, LI Longbing, et al. Research on the connotation and evaluation index system of interconnected river system network [J]. Water Power, 2016, 42(7): 2-7. (in Chinese))
- [11] 胡尊乐,汪姗,费国松. 基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):24-28. (HU Zunle, WANG Shan, FEI Guosong. Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 24-28. (in Chinese))
- [12] 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 Meng, DOU Ming. 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))
- [13] 李景保,于丹丹,杨波,等. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性[J]. 水资源保护,2019,35(5):19-26. (LI Jingbao, YU Dandan, YANG Bo, et al. Regulation capacity changing trend and its relation with river network structure in Jingnan Three Port of Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 19-26. (in Chinese))
- [14] 向莹,韦安磊,茹彤,等. 中国河湖水系连通与区域生态环境影响[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(增刊1):139-142. (XIANG Ying, WEI Anlei, RU Tong. et al. Rivers system connection and regional ecological and environmental impacts in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(Sup1): 139-142. (in Chinese))
- [15] 冯顺新,李海英,李翀,等. 河湖水系连通影响评价指标体系研究 I: 指标体系及评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(4):386-393. (FENG Shunxin, LI Haiying, LI Chong. et al. Study on the impact evaluation indicator system of river and lake system interconnection I: impact evaluation indicator system and evaluation method [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 386-393. (in Chinese))

(下转第 22 页)