

洞庭湖区典型水系连通工程优化分析

柳恒¹,李志威²,胡旭跃¹,李凯轩³,陈帮¹,王赞成⁴

(1.长沙理工大学水利与环境工程学院,湖南长沙 410114;

2.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉 430072;

3.湖南省水利水电勘测设计规划研究总院,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:选取南县西水东调工程和君山区华洪运河连通工程作为典型案例,基于连通性指标对洞庭湖区规划水系进行优化分析与评价。结果表明:规划条件下洞庭湖区水系结构连通性有所下降,但存在优化空间;优化条件下南县西水东调工程中藕池河西支、中支的流量分别增加至 $9.3\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5.3\text{ m}^3/\text{s}$,水动力条件得到明显改善,优化廊道出口节点的流量分配系数增加,有效增加了钟家嘴灌区的输水量;优化后君山区华洪运河连通工程中南、北湖群增蓄水量的换水周期分别减少至5 d和8 d,换水效率分别提高55.71%和12.26%。

关键词:水系连通;廊道优化;换水周期;洞庭湖区

中图分类号:TV147

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)01-0091-06

Connectivity analysis and optimization of typical river-lake connection projects in Dongting Lake area//LIU Heng¹, LI Zhiwei², HU Xuyue¹, LI Kaixuan³, CHEN Bang¹, WANG Zancheng⁴ (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China; 4. Hunan Bestall Water Conservancy Construction Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The Nanxian West-to-East Water Diversion Project and the Huahong Canal Connection Project were selected as typical cases, and the planned water system in the Dongting Lake area was optimized and evaluated based on connectivity indicators. The results show that the connectivity of the water system structure has declined under the planning conditions, indicating much room for optimization. Under the optimized conditions, the flow discharge of the west and middle branches of the Ouchi River in the Nanxian West-to-East Water Transfer Project increases up to $9.3\text{ m}^3/\text{s}$ and $5.3\text{ m}^3/\text{s}$, and the hydrodynamic conditions are significantly improved. The discharge distribution coefficient at the outlet node of the optimized corridor is increased by 16.7%, effectively increasing the water delivery volume of the Zhongjiazui irrigated area. After the optimization, the water exchange cycle for increasing the storage capacity of the south and north lake group of the Huahong Canal Connection Project is reduced to 5 and 8 days, respectively, and correspondingly the water exchange efficiency is increased by 55.71% and 12.26%, respectively.

Key words: water system connectivity; corridor optimization; water exchange cycle; Dongting Lake area

受自然与人为因素的影响,自1950年荆江-洞庭湖关系发生重大变化,导致部分河道断流天数增加,而河道断流加剧了沿岸地区农田灌溉、生活用水短缺的问题^[1-2]。枯水期由于来流量减少,内湖水体交换能力明显下降,水质恶化、水体富营养化等环境问题日益突出,因此水环境问题逐渐成为阻碍社会经济可持续发展的重要因素。在洞庭湖区实施河湖连通工程是实现区域水资源调配、水质改善和生态修复的有效措施,可有效提高该区域应对极端水旱

灾害的能力。

目前水系连通性的评价方法主要分为图论法、景观学法、综合指标法、生物法和水文水力学法^[3-8]。图论法通过点与线组成的图形建立顶点间的邻接矩阵,根据判定准则计算河网连通度,但计算结果无法反映流域水量分配的过程。综合指标法能够综合社会、自然等多方面的属性进行综合评判,但人为主观因素大。水文水力学法采用过流能力和阻力特性来反映河网水系的连通性,无法适应源头区中小河流

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);湖南省自然科学基金(2020JJ3036)

作者简介:柳恒(1996—),男,硕士研究生,主要从事河流流体力学研究。E-mail: 1357468626@qq.com

通信作者:李志威(1984—),男,副教授,博士,主要从事河流流体力学研究。E-mail: lizw2003@whu.edu.cn

的连通性评价。生物法依据生物的迁徙与扩散来反映河流的生态连通性,因此易受生物种类及其习性的影响。景观学法基于影像数据和评价指标,能够较为客观地评价规划区域内水系的分布格局和结构连通性,是城市水系规划、评价和优化的重要方法,但是依赖影像资料的分辨率。

在对洞庭湖区水系连通工程评价中,黄草等^[4]基于景观学中网络连通度方法评价洞庭湖区现状水系以及规划水系,提出优化方案;李景保等^[5]运用集对分析以及相关分析的方法评价水工建筑物对自然河流水系连通的影响;陈叶华等^[9]通过水动力模型建立芭蕉湖-南湖水系连通定量评价指标。以往水系连通规划工程的评价主要考虑水系的结构连通性,对于优化方案的功能连通性评价方法有待进一步研究。枯水期洞庭湖区藕池河段河床常年淤积,藕池河中西支常年处于断流状态,沿岸地区水资源短缺。本文依据前人对洞庭湖规划片区水系格局以及连通性差异的合理性分析^[4],按照泵站抽水流量控制和水位自流驱动两种水动力条件,以南县西水东调工程和华洪运河连通工程为典型案例,基于景观学中网络连通度方法进行优化分析与评价。

1 工程规划概况

以骨干河道为边界,工程规划区域共划分为六大片区,分别为洞庭湖北部地区连通区、松澧地区连

通区、沅澧地区连通区、沅江市连通区、湘-资水尾间连通区和岳阳市连通区(图1),拟通过合理的水系规划增强水系抗旱、抗涝能力,保证用水安全,同时依靠生态湿地公园、景观带建设发挥娱乐功能,改善人们的生活品质。

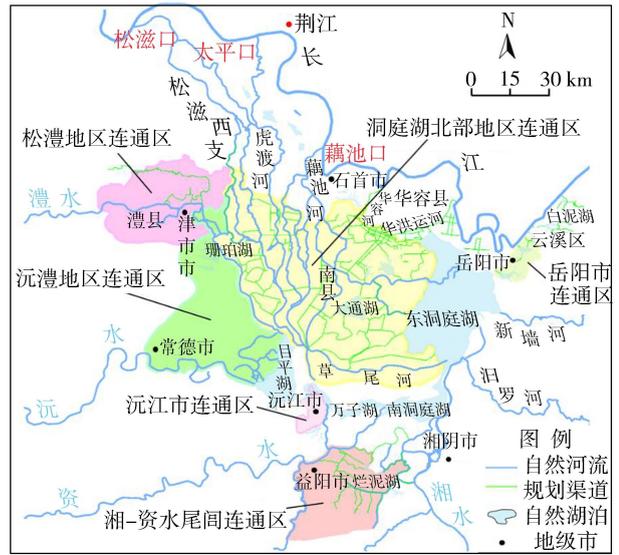


图1 洞庭湖区水系连通工程规划片区

按照不同的规划功能对水系连通工程进行分类,各工程具体功能如表1所示。北部地区连通区主要满足城镇和农田灌溉用水需要。由于藕池河中西支、鲇鱼须河的断流期持续时间较长,故南县和华容县的缺水量远高于其他水系连通工程。岳阳市连

表1 洞庭湖区水系连通工程分类

连通工程一级功能	水系连通工程	所属片区	二级功能	水动力条件	95%保证率的年取水量/万m ³
资源调配型	沅江市双茶垸连通工程	北部地区连通区	灌溉用水	水位自流	1985
	益阳市赫山区连通工程	北部地区连通区	灌溉用水、安全用水、水环境治理	水位自流	2843
	资阳区民丰垸连通工程		安全用水、灌溉用水	水位自流	1015
	资阳区长春垸连通工程		灌溉用水、水环境治理	泵站抽水	1141
	南县西水东调工程	北部地区连通区	灌溉用水	泵站抽水	15534
	华容县连通工程	北部地区连通区	城镇供水、灌溉用水	水位自流	22300
	汉寿县连通工程		城镇供水、灌溉用水	水位自流	3300
	安乡县安保垸连通工程	北部地区连通区	城镇供水、生态修复	水位自流	4009
	安乡县松虎藕河连通工程	北部地区连通区	保证饮水安全、灌溉用水、防洪排涝	泵站抽水	9092
水质改善型	岳阳市主城区两湖连通工程	岳阳市连通区	水质改善、生态修复、景观维护	水位自流	739
	湘阴湘滨南湖垸连通工程		水质改善、生态修复	水位自流	2486
	沅江市城区五湖连通工程	沅江市连通区	生态修复、景观维护	水位自流	0
水灾害防御型	岳阳县中洲垸连通工程		防洪排涝	水位自流	1700
	湘阴白水江下游连通工程	湘-资水尾间连通区	防洪排涝、灌溉用水	水位自流	2814
	临湘市水系连通工程		防洪排涝、灌溉用水、生态修复	泵站抽水	1700
	安乡县深柳镇连通工程	北部地区连通区	防洪排涝、城市供水	水位自流	2099
	云溪区永济垸连通工程		洪水防御、城市除涝	泵站抽水	2487
	云溪区陆城垸连通工程		洪水防御、城市除涝	泵站抽水	2487
	君山区华洪运河连通工程	北部地区连通区	洪水防御、城市除涝、应急供水	水位自流	874
	君山区君山垸连通工程	北部地区连通区	洪水防御、城市除涝、应急供水	水位自流	874
	常德市沅澧大圈连通工程	沅澧地区连通区	排涝、供水、灌溉、水生态修复	泵站抽水	8900
综合治理型	澧县平原地区连通工程	松澧地区连通区	排涝、供水、灌溉、水生态修复	水位自流	3400
	大通湖水系连通工程	北部地区连通区	排涝、供水、灌溉、水生态修复	泵站抽水	11466
	汨罗江古罗城连通工程		排涝、供水、灌溉、水生态修复	水位自流	3400

通区、沅江市连通区规划工程主要以水质改善、生态修复和景观修复为目标,着重改善城市居民的生活环境。湘-资水尾间连通区由于地处湘水、资水交界处,防洪压力较大,以洪水防御为主。沅澧地区和松澧地区连通区由于灌区面积广阔,且有松滋河、沅水和澧水的水系交织,防洪压力更大,规划功能为综合治理型。这六大片区规划工程根据本地的实际情况,依据不同的规划功能相互协同,推动洞庭湖区水环境综合治理,提升内湖和垸内水体自净,提高水环境容量。

2 研究方法

2.1 水系格局及连通性评价标准

依据《洞庭湖区河湖水系连通整体方案》^[10],结合 Google Earth 对规划廊道矢量化绘制出各工程的水系有向图,基于景观学中网络连通度方法,以河网密度 R_d 、水系环度 α 、节点连接率 β 、水系网络连通度 γ 等指标来评价水系连通性^[4]。参照 SL 431—2008《城市水系规划导则》及相关文献^[4,11],建立适合洞庭湖区连通工程的水系连通性评价标准如表 2 所示。

表 2 洞庭湖区水系连通性评价标准

等级	R_d	α	β	γ
优	(2.5,4]	(0.5,1]	(1.6,1.7]	[0.7,1)
良	(1.5,2.5]	(0.3,0.5]	(1.5,1.6]	[0.5,0.7)
中	(1,1.5]	(0,0.3]	(1.4,1.5]	[0.3,0.5)
差	(0,1]	(-1,0]	(0,1.4]	(0,0.3)

河网密度反映区域内水系通达程度和发育水平,计算公式为

$$R_d = \frac{\sum_{i=1}^m L_i}{A_r} \quad (1)$$

式中: L_i 为单条水系长度; A_r 为区域面积; m 为水系数量。

水系环度反映河网水系中节点成环的水平,计算公式为

$$\alpha = \frac{M - V + 1}{2V - 5} \quad (2)$$

式中: M 为连接的廊道数量; V 为水系节点数量, $V \geq 3$ 。

节点连接率反映河网水系中每个节点与其他节点连接的难易程度,计算公式为

$$\beta = \frac{M}{V} \quad (0 \leq \beta \leq 6) \quad (3)$$

水系网络连通度 γ 为河网水系中相互连接的廊道数量与最大可能廊道连接数 M_{\max} 之比,计算公式为

$$\gamma = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{M}{3(V-2)} \quad (4)$$

2.2 功能连通性评价方法

优化效果通过换水周期和河网连通度指标进行量化。按照功能不同,河网节点主要分为自然输入节点、水量分配节点、排泄节点 3 种。本文以相邻节点之间的廊道分流量为权值,通过 MATLAB 中的最大流算法建立节点之间的流量邻接矩阵 E ,计算公式为

$$E = \begin{pmatrix} Q_{ij} \\ Q_i \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (5)$$

式中: Q_{ij} 为由节点 i 流向节点 j 的流量; Q_i 为节点 i 的总出流量; N 为节点总数。

换水周期 T 是自然界水文循环的反映,用以表征水体之间的连通程度,计算公式^[9]为

$$T = \frac{W}{24 \times 3600Q} \quad (6)$$

式中: W 为湖泊增蓄水量; Q 为入湖流量。

3 典型水系连通工程的连通性及优化分析

3.1 南县西水东调工程

3.1.1 规划方案

南县位于洞庭湖区中部,被藕池河中西支和沱江分割为 5 个堤垸,藕池河中西支常年断流,仅松澧洪道过流。为解决枯水期藕池河中西支断流造成沿岸农田灌溉、生活用水短缺的问题,规划工程新建白蚌口提水泵站,枯水期以松澧水为水源,通过新修和改建原有廊道向藕池河、沱江、大通湖供水(图 2)。规划工程横跨南汉垸、和康垸、育乐大垸和南鼎垸,区域面积达 722 km²,规划区内自然廊道为 15 条,占总廊道数的 62.5%,其中人工廊道为 9 条,占廊道总数的 37.5%。由于仅增加 1 条廊道,规划条件下的河网密度由 0.43 增加至 0.44,总体变化不大。工程水动力重构条件为泵站抽水流量控制。

规划后, α 、 β 、 γ 分别为 0.714、2.08 和 0.82,各指标均有所下降,但规划区整体的水系连通性处于较高的水平(表 3)。由于蓄水工程不足,枯水期农田灌溉保障率较低。规划工程可改善唐家湾、钟家嘴灌区灌溉面积 1.85 万 hm²,同时解决 34.23 万人的安全饮水问题。

表 3 南县西水东调工程规划前后水系连通性变化

类别	R_d	α	β	γ
规划前	0.43	0.760	2.09	0.85
规划后	0.44	0.714	2.08	0.82
优化后	0.45	0.740	2.14	0.83

3.1.2 优化方案

规划方案以藕池河中西支为平原水库,库区水

图例

- ① 原有节点
- ② 规划节点
- ③ 新增节点
- ⊠ 规划闸
- ⊞ 现有闸
- ⊞ 规划电排、泵站
- ⊞ 现有电排、泵站
- 规划橡胶坝
- ⊞ 规划倒虹吸
- 现有廊道
- 自然廊道
- 规划廊道
- 优化廊道
- 主要灌区

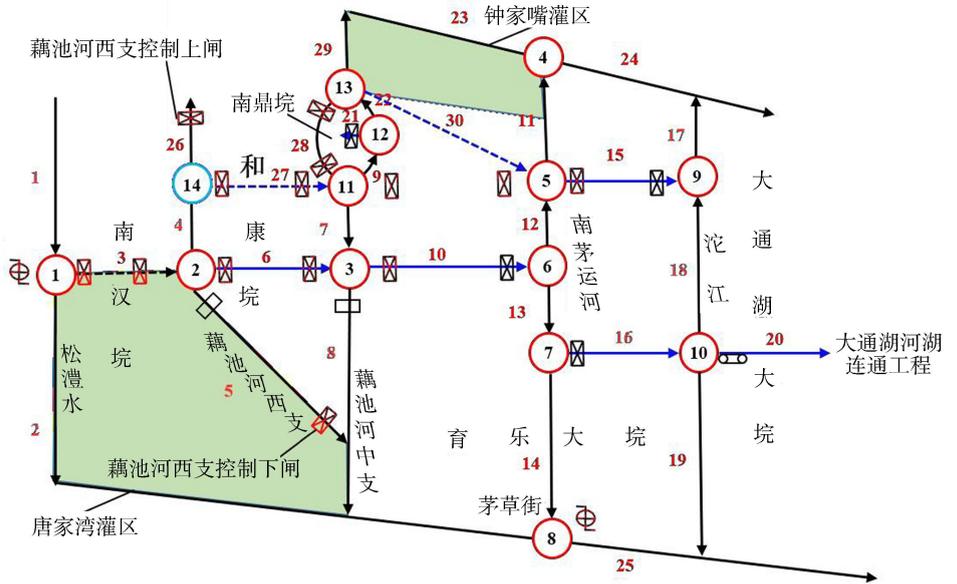


图2 南县西水东调工程规划水系有向图及优化廊道

流交换的渠道仅有6、10号廊道,水量平衡时库区内水流流速很小,优化方案通过增加水体流动性来改善库区内水质。在规划方案的基础上新增27、30号廊道,优化后 α 、 β 、 γ 分别为0.740、2.14和0.83,相对规划后分别上升3.64%、2.88%和1.22%(表3)。

白蚌口泵站抽水流量根据生态基流量和供需平衡下的工程补水量来确定,藕池河西支、中支的汛期集中在每年的6—9月份,其他月份河流基本处于断流状态,因此工程补水期应设在每年10月至次年5月。依据2003—2014年康家岗、管家铺和罗文窑站实测水文资料,基于最小月平均流量法和Tennant法计算藕池河中、西支的最小生态流量。考虑河床渗流以及灌溉引水造成的损失,生态基流量取两种结果中的较大值。

Tennant法取多年平均径流量的10%或30%作为河道的生态基流量,由于藕池河西支、中支常年断流河段的水生生物种类较少,水流仅需维持河道基本形态,生态基流量取年均径流量的10%。最小月平均流量法以每年最小月平均流量的平均值作为生态环境的需水量,计算方法见文献[12]。

通过水文数据分析,2003—2014年藕池河西支、中支的年平均径流量分别为4.17亿 m^3 和27.00亿 m^3 ,按照Tennant法计算出的藕池河西支、中支的最小生态流量分别为1.32 m^3/s 和8.56 m^3/s 。根据最小月平均流量法计算出的最小生态流量分别为3.08 m^3/s 和2.58 m^3/s ,最终确定西支、中支的生态基流量分别为3.08 m^3/s 和8.56 m^3/s ,渠道有效利用率取0.7,计算得到补水期白蚌口泵站总抽水量为5.55亿 m^3 。为减少水资源浪费,工程补水集中在每年的10—12月和次年3—5月,生态补水则

贯穿整个补水期,确定白蚌口泵站在灌溉期、非灌溉期引水流量分别为29.84 m^3/s 和15.91 m^3/s 。

水量平衡时廊道的分流量按动量平衡法进行计算,计算公式见文献[13-15]。根据谷歌影像资料结合藕池河段实测断面数据,计算出连接节点的各廊道分流比,进而计算出相邻节点之间廊道分流量。计算结果表明,节点数量增加,水网连通度总体变化不大;优化条件下14、11节点的水文连通性分别增加至0.12和0.13,5、9节点的流量分配系数分别为0.18、0.02;优化后有效增加了松澧水向钟家嘴灌区的输水量,藕池河西支、中支的流量分别增加至9.3 m^3/s 和5.3 m^3/s ,水动力条件得到明显改善,同时30号廊道增加了南县北部地区的输水量,可满足钟家嘴灌区的用水需要。

3.2 君山区华洪运河连通工程

3.2.1 规划方案

为实现水网连通和分流滞洪,君山区河湖连通以华洪运河为主水源,将长江、华容河、洞庭湖、藕池河相互连通,在主水道境内形成一张完备的渠道网(图3)。君山区跨钱粮湖垸、建设垸以及君山垸区域面积达718 km^2 ,规划区内自然渠道总长为101.7 km ,占总廊道长度的45.9%,工程实施后河网密度为0.35,工程水动力重构条件为水位自流驱动。

规划后 α 、 β 和 γ 分别为0.418、1.795和0.615,与规划前相比分别下降了10.9%、4.6%和2.5%(表4)。水系连通性的3个指标都下降的主要原因为沙山、七星湖、良心堡水库周围湖泊间连通渠道少,导致廊道节点众多,总体水系连通性一般。通过内湖清淤扩容、岸堤加高,湖区容积增加了2990万 m^3 ,在年平均径流量不变的条件下洪水防

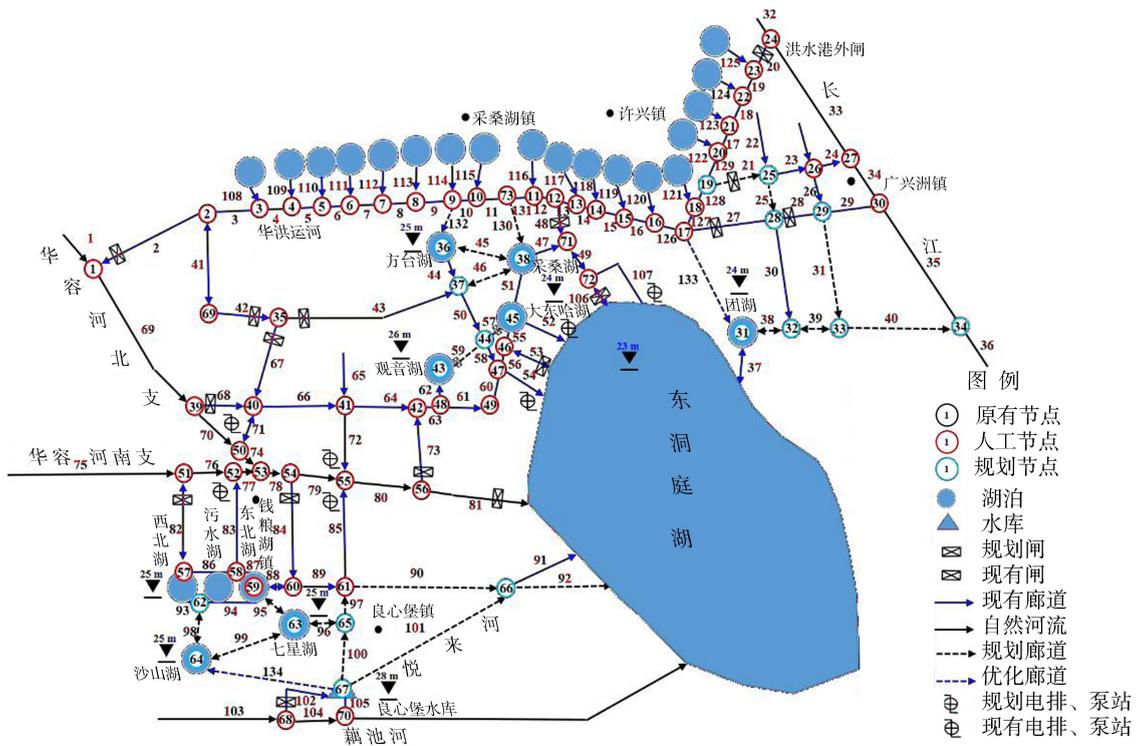


图3 君山区华洪运河连通工程规划水系有向图及优化廊道

御能力显著提升。

表4 君山区华洪运河连通工程规划前后水系连通性变化

类别	R_d	α	β	γ
规划前	0.33	0.468	1.879	0.649
规划后	0.35	0.418	1.795	0.615
优化后	0.36	0.440	1.836	0.629

3.2.2 优化方案

在原规划方案基础上通过132、133、134号廊道增加方台湖、团湖、沙山湖的引水流量,提高换水效率并增强湖泊的自净能力,优化后 α 、 β 和 γ 分别为0.440、1.836和0.629,相对规划方案分别提高5.26%、2.28%和2.28%,总体变化不大。

优化效果通过内湖换水周期指标进行量化。华洪运河的平均水位维持在28m,各内湖水水面高程数据依据Google Earth软件获得,规划区内引水渠道为土质渠道,不冲条件下的允许流速 $u = (0.65 \sim 0.8)R^{0.225}$,本文取平均值 $0.73R^{0.225}$ (R 为渠道的水力半径),依据水力学公式计算出各廊道的设计水深,进而计算出各廊道入内湖流量。假定廊道糙率相同且均为矩形断面,规划廊道入内湖流量按照明渠均匀流进行计算:

$$Q = \frac{1}{n}bh \left(\frac{bh}{b+2h} \right)^{\frac{2}{3}} i_0^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: i_0 为渠道底坡(依据正常蓄水位下内湖间的水位差与廊道长度的比值确定); b 为人工渠道宽度; h 为设计水深; n 为糙率,取值0.025。

内湖清淤后库容增加,导致换水周期延长,规划

后七星、沙山、东北、污水和西北湖群(北湖群)增蓄水量为990万 m^3 ,换水周期为11d,采桑、大东哈、方台和观音湖群(南湖群)增蓄水量为1200万 m^3 ,换水周期为9d。优化后南、北湖群的换水周期分别减少至5d和8d,换水效率分别提高55.71%和12.26%。同时优化廊道增加了华洪运河向方台湖和团湖的泄流量,减轻了华容河汛期的防洪压力,充分发挥了内湖调蓄作用。

4 结语

本文按照泵站抽水流量控制和水位自流驱动两种水动力重构条件,分别选取南县西水东调工程和君山区华洪运河连通工程作为洞庭湖区水系连通典型工程进行优化分析。与规划前相比,规划后连通性指标均有所下降,因此存在较大优化空间。南县西水东调工程优化以改善水质为目标,优化后结构连通性指标提高1.22%~3.64%,水系连通性有所增加。最小设计流量下藕池河西支、中支的流量分别增至9.3 m^3/s 和5.3 m^3/s ,有效改善了水动力条件,优化廊道尾部节点的流量分配系数提高,有效增加了钟家嘴灌区的输水量。君山区华洪运河连通工程优化通过增加湖泊的引水流量,提高了水体自净能力。优化后,结构连通性指标提高2.28%~5.56%,总体变化不大,南、北湖群增蓄水量的换水效率分别提高55.71%和12.26%,可进一步增强湖泊的自净能力。

由于洞庭湖区水系连通工程规划尚未全部实施,而且功能连通性指标是基于经验公式进行计算,

因此计算结果与实际存在差异,优化方案应根据规划工程实施后的实际情况进行调整。

参考文献:

- [1] 穆锦斌,张小峰,许全喜. 荆江三口分流分沙变化研究 [J]. 水利水运工程学报,2008(3):22-28. (MU Jinbin, ZHANG Xiaofeng, XU Quanxi. Study on variation of runoff and sediment diversion from three outfalls [J]. Hydro-Science and Engineering,2008(3):22-28. (in Chinese))
- [2] 李景保,何霞,杨波,等. 长江中游荆南三口断流时间演变特征及其影响机制 [J]. 自然资源学报,2016,31(10):1713-1725. (LI Jingbao, HE Xia, YANG Bo, et al. Temporal evolution of dried up days and the influencing mechanisms at three outlets along Jingjiang in the Middle Reach of Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(10):1713-1725. (in Chinese))
- [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] 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. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake Area [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5):661-672. (in Chinese))
- [5] 李景保,何蒙,吕殿青,等. 水利工程对长江荆南三口水系连通功能变化的影响 [J]. 热带地理,2019,39(1):135-143. (LI Jingbao, HE Meng, LYU Dianqing, et al. Effect of hydrological projects on hydrologic connectivity in the three outlets of Southern Jing River [J]. Tropical Geography, 2019, 39(1):135-143. (in Chinese))
- [6] 孙鹏,王琳,王晋,等. 闸坝对河流栖息地连通性的影响研究 [J]. 中国农村水利水电,2016(2):53-56. (SUN Peng, WANG Lin, WANG Jin, et al. A study of the effect of sluices and dams on river habitat connectivity [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2):53-56. (in Chinese))
- [7] 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. (GAO Yuqin, XIAO Xuan, DING Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):18-23. (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 rivers connectivity evaluation in plain river network area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(5):626-631. (in Chinese))
- [9] 陈叶华,李志威,沈小雄. 芭蕉湖-南湖连通工程的连通性评价 [J]. 长江流域资源与环境,2019,28(3):731-738. (CHEN Yehua, LI Zhiwei, SHEN Xiaoxiong. Hydrodynamic connectivity evaluation of Bajiao-South Lakes connected projects in Yueyang City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3):731-738. (in Chinese))
- [10] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 洞庭湖区河湖水系连通整体方案 [R]. 长沙:湖南省水利水电勘测设计研究总院,2020.
- [11] 崔国韬,左其亭,李宗礼,等. 河湖水系连通功能及适应性分析 [J]. 水电能源科学,2012,30(2):1-5. (CUI Guotao, ZUO Qiting, LI Zongli, et al. Analysis of function and adaptability for interconnected river system network [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2):1-5. (in Chinese))
- [12] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述 [J]. 水科学进展,2006,17(3):430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3):430-434. (in Chinese))
- [13] 童朝锋,严以新,孟艳秋,等. 分汊河道分流比估算方法 [J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):7-9. (TONG Xiaofeng, YAN Yixin, MENG Yanqiu, et al. Methods for evaluating flow diversion ratio of bifurcated rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6):7-9. (in Chinese))
- [14] 高玉琴,刘云苹,闫光辉,等. 秦淮河流域水系结构及连通度变化分析 [J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):32-39. (GAO Yuqin, LIU Yunping, YAN Guanghui, et al. Analysis on variation of water system structure and connectivity of Qinhuai River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5):32-39. (in Chinese))
- [15] 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 Kaixuan, LI Zhiwei, HU Xuyue, 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))

(收稿日期:2020-12-29 编辑:骆超)