

水工建筑物调度下的小微水体水系连通性评价

高雨慧¹, 徐慧¹, 唐华燕², 林小明², 周强³, 闫怀春³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 常州市溧阳市水利局, 江苏 常州 213300;

3. 江苏省水土保持生态环境监测总站, 江苏 南京 210012)

摘要: 为探究太湖流域圩内小微水体综合整治工程的水系连通成效,在考虑水系格局、结构连通性、水力连通性准则层的基础上,针对小微水体在生态系统保护和水质净化方面的突出功能,进一步提出景观连通性和水质改善两大准则层。根据小微水体的形状特征修正传统指标,使其能更好地适用于多形态水系;因小微水体受水工建筑物调度而形成不同的连通通道与水力条件,结构连通性与水力连通性均按照不同工况分别计算,再由工况时长加权得到较为稳定的年内平均值。应用该小微水体水系连通性评价指标体系对溧阳市同字水系整治前、后的水系连通性进行评价。结果表明:综合整治工程对水系连通性提升效果显著,该评价指标体系能较为客观、全面地体现小微水体与各类水工建筑物协同运作下的水系连通性。

关键词: 小微水体; 水系连通性; 水工建筑物调度; 综合评价; 同字水系

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)05-0080-08

Evaluation of water system connectivity of small water bodies under the regulation of hydraulic structures

GAO Yuhui¹, XU Hui¹, TANG Huayan², LIN Xiaoming², ZHOU Qiang³, YAN Huaichun³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources

Bureau of Liyang District, Changzhou City, Changzhou 213300, China; 3. Soil and Water Conservation

Ecological Environment Monitoring Station of Jiangsu Province, Nanjing 210012, China)

Abstract: In order to analyze the efficiency of comprehensive river regulation works on water system connectivity of small water bodies in the polder areas of Taihu Basin, two more criterion layers of landscape connectivity and water quality improvement were put forward based on the existing criterion layers including water system pattern, structural connectivity and hydraulic connectivity, due to the prominent functions of small water bodies in ecosystem protection and water purification. The conventional indices were modified according to the shape characteristics of small water bodies, so as to better describe polymorphic river networks. In light of different water flow pathways and hydraulic conditions of small water bodies caused by various regulations of hydraulic structures, structural connectivity and hydraulic connectivity were calculated separately under diverse working conditions, and then weighted by duration for relatively stable annual averages. Then, this evaluation system of water system connectivity of small water bodies was applied to the connectivity evaluation of the Tongzi River in Liyang City before and after river regulations. The results showed that comprehensive river regulation works had a significant effect on the improvement of the water system connectivity, and the evaluation system could reflect water system connectivity of small water bodies under collaborative operations of various hydraulic structures in a reasonably objective and comprehensive way.

Key words: small water body; water system connectivity; regulation of hydraulic structure; comprehen-

收稿日期:2022-11-04; 修回日期:2023-03-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401502);江苏省水利科技项目(2021043);广东省水利科技创新项目(202107)

作者简介:高雨慧(1999—),女,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为城市水务研究。

通讯作者:徐慧(1969—),女,江苏盐城人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为河湖生态保护与修复及景观规划研究。

sive evaluation; Tongzi River

1 研究背景

水系连通是指区域水体在必要的水工建筑物维系与调度下,重塑或构建起较为完整的水流通道网络与较为稳定的水力联系,从而形成具有一定规模且能够满足一定功能目标的河湖水系格局^[1],是增强防洪抗旱能力、促进水资源合理配置^[2]、改善水生态环境^[3]的最基本、最有效的方式之一。目前大多数水系连通研究关注的对象是区域性河网水系,通过模拟比较不同工况得到水系连通工程的最优方案,常用方法有图论^[4-6]、水力模型^[7-9]、连通性函数^[10-12]和综合评价^[13-16]等。综合评价体系能从多个学科角度出发,对水系连通进行更加全面地量化。随着近年来大中型河流综合整治工程的稳步落实,水系连通治理的对象逐步向中小河流乃至小微水体过渡。小微水体是指主要分布于乡镇地区的沟、渠、溪、塘等各类小型水体^[17],一般河道级别较低、水体规模较小、流动性较差、自净能力有限,被喻为江河湖库的“毛细血管”^[18]。小微水体与河网水系相比,其区域范围小、水面与断面形状各异,因而具有复杂的流速差异性,若直接按照河网水系连通性评价指标体系进行计算则有欠妥当。闫欣等^[19]基于生态系统理论的景观生态学提供了将水域视为“斑块”的研究角度,对水面形状各异的小微水体具有较好的适用性,而水质改善程度也是水系连通工程重要的考核指标之一^[20],该理论为小微水体水系连通研究提供了新视角。

太湖流域是典型的城市化平原河网地区^[21],其现存的塘浦圩田具有源远流长的古水系特征^[22]。在人类活动的强烈干预下^[23],大多数圩内河道经现代化治理与建设,已成为依赖水工建筑物调度程度极高的小微水体,一般无法独立维持水体的循环流动^[24]。水工建筑物对小微水体连通性的影响可分为两大类,一类如闸、坝等阻隔了自然状态下的水体流动^[25],仅根据调度需要短时恢复畅通状态;另一类则为水体流动提供通道或能量,以促进水体交换,如涵洞、泵站等。因此,水工建筑物能在很大程度上决定水系的水位、流量等连通要素。目前已有研究一般关注水系连通性在自然因素影响下的动态变化规律^[26],而如何在水系连通评价中体现出水工建筑物工况带来的影响尤为重要。

本文重点讨论以下两方面的内容:(1)根据小微水体与河网水系的形状特征差异,对小微水体水

系连通性指标进行选取与修正;(2)根据小微水体受水工建筑物调度影响的特点,在水系连通性指标计算时考虑各水工建筑物启闭工况组合及相应运行时长,得到水系连通动态变化值与长时间范围内较为稳定的综合平均值。将所提出的小微水体水系连通性评价指标体系应用于溧阳市同字水系,对其综合整治前后的水系连通改善情况进行量化评价。

2 小微水体水系连通性评价体系构建

2.1 指标选取

小微水体是河网水系中的“繁枝细节”,具有水系连通的一般物理特征。研究表明,拥有“活水”的小微水体可通过复杂的物化过程改变所属河湖生态系统中的物质通量,进而影响水系的结构和功能^[27]。因此,根据水系连通评价体系构建原则,河网水系连通性评价体系常用的水系格局、结构连通性和水力连通性 3 个准则层对小微水体仍具有较好的适用性。考虑到小微水体在河湖生态系统中的服务功能^[28-29]和水质提升^[30-31]方面的特点,补充景观连通性和水质改善两项准则层。

在对各准则层进行指标选取时,均需根据小微水体影响生态服务功能的形状特征和受水工建筑物调度的水力条件等特点来修正指标和计算方法。相较于河网而言,小微水体水系形状带状特征不明显,因此在水系格局中弱化与河道“长度”相关的指标,而强调水体所占面积与体积,改进的小微水体水系连通性评价指标体系如表 1 所示。

表 1 小微水体水系连通性评价指标体系

目标层	准则层	指标层(单位)	计算时是否考虑工况
水系连通性	水系格局	水面率/% 槽蓄量/m ³	否
	结构连通性	环度	是
		节点连接率 实际结合度	
	水力连通性	流速(m/s) 水力连通能力	是
	景观连通性	分离度指数	否
		景观分割度	
	水质改善	内梅罗污染指数	否

2.2 评价方法

太湖流域小微水体水系连通受到人工的强烈干

预,通过水工建筑物的启闭调度,能引起水系网络连通通道以及水流流动能量大小的变化,从而需区分不同工况下的结构连通性和水力连通性,计算各工况的对应值与均化工况时长后的综合平均值。另外,本文认为水系格局、景观连通性和水质改善准则层内的指标受水工建筑物调度影响较小,可忽略不计。

2.2.1 水系格局 河网水系格局研究主要源于河流地貌学,描述水系本身整体形态、规模与发育程度,进而反映其对径流、沉积物等物质转移的促进或阻碍作用^[32],常选取河网密度、水面率、河频率、槽蓄量等指标。针对小微水体,河流带状形态不明显,河网密度、河频率等指标难以定量,但水面率、槽蓄量对小微水体仍适用。水面率是指河流湖泊多年平均水位以下水体所占水域面积与区域总面积之比,该指标表征区域水域范围的大小。槽蓄量为河流湖泊在设计水位以下的蓄水总量^[33-34],反映该区域水系储蓄水资源的能力,也是该区域瞬时参与循环流动的总水量。

2.2.2 结构连通性 水系连通包含横向、纵向和垂向 3 个维度的连接与联系^[35]。结构连通性评价将水系概化为二维图模型,衡量横向与纵向的连通情况。该评价方法源于交通路网领域,遵循图论原理反映节点与边所构建的网状结构的连通状况^[36],也在景观生态学中用于描述廊道之间的连通性。现有文献中对结构连通性的研究大多关注水系自身的结构属性,本文认为,结构连通性存在水系自身以及水工建筑物调度两个层面。对于水系自身层面,各类水工建筑物运行期内若相关水流通道的互通,则该处水系连通结构在任何时间均成立,不考虑非运行期水工建筑物对地表水流流动产生的阻碍影响;对于水工建筑物调度层面,区分为水工建筑物运行期与非运行期,根据闸门启闭状态,判断不同工况下各水工建筑物所处位置的水系结构连通与否,进而根据各工况时长占比赋权,加权得到一定时间范围内动态稳定的综合结构连通性。

小微水体的图模型概化原则与河网水系一致,利用图论中的元素表征水系结构的不同几何要素。考虑到小微水体内部水系流向复杂、蜿蜒曲折,为简化图模型仅取主流向,即细长形水体采用长度方向的边 E 表示,水体汇合处、水工建筑物所处位置以及边界等结构连通条件突变处用点 V 表示。其中,依托泵站、暗涵、桥洞等水工建筑物构建而成的输水通道,其断面尺寸与塘体宽度相差较大,将该类输水通道的起点与终点概化为点,将通道自身概化为直

线边,忽略通道内的水流流向。

综合考虑点线之间的关系,选取环度、节点连接率和实际结合度指标进行评价^[37]。环度定义为网状结构的实际回路数与在不改变点线数量、仅改变点线互接结构的情况下可能形成的最大回路数之比,其反映了河网回路的丰富度。环度越大,则实际回路越丰富、水系内物质能量的循环路径越多、交换能力越强。节点连接率为网状结构内每个节点所邻接边数的平均值,表征节点间相互联系的难易程度。节点连接率越大,则节点之间的联系渠道越顺畅、节点间互通水流的能力越强。实际结合度是网状结构的实际边数与在不改变点数量的情况下可能构成的最大边数之比,主要衡量水系通道的密度。实际结合度越大,则水系通道越密、用于水分输移的场所越多、水系沟通能力越强。上述 3 个指标的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{e - \nu + 1}{2\nu - 5} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2e}{\nu} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{e}{3(\nu - 2)} \quad (3)$$

式中: α 为环度; β 为节点连接率; γ 为实际结合度; e 为网状结构的边数; ν 为网状结构的节点数。

2.2.3 水力连通性 在结构连通性二维基础上进一步考虑垂向维度,即在水流通道的作为结构“载体”的基础上探讨水流流动时的水力条件,进行水力连通性评价。水力连通性是衡量水体在网状结构中的实际流动能力,河网水系常采用流速、流量、换水周期、水位、水力坡度、水流动势^[38]等指标,归根结底这些指标都可转化为稳定流速的能量大小。小微水体内部水流流速偏低且不稳定,流向复杂,难以选定典型断面以获取平均流速等信息。同时,小微水体中水流流动几乎完全受水工建筑物运行所操控,因此可由水工建筑物的运行参数计算其为水流流动供给的外部能量,进而反算出平均水力条件。考虑到小微水体流量数据普遍缺乏,换水周期受到槽蓄量大小的影响,因此选取流速作为指标之一。

同时,小微水体大多无法依靠天然地势高差形成的水力坡度独立维持稳定的水位差,需借助外力提供势能。假定水流循环中的所有水头损失均由水工建筑物产生,不再单独计算糙率影响。从能量供给的结果角度,采用水工建筑物提供的水位差计算水力连通能力^[39],公式如下:

$$C_h = \frac{1}{|\Delta Z| + 1} \quad (4)$$

式中: C_h 为水力连通能力, m^{-1} ; ΔZ 为小微水体内部设计最高水位点与设计最低水位点之间的水位差, m 。

2.2.4 景观连通性 景观连通性是从景观生态学的角度对斑块间通过廊道相连程度的定量描述^[40], 主要取决于斑块的形状、面积与空间分布情况。景观格局指数可以较好地衡量斑块的聚集或分散程度对物质输移、能量交换、信息传递等所起的作用, 进而反映水流从景观范围内的一处转移到另一处的能力大小^[41]。

运用 Fragstats4.0 软件计算小微水体水域在类型水平上的分离度指数和景观分割度^[19]。景观连通和生境破碎是相反的两个过程, 因此分离度指数和景观分割度是水系连通性的负向指标。分离度指数是某类型各斑块面积的平方和与区域总面积平方之比, 其数值越大表明景观破碎越严重。景观分割度是某类型各斑块面积与总景观面积之比的平方和比 1 小的程度, 反映同一类型内不同斑块的分布离散程度, 其数值越大表明斑块越分散。分离度指数和景观分割度计算公式如下:

$$SPLIT = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}^2}{A^2} \quad (5)$$

$$DIVISION = 1 - \sum_{j=1}^m \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \quad (6)$$

式中: $SPLIT$ 为分离度指数; $DIVISION$ 为景观分割度; A 为区域总面积, m^2 ; a_{ij} 为第 i 种类型的第 j 块斑块的面积, m^2 。

2.2.5 水质改善 根据目标的不同, 水系连通工程可分为水灾害防御型、水质改善型、资源调配型、综

合治理型 4 大类^[42]。小微水体纳污能力较小, 水系连通对水资源、水安全等方面起到的提升效果有限, 而对水质改善的效果较为明显且便于定量评价, 近年来以水质改善为目标的黑臭小微水体治理逐渐在平原城市化地区兴起^[43]。本文采用的内梅罗污染指数法(Nemerow index method)是衡量水质综合污染应用最广泛的方法之一^[44], 该指数为负向指标。

3 应用实例与分析

3.1 研究区概况

同字水系位于江苏省常州市溧阳市昆仑街道方里村, 属于北丰联圩的重要村级河道, 由 9 块方塘组成, 整体呈“同”字形。外方分为东、西、南、北、中 5 塘, 占地面积约为 27 hm^2 , 内方共有 4 小塘, 占地面积约为 3 hm^2 , 河道总长 3.8 km 。明嘉靖二十三年(公元 1543 年), 溧阳地区大旱, 吏部主事史际提出以工代赈, 主持开挖低洼处为堰池, 平整地势较高处为农田。外堤抵挡洪水, 内池进行养殖与灌溉, 于乾隆五十一年(公元 1786 年)完工并延用至今。溧阳市方里村美丽乡村规划与溧阳市方里村同字水系水环境综合整治工程于 2019 年 7 月开工, 2021 年 5 月已基本完成水环境整治、生态清淤和基地修复工程, 整治前、后研究区及周边水系与水工建筑物概览图见图 1。北丰联圩以中河、丹金溧漕河、竹箦河与芜申运河为界, 同字水系由方里北河连通至丹金溧漕河, 由北丰圩内河与中河及竹箦河相通。目前外方设计水位为 1.7 m (1985 国家高程基准, 下同), 内方设计水位为 1.9 m 。同字水系内、外方互通, 并与塘外水系具有紧密的水力连通, 有较为独立的水循环系统, 属于水工建筑物调度下的网状循环小微水体。根据地面高程划分汇水区作为研究区范围。

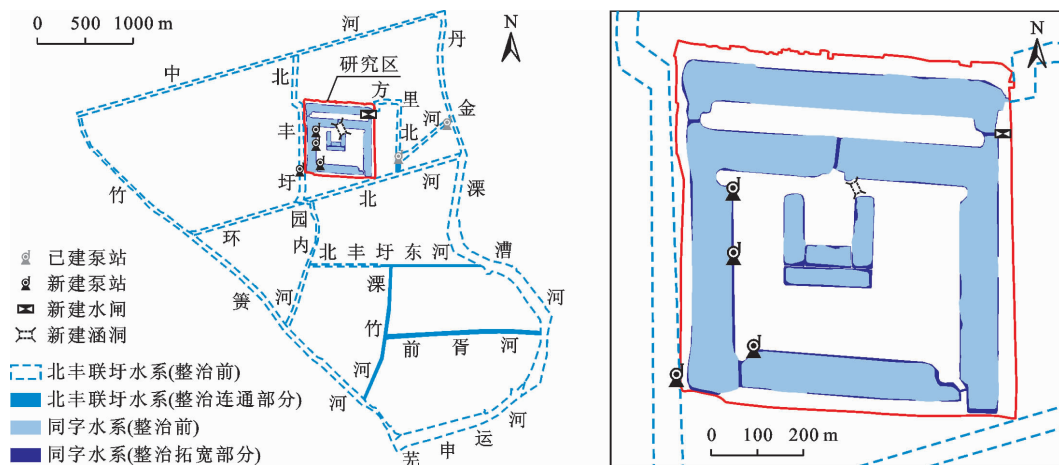


图1 整治前、后研究区及周边水系与水工建筑物概览图

3.2 数据来源

本文采用溧阳市别桥镇航空遥感影像,摄于2015 和 2021 年,空间分辨率分别为 0.8 和 0.1 m;河道断面数据来源于《常州溧阳市方里村同字水系水环境综合整治方案》;水质数据来自《常州市生态环境监控中心溧阳分中心水和废水监测结果表》。

3.3 评价指标计算

3.3.1 水系格局评价指标 通过 ArcGIS 软件分别对整治前、后的遥感影像进行目视解译,检验总体精度分别为 96.42% 和 97.33%,Kappa 系数分别为 0.912 8 和 0.936 5,符合要求。将所得同字水系水域范围评价指标进行统计,水面率分别为 45.76% 和 47.52%,整治后水面面积增大了 1.16 hm²,水面率增加了 1.76%。

根据整治前、后断面图计算槽蓄量。整治前同字水系淤积严重,断面呈自然对称梯形状,边坡比约为 1:9,平均水深为 1.6 m。生态清淤工程平均清淤深度为 0.6 m,总清淤量为 17.82 × 10⁴ m³。经断面设计,内方四塘近似矩形断面,河底高程约为 -0.3 m;外方 5 塘采用直立式护岸的复式断面,河底高程约为 -1.0 ~ -0.5 m,平台宽 20 m,距水面 0.5 ~

0.7 m,平台下坡比为 1:2.5。计算得出整治前、后槽蓄量分别为 33.14 × 10⁴ 和 50.99 × 10⁴ m³,清淤工程使得槽蓄量增大了 53.86%。

3.3.2 结构连通性评价指标 因同字水系内水流流速较缓,流向复杂多变,易受风力、游船等干扰,为简化计算,只取因内、外方塘水位差产生的单向重力流。整治前,内、外方塘均用于鱼塘养殖,因而设有鱼塘隔离坝,仅有西方北方、西方南方、东方北方以及内方隔离坝体上有用于人工换水的闸口。闸口平时处于关闭状态(工况 1),换水时开启(工况 2),并与外部北丰圩内河和方里北河连通。经整治,鱼塘隔离坝已全部拆除,且在西方中方修建引水泵站维持内、外方水位差,记引水泵站关闭状态为工况 3,开启状态为工况 4。

根据水工建筑物的启闭情况绘制整治前、后不同工况下的同字水系图模型,如图 2 所示。基于图 2 模型计算整治前、后各工况同字水系结构连通性指标,并根据平水年水工建筑物启闭时长加权计算年内平均结构连通值。其中,由环度的定义可得工况 1、2 的环度为 0,其余指标采用公式(1)~(3)计算,结果见表 2。

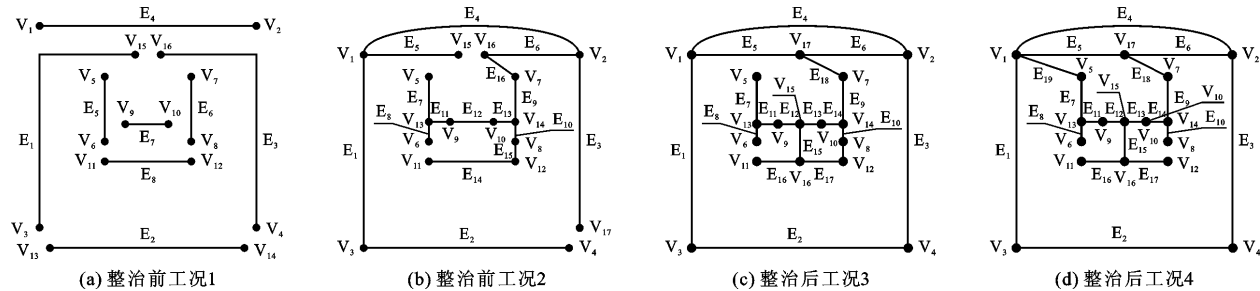


图2 整治前、后同字水系图模型

表2 整治前、后各工况同字水系结构连通性评价指标计算结果

	工况	边数	节点数	环度 α	节点连接率 β	实际结合度 γ	运行时长占比/%
整治前	工况 1	8	16	0	1.000	0.190	98.97
	工况 2	16	17	0	1.882	0.356	1.03
	年内平均			0	1.009	0.192	
整治后	工况 3	18	17	0.069	2.118	0.400	83.56
	工况 4	19	17	0.103	2.235	0.422	16.44
	年内平均			0.075	2.137	0.404	

由表 2 可知,整治前工况 1 同字水系各塘体间无通道,无法形成回路,基本处于孤立状态。拆除鱼塘隔离坝后,结构连通性的 3 项指标均有显著提升,即使在引水泵站关闭时期(工况 3),也比整治前开启闸口(工况 2)换水时的结构连通性更好。开启引

水泵站后(工况 4),虽然仅比工况 3 增加了 1 条连通通道(E19),但 3 项指标均有所增大。比较整治前、后的年内平均情况值,环度值增大 0.075,节点连接率与实际结合度增量超过 1 倍。

3.3.3 水力连通性评价指标 同字水系缺少完整

的流速流量监测资料,需通过换水量与换水周期换算平均流速。同字水系既有用于内外连通/阻隔的水工建筑物,又有用于内部水体循环流动的水利设施,因此换水周期可分为内部水循环周期和内、外水体交换周期。在水力连通性评价中,换水周期指内部水流循环量达到总槽蓄量所需的时间。若无法实现较为稳定的内部循环,则该换水周期与内、外水体交换量达到总槽蓄量时所需时间相同。

整治前同字水系几乎无法维持稳定水流,须周期性与外部水系连通进行人工换水。换水历时为隔

离坝闸口开启时长,即工况 2;整治后,内部水流循环依靠西方中方引水泵站提供动力,即工况 4。同时,整治后方里灌排站(2 台(套)混流泵 500HW-6)、方里排涝站、后桑园翻板闸与手动双向蝶阀泵站联合运行进行内、外水体交换,引北丰圩内河水入同字水系,并排入方里北河,且此时用于供给内部水流循环的引水泵站同步工作,记为工况 5。单次换水率为单次换水量与槽蓄总量之比;换水周期为年内平均换水间隔与单次换水率之比。整治前、后工况 2、4、5 的平水年换水周期见表 3。

表 3 整治前、后工况 2、4、5 同字水系平水年换水周期

工况	换水间隔时间/d				年内平均换水次数	单次换水历时/h	单次换水量/m ³	单次换水率/%	换水周期/d
	夏季	春秋季	冬季	年内平均					
工况 2	5~7	12~15	0~1	12	30	3	217362	65.52	18
工况 4	4~5	6	7~8	6	60	24	26566	5.21	115
工况 5	10~15	20~30	0~1	24	15	24	95040	18.60	129

由表 3 可知,因整治前内部水循环无法实现,工况 1 同字水系中水体流速几乎为 0,只能借助工况 2 的内、外水体交换来实现水力流动,工况 2 换水周期约为 18 d,单次换水率高达 65.52%,流速为 20.13 m/s。根据时长占比综合工况 1、2,得到整治前年内平均流速为 0.21 m/s。整治后借助引水泵站(工况 4)的内部水循环换水周期为 115 d,比工况 2 显著增长,但换水间隔缩短,单次换水率减小,该工况以少量多次的方式维持水流循环,平均流速为 0.31 m/s;工况 3 平均流速可近似取与工况 4 一致;工况 5 平均流速为 1.10 m/s,换水周期为 129 d。通过工况 3、4、5 的时长占比加权计算,得到整治后年内平均流速为 0.34 m/s,平均流速较整治前增大了 61.9%。

整治前,换水时长较短,且需借助方里灌排站与方里排涝站促使水体流动达到换水目的,内、外方水位差几乎为 0。整治后,引水泵站将内、外方水位差维持在约 0.2 m,由公式(4)计算得出水力连通能力为 0.83 m⁻¹。

3.3.4 景观连通性评价指标 在 Fragstats4.0 软件中处理目视解译得到的水域范围,选择类型水平的分离度指数和景观分割度来衡量水域的景观连通性。通过计算得出,整治前同字水系分离度指数和景观分割度分别为 21.60、0.95,整治后分别为 5.42、0.82。整治后分离度指数和景观分割度分别减小了 74.9%、13.7%。整治工程拆除鱼塘隔离坝后,相邻水域斑块合并,因此水域斑块数量减少且距

离拉近,分离度指数显著降低,景观分割度减小,二者表现出一致性,可见整治工程大大提高了同字水系的景观连通性。

3.3.5 水质改善评价指标 同字水系主要由中河进行水源补给,中河现状水质总体稳定,保持在国家Ⅲ类水标准。根据 2019 年 9 月 15 日和 2021 年 6 月 22 日同字水系 5 个采样点(S₁~S₅)的水质检测结果,选择高锰酸盐指数、氨氮、总磷 3 个水质参数利用内梅罗污染指数法计算,标准值采用整治的目标水质Ⅲ类水相应标准,所得结果如图 3 所示。对 5 个采样点的内梅罗污染指数求均值,得到整治前、后综合内梅罗污染指数分别为 2.56 和 0.58,整治后综合内梅罗污染指数减小了 77.3%,水质得到了明显提升。

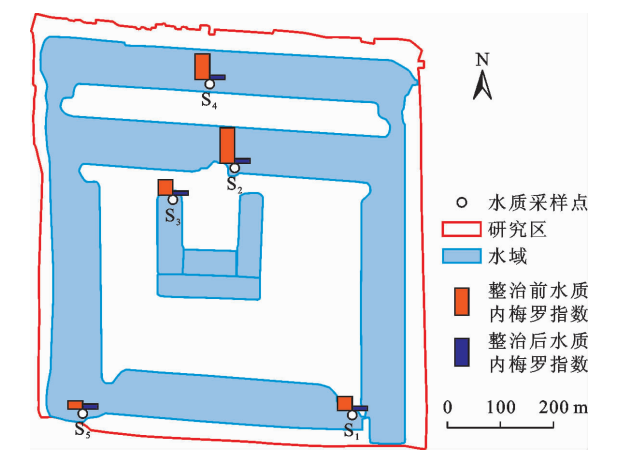


图 3 同字水系采样点分布及相应水质内梅罗污染指数

3.4 讨 论

在表 3 的基础上进一步计算,探讨连通性和年均换水量之间的关系。整治前,平水年每年需要外部提供 $652 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水,才能满足鱼塘养殖的水质与水量要求,而整治后仅需 $133 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水即可保证景观生态用水。结合整治前、后的水质污染情况(图 3)来看,尽管整治后内、外水体交换周期比整治前更长,但整治后的水质明显优于整治前。这也从侧面验证,简单直接的换水方式不仅会导致治理效果不佳、水质问题反复出现,还会造成优质水源的大量浪费。引水治污必须以控源截污为前提,建立较为完整稳定的水系连通系统,从根本上恢复河湖生态活力^[45]。

本文从多角度探讨了在水工建筑物调度下的小微水体水系连通性指标体系,并以同字水系为例分析了整治前、后水系连通各方面的改善成效,但数据量仍不足以计算得出如文献[13]中的指标权重并得出综合水系连通性指数,因而还需进一步研究。

太湖流域小微水体的水系连通受到配套水工建筑物的调度,在本文提出的小微水体水系连通性评价指标体系中结构连通与水力连通情况系根据不同工况开展计算,得到了波动值以及长期内较为稳定的综合平均值。本文的思路也可应用于水工建筑物调度情况更为复杂、受人为因素影响更为剧烈的水系连通性计算,根据工况分解掌握其年内、年际动态变化过程及阶段综合情况。同时,本文针对带状特征不明显的小微水体进行了水系连通性指标修正,并将水域视为“斑块”进行景观生态学角度的探究,在计算“水量”循环的同时考虑“水质”,对太湖流域圩内小微水体的水系连通性评价有较好的适用性。

4 结 论

本文针对小微水体在提供生境和净化水质方面的突出贡献,增设景观连通性和水质改善两大准则层,同时根据小微水体形态特征和受水工建筑物调度影响的特点选取相关指标,探索性地提出了包含 5 大准则层共 10 项指标的小微水体水系连通性评价指标体系。利用该评价体系对溧阳市同字水系小微水体整治前、后的水系连通性进行量化,得出以下主要结论:

(1)水系格局中的水面率、槽蓄量指标能较好地反映出小微水体的整体形态与规模,同字水系经清淤整治后,水面率略有增大,而槽蓄量增长幅度超过 1 倍;环度、节点连接率和实际结合度能从多个角

度反映不同工况下小微水体的结构连通性,同字水系整治后环路从无到有,节点连接率和实际结合度增量超 1 倍;流速与水力连通能力在多个水工建筑物联合运行的小微水体中能够合理又简洁地衡量水力连通性的强弱及动态变化,同字水系年内平均流速较整治前提高了 61.9%,水力连通能力增至 0.83 m^{-1} ;分离度指数和景观分割度指标可量化水域斑块的破碎化程度,以此表征景观连通性,同字水系该两项指标均在整治后降低,其中分离度指数降低尤为显著;用内梅罗污染指数法计算得到的水质改善情况能从侧面反映出水系连通带来的生态环境效益,同字水系整治后内梅罗污染指数显著降低,水质大幅提升。

(2)各项指标在同字水系小微水体整治后均体现出水系连通性的改善,整个评价指标体系能够较为全面、合理地衡量小微水体在各类水工建筑物联合调度下的水系连通性。

(3)科学的水系连通措施与简单直接的换水方式相比,不仅能更有效地提高水系连通性,也能在节约换水量的同时达到更优的水质提升效果。

参考文献:

- [1] 李原园,郦建强,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.
- [2] 代 稳,王金凤,陕振沛,等. 荆南三口流域水系连通性变化对水资源开发利用的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 114-120.
- [3] 高常军,高晓翠,贾 朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594.
- [4] SAHRAOUI Y, FOLTÊTE J C, CLAUZEL C. A multi-species approach for assessing the impact of land-cover changes on landscape connectivity[J]. Landscape Ecology, 2017, 32: 1819-1835.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 高玉琴,汤宇强,肖 璇,等. 基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 33-37.
- [8] LI Yunliang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geostatistical analysis[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33: 2071-2088.

- [9] LI Yunliang, TAN Zhiqiang, ZHANG Qi, et al. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: framework and implications for eco-environmental assessments[J]. *Water Research*, 2021, 195: 117005.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] TAN Zhiqiang, WANG Xiaolong, CHEN Bin, et al. Surface water connectivity of seasonal isolated lakes in a dynamic lake-floodplain system[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124154.
- [13] 梁霄,巨文慧,孙博闻,等. 基于AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价——以廊坊市为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 352-364.
- [14] 夏敏,周震,赵海霞. 基于多指标综合的巢湖环湖区水系连通性评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(1): 73-77.
- [15] 高学平,胡泽,闫晨丹,等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 41-47.
- [16] CHEN Yin, WANG Yangui. Changes in river connectivity indexes in the lower Yellow River between 1960 and 2015[J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(9): 1377-1386.
- [17] 邬剑宇. 安吉县西苕溪流域小微水体污染源解析及生态修复模式研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [18] 王硕,刘蕴思,李攀. 微纳米气泡对小微水体中好氧微生物群落的影响[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 29-34.
- [19] 闫欣,牛振国. 白洋淀流域湿地连通性研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(24): 9200-9210.
- [20] 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+22.
- [21] 魏莹莹,李一平,翁晟琳,等. 太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 553-563.
- [22] 李俊奇,吴婷. 太湖流域塘浦圩田水利体系对海绵城市建设的启示[J]. *给水排水*, 2018, 54(8): 48-52.
- [23] 左其亭,崔国韬. 人类活动对河湖水系连通的影响评估[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1483-1493.
- [24] JULIAN J P, WILGRUBER N A, DE BEURS K M, et al. Long-term impacts of land cover changes on stream channel loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 399-410.
- [25] 罗贤,许有鹏,徐光来,等. 水利工程对河网连通性的影响研究——以太湖西苕溪流域为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2012, 43(9): 12-15.
- [26] BROOKS A C, COVINO T, HALL E K. Evaluating spatial and temporal dynamics of river-floodplain surface water connectivity using hydrometric, geochemical and microbial indicators[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): 030336.
- [27] LEIBOWITZ S G, WIGINGTON P J, SCHOFIELD K A, et al. Connectivity of streams and wetlands to downstream waters: an integrated systems framework[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54(2): 298-322.
- [28] VAN LOOY K, PIFFADY J, CAVILLON C, et al. Integrated modelling of functional and structural connectivity of river corridors for European otter recovery[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 273: 228-235.
- [29] 何理,李恒臣,赵文仪,等. 水系连通工程综合效应评价体系研究——以“引江济巢”工程为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 1-6.
- [30] 朱诗洁,毛劲乔,戴会超. 资料缺乏地区水系连通工程效益评价方法研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(2): 12-19.
- [31] 纳月,邓勇,赵进勇,等. 河湖水系生态连通布局方案优选技术平台研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(6): 134-142+151.
- [32] CAVALLI M, VERICAT D, PEREIRA P. Mapping water and sediment connectivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 763-767.
- [33] 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.
- [34] 侯鑫,潘威. 20世纪30年代珠江三角洲平原河网结构重建及最大槽蓄容量[J]. *热带地理*, 2015, 35(6): 883-889.
- [35] 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(S1): 29-38.
- [36] 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+34.
- [37] 韩龙飞,许有鹏,邵玉龙,等. 城市化对水系结构及其连通性的影响——以秦淮河中、下游为例[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(3): 335-341.
- [38] 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.
- [39] 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.

(下转第97页)

- [42] TIAN Chang, PEI Haiyan, HU Wenrong, et al. Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(8): 1394–1402.
- [43] KENESI G, SHAFIK H M, KOVÁCS A W, et al. Effect of nitrogen forms on growth, cell composition and N_2 fixation of *Cylindrospermopsis raciborskii* in phosphorus-limited chemostat cultures [J]. Hydrobiologia, 2009, 623: 191–202.
- [44] 欧 腾,李秋华,王安平,等. 贵州高原三板溪水库浮游植物群落动态与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3432–3439.
- [45] 钱玺亦,李金彪,敖 文,等. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1814–1827.
- [46] MICHALAK A M, ANDERSON E J, BELETSKY D, et al. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(16): 6448–6452.
- [47] ZHU Liying, CHEN Yuanyuan, WANG Yawei, et al. Ecological assessment of water quality in an urban river replenished with reclaimed water: the phytoplankton functional groups approach [J]. Environmental Research Communications, 2021, 3: 115006.
- [48] LIU Shuya, CUI Zongmei, ZHAO Yongfang, et al. Composition and spatial-temporal dynamics of phytoplankton community shaped by environmental selection and interactions in the Jiaozhou Bay [J]. Water Research, 2022, 218: 118488.

(上接第87页)

- [40] 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): 349–358.
- [41] 马 栋,张 晶,赵进勇,等. 扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 34–40.
- [42] 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): 26–31.
- [43] 杨 娜,王趁义,徐园园,等. 黑臭小微水体治理技术的研究现状与发展趋势 [J]. 工业水处理, 2021, 41(5): 15–21.
- [44] 高红杰,郑利杰,嵇晓燕,等. 典型城市地表水质综合评价方法研究 [J]. 中国环境监测, 2017, 33(2): 55–60.
- [45] 韩 璐,李庆龙,曾 萍,等. 长江流域典型城市河段黑臭水体生态整治案例分析 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 546–552.

