

傅春, 邓俊鹏, 欧阳欢葵, 等. 基于图论法对城市水系连通性表征及优化 [J]. 地理科学, 2022, 42(11): 2028-2038. [Fu Chun, Deng Junpeng, Ouyang Huanrui et al. Lay-out and optimization of urban water system connectivity based on the Graph Theory. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(11): 2028-2038.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.11.017

基于图论法对城市水系连通性表征及优化

傅春^{1,2}, 邓俊鹏^{3,4}, 欧阳欢葵⁵, 付耀宗³, 张静¹

(1. 南昌大学公共政策与管理学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学区域经济研究院, 江西 南昌 330031; 3. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 4. 抚州市应急救援保障中心, 江西 抚州 344100; 5. 南昌大学经济管理学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 基于景观生态学中“点-边”数量关系建立水系环度(α)、节点连接率(β)和网络连通度(γ)3种水系连通性评价指标, 绘制出南昌市水系“节点-廊道”有向图, 并以城市湖水体引流化污为切入点来优化城市水系连通性。研究表明: ① 南昌市城区水系存在廊道空间分布不均匀, 湖节点与其他水系节点连接的廊道较少等问题; ② 优化后的城区水系相较于现在水系, 其中水系环度(α)提高 75%, 节点连接率(β)提高 14.88%, 网络连接度(γ)提高 14.63%。在城市水系连通性优化中, 不应过分追求连通性而盲目增加湖泊廊道, 应在连通性与湖泊连接的廊道数量之间保持一个平衡关系, 以免水体污染物在湖泊中淤积。

关键词: 图论法; 水系连通; MIKE21; 引流化污; 南昌市

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)11-2028-11

河流是人类文明起源的摇篮, 是联结水圈、生物圈、岩石圈的重要纽带, 同时也是重要的生物栖息地^[1]。河网水系是城市生态环境系统的重要组成部分, 河流以及水系结构遭到破坏, 可能会引发区域地表水文生态格局紊乱, 并造成一系列水环境问题^[2]。随着城镇化不断发展, 城市变得越来越大, 许多原始的河流和湖泊变成城市内河, 原有的河流湖泊形态和结构不断被人工化改造而发生变化, 引发许多问题, 引起学者们的关注, 如南昌市水域面积占比由 1990 年 23.21% 缩减到 2010 年 22.66%, 对应面积由 1 718.1 km² 缩减到 1 679.8 km², 南昌市 1958 年的一级河流条数比 2010 年多 38%, 二级河流多 56%; 河流水面率由 1958 年的 9.9% 降低到 2010 年的 8.8%^[3]。对遭受破坏的城市水系进行修复工作迫在眉睫, 连通性评价是城市水系修复工作的基础, 具有重要的理论意义和实践价值。

目前, 国外主要从水文学模型、生态-水文、景观-生态、网络连接指标、连通性函数和水动力模型等方法进行研究。在 2010 年之前, 相关研究主要以

生物栖息地迁徙、水系景观、水文连续性等方向为主, 多采用图形法^[4]、空间景观分析法^[5]、水文-水动力模型^[6]等研究方法。2010 年之后, 主要针对河流水系的功能性要求, 还有航拍和 GIS 技术的使用, 产生了多种针对性的研究方法, 比如图模型法^[7]、图论-生态法^[8]、景观生态法^[9]、生态-水动力法^[10]、综合指标评价法^[11]等方法。Karim^[12]用水动力模型(MIKE21)量化洪水漫岸连通性的方法, 计算并预测了澳大利亚昆士兰州北部 Tully-Murray 流域几个漫滩湿地与河流之间连接的时间、持续时间和空间范围。徐光来^[13]基于图论法将太湖流域嘉兴平原河网水系概化为图模型, 构建出平原河网图模型的加权邻接矩阵, 进而实现对水系连通性的量化分析。徐慧^[14]以景观生态学理论为基础, 将景观水系分为水域、过渡域和陆域 3 个不同的空间和自然、休闲娱乐与文化历史 3 个层次, 提出针对太仓市的“两带、三轴、三片、六点”的城市水系景观空间格局。目前针对大江大湖的水系连通性研究较比丰富, 而对城市内水系连通性的研究缺乏相应经验, 刘昌明^[15]指出未来河湖水系连通与城镇化发展格局也

收稿日期: 2021-07-01; 修订日期: 2022-03-12

基金项目: 国家社会科学基金项目(18BGL187)资助。[Foundation: National Social Science Foundation of China (18BGL187).]

作者简介: 傅春(1966-), 女, 江西樟树人, 教授, 博士, 主要从事水资源的利用与管理研究。E-mail: ccfu@ncu.edu.cn

是水系连通性的重要研究方向, 本文在基于图论法对城市水系连通性评价之后, 以湖节点水系的水质功能为切入点, 利用 MIKE21 来模拟设计方案, 讨论连接湖节点的廊道布置最优方案, 以此来优化研究区域内的水系连通性能, 其中图论法将城市水系连通与城市水系规划联系起来, 形成学科交叉。

1 研究区域与数据来源

南昌市位于江西省中部偏北, 滨临鄱阳湖西南岸, 位于 115°27'E~116°35'E、28°10'N~29°11'N。本研究主要是针对城市区域内的水系研究, 在研究区域的选择上主要有两点: 一是尽量包含目前城市建设和城市规划地区, 以保证水系格局对城市影响的有效性; 二是尽量以水系河流为研究区域的边界, 以保证水系格局的完整性。根据上述 2 个原则, 本次研究区域是包含南昌市大部分水系和南昌市主城区的地带, 具体是以抚河-焦头河为东边界, 以赣江南支-赣江北支-幸福河为北边界, 以南昌绕城高速为西边界, 以杭长高速-抚河故道-连西河为南边界。南昌市面积 3 095.36 km², 城区面积 629.25 km², 研究区面积约为 865.92 km² [16]。

现今主流提取河网水系的方法主要有 3 种: ① 数字高程模型(DEM) [17]。基于 ArcGIS 的水文分析工具对 DEM 数据进行处理, 生成研究区的河网水系, 这种方法的优点是操作简单, 提取速度快, 缺点是水系错误较多, 与实际河网水系相差大; ② 遥感影像图 [18]。采用高分辨率卫星遥感影像图对水体信息进行自动或半自动提取, 这种方法优点是机器自动提取, 水系生成速度快, 缺点是易受到城区建筑物的影响, 产生较多杂质信息, 处理复杂; ③ Google Earth 地图 [19]。下载研究区域的 Google Earth 地图在 ArcGIS 或者 AutoCAD 中进行描绘, 将可视的水体进行数字化, 这种方法的优点是方法简单且精度高, 缺点是勾勒描绘工作精细, 需耗费大量时间。本文的研究区域处于南昌市主城区, 遥感影像图方法不适合本次研究。所以将第一种和第三种方法结合使用来提取南昌市城区河网水系。首先用南昌市 DEM(30 m) 提取出粗略的水系, 然后再根据 Google Earth 地图进行精细的修正与补充, 最后形成南昌市城区河网水系图(图 1)。

2 研究方法

2.1 水系连通性评价方法

对于水系连通度的研究, 国内外的专家从不同

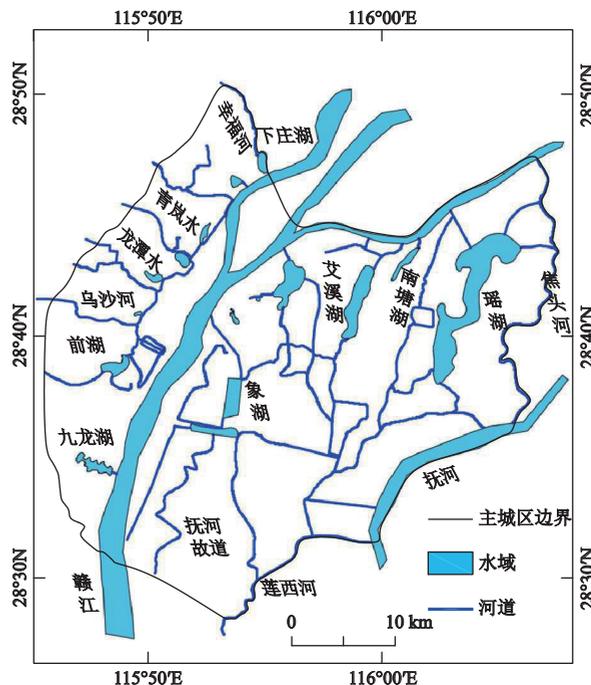


图 1 南昌市主城区河网水系

Fig. 1 River network diagram of the main urban area of Nanchang

学科角度提出了多种评价方法 [20]。综合指标评价法 [21,22] 考虑了水系的多方面因素和容易与河流功能性研究相结合的优点, 在水系连通的评价方法中比较常见且符合实际情况。本文选取景观生态学 [11] 中的水系环度(α)、节点连接率(β)以及网络连接度(γ)来量化南昌市城区水系连通度, 建立水系连通评价指标。

1) α 指数。水系环度(α)表示河网水系中节点与廊道形成环路的多少, 是量化水系网络成环程度的指标。计算公式为:

$$\alpha = \frac{L - N + 1}{2N - 5} \quad (1)$$

2) β 指数。节点连接率(β)表示河网水系中每个节点和其他节点连接难易的程度, 是量化水流通道的指标。计算公式为:

$$\beta = \frac{2L}{N} \quad (2)$$

3) γ 指数。网络连接度(γ)表示河网水系中廊道实际连接数与最大可能连接数之比, 是量化水系网络连接程度的指标。计算公式为:

$$\gamma = \frac{L}{L_{\max}} = \frac{L}{3(N-2)} \quad (3)$$

式中, N 为水系节点个数; L 为节点与节点间连接廊道数; L_{\max} 为最大廊道连接数; α 指数为 0~1, 0 为没有环路, 1 为最大环路; β 指数 0~6, 指数越大越好; γ 指数 0~1, 0 为节点之间均不相连, 1 为每个节点均互相连接。

由南昌市城区河网水系图(图 1)发现, 南昌市城区河网水系交汇点、河网分布错综复杂, 难以分辨, 无法实现对水系环度(α)、节点连接率(β)、网络连接度(γ)的计算, 故将原始水系图转化成“节点-廊道”水系有向图。原始水系图转化成节点-廊道”水系有向图时, 需要遵循一些绘图原则, 让读者了解水系有向图如何绘制, 各种水系的具体表征原则与表征方式见表 1, 表征原则与形式主要借鉴黄草等^[11]研究成果, 在其基础上加以改进得到符合城市水系特征的表征标准。

2.2 MIKE21 模拟

本次模拟主要采用 MIKE21 中的水动力模块和水质模块。其中水质模块采用 Transport, Transport 模块常用于模拟水体污染物的对流和扩散过程, 可以根据研究需求自己设定污染物类别, 初始设定操作简单灵活。鉴于模拟研究目的是对小型湖泊在相同引流量下, 廊道布置对水体污染物的净化作用, 采用 Transport 模块能够满足本次研究要求。

3 结果与分析

3.1 水系连通性表征

基于以上水系表征原则和表征形式, 可得到南昌市城区水系图模型, 虽然图模型不是原始水系的比列, 但图模型有较好的可视性, 将河道转化成有向廊道, 交汇点转化成节点, 能够从水系环度(α)、节点连接率(β)、网络连接度(γ)3 个方面对南昌市

水系连通性做出评价, “节点-廊道”水系有向图具体见图 2。

通过研究区域水系格局和连通性表征的“节点-廊道”有向图数据提取可以得到表 2。在基础指标方面, 南昌市主城区节点数(N)为 85 个, 廊道数(L)为 103 条, 其中昌南城区的节点数 48 个, 廊道数 63 条, 昌北城区的节点数 40 个, 廊道数 42 条。在水系连通方面, 南昌市主城区水系环度(α)为 0.12, 其中最高的是昌南城区为 0.18, 比主城区高 50%, 比昌北城区高 350%, 昌北城区的水系环度明显不足; 主城区节点连接率(β)为 2.42, 其中最高的是昌南城区为 2.63, 比主城区高 8.7%, 比昌北城区高 25.2%; 主城区网络连接度(γ)为 0.41, 其中最高的是昌南城区为 0.46, 比主城区高 12.2%, 比昌北城区高 24.3%。

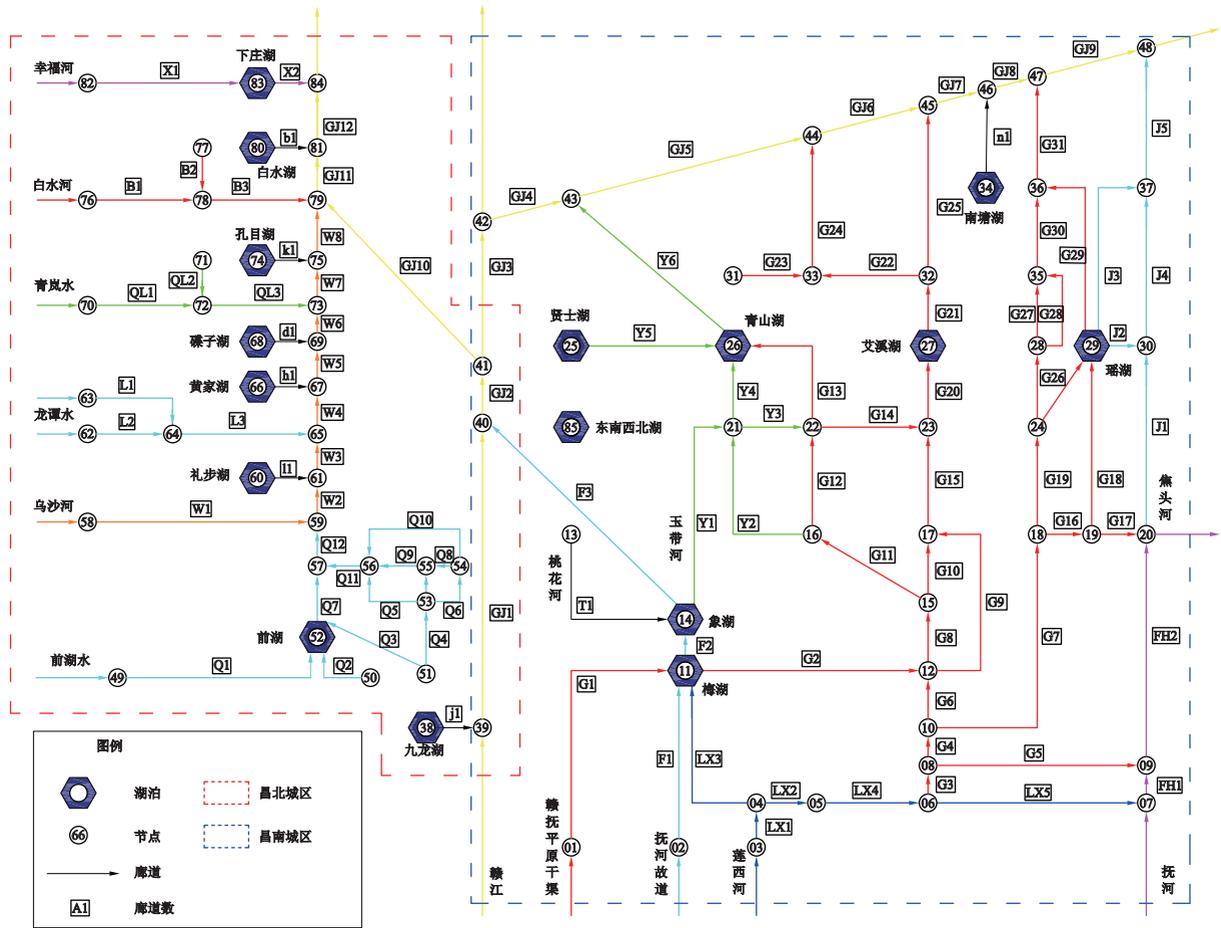
从表 3 中可以知道, 一般河流水系的节点数比廊道数多 1 个, 因为 2 个节点连成 1 条廊道, 但是前湖水的廊道数比节点数多, 因为节点与节点之间存在多条廊道, 这样有利于水系成环, 增加 α 系数的值。虽然前湖水廊道数比节点数多, 但昌北城区的 α 系数值依旧比昌南城区要小的多, 发现在湖泊节点的廊道连接数上, 昌北城区的 8 个湖泊中, 仅前湖的廊道数为 4, 其他湖泊的廊道数为 1。就是因为昌北城区的湖泊与其他水系连接的廊道数量少, 导致的昌北城区 α 系数值远低于昌南城区。

根据王世涛^[9]的研究, 1958 年昌北地区水系分布较之昌南地区更广, 河链数 27 条, 节点数 24 个, 纵向廊道有乌沙河和赣江, 横向廊道有前湖水、龙潭水、白水河、幸福河; 2010 年昌北城区河链数 10 条, 节点数 11 个, 相较于 1958 年仅增加一条纵向廊道青岚水, 廊道数量和廊道走向均变化不大;

表 1 水系特征的表征原则与形式

Table 1 Characterization principles and forms of water system characteristics

水系特征	表征原则	表征形式
水系源于研究区内, 汇于研究区内	研究区源头创建一个节点, 汇入创建一个节点	
水系源于研究区外, 汇于研究区内	研究区源头创建一个节点和一条不计数的廊道, 汇入创建一个节点	
水系源于研究区外, 汇于研究区外	研究区源头不创建节点并创建一条不计数的廊道, 汇入不创建节点并创建一条不计数的廊道	
城市湖泊	创建一个湖节点	
廊道方向	与水流方向一致	
廊道数字	从上游到下游编制	
节点及节点编号	河道的交汇点、分流点创建一个节点, 同一位置节点重复创建只记一个节点, 编号按照廊道方向从小到大编制	



图中字母 GJ 代表赣江、G 代表赣抚平原干渠、F 代表抚河故道、LX 莲西河、FH 代表抚河、T 代表桃花河、J 代表焦头河、Y 代表玉带河、Q 代表前湖水、W 代表乌沙河、L 代表龙潭水、QL 代表青岚水、B 代表白水河、X 代表幸福河、n 代表南塘湖廊道、j 代表九龙湖廊道、l 代表礼步湖廊道、h 代表黄家湖廊道、d 代表碟子湖廊道、k 代表孔目湖廊道、b 代表白水湖廊道; 不同颜色线代表不同河流水系

图 2 南昌市城区水系“节点-廊道”有向图

Fig.2 The "node-corridor" directed graph of the urban water system in Nanchang

表 2 南昌市主城区和赣江两岸水系连通性

Table 2 Connectivity between the main urban area of Nanchang City and the water system on both banks of the Ganjiang River

评价项目	评价指标	单位	主城区	昌南城区	昌北城区
基础指标	节点数(N)	个	85	48	40
	廊道数(L)	条	103	63	42
	研究区面积(A)	km ²	865.58	538.35	327.23
	河长	m	283.21	188.22	117.35
水系连通	水系环度(α)	-	0.12	0.18	0.04
	节点连接率(β)	-	2.42	2.63	2.10
	网络连接度(γ)	-	0.41	0.46	0.37

注: -为无此项。

2020 年相较于 1958 年昌北地区在城市化中主要改变了水系的分支连接、水域面积和湖泊数量。1958 年昌南地区多为湿地或沼泽, 区域内少有河流, 且

多为连通度较小的支流, 河链数 5 条, 节点数 4 个, 纵向廊道有抚河(现抚河故道)、焦头河和赣江, 横向廊道有莲西河和玉带河; 2010 年昌南城区河链

表 3 2020 年南昌市城区主要水系的节点与廊道数

Table 3 Number of nodes and corridors of main water systems in Nanchang urban area in 2020

研究区域	水系廊道名称	节点数/个	廊道数/条	湖节点名称	连接廊道数/条
昌南城区	赣抚平原干渠	32	31	梅湖	5
	抚河故道	4	3	象湖	4
	莲西河	6	5	贤士湖	1
	抚河	3	2	青山湖	4
	桃花河	2	1	艾溪湖	2
	玉带河	7	6	南塘湖	1
	焦头河	5	4	瑶湖	5
	-	-	-	东南西北湖	0
	昌北城区	前湖水	10	12	九龙湖
	乌沙河	9	8	前湖	4
	龙潭水	4	3	礼步湖	1
	青岚水	4	3	黄家湖	1
	白水河	4	3	碟子湖	1
	幸福河	3	2	孔目湖	1
	赣江	13	12	白水湖	1
	-	-	-	下庄湖	1

注：-为无此项。

数 30 条, 节点数 21 个, 因灌溉需求人工修建了赣抚平原干渠, 纵横交错, 形成多条回路, 将各大水系连接在一起; 2020 年相较于 1958 年昌南地区在城市化中不仅改变了水系的分支连接、走向、水域面积和湖泊数量, 更增加了大量的人工廊道。

综上所述, 反映南昌市主城区水系的两个问题: 一、昌北城区廊道在空间分布不均匀, 缺少纵向廊道。水系连通上昌南城区好于南昌市主城区好于昌北城区, 主要原因是昌南城区的人工廊道较多, 空间上分布均匀, 人工修建的赣抚平原干渠将梅湖、青山湖、艾溪湖和瑶湖连接起来形成了水流通路, 而昌北城区的规划主要依据原始河道进行, 缺少人工廊道, 且从图 2“节点-廊道”有向图可以看出, 昌北城区空间分布不均匀, 东密西疏, 基本上都是横向廊道, 缺少纵向廊道, 一旦源头受到污染, 因为仅仅一条纵向河流, 无法形成分流和截流, 会导致整个下游都受到水污染的影响。二、部分湖泊节点与其他水系节点连接的廊道少, 无法形成水流交换。礼步湖、黄家湖、孔目湖和白水湖等湖泊节点与河道节点仅有 1 条廊道相通, 且是湖泊流向河道的单向流。如果湖体发生水污染, 无法与河流产生水体交换, 只能通过湖体的自净功能来解决。

3.2 基于 MIKE21 典型湖节点水动力-水质模拟

从主观常识来说, 对应湖泊连接的廊道越多, 湖泊排污化污效果越好, 但实际情况是否如此? 本

文设计了 5 种湖节点的廊道布置方案, 来分析廊道布置对湖节点排污化污能力的影响。

3.2.1 湖节点分类

南昌市主城区湖泊众多, 湖泊边界条件复杂, 是影响湖泊水流的重要因素, 本文只选取典型湖泊来进行模拟(表 4), 于是将南昌市 16 个城市内湖按照中轴线长(a)和平均湖宽(b)之比分成两类: $a/b > 4$ 的一类为条带形湖泊, $a/b < 4$ 的一类为类圆形湖泊。快速城镇化导致城镇用地增加、水域面积减少, 目前南昌市主城区的主要湖泊有以下 14 个, 受到湖泊边界条件的影响, 以湖泊的长宽比例将湖泊分为两类, 一类是长宽比大于 2 的, 称为条带形湖泊, 一类是长宽比小于 2 的, 称为类圆形湖泊。

根据地域、湖泊类型以及实测数据限制, 在昌南城区选取南塘湖作为条带形典型湖泊作为模拟对象, 在昌北城区选取下庄湖作为类圆形典型湖泊作为模拟对象。

3.2.2 典型湖节点概况

根据现有南塘湖和下庄实测数据, 采用 Matlab 的 `griddata` 函数对数据做地形插值, 得到南塘湖和下庄湖的水下数值地形和边界, 网格采用非结构化三角形网格, 靠近边界网格较密, 湖中心位置网格疏松, 以加快模型在运算时的速度。在之后的情景方案模拟中, 南塘湖设置 6 个进出口点位, 具体位置如图 3, 其中 1 号口为现状进口位置, 6 号口为

表 4 南昌市城区城市湖分类

Table 4 Classification of urban lakes in Nanchang City

研究区域	湖节点名称	中轴线的长/km	平均湖宽/km	长宽比	类别
昌南城区	梅湖	2.50	0.20	12.50	条带形
	象湖	3.50	1.00	3.50	类圆形
	贤士湖	0.20	0.17	1.18	类圆形
	青山湖	3.30	1.10	3.00	类圆形
	艾溪湖	5.10	1.20	4.25	条带形
	南塘湖	3.30	0.47	7.02	条带形
	瑶湖	11.60	1.40	8.29	条带形
昌北城区	东南西北湖	1.08	0.19	5.68	条带形
	九龙湖	2.60	0.47	5.53	条带形
	前湖	2.20	1.00	2.20	类圆形
	礼步湖	1.00	0.20	5.00	条带形
	黄家湖	2.00	0.43	4.65	条带形
	碟子湖	1.36	0.74	1.84	类圆形
	孔目湖	1.80	0.30	6.00	条带形
	白水湖	0.90	0.54	1.67	类圆形
	下庄湖	1.37	0.57	2.40	类圆形

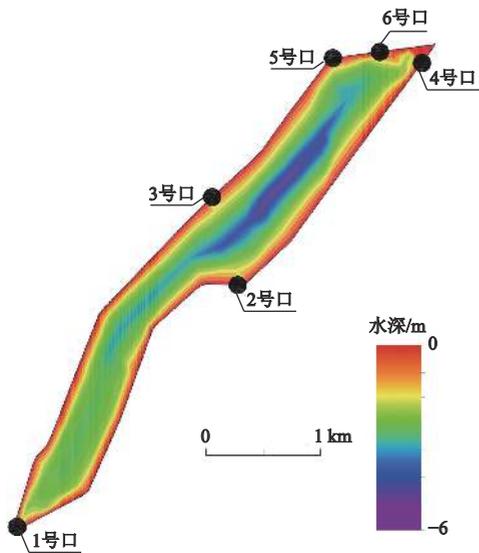


图 3 南塘湖数值地形

Fig.3 Numerical topographic of Nantang Lake

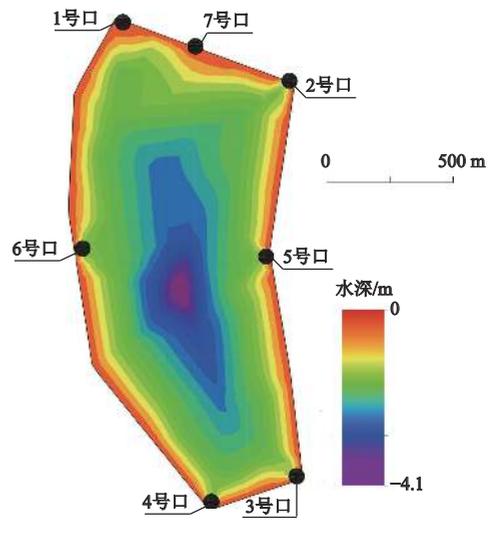


图 4 下庄湖数值地形

Fig.4 Numerical topographic of Xiaozhuang Lake

现状出口位置, 2 号口为假定进口位置, 3 号口、4 号口和 5 号口为假定出口位置; 下庄湖设置 7 个进出口点位, 具体位置如图 4, 其中 1 号口和 2 号口为现状进口位置, 4 号口为现状出口位置, 6 号口和 7 号口为假定进口位置, 3 号口和 5 号口为假定出口位置。位置设定依据现状地形海拔高度和连接相邻水系的海拔高度设定, 数量设定依据本文设置的布置形式和进出口方式设定。

3.2.3 水动力-水质模型构建

1) 情景模拟方案。南塘湖和下庄湖作为湖节点, 有多条廊道与之相连, 为确定湖节点在廊道连接数量上的最优形式, 设置 5 种情景方案进行对比, 南塘湖和下庄湖进出口设置根据图 3 和图 4 进行, 湖泊边界在定义为进出口时, 边界条件状态为开边界; 未被定义为进出口的边界, 设定边界条件状态为陆地边界, 进出口方案设置见表 5。

表 5 典型湖节点情景模拟方案进出口设置

Table 5 Import and export settings of typical lake node scenario simulation program

情景方案	布置形式	进出形式	条带形湖节点—南塘湖				类圆形湖节点—下庄湖			
			进口		出口		进口		出口	
方案一	线形	一进一出	1号口, 指定 流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$	-	6号口, 指定 水位 0 m	-	1号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	-	3号口, 指定 水位 0 m	-
方案二	三角形	两进一出	1号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	2号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	6号口, 指定 水位 0 m	-	1号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	2号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	3号口, 指定 水位 0 m	-
方案三	倒三角形	一进两出	1号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	-	4号口, 指定 水位 0 m	5号口, 指定 水位 0 m	1号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	-	3号口, 指定 水位 0 m	4号口, 指定 水位 0 m
方案四	矩形	两进两出	1号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	2号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	4号口, 指定 水位 0 m	5号口, 指定 水位 0 m	1号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	2号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	3号口, 指定 水位 0 m	4号口, 指定 水位 0 m
方案五	十字形	两进两出	1号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	2号口, 指定 流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$	4号口, 指定 水位 0 m	5号口, 指定 水位 0 m	6号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	7号口, 指定 流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$	3号口, 指定 水位 0 m	5号口, 指定 水位 0 m

注: -为无此项。

2) 模型初始条件设定。① 水动力模块设定。南塘湖网格数量 1 480 个, 节点数量 827 个; 下庄湖网格数量 1 813 个, 节点数量 969 个; 方案模拟时间设定 500 步, 时长设定 1 800 s, 共 10.4 d; CFL 数和时间步长的设定会影响到模型是否收敛, 不收敛将无法运行, 设定最小时间步长为 0.01 s, 最大时间步长为 30 s, 2) 模型初始条件设定。CFL 数标准值设为 0.8; 干湿水深动边界用于处理模型可能出现的发散现象, 设定干水深为 0.005 m, 淹没水深 0.05 m, 湿水深 0.1 m, 提高模型的稳定性和计算效率; 南塘湖与下庄湖距离赣江均不超过 200 m, 经实地踏勘, 南塘湖与下庄湖的边界为较平顺的土壤, 参照 SWMMH 5.1 用户手册曼宁系数(n)取值 0.25~0.40, 糙率取值 $32\text{ m}^{(1/3)}/\text{s}$ 合理; 涡粘系数参照舒长莉^[23]关于赣江的论文设定, 取值为 0.28; 初始湖面水位高程设置成 0 m, 初始流速 0 m/s; 在引入流量设定中, 对比各方案的优劣以及考虑南塘湖和下庄湖的规模大小和模型运行速度, 执行以下流量设置: 当南塘湖情景方案仅有 1 个进口开边界时, 流量设置成指定流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$, 出口边界均设置成指定水位 0 m, 当情景方案有 2 个进口开边界时, 流量则均设置成指定流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$, 出口均设置成指定水位 0 m; 当下庄湖情景方案仅有 1 个进口开边界时, 流量设置成指定流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$, 出口边界均设置成指定水位 0 m, 当情景方案有 2 个进口开边界时, 流量则均设置成指定流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$, 出口均设置成指定水位 0 m。② 水质对流扩散模块设定。湖泊水质对 TP 的质量浓度最为敏感, 故选取 TP 来模拟南塘湖和下庄湖水体污染物质量浓度变化。扩散系数的大小决定了污染物的扩散和扩散, 参考其他研究

成果^[23,24], TP 扩散系数均设置成 $1.5\text{ m}^2/\text{s}$; 降解系数反映了污染物的降解和转化情况, 本次研究对象为小型城市内湖, 且模拟时长较短, 研究主要考虑内容是引流后的水体交换, 不考虑水体污染物的降解问题, 水体污染物降解速率设置成 0。

3) 模型率定。在实际地形中, 图 3 中的 1 号口和 6 号口为南塘湖真实存在的进出口, 选取这两个观测点作为南塘湖来进行模型率定, 其中 1 号口为进水口, 6 号口为出水口; 图 4 中的 1 号口和 3 号口为下庄湖真实存在的进出口, 选取这 2 个观测点作为下庄湖模型来进行模型率定, 其中 1 号口为进水口, 3 号口为出水口, 将这两个湖泊的进水口和出水口的实测水位数据分别作为进出口边界控制水位, 将实测流量数据作为进口输入, 南塘湖输入流量 $3.2\text{ m}^3/\text{s}$, 下庄湖输入流量 $4.3\text{ m}^3/\text{s}$, 待模型运行稳定后, 得到理论上进出口点位在水体稳定时的流速, 与实测流速进行比较, 结果见表 6。

从表 6 可见, 南塘湖的 1 号口和 6 号口的相对误差分别为 4.3% 和 3.2%, 下庄湖的 1 号口和 3 号口的相对误差分别为 4.6%、4.8%, 均小于 5%, 说明水动力模型较精确, 符合本次研究模拟要求。

3.3 模拟结果分析

根据《地表水环境质量标准》中 TP 项目的准限值, III类水质 TP 质量浓度为(0.025,0.05], IV类水质 TP 质量浓度为(0.05,0.1], V类水质 TP 质量浓度为(0.1,0.2]。A、B 分别表示为 V、IV类水质消失的时间节点, 表示方案的优劣, 运行步数越少, 代表其布置方案越好, 其中 1 步等于 30 min。南塘湖和下庄湖 TP 质量浓度变化模拟结果见表 7。

由表 7 可知, 方案一效果是 100% 为基准, 南

表 6 典型湖节点流速模拟值与实测值

Table 6 The simulated and measured values of velocity at typical lake nodes

湖节点	观测点位	水位高程/m	流速实测值/(m/s)	流速模拟值/(m/s)	相对误差/%
南塘湖	1号口	18.43	0.14	0.134	4.3
	6号口	18.43	0.12	0.124	3.2
下庄湖	1号口	15.83	0.31	0.325	4.6
	3号口	15.83	0.28	0.294	4.8

表 7 湖泊 TP 质量浓度变化模拟结果

湖泊	项目	A节点(V类水质消失步数)	B节点(IV类水质消失步数)
南塘湖	方案一	131步	193步
	方案二	154步	195步
	方案三	133步	182步
	方案四	134步	179步
	方案五	196步	250步
下庄湖	方案一	244步	449步
	方案二	154步	195步
	方案三	156步	289步
	方案四	128步	171步
	方案五	218步	362步

塘湖在以 TP 为评价标准的 V 类水质消失节点上, 方案二到方案五的引水净化效果依次为 82.44%、98.47%、97.71%、50.38%; IV 类水质消失节点上, 方案二到方案五的引水净化效果依次为 98.44%、105.21%、107.29%、69.79%; 比较 5 个方案的引流净化效果得出, 典型条带形湖节点—南塘湖的方案三(倒三角形布置)效果最好, 方案五(十字形布置)效果最差。以方案一效果是 100% 为基准, 下庄湖以 TP 为评价标准的 V 类水质消失节点上, 方案二到方案五的引水净化效果依次为 368.85%、136.07%、147.54%、110.66%; IV 类水质消失节点上, 方案二到方案五的引水净化效果依次为 373.05%、135.63%、161.92%、119.38%。比较 5 个方案的引流净化效果得出, 典型类圆形湖节点—下庄湖的方案二(三角形布置)效果最好, 方案一(线形布置)效果最差。模拟结果显示, 无论是条带形湖泊还是类圆形湖泊, 方案五(十字形布置)廊道最多, 但水体引流净化的效果却不甚理想, 可见在规划城市水系时, 应选择合适的湖泊廊道布置方式, 以避免水体污染物在湖泊中淤积, 不应过分追求廊道数量来突出其连通性, 而应在连通性与湖泊连接的廊道数量之间保持一个平衡关系。

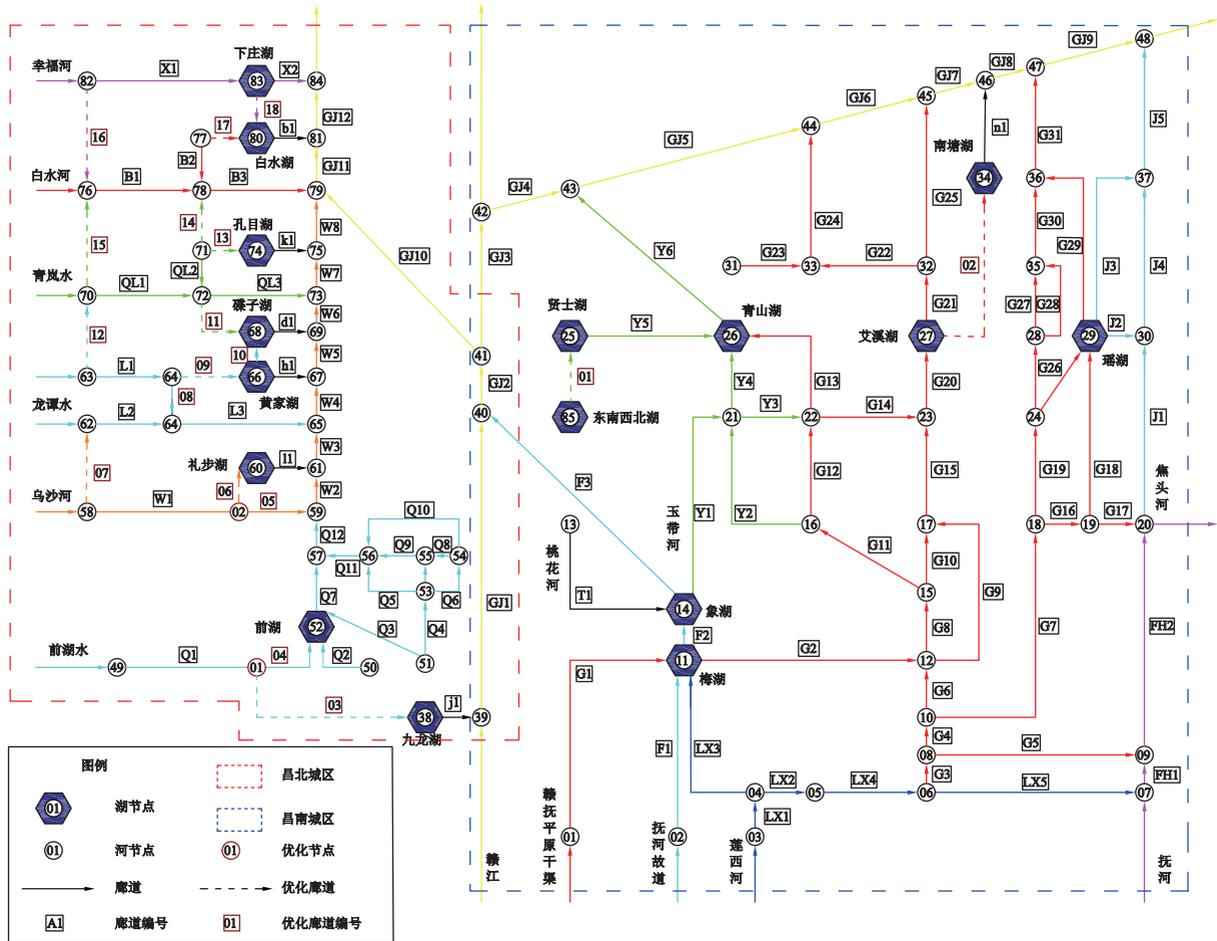
3.4 城区水系连通优化

在 3.3 节中模拟结果得出, 对条带形湖节点优先采用倒三角形布置, 尽量避免的十字形廊道布置; 对类圆形湖节点优先采用三角形布置, 应避免线形布置和十字形布置。再结合现有的实际情况, 对南昌市城区水系连通性做以下优化: ① 打通东南西北湖和贤士湖, 增加一条廊道, 贤士湖形成线形廊道布置。② 打通艾溪湖和南塘湖, 增加一条廊道, 艾溪湖形成倒三角形廊道布置, 南塘湖形成线形廊道布置。③ 打通前湖水和九龙湖, 增加一条廊道, 九龙湖形成线形廊道布置。④ 打通乌沙河和礼步湖, 增加一条廊道, 礼步湖形成线形廊道布置。⑤ 打通龙潭水、黄家湖和碟子湖, 增加两条廊道, 黄家湖形成倒三角形布置, 碟子湖形成三角形布置。⑥ 打通青岚水、白水河和孔目湖, 增加两条廊道, 孔目湖形成线形布置。⑦ 水湖和下庄湖, 增加一条廊道, 白水湖形成三角形布置, 下庄湖形成倒三角形布。

根据南昌市城区水系“节点—廊道”有向图(图 2)和优化后南昌市城区水系“节点—廊道”有向图(图 5)数据提取得到表 8。优化后南昌市主城区节点数(N)为 87 个, 廊道数(L)为 121 条, 其中昌南城区的节点数 48 个, 廊道数 65 条, 昌北城区的节点数 42 个, 廊道数 58 条。南昌市主城区水系环度(α)优化后为 0.21, 比现状提高 75%; 节点连接率(β)优化后为 2.78, 比现状提高 14.88%; 网络连接度(γ)优化后为 0.42, 比现状提高 14.63%。昌南城区水系环度(α)优化后为 0.2, 比现状提高 11.11%; 节点连接率(β)优化后为 2.71, 比现状提高 3.04%; 网络连接度(γ)优化后为 0.19, 比现状提高 2.17%。昌北城区水系环度(α)优化后为 0.22, 比现状提高 450%; 节点连接率(β)优化后为 2.76, 比现状提高 31.43%; 网络连接度(γ)优化后为 0.48, 比现状提高 29.73%。

4 结论与讨论

水系连通是河流湖泊排污化污的重要手段。本



图中符号含义见图 2

图 5 优化后南昌市城区水系“节点-廊道”有向图

Fig.5 The 'node-corridor' directed graph of the urban water system in Nanchang City after optimization

表 8 南昌市城区水系连通优化前后对比

Table 8 Comparison before and after optimization of urban water system connectivity in Nanchang

评价指标指标	单位	主城区		昌南城区		昌北城区	
		现状	优化	现状	优化	现状	优化
节点数(N)	个	85	87	48	48	40	42
廊道数(L)	条	103	121	63	65	42	58
水系环度(α)	-	0.12	0.21	0.18	0.20	0.04	0.22
节点连接率(β)	-	2.42	2.78	2.63	2.71	2.10	2.76
网络连接度(γ)	-	0.41	0.47	0.46	0.47	0.37	0.48

注：-为无此项。

次研究利用图论法将错综复杂的城市河网水系概化成通俗易懂的“节点-廊道”有向图，再以城市湖泊水体污染物迁移为切入点，讨论连通性与廊道间的平衡关系。本次研究主要以下结论：

1) 基于图论法对南昌市城区水系连通进行评价，其结果有良好的可视性。采用图论法和景观生态学对南昌市城区水系连通进行评价，其中景观生

态学的强景观属性评价指标对城市水系连通相对于大江大湖具有更好的匹配度；图论法利用表征规则将复杂水系转化成通俗易懂的“节点-廊道”图，又能将水系连通与城市水系规划结合在一起，具有学科交叉性；评价结果显示南昌市城区水系环度(α)为 0.12，节点连接率(β)为 2.42，网络连接度(γ)为 0.41，符合南昌市实际情况，具有理论科学性。

2) 针对不同类型的湖节点, 应采用不同廊道布置方式, 有利于净化湖泊水体污染物。根据 MIKE21 模拟 TP 污染物在湖体中迁移扩散的速度结果显示, 条带形湖节点在廊道布置中应优先采用倒三角形布置, 尽量避免的十字形廊道布置; 类圆形湖节点在廊道布置中优先采用三角形布置, 应避免线形布置和十字形布置。在规划城市水系时, 不应过分追求廊道数量来突出其连通性, 也不应保持原始状态而不做任何规划, 而是应在连通性与湖泊连接的廊道数量之间保持一个平衡关系, 在保证连通性的同时避免水体污染物在湖泊中淤积。

3) 对城市水系进行合理规划有利于改善水系的连通性、湖泊的抗污染能力以及水系景观美丽度。南昌市主城区水系环度(α)优化后为 0.21, 比现状提高 75%; 节点连接率(β)优化后为 2.78, 比现状提高 14.88%; 网络连接度(γ)优化后为 0.42, 比现状提高 14.63%, 节点、廊道空间布置合理, 紧疏有致, 不仅能增加水系纳污化污能力, 还能增加调蓄水量、水生态景观面积, 为城市水功能区域划分、水生态文明城市建设、海绵城市建设提供一定的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 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. [Xia Min, Zhou Zhen, Zhao Haixia. Evaluation of water system connectivity of the district around Chaohu Lake based on comprehensive indexes. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(1): 73-77.]
- [2] 杨凯. 平原河网地区水系结构特征及城市化响应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006. [Yang Kai. Stream structure characteristics and its urbanization response in dense river network plain. Shanghai: East China Normal University, 2006.]
- [3] 王世涛. 城市化发展对南昌市水系结构与河网连通性变化及其调蓄能力的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. [Wang Shitao. Study on the impact of urbanization on structure, river network connectivity and storage capacity in Nanchang. Nanchang: Nanchang University, 2016.]
- [4] 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.
- [5] Jackson C R, Pringle C M. Ecological benefits of reduced hydrologic connectivity in intensively developed landscapes[J]. *BioScience*, 2010, 60(1): 37-46.
- [6] Stoffels R J, Rehwinkel R A, Price A E et al. Dynamics of fish dispersal during river-floodplain connectivity and its implications for community assembly[J]. *Aquatic Ecosyst. Health Manag.*, 2016, 78(2): 355-365.
- [7] 窦明, 石亚欣, 于璐, 等. 基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清溪河许昌段为例[J]. *水利学报*, 2020, 51(6): 664-674. [Dou Ming, Shi Yaxin, Yu Lu et al. Optimization of connecting schemes for urban river networks based on graph theory. A case study of Xuchang section of Qingying River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(6): 664-674.]
- [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. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 626-631.]
- [9] 韩毅, 朴香花, 梁倩. 城市双修视角下的城市水系景观规划实践——以新乡市水系连通生态规划为例[J]. *中国园林*, 2018, 34(8): 27-32. [Han Yi, Piao Xianghua, Liang Qian. Urban water system landscape planning in the perspective of city betterment and ecological restoration—A case study of the ecological planning for water system connection in Xinxiang City [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(8): 27-32.]
- [10] 赵筱青, 和春兰. 外来树种桉树引种的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1860-1871. [Zhao Xiaqing, He Chunlan. Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species Eucalyptus. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1860-1871.]
- [11] 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. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 661-672.]
- [12] Karim F, Kinsey-Henderson A, Wallace J et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(18): 2710-2723.
- [13] 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. [Xu Guanglai, Xu Youpeng, Wang Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 776-781.]
- [14] 徐慧. 城市景观水系规划模式研究——以江苏省太仓市为例[J]. *水资源保护*, 2007, 22(5): 25-27+30. [Xu Hui. Landscape planning of urban water system: A case study on Taicang City. *Water Resources Protection*, 2007, 22(5): 25-27+30.]
- [15] 刘昌明, 李宗礼, 王中根, 等. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 505-512. [Liu Changming, Li Zongli, Wang Zhonggen et al. Key scientific issues and research directions of the interconnected river system network. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 505-512.]
- [16] 钟义鹏. 南昌市城区商业用地价格时空演变及三维可视化分析[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021. [Zhong Yipeng. Spatio-temporal evolution and three-dimensional visualization analysis of commercial land prices in Nanchang City. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.]

- [17] 何振芳, 郭庆春, 赵牡丹, 等. 基于小波分析的复杂地貌区DEM自动综合研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4): 57-63. [He Zhenfang, Guo Qingchun, Zhao Mudan et al. Research on DEM automatic synthesis in complex geomorphic areas based on wavelet analysis. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(4): 57-63.]
- [18] 张景奇, 关威, 孙萍, 等. 基于K-T变换的地表水体信息遥感自动提取模型[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 88-92. [Zhang Jingqi, Guan Wei, Sun Ping et al. Automatic water bodies extraction model based on K-T transformation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 88-92.]
- [19] 陆丁潏, 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. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(2): 161-167.]
- [20] 郭伟鹏. 城市水系连通工程近邻空间规划控制要素及指标研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. [Guo Weipeng. Study on control factors and indexes of the neighbor space of city river connectivity project. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.]
- [21] 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. [Ma Dong, Zhang Jing, Zhao Jinyong et al. Quantitative evaluation and improvement measures of water connectivity in main urban area of Yangzhou. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 34-40.]
- [22] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013. [Ma Shuangshuang. Study on river network pattern and connectivity of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain region based on river health. Nanjing: Nanjing University, 2013.]
- [23] 舒长莉, 李林, 冯韬. 基于MIKE21的河道饮用水源地突发污染事故模拟——以赣江南昌段为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 73-77. [Shu Changli, Li Lin, Feng Tao. Simulation of emergent water pollution accident in river-type drinking water sources based on MIKE 21: A case of Nanchang reach of Ganjiang River. *Yangtze River*, 2019, 50(3): 73-77.]
- [24] 李华旭, 杨锦琦. 生态环境约束下农业全要素生产率时空变化研究——以江西为例[J]. *南昌大学学报(人文社会科学版)*, 2020, 51(3): 81-90. [Li Huaxu, Yang Jinqi. Study on the temporal and spatial changes of agricultural total factor productivity in Jiangxi Province under the constraints of ecological environment. *Journal of Nanchang University (Humanities and Social Sciences)*, 2020, 51(3): 81-90.]

Layout and Optimization of Urban Water System Connectivity Based on the Graph Theory

Fu Chun^{1,2}, Deng Junpeng^{3,4}, Ouyang Huanrui⁵, Fu Yaozong³, Zhang Jing¹

(1. *School of Public Policy and Administration, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*; 2. *School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*; 3. *School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*; 4. *Fuzhou Emergency Rescue Support Center, Fuzhou 344100, Jiangxi, China*; 5. *School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*)

Abstract: Urban expansion has cut off the originally connected rivers and lakes, and repairing the connectivity of the water systems in urban areas is an important part of the construction of sponge cities and water ecological civilization cities. Based on the ‘point-edge’ quantitative relationship in landscape ecology, three water system connectivity evaluation indicators (α), node connection rate (β) and network connectivity (γ) are established, and the ‘node-corridor’ of the water system in Nanchang is drawn. ‘Tao’ has a directed map and uses urban lake water drainage and pollution as the starting point to optimize the connectivity of the urban water system. Studies have shown that: 1) The urban water system of Nanchang has uneven distribution of corridors, and there are fewer corridors connecting the lake node with other water system nodes; 2) The optimized urban water system is compared with the current water system. The degree (α) is increased by 75%, the node connection rate (β) is increased by 14.88%, and the network connection degree (γ) is increased by 14.63%. In the optimization of urban water system connectivity, we should not blindly increase lake corridors by pursuing connectivity too much. We should maintain a balance between connectivity and the number of corridors connected to the lake to prevent water pollutants from silting up in the lake.

Key words: Graph Theory; water system connection; MIKE21; drainage and pollution; Nanchang City