

河道断点打通效果评价研究

——以浦东新区骨干河道为例

钟 敏

上海市浦东新区水文水资源管理事务中心, 上海

收稿日期: 2024年10月8日; 录用日期: 2024年11月18日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

针对河网中的断点问题, 以浦东新区骨干河道为例, 构建了一套包含水系形态、结构连通性和水力连通性的评价指标体系, 采用AHP-熵综合权重法进行指标赋权, 以科学评估断点打通的效果。研究发现, 断点打通能提升水面率、河网密度和槽蓄量, 增强水系环度和连通度, 改善流速和缩短水体交换时间。本研究可为河道整治和水资源管理提供决策支持, 助力提升区域水安全和城市韧性。

关键词

断点打通, 河道连通, 评价指标体系

Evaluation Study on the Effects of Disconnection Resolution in River Channels

—A Case Study of the Main River Channels in Pudong New Area

Min Zhong

Hydrologic Survey and Resources Administration of Pudong New Area, Shanghai

Received: Oct. 8th, 2024; accepted: Nov. 18th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

This study focuses on the issue of disconnections within river networks and selects the main river channels of Pudong New Area as an example. It constructs an evaluation index system that includes water system morphology, structural connectivity, and hydraulic connectivity. The AHP-entropy composite weight method is used for index weighting to scientifically evaluate the effects of disconnection resolution. The study

作者简介: 钟敏(1979.5-), 女, 上海人, 工程硕士, 助理工程师, 从事水文学水动力学模型, 水文分析计算研究, Email: 31879615@qq.com

文章引用: 钟敏. 河道断点打通效果评价研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(6): 633-641.
DOI: 10.12677/jwrr.2024.136071

finds that resolving disconnections can enhance the water surface rate, river network density, and reservoir capacity. It can strengthen the degree of water system cyclicity and connectivity, and improve flow velocity and reduce the time for water body exchange as well. This research can provide decision support for river channel and water resource management, helping to improve regional water safety and urban resilience.

Keywords

Disconnection Resolution, River Connectivity, Evaluation Index System

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河湖水系是生态环境的重要组成部分，也是经济社会发展的基础支撑[1]。然而，骨干河道存在的断点问题限制了水系的连通性，影响了防洪排涝能力和水环境质量。随着国家及各级政府对河湖水系连通修复的日益重视，开展骨干河道断点打通工作显得尤为迫切，打通断点的主次性、迫切程度也需要明显区分。因此构建科学的评价体系，模拟断点打通后的水文水动力效应，对河道整治和水资源管理提供决策支持，促进区域水安全保障能力与城市韧性的提升具有重要意义。

浦东新区是长江下游受水闸调度影响明显的平原感潮河网地区，水系连通性的研究相对较少[2]，对断点打通效果的引入水力连通性尚无相关研究[3]。本研究以浦东新区河网水系为例，展开骨干河道断点打通的效果评价研究。基于浦东新区河网水系特点，建立一套科学适用的河道断点打通效果评价体系；借助数值模型等技术手段评价骨干河道断点打通效果，进而支撑中长期河道规划科学优化实施安排，同时为国内其他同类城市的骨干河道断点打通做参考。

2. 研究方法

1) 数据资料收集与整理

收集骨干河道所有断点打通工程的具体位置、打通后的河床规划断面、以及遥感水面图层等数据；收集近年的降雨、蒸发、潮位、水位、流量、闸泵开关记录等过程。

2) 更新模型

将现状雨水泵站及其服务区、打通断点后的水系拓扑结构更新至浦东水利片水文水动力模型。利用收集到的近年数据对更新后的模型进行率定与验证，保障模型进行断点效果评估的可靠性。

3) 建立评价指标体系

通过对近年来城市水系连通性评价研究的分析和整合，从反应水系形态、结构连通性、水力连通性三个方面选用指标，建立河道断点打通效果评价的指标体系。

4) 指标计算与标准化

为了客观真实的反应各项指标对断点打通的贡献，本研究采用 AHP-熵权法，对指标进行赋值和标准化处理，消除量纲差异，确保评价的公正性和准确性。

5) 方案评价

选取特定的水文模拟条件和工程组合，拟定方案。利用多目标评价方法，对断点打通效果进行综合评价。

研究技术路线如图 1 所示：

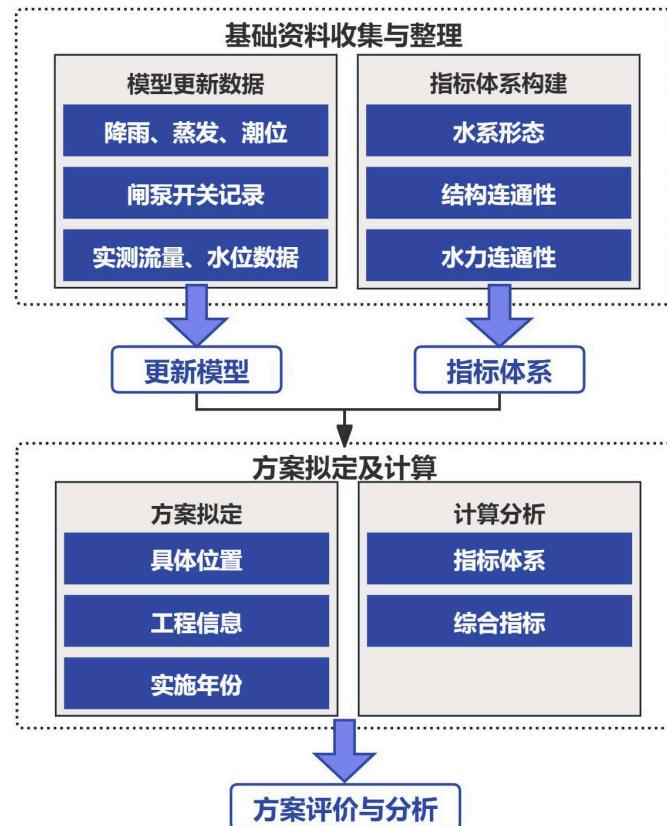


图 1. 断点打通评价研究路线

3. 研究内容

3.1. 数据收集与整理

1) 水文数据

收集了浦东水利片 2019~2022 年的水文站数据，数据间隔为 5 分钟，一年约 10.5 万个数据记录，数据有效率达 99%。

2) 水闸调度数据

收集浦东水利片泵闸基础属性数据，以及浦东水利片 2016~2023 年的水闸调度时间序列数据，共涉及 43 个水闸。

3) 骨干河道打通数据

浦东骨干河道计划打通断点共有 42 个，其中截止到 2022 年已沟通的断点有 3 个、在建的断点有 12 个、按规划实施的断点有 14 个、优化规划后实施的断点有 1 个、分阶段实施的断点有 4 个、通过邻近河道沟通的断点有 7 个、需要专题研究的断点有 1 个。断点分布如图 2 所示。

3.2. 模型更新

本研究基于浦东水利片水文水动力模型，浦东水利片水文水动力数值模型概化后共包含河道 705 条段，计算点 4875 个，水闸 42 个，雨水泵站 77 个；共划分了 115 个水文模型计算分区，考虑到浦东水利片大部分区域为城市建成区，本次模型将建成区水文模型更新为 Urban A 模块。同时对模型中相应雨水泵站服务区的排水参数进行了修改，以提升模型的精度。浦东水利片水文水动力模型概化图如图 3 所示。

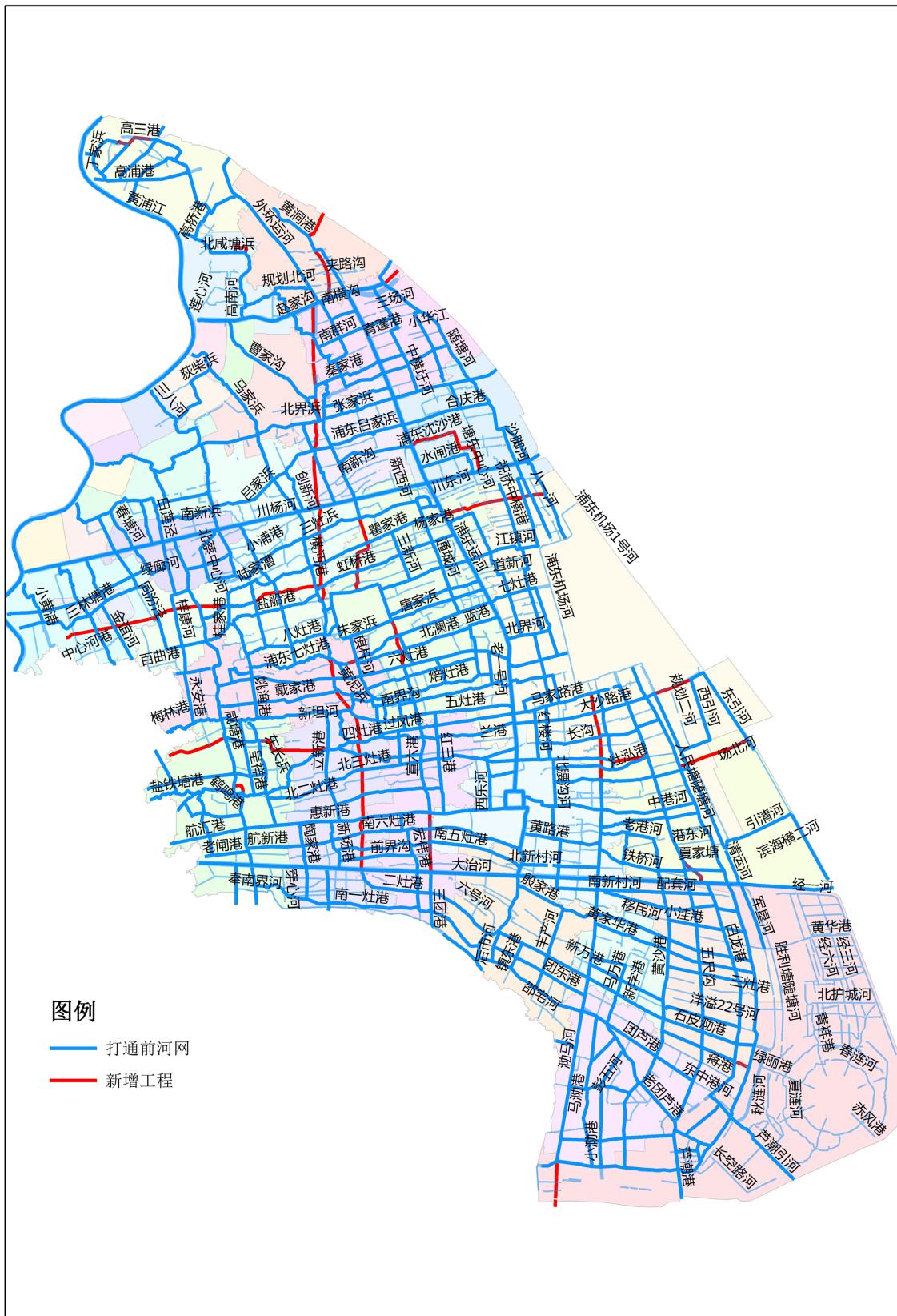


图 2. 浦东骨干河道断点打通点位分布

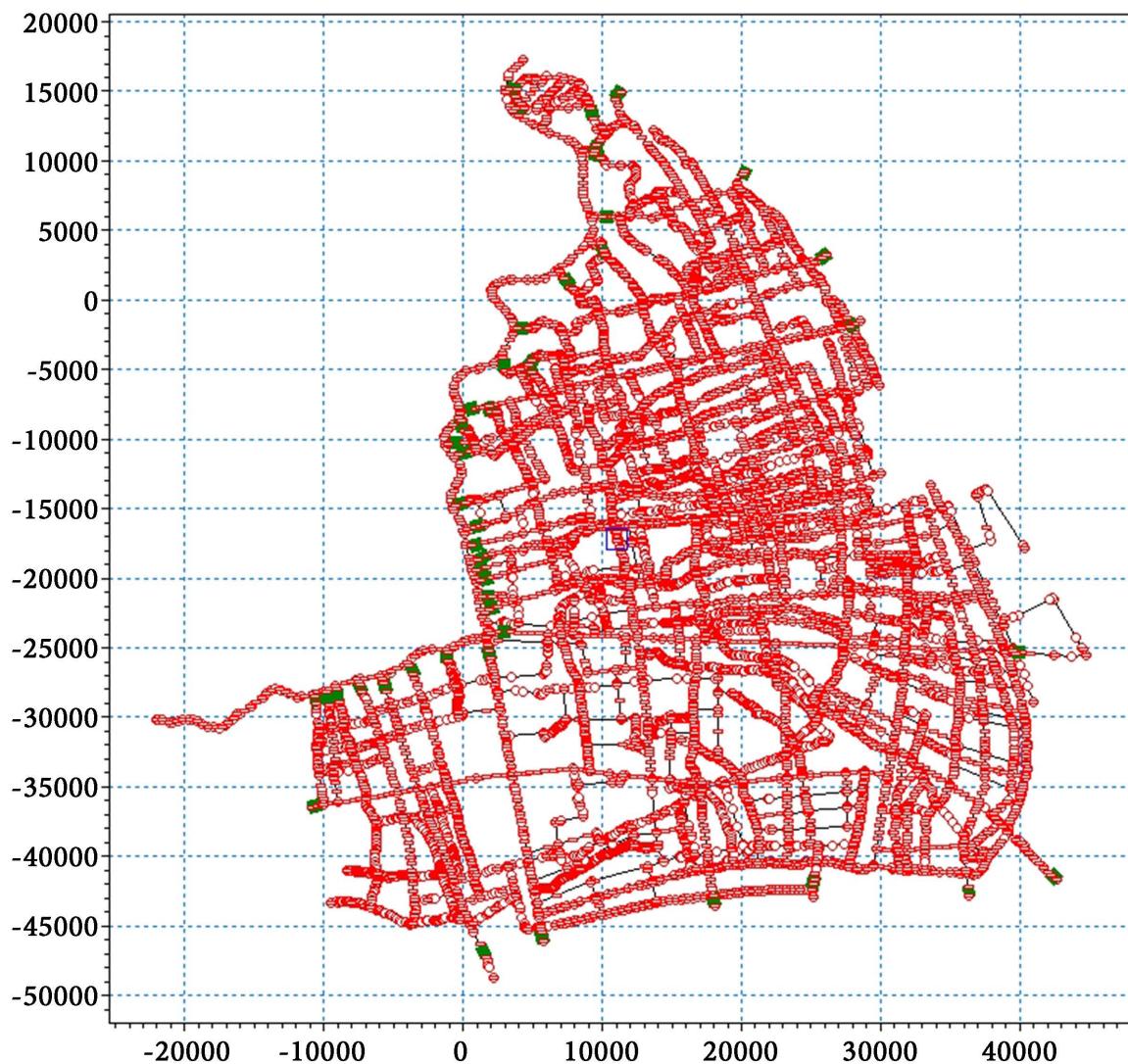


图3. 浦东水利片水文水动力模型概化图

3.3. 建立评价指标体系

3.3.1. 评价指标

本研究综合河流地貌学视角,选取河网密度、水面率和河频率作为水系形态指标,反映水系规模和静态特征。为增强评价的动态性,引入河道槽蓄量指标,以评估河道的防洪排涝和水资源调度能力,实现对城市水系形态的全面评价。

平原河网因地势平坦和人工改造导致水流复杂且流向多变。为克服传统河流分级的局限性,本研究通过水系环度、节点连接率及水系连通度等量化指标,客观评估河网的结构连通性。

在结构连通性的基础上,充分考虑平原河网水体流动能力对水系连通性的影响,采用流速、水位预降时间、换水周期3个指标进行水力连通性评价。

3.3.2. 指标体系

浦东水利片平原河网构建了如表1的一套指标体系:体系目标层为打通效果;准则层包括水系形态、结构连通性、水力连通性;指标层共有10项评价指标。

表1. 断点打通评价指标计算方法

目标层	准则层	指标层	计算公式(方法)	物理意义
打通效果评价	水系形态	水面率%	$s = \frac{Aw}{Ar}$	反映区域水域面积大小
		河网密度(km/km ²)	$D = \frac{L}{Ar}$	反映区域河流长度的发育程度
		河频率(条/km ²)	$R = \frac{N}{Ar}$	反映区域河流数量的发育程度
	水系环度	河网槽蓄量(亿 m ³)	数值模型	反映区域水系水资源存储能力的大小
		节点连接率	$\beta = \frac{n}{v}$	反映河网水系中每个节点连接水系强弱的能力
		水系连通度	$\gamma = \frac{n}{3(v-2)}$	反映河网水系之间连通性强弱和水分输移的能力
水力连通性	流速(m/s)	流速(m/s)	$v = \frac{\sum_1^N Vi}{N}$	反映河网中各河段水系的平均流速
		预降耗时(H)	数值模型	反映河网的防洪能力
	换水时间(H)	数值模型		反映河网的水质改善能力

3.4. 指标计算与标准化

本次采用 AHP-熵综合权重法对指标赋权, 进而对不同的断点打通方案进行综合评价。

层次分析法(AHP)通过层次树模型定性比较指标重要性, 属于主观赋权。熵权法通过计算熵值定量确定权重, 属于客观赋权。为平衡主观客观性, 本研究采用 AHP-熵综合权重法, 精确定评价指标权重。权重计算过程如下:

1) AHP 权重

AHP 权重计算的计算公式详见(1)和(2)。

$$C_I = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (1)$$

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 断矩阵的最大特征值; m 为判断矩阵的阶数; R_I 为一致性指标标准值。若 $C_R < 0.1$, 则检验通过。借助程序计算 λ_{\max} 的特征向量, 得到各层次元素权重。将各层次元素权重相乘即可得到评价指标相对准则层的权重, 即 AHP 权重。

2) 熵权权重

首先对评价指标数值进行归一化处理, 得到归一化矩阵, 然后定量计算各评价指标对应的熵值, 得到指标对应的熵权。

指标归一化处理的计算公式详见(3)和(4)。

$$\text{正向指标 } x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(i, j)}{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)} \quad (3)$$

$$\text{负向指标 } x(i, j) = \frac{x_{\max}(i, j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)} \quad (4)$$

式中: $x(i, j)$ 为第 i 个评价方案第 j 个评价指标归一化后的值; $x_{\max}(j)$ 和 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个评价指标的最大值和最小值; $x^*(i, j)$ 为第 i 个评价方案第 j 个评价指标的实际值。

熵值计算公式详见(5)、(6)和(7)。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^N f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{i=1}^N g_{ij}} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\ln N} \quad (7)$$

式中: H_j 为评价指标 j 的熵值, 在此假定当 $f_{ij} = 0$, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; g_{ij} 为评价指标的归一化矩阵; k 为玻尔兹曼常量; N 为评价方案的总个数。

熵权计算公式详见(8)。

$$w_j^i = \frac{1 - H_j}{M - \sum_{j=1}^M H_j} \quad \left(0 \leq w_j^i \leq 1, \sum_{j=1}^M w_j^i = 1 \right) \quad (8)$$

式中: M 为评价指标的总个数。

3) 综合权重(AHP-熵权法)

将 AHP 法计算得到的指标权重值记为 w^* , 熵权法计算得到的指标权重记为 w' , 评价指标的个数记为 $j (j=1, 2, \dots, M)$, 计算得出的数值即为综合权重, 计算公式详见(9)。

$$w_j = \frac{(w'_j w_j^*)^{0.5}}{\sum_{j=1}^M (w'_j w_j^*)^{0.5}} \quad (j=1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

3.5. 方案评价

研究以浦东新区断点打通工程实施前的水系河网为基础, 方案一考虑内部沟通和外部沟通两个方案。方案二为考察增加内部河道沟通的效果研究, 在方案一的基础上打通 94、97、111 等 3 个断点; 方案三为考察增加外部河道沟通的效果研究, 在方案一的基础上打通断点 77、83、104 等 3 个断点。关键节点方案见表 2。

最终计算方案一的决策值是 0.485, 方案二的决策值是 0.486, 方案三的决策值是 0.490。评价指标计算结果见表 3。评价指标权重计算结果见表 4。

从水系形态评价结果可以看出: 内部和外部节点打通后, 水面率、河网密度、河网槽蓄量有一定的提高, 但由于分散节点的打通没法实现骨干河道的整体畅通, 因此河频率与方案一基本一致。

从结构连通性评价结果可以看出: 内部断点的打通, 使得回路增多, 一定程度上减小了水系环度、节点连

表 2. 关键节点方案

方案	断点序号	说明
方案一	断点打通前	基准时间 2021 年
方案二	方案一 + 断点 94、97、111	内部沟通
方案三	方案一 + 断点 77、83、104	外部沟通

表3. 评价指标计算结果

准则层	指标层	方案一	方案二	方案三
水系形态	水面率%	11.0%	11.02%	11.03%
	河网密度(km/km ²)	0.95	0.95	0.95
	河频率(条/km ²)	0.043	0.043	0.043
	河网槽蓄量(亿 m ³)	0.83	0.84	0.85
结构连通性	水系环度	0.371	0.369	0.373
	节点连接率	1.736	1.732	1.741
	水系连通度	0.581	0.580	0.583
水力连通性	流速(m/s)	0.070	0.071	0.070
	预降耗时(H)	4.56	4.55	4.464
	换水时间(H)	517	504	483

表4. 评价指标权重计算结果

准则层	指标层	权重		
		AHP	熵权	综合权重
水系形态(1/3)	水面率(1/4)	0.083	0.099	0.091
	河网密度(1/4)	0.083	0.105	0.094
	河频率(1/4)	0.083	0.098	0.091
	河网槽蓄量(1/4)	0.083	0.098	0.091
结构连通性(1/3)	水系环度(1/3)	0.111	0.101	0.106
	节点连接率(1/3)	0.111	0.101	0.106
	水系连通度(1/3)	0.111	0.101	0.106
水力连通性(1/3)	流速(1/3)	0.111	0.109	0.111
	预降耗时(1/3)	0.111	0.113	0.112
	换水时间(1/3)	0.111	0.075	0.092

接率、水系连通度；外部断点的打通，直接增加了与外部水系的沟通，一定程度上增加了水系环度、节点连接率、水系连通度。

从水力连通性评价结果可以看出：内部、外部部分断点的打通对河网的流速影响不大；内部断点的打通由于增加了水流的距离，因此一定程度上影响了预降耗时，但减小了换水时间；相较内部断点打通，外部断点的连通能更为明显的减小预降耗时和换水周期。

4. 结论与建议

浦东新区是一个复杂的水网系统，具有河网水系密布、水流往复、水闸控制的特点。为分析浦东水系骨干河道打通断点后水系连通状况和满足水质管理要求，本次研究考虑指标的合理性与适宜性，结合《河湖水系连通工程技术指南》等相关文献以及数值模型，从反应水系形态、结构连通性、水力连通性三个方面选用指标，构建了一套适用于评估浦东新区水系连通性的评价指标体系。这套评价指标体系包含了能够评估防洪能力提升和水质管理改善效果的指标。

为评估断点打通效果，项目里拟定了三组方案。

方案一：断点全部打通后水面率、河网密度、河频率、河道槽蓄量较打通前分别提高 2.7%、7.4%、4.7%、14.5%；水系环度、节点连接率、水系连通度分别提高 3.8%、1.6%、1.5%；流速、预降耗时和换水时间 3 项指标较方案一分别提高 10.0%、6.8%、14.0%。河网槽蓄量、流速、预降耗时、换水时间均提升效果明显，这些指标的提高明显有利于防洪能力提升与水质改善。

方案二：内部优先打通方案相较打通前，水面率、河网密度、河频率、河道槽蓄量 4 项指标分别提升 0.2%，0%，0%，1.2%；水系环度、节点连接率、水系连通度 3 项指标分别降低 0.5%，0.2%，0.2%；流速、预降耗时和换水时间 3 项指标分别提升 0%，0.2%，2.5%。

方案三：外部优先打通方案相较打通前，水面率、河网密度、河频率、河道槽蓄量 4 项指标分别提升 0.3%，0%，0%，2.4%；水系环度、节点连接率、水系连通度 3 项指标分别提升 0.5%，0.3%，0.3%；流速、预降耗时和换水时间 3 项指标分别提升 1.4%，2.1%，6.6%。

根据三个方案的结论分析，通过外部优先打通方案与内部优先打通方案提升效果的比较，建议将外部断点工程优先实施。同时参照数字孪生流域建设要求，尽可能实现物理流域全要素和水利治理管理活动全过程的数字化映射。随着河道工程、水闸工程等工程性措施逐渐依照各项规划落地实施，水利行业各单位应加强数据信息共享，便于将最新的河网断面和水闸工情数据更新到模型中去，保持并逐步提高模型精度。同时，通过模型应用分析，发挥模型对各项措施落地后河道水情变化的预测功能。最终通过持续迭代应用，实现模型精度提升和模型功能作用效果同步释放，进而真正实现以数字孪生流域水务时序为数字底座、数学模型为技术支撑的，具有“四预”（预报、预警、预演、预案）功能的智慧水利体系。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郭亚萍. 泗河流域水系连通性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [3] 沈洁. 上海浦东新区城市化进程对水系结构, 连通性及其调蓄能力的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2015.