

高淳西部圩区水系连通变化对水环境的影响分析

高玉琴¹,王丽君¹,李媛媛²,唐 静¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 水利部淮河水利委员会)

摘要:设计 5 种水系连通方案并定量评价了南京高淳西部圩区连通性,基于水文与水动力水质模型模拟了各方案下的水环境响应特征。结果表明:河道沟通(方案 1)使漕塘西山河等河道水质显著改善,其氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低 0.65、0.14、1.21 mg/L,说明河道沟通可加速污染物衰减;沟通撑龙港河与官溪河(方案 2)虽使撑龙港河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低 0.84、0.15、0.90 mg/L,但引发固城湖、横溪河等河道水质轻微下降,说明当超出水体自净能力范围时,河道沟通将污染原本水质较好的水体;河道挖深(方案 3)与河道拓宽(方案 4)对水环境影响微弱;增加支流(方案 5)可减少漆桥河水量,导致氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别上升 0.11、0.02、0.04 mg/L,从而对下游的固城湖大湖区水环境造成负面影响。

关键词:水系连通;水环境;SWAT 模型;MIKE11 模型;高淳西部圩区

Analysis of impacts of water system connectivity changes in the western polder area of Gaochun District on water environment//Gao Yuqin¹, Wang Lijun¹, Li Yuanyuan², Tang Jing¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources)

Abstract: Five water system connectivity schemes were designed to quantitatively evaluate the connectivity of the western polder area of Gaochun District in Nanjing. Based on the hydrological, hydrodynamic, and water quality models, the water environmental response characteristics under each scheme were simulated. The results show that connecting river channels (scheme 1) significantly improved the water quality of rivers such as the Caotang Xishan River, with annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus and total nitrogen in the Caotang Xishan River decreasing by 0.65, 0.14, and 1.21 mg/L, respectively, indicating that river channel connection can accelerate pollutant attenuation. Connecting the Chenglonggang River and Guanxi River (scheme 2) reduced annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen in the Chenglonggang River by 0.84, 0.15, and 0.90 mg/L, respectively. However, it caused a slight decline in the water quality of Gucheng Lake and rivers such as the Hengxi River, indicating that when the self-purification capacity of the water body is exceeded, the channel connection will pollute originally good-quality water bodies. Deepening river channels (scheme 3) and widening river channels (scheme 4) have a weak impact on the water environment. Increasing tributaries (scheme 5) reduced the water volume of the Qiqiao River, leading to increases in annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus and total nitrogen by 0.11, 0.02, and 0.04 mg/L, respectively, thereby negatively affecting the water environment of the lake area of Gucheng Lake downstream.

Key words: water system connectivity; water environment; SWAT model; MIKE11 model; the western polder area of Gaochun District

河湖水系是水资源、水环境的重要载体和生态系统的重要组成部分,也是社会发展的重要支撑^[1]。人类活动导致河网水系连通格局显著改变,引发河湖间水文过程、水力联系、水资源分布和生态环境的相应变化^[2-3]。部分河道的阻断或填埋切断了河流间的水力联系^[4],而污水、废物等随意排放会造成河湖淤塞萎缩、连通不畅。如何恢复和提升河湖水系连通性,有效提高水环境承载能力和水生

态自我修复能力,成为近年来的研究热点。针对水系连通性,国外学者从水文过程、地貌景观及生物多样性等方面展开了研究,但河网水系变化研究仍处于起步阶段^[5-8]。国内学者从理论上探讨了水系连通的定义、特征、分类、影响因素等,采用图论法、景观生态学法、水文水动力模拟法、指标分析法等评价水系连通性,但水系连通评价仍有待深化^[9-13]。在水环境模拟方面多采用水动力水质模

型,而关于水环境对水系连通的响应,部分研究则局限于单一水系连通方案下的水环境特征分析^[14-15],虽有部分研究分析了多方案的水质改善效果,但未系统量化方案的连通程度^[16-18]。

本文以南京高淳西部圩区为研究对象,设计多种连通方案并评价其连通性,通过构建水文与水动力水质模型定量描述各方案下的水环境响应特征,以期为改善水系连通和水环境状况提供参考。

1 研究区概况与数据来源

高淳区地处南京市的西南端,西部圩区位于高淳区中西部,面积 380 km²(图 1),属于水阳江-青弋江流域下游的平原河网区,水系发达,人口聚集,人与水环境矛盾突出。受人类活动影响,西部圩区水系连通不足,且水产养殖产生的面源污染较严重,水环境状况不佳,2020 年 12 个主要水体水质监测断面中,Ⅲ类以下水质断面有 5 个^[19]。

本文构建水环境模型需要 DEM、土地利用、土

壤、水文气象、水工建筑物规模及调度规则信息、水质等数据,具体如表 1 所示。

2 研究方法

如图 2 所示,本文设计了不同水系连通方案,采用水系连通性评价模型评估其连通程度,并通过水文与水动力水质模型模拟不同连通方案下水环境响应特征。

2.1 连通情景设置

研究区河道连通性总体较好,但仍存在局部连通不畅及淤积问题。具体而言,漕塘河、漕塘西山河与漕塘东山河不连通,撑龙港河与官溪河不连通,狮树河末端与水阳江不连通;同时,狮树河、横溪河等 5 条河道平均淤深超过 0.8 m,而时家河、茅城河、砖墙河则在 0.4~0.6 m 之间。据此设定两种连通情景:情景 1 针对现存问题,实施河道沟通与清淤;情景 2 以水系形态特征为研究变量,增加河宽与支流数量。具体方案见表 2。

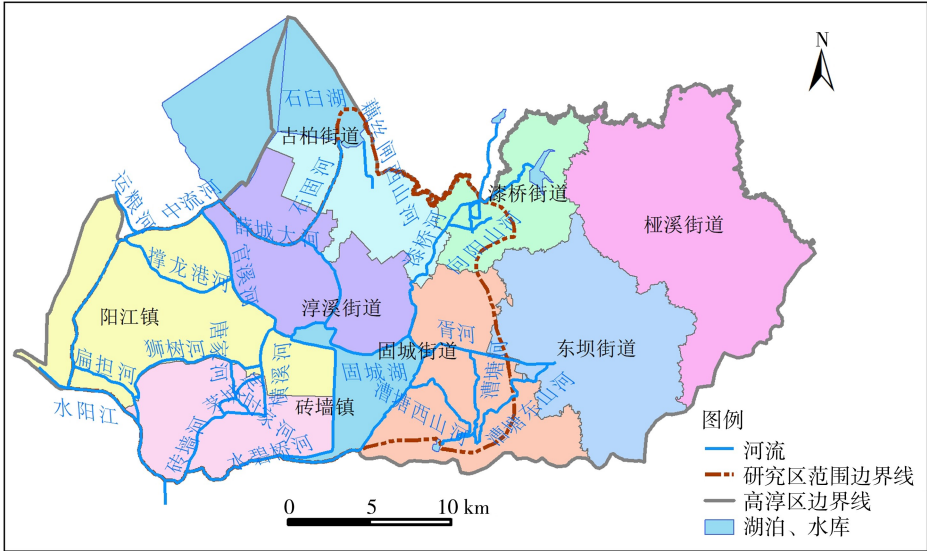


图 1 研究区范围

表 1 模型数据信息

模型	数据类型	来源	用途
SWAT 水文模型	DEM	91 卫图助手	模型构建
	土地利用	资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/)	
	土壤类型	寒区科学大数据中心 (http://www.bdc.ac.cn/)	
	气象	2010—2019 年马鞍山和芜湖的气象数据	
	降雨	2010—2019 年当涂、高淳等 19 个站点的逐日降雨数据	模型率定与验证
	水文	2010—2019 年当涂和大磬坊的实测逐日径流数据	
MIKE11 HD 模块 (水动力模块)	水工建筑物规模及调度规则信息	杨家湾闸、水碧桥闸、茅东闸、薛城大河闸及蛇山泵站	河网文件设置
	水文	新河庄站和信村站实测流量、蛇山站实测水位数据 2017—2019 年高淳站和杨家湾闸上水位数据	边界条件设置 模型率定与验证
MIKE11 AD 模块 (对流扩散模块)	水质	点源污染和面源污染数据;2017—2019 年水碧桥站、水阳江大桥站、蛇山站、河定大桥站实测水质数据	水质内部、外部边界条件设置
		2017—2019 年漕塘河、官溪河、固城湖大小湖区、漆桥河、石固河、水碧桥河、胥河、中流河氨氮、总磷、总氮实测值	模型率定与验证

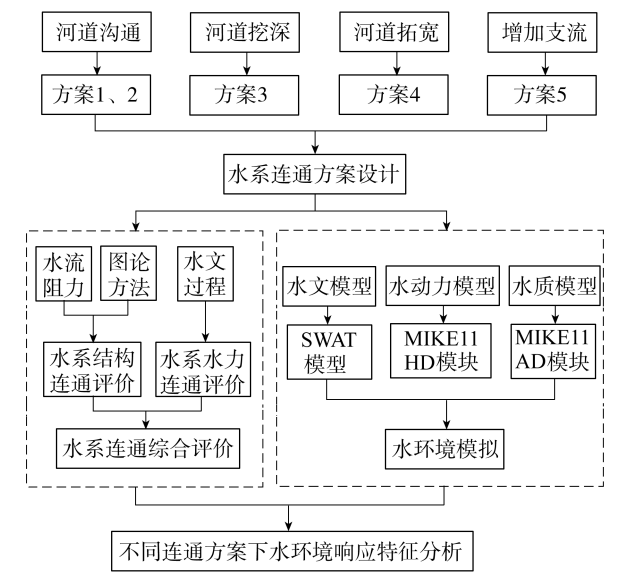


图2 技术路线

表2 水系连通方案设计

情景	方案	具体实施方案
情景1	方案1	沟通漕塘河、漕塘西山河、漕塘东山河;沟通狮树河与水阳江
	方案2	在方案1的基础上沟通撑龙港河与官溪河
	方案3	在方案2的基础上挖深淤积较深的河道,狮树河、横溪河、唐家河、扁担河与漕塘河在原有断面基础上河底高程降低0.8m,时家河、茅城河、砖墙河降低0.5m
情景2	方案4	在方案3的基础上拓宽横溪河、茅城河、时家河、唐家河、砖墙河的河道,在原有断面基础上河口拓宽1m
	方案5	在方案4的基础上增加漆桥河支流的河长,将未纳入模拟范围的港南南河、港南西河、港南东河、港南北河、朝阳圩东西大河等较小河道作为漆桥河支流纳入模拟范围,并连通这些河道

2.2 水系连通性评价模型

参考文献[20-22],本文从结构连通、水力连通和综合连通三方面定量评价水系连通性,同时修正水系连通性计算方法,计算水流阻力时水深和站点间水位差采用水文水动力模型的模拟结果,实现水系连通性的动态评价。

2.2.1 基于水流阻力与图论方法的水系结构连通评价

以流域内河源、节点和出口为顶点,以河链为边,建立以 V 为顶点集、 E 为边集的河网图模型 $G(V, E)$ 。用邻接矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 表示河网图模型, r_{ij} 表示顶点 v_i 与 v_j 之间的水流通畅程度。设置 R 为加权邻接矩阵,此时 r_{ij} 为顶点 v_i 和 v_j 的边权值。当顶点 v_i 和 v_j 之间无边直接相连或 $i = j$ 时, $r_{ij} = 0$;当有多条边直接相连时, r_{ij} 为多条直接相连边的权值之和。为考虑不同河道输水能力的差别,以水流阻力 H 的倒数作为边权值 ω ,计算公式为:

$$\omega = 1/H = \frac{1}{ln} \left[\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

式中: l 为河长; n 为曼宁糙率; b 为河道底宽; m 为边坡系数; h 为水深。

由矩阵乘法得到 R^k :

$$R^k = (r_{ij}^{(k)})_{n \times n} \quad (2)$$

其中

$$r_{ij}^{(k)} = \sum_{p=1}^n r_{ip}^{(k-1)} r_{pj}$$

式中: $r_{ij}^{(k)}$ 表示由顶点 v_i 出发经 $k-1$ 个中间顶点到达顶点 v_j 的水流通畅度; p 为顶点编号。

为避免水系结构连通性计算结果偏大,在河网概化过程中需对河道进行修正,将长度小于 150 m 和边权值大于 0.3 的河道与相邻河道合并^[23],然后建立水流通畅度矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times n}$:

$$f_{ij} = \begin{cases} \max r_{ij}^{(k)} & k = 1, 2, \dots, n-1; i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{ij} 为顶点 v_i 与 v_j 之间边权值的最大值。

河网中任一顶点的水流通畅度 D_i 和 水系结构连通度 D_s 计算公式为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j \neq i) \quad (4)$$

$$D_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

2.2.2 基于水文过程的水系水力连通评价

因西部圩区属平原河网区,其水位变化与河网纵向连通性显著相关,且各站点间水位联系密切^[24-25],故以站点间水位差来评估水力连通程度。水系水力连通性 D_h 计算公式为:

$$D_h = 1/(|\Delta Z| + 1) \quad (6)$$

式中: ΔZ 为相邻站点的水位差。

2.2.3 水系连通综合评价

采用最小-最大归一化方法对上述两种连通性计算结果进行处理后,将两者加权求和得到综合水系连通性 D :

$$D = w_1 D'_s + w_2 D'_h \quad (7)$$

式中: D'_s 、 D'_h 分别为水系结构连通性和水力连通性的归一化结果; w_1 、 w_2 为对应权重,其和为 1,由河道功能属性、区域防洪排涝的重要程度等决定。

2.3 水环境模拟方法

水文模型模拟降雨径流过程,并以边界条件的形式向水动力模型传递流量过程或水位过程;水动力模型模拟河道水流运动,并向水质模型传递水流流态等变化情况;水质模型模拟污染物对流扩散过程,实现水质指标的模拟^[26]。因此,本文基于 SWAT 水文模型和 MIKE11 HD 模块、AD 模块构建水文与水动力水质模型,反映研究区水环境变化情况。

3 模型构建与验证

3.1 模型构建

3.1.1 水文模型构建

因研究区缺乏出口流量数据且属于非自然流域边界,故选取研究区所在的青弋江-水阳江流域下游为模拟范围构建 SWAT 水文模型(图 3)。输入建模所需的地形、土地利用、土壤、水文气象等数据,以当涂站为流域总出口,设定集水面积阈值为 350 km²,共划分 27 个子流域和 278 个水文响应单元,选择月和日两个时间尺度进行水文过程模拟。



图 3 SWAT 模型模拟范围及站点分布

3.1.2 水动力模型构建

采用 MIKE11 HD 模块对研究区水动力条件进行模拟。

a. 河网及断面概化。根据水系现状合理概化研究区河网,将固城湖分别以小湖区和大湖区进行河道概化(图 4)。将概化的水系矢量文件导入河网文件,并添加杨家湾闸、水碧桥闸、茅东闸、薛城大河闸与蛇山泵站。此外,根据相关规划及工程施工图概化相应河道断面。

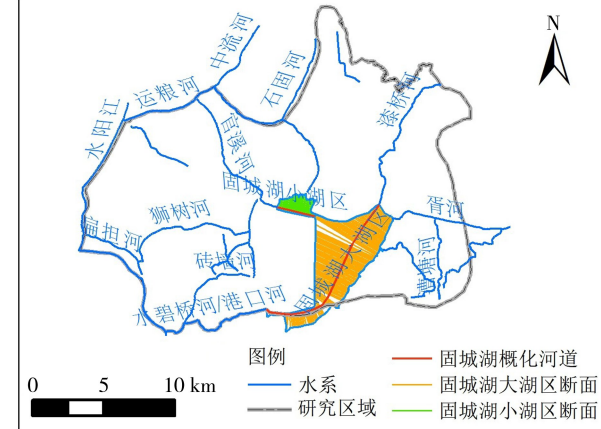


图 4 水系和湖泊概化结果

b. 边界条件设置。研究区边界主要包括水阳江上下游开边界,中流河、石固河入石臼湖开边界,漆桥河、漕塘西山河、漕塘河、漕塘东山河、狮树河上游开边界,胥河下游开边界,撑龙港河下游闭边界;其余均为点源汇流和分布源汇流边界。水阳江上游来水由新河庄站和信村站实测流量确定,石固河下游水位由蛇山站实测水位确定,水阳江、中流河、胥河下游出口设置为自由出流;其他河道上来水设置为 0,河道流量由降雨径流确定;各河道点源汇流和分布源汇流数据由其所在子流域降雨径流确定,通过 SWAT 模型模拟得到。

c. 参数设置。初始流量设置为 0;初始水位既不低于河底高程也不高于河堤高程;河道糙率结合研究区实际情况,通常在 0.025~0.04 之间,一般设置为 0.025。

3.1.3 水质模型构建

采用 MIKE11 AD 模块对研究区水质变化过程进行模拟。

a. 污染排放量计算。参考《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》《南京市高淳区农村生活污水治理专项规划(2021—2025)公示》对研究区氨氮、总磷、总氮 3 种主要污染物排放量进行计算。参考相关研究^[27-30],采用产排污系数法核算面源污染排放量,计算范围包括种植业、禽兽养殖业、水产养殖业、农村生活污水和城镇生活污水,计算结果见表 3。

表 3 研究区面源污染排放量 单位:t

年份	氨氮	总磷	总氮
2017	572.87	115.09	1 118.80
2018	601.68	112.94	1 143.42
2019	644.41	113.40	1 141.90

b. 边界条件设置。设置水质外部边界条件需给出所有组分的质量浓度,其中狮树河、水阳江、中流河、漆桥河、漕塘河、漕塘西山河和漕塘东山河的入口各组分质量浓度设为 0,水阳江入、出口分别采用 2017—2019 年水碧桥站和水阳江大桥站实测水质数据,石固河和胥河的出口分别采用 2017—2019 年蛇山站和河定大桥站实测水质数据。内部边界条件则输入表 3 数据。

c. 参数设置。河道初始质量浓度为实测水质质量浓度的平均值;扩散系数初步拟定为 5~20 m²/s 之间,然后通过模型率定确定;衰减系数结合水质实测数据进行率定。

3.2 模型率定与验证

3.2.1 SWAT 模型

将当涂与大蓉坊的实测流量作为青弋江-水阳

江流域的出口流量,并根据模拟范围占该流域的面积比,计算获得模拟范围的出口流量。

以 2010 年为模型预热期,2011—2014 年为率定期,2015—2019 年为验证期。采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对模型参数进行敏感性分析,最终确定了一个最优模型参数取值。采用纳什效率系数 (NSE) 和决定系数 (R^2) 评估模型的模拟精度,径流模拟结果见图 5。表 4 显示率定期和验证期 R^2 和 NSE 均在 0.6 以上,表明该模型可用于研究区水文模拟。

表 4 SWAT 模型径流模拟评价结果

模拟期	月流量		日流量	
	R^2	NSE	R^2	NSE
率定期	0.7574	0.7550	0.6491	0.6483
验证期	0.7364	0.7030	0.6847	0.6519

3.2.2 MIKE11 HD 模块

模拟期为 2017 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 1 日,时间步长为 1 h,对研究区水动力条件进行模拟。以 2017—2019 年高淳站水位、杨家湾闸上水位进行率定与验证,其评价结果见表 5,水位模拟结果见图 6,率定期和验证期 R^2 和 NSE 均在 0.6 以上,

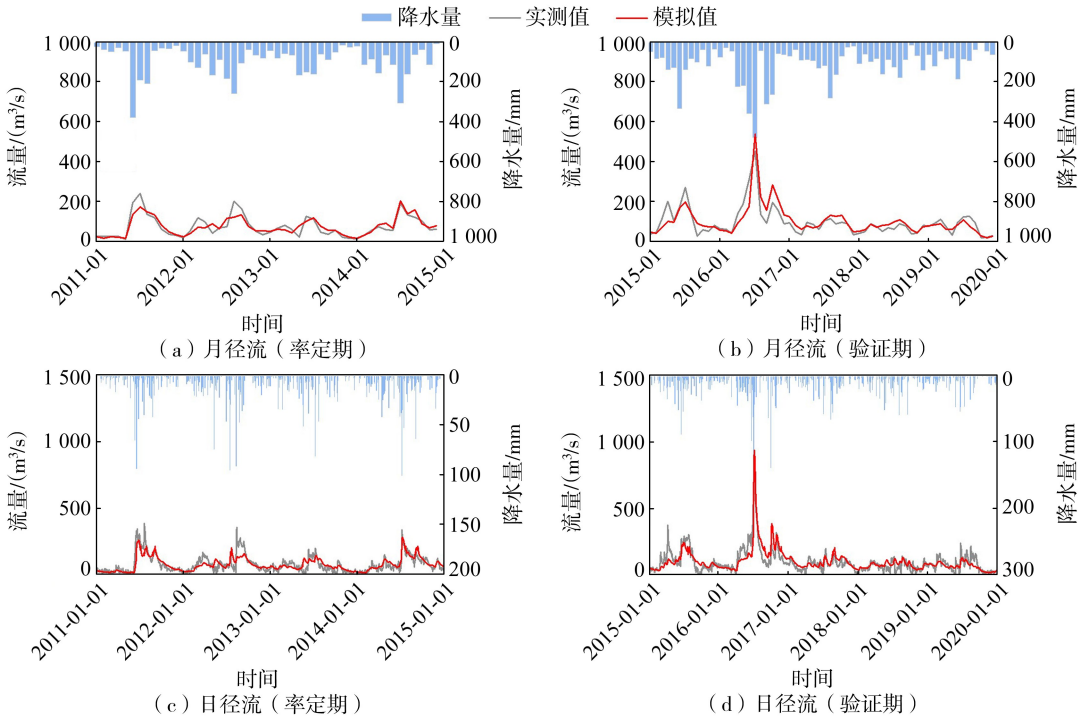


图 5 不同尺度下率定期与验证期径流模拟结果

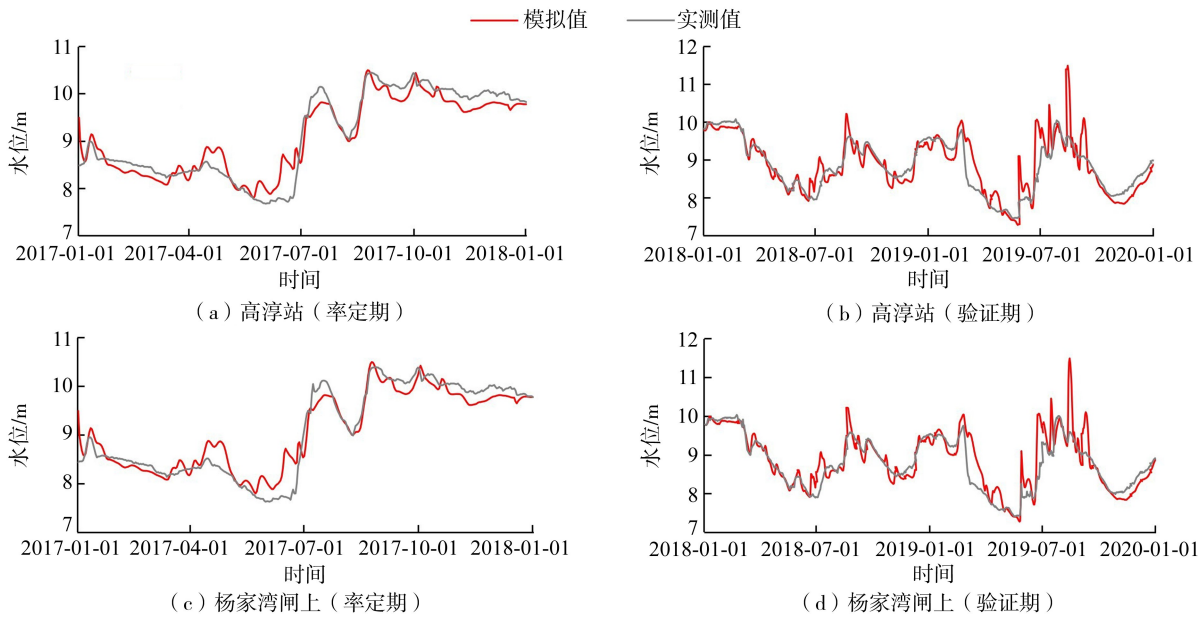


图 6 一维水动力模型模拟与实测水位过程线

适用于研究区水动力条件模拟。

表 5 一维水动力模型模拟评价结果

模拟期	高淳站水位		杨家湾闸上水位	
	R^2	NSE	R^2	NSE
率定期	0.928 7	0.915 2	0.932 7	0.919 1
验证期	0.762 2	0.720 8	0.764 1	0.711 9

3.2.3 MIKE11 AD 模块

选取部分实测水质断面对河道扩散系数和衰减系数进行率定,确定河道扩散系数为 14 m²/s,湖泊扩散系数为 8 m²/s,氨氮衰减系数为 0.01~0.38 d⁻¹,总磷衰减系数为 0.01~0.60 d⁻¹,总氮衰减系数为 0.01~0.30 d⁻¹。研究区一维水质模型模拟评价结果见表 6,超过 40%的模拟值与实测值之间的相对误差小于 30%,超过 60%的模拟值与实测值之间的相对误差小于 50%。代表断面污染物模拟值与实测值基本吻合,模型可用于研究区水质模拟,其中漆桥河模拟效果如图 7 所示。

表 6 一维水质模型模拟评价结果

河道	相对误差小于 30%的占比/%		相对误差小于 50%的占比/%	
	率定值	验证值	率定值	验证值
漕塘河	33.33	49.28	61.11	62.32
官溪河	47.22	69.44	69.44	87.50
固城湖大湖区	30.56	36.11	52.78	61.11
固城湖小湖区	52.78	41.67	80.56	59.72
漆桥河	47.22	68.06	77.78	91.67
石固河	25.00	37.50	52.78	55.56
水碧桥河	44.44	26.39	63.89	44.44
胥河	30.56	26.39	41.67	55.56
中流河	44.44	36.11	69.44	58.33

4 结果与分析

4.1 不同连通方案的水质影响范围分析

以 2017—2019 年为模拟期,基于 23 条河道的 23 个水质代表点,评估不同水系连通方案对氨氮、总磷和总氮 3 种主要污染物的影响。为提升效率,通过分析相邻方案间污染物质量浓度变化率界定水质影响范围。若上一方案至下一方案的变化率大部分在-1%~1%之间,则判定该河道不受下一方案影

响。各方案水质影响范围如下:①方案 1 影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、官溪河、固城湖大湖区、固城湖小湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、石固河、时家河、狮树河、水碧桥河、水阳江、唐家河、薛城大河、胥河、砖墙河;②方案 2 影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、撑龙港河、官溪河、固城湖大湖区、固城湖小湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、石固河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河、薛城大河、胥河、运粮河、中流河、砖墙河;③方案 3 影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、撑龙港河、固城湖大湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河、薛城大河、胥河、砖墙河;④方案 4 对各河道无影响;⑤方案 5 影响固城湖大湖区、漆桥河。可见方案 1~3 影响多条河道,方案 5 影响范围仅限漆桥河和固城湖大湖区,而方案 4 影响水质效果不显著,因此后续分析予以剔除。

4.2 不同连通方案的水系连通性评价

研究区河道规模差异较大,一级河道行洪排涝功能的重要性高,参考相关研究成果^[31-32],取水系结构连通性权重为 0.7、水力连通性权重为 0.3,各方案的水系连通性计算结果如表 7 所示,水系连通性变化率如表 8 所示。在采取各种措施后,综合水系连通性由 0.4674 提升到 0.4743,提升 1.48%,增幅有限。方案 1 因狮树河与水阳江连通引发内河水位下降,水系连通性降低;方案 2 因打通断头萎缩的撑

表 7 不同连通方案的水系连通性

指标	未连通	方案 1	方案 2	方案 3	方案 5
水系结构连通性	0.441 4	0.436 6	0.439 8	0.435 7	0.457 3
水系水力连通性	0.528 1	0.472 1	0.480 6	0.450 9	0.513 8
综合水系连通性	0.467 4	0.447 2	0.452 0	0.440 3	0.474 3

表 8 不同连通方案水系连通性变化率

指标	变化率/%			
	未连通与方案 1	方案 1 与方案 2	方案 2 与方案 3	方案 3 与方案 5
水系结构连通性	-1.09	0.73	-0.93	4.96
水系水力连通性	-10.60	1.80	-6.18	13.95
综合水系连通性	-4.32	1.07	-2.59	7.72

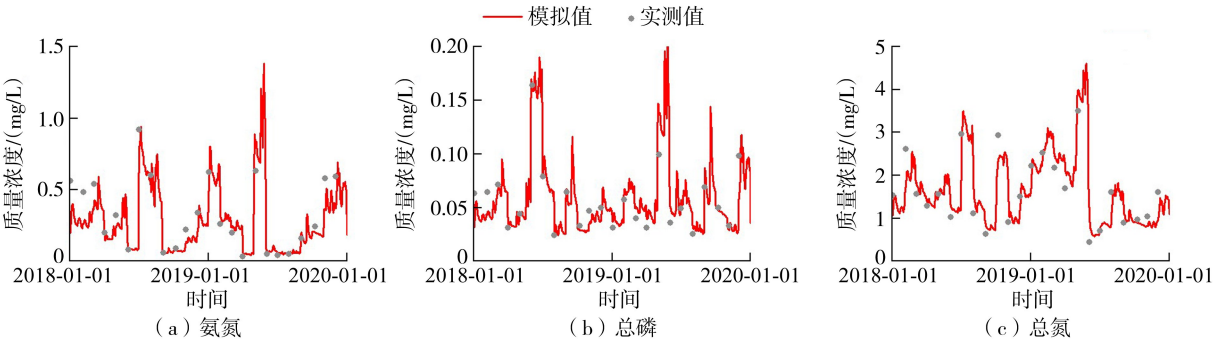


图 7 漆桥河验证期污染物模拟值与实测值对比

龙港河,使其连通性更好且减小与官溪河的水位差,水系连通性小幅提升;方案 3 挖深河道导致采取连通措施的河道水位下降,水系连通性降低;方案 5 通过增加支流提升槽蓄容量,水系连通性得到提升。表 8 结果表明,各方案对水系水力连通性的影响程度大于水系结构连通性,这与方案实施后水位变化有关。

4.3 不同连通方案的水质变化特征

4.3.1 时间变化特征

对 2017—2019 年 23 条河道在各连通方案下主要污染物的变化情况进行模拟,结果如图 8 所示。整体上,多数河道氨氮和总磷质量浓度呈年际下降趋势,总氮质量浓度多呈先降后升态势。不同连通方案的水质改善效果对比表明:

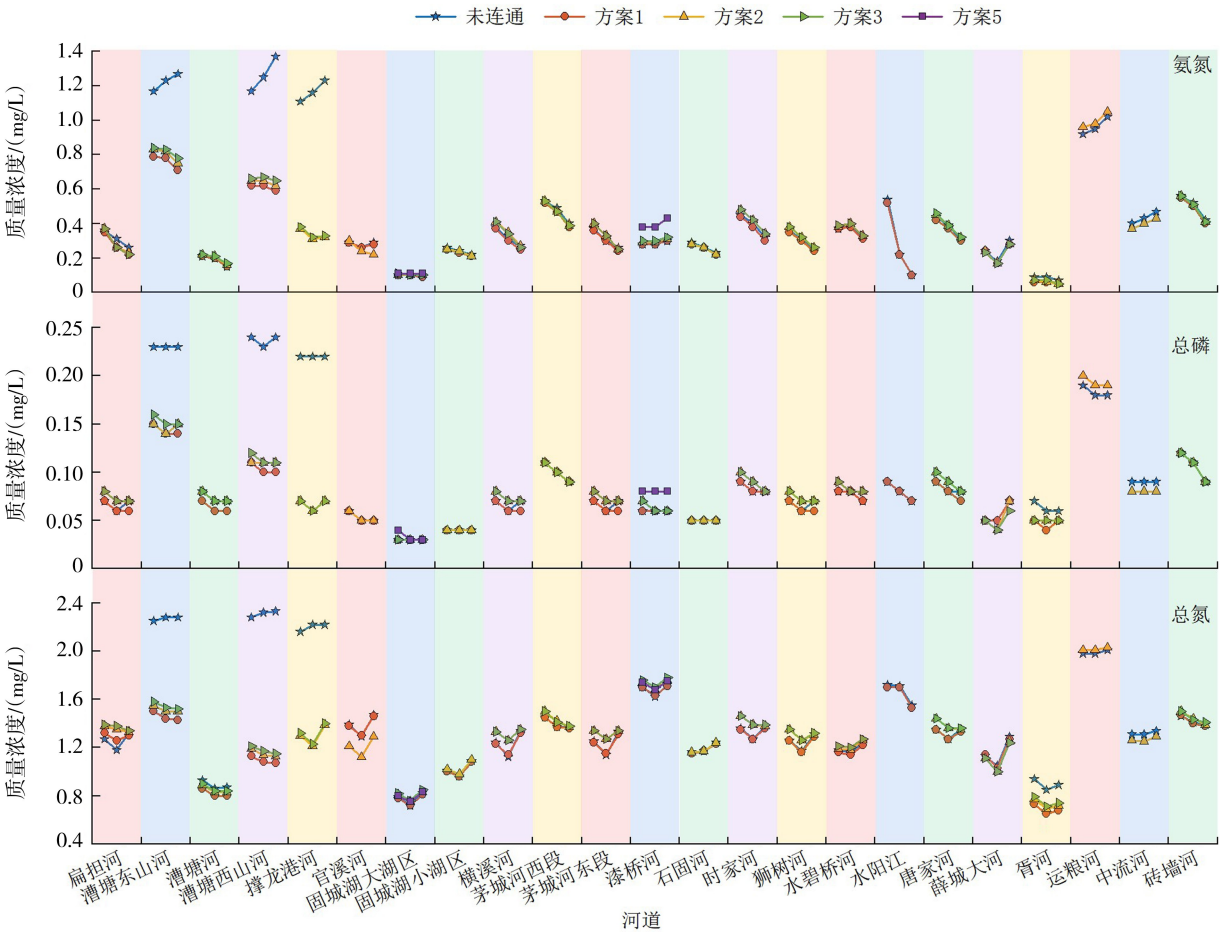
a. 方案 1 沟通漕塘河、漕塘西山河、漕塘东山河后,漕塘西山河和漕塘东山河水质显著改善,改善幅度呈逐年上升趋势,其中 2017 年、2018 年、2019 年漕塘西山河的氨氮质量浓度分别下降 0.55、0.63、0.78 mg/L,总磷分别下降 0.13、0.13、0.14 mg/L,总氮分别下降 1.15、1.24、1.26 mg/L;胥河、漕塘河水质亦有所改善,表明节点连通可促进水体流动,加速污染物衰减。沟通扁担河与水阳江后,

一定程度上改善了狮树河、扁担河的水质,而水阳江水质无明显变化,表明在干流自净能力范围内,干支流沟通会改善支流水环境,且对干流水环境影响较小。

b. 方案 2 改善了撑龙港河、官溪河和中流河的水环境,以撑龙港河为最,2017 年、2018 年、2019 年氨氮质量浓度分别下降 0.74、0.85、0.91 mg/L,总磷分别下降 0.15、0.16、0.15 mg/L,总氮分别下降 0.86、1.01、0.83 mg/L。但扁担河、固城湖、横溪河、茅城河、漆桥河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河和运粮河污染物质量浓度有轻微升高,可能是因为连通后超出局部水体自净能力的范围。

c. 方案 3 对河道水环境影响不显著。方案 5 增加漆桥河支流后,漆桥河和固城湖大湖区污染物质量浓度上升。与未采取连通措施相比,2019 年漆桥河氨氮、总磷、总氮质量浓度分别升高 0.13、0.02、0.03 mg/L,固城湖大湖区分别升高 0.01、0、0.01 mg/L。此现象或源于污染物扩散速率低于水体流动速率。

基于上述显著影响,进一步开展河道水质年内变化分析。如图 9 所示,方案 1 显著改善了漕塘东



注:每段折线的 3 个数据点从左到右分别表示 2017 年、2018 年、2019 年的质量浓度。

图 8 不同水系连通方案下各河道主要污染物质量浓度年际变化

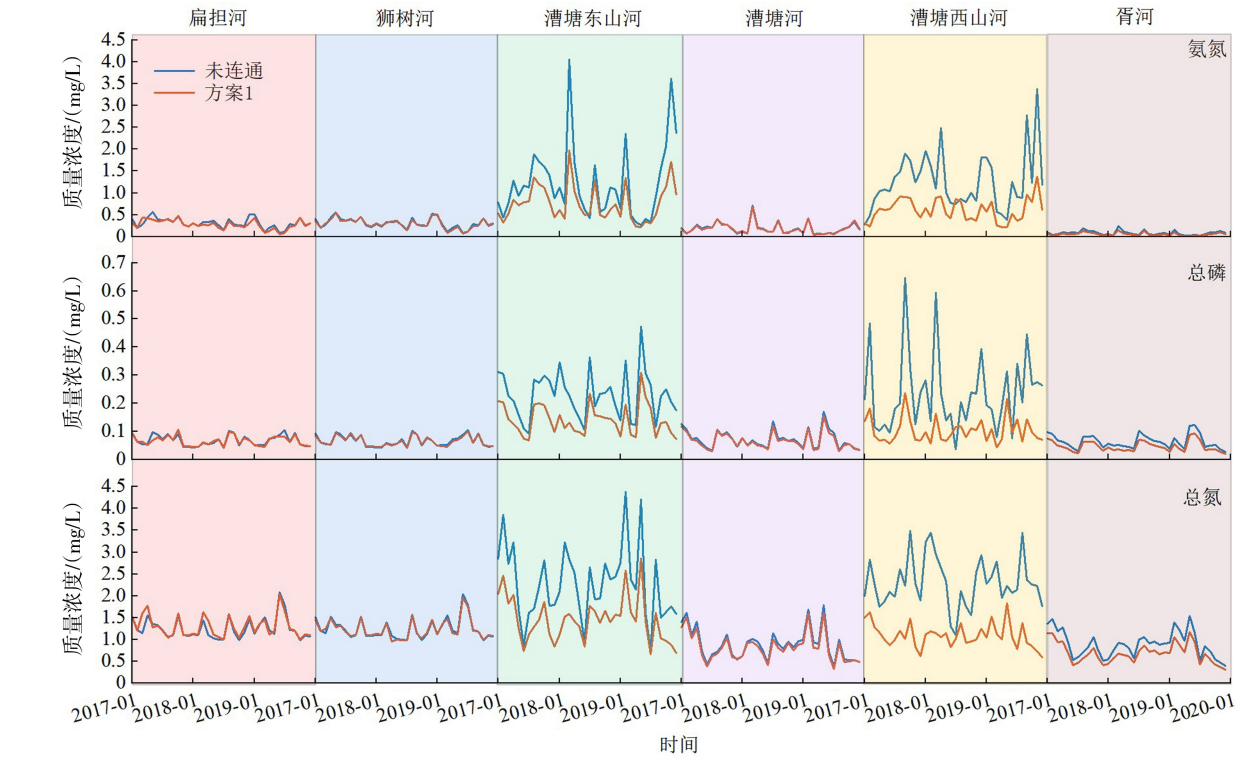


图9 方案1水质改善情况

山河和漕塘西山河水质,胥河污染物质量浓度也有所下降,但对扁担河、狮树河和漕塘河水质改善有限。以未连通状态下排行前五的漕塘东山河、漕塘西山河氨氮质量浓度峰值为例(表9),随着氨氮质量浓度峰值的降低,方案1改善效果也降低。结合图9变化趋势,表明方案1的削峰作用在污染物质量浓度较高的峰值处更明显。

表9 方案1对氨氮的削峰作用 单位:mg/L

河道	时间	未连通 质量浓度	方案1 质量浓度	质量浓度 削减量
漕塘东山河	2018-03	4.05	1.97	2.08
	2019-11	3.61	1.72	1.89
	2019-02	2.36	1.35	1.01
	2017-08	1.89	1.36	0.53
	2018-08	1.64	1.29	0.35
漕塘西山河	2019-11	3.39	1.37	2.02
	2019-09	2.79	0.96	1.83
	2018-04	2.48	0.92	1.56
	2018-01	1.96	0.66	1.30
	2017-09	1.91	0.90	1.01

如图10所示,撑龙港河水环境明显改善,污染物质量浓度大幅降低,氨氮、总磷、总氮月最大降幅分别达4.51、0.39、2.43 mg/L,这与撑龙港河沟通后水流状态变好有关。因官溪河在方案2实施范围内,其水质改善效果优于中流河。中流河月污染物质量浓度均降低,但幅度不大,氨氮、总磷、总氮最大降幅分别为0.08、0.01、0.11 mg/L;官溪河月污染物质量浓度有时会高于未连通状态,就降低的情况而言,其氨氮、总磷、总氮最大降幅分别为0.35、0.04、

0.52 mg/L。相同月份数据对比,官溪河总氮降幅高于中流河总氮降幅的月份占85.29%,高出0.02~0.41 mg/L。

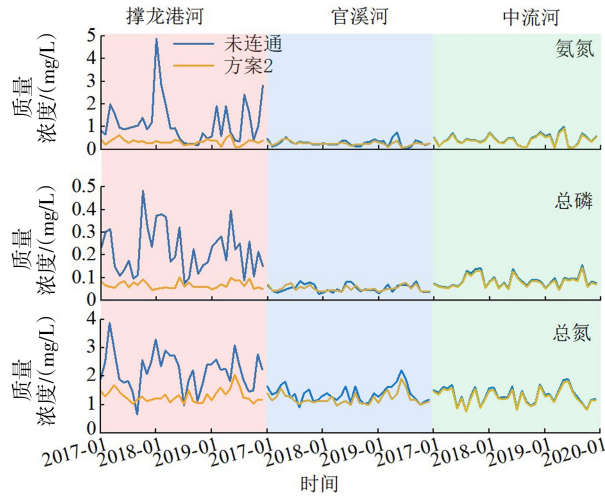


图10 方案2水质改善情况

由图11可见,漆桥河污染物质量浓度轻微上升,进而其下游固城湖大湖区出现水质波动。从年内变化来看,以2017—2019年各年6—9月的月均质量浓度平均值作为丰水期质量浓度,1—3、10—12月的月均质量浓度平均值作为枯水期质量浓度,计算漆桥河在未连通和方案5下的主要污染物质量浓度及其变化率,结果如表10所示。漆桥河丰水期污染物质量浓度变化率小于枯水期,表明丰水期恶化程度较低,进一步说明径流量大小对水质有较大影响。

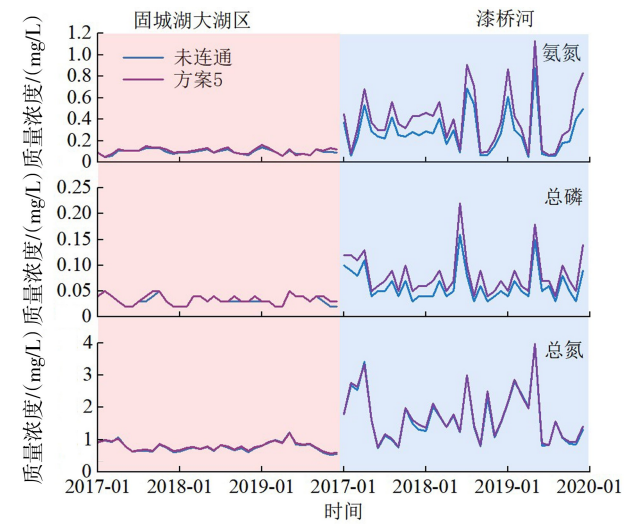


图 11 方案 5 水质改善情况

4.3.2 空间变化特征

对 2017—2019 年各方案下主要污染物质量浓度求多年均值,结果如表 11 所示。

未采取连通措施前,研究区氨氮质量浓度变化范围为 0.08(胥河)~1.26 mg/L(漕塘西山河),总磷质量浓度为 0.03(固城湖大湖区)~0.24 mg/L(漕塘西山河),总氮质量浓度为 0.78(固城湖大湖

区)~2.31 mg/L(漕塘西山河),漕塘东山河、漕塘西山河、撑龙港河和运粮河的主要污染物质量浓度与其他河道相比较。主要污染物最大质量浓度均出现在漕塘西山河,最低质量浓度主要在固城湖大湖区,固城湖湖区的污染物质量浓度总体上小于河道。

采取各种连通措施后,除漕塘东山河、漕塘西山河、撑龙港河、漆桥河外,大部分河道的主要污染物质量浓度变幅不大。方案 1 显著改善了漕塘东山河和漕塘西山河水质,漕塘东山河氨氮、总磷、总氮质量浓度分别降低 0.46、0.09、0.81 mg/L,漕塘西山河分别降低 0.65、0.14、1.21 mg/L。方案 2 明显改善了撑龙港河水质,其氨氮、总磷和总氮质量浓度分别降低 0.84、0.15、0.90 mg/L。方案 5 使漆桥河氨氮、总磷和总氮质量浓度小幅升高,与未采取连通措施相比分别升高 0.11、0.02、0.04 mg/L。

5 结 论

a. 各连通方案实施后,研究区综合水系连通性由 0.4674 提升至 0.4743,总体增幅有限。方案 1 因狮树河与水阳江连通引发内河水位下降,综合水系连通性降低 4.32%;方案 2 打通撑龙港河使其连

表 10 漆桥河主要污染物质量浓度及其变化率

水文期	氨氮质量浓度/(mg/L)		氨氮质量浓度变化率/%	总磷质量浓度/(mg/L)		总磷质量浓度变化率/%	总氮质量浓度/(mg/L)		总氮质量浓度变化率/%
	未连通	方案 5		未连通	方案 5		未连通	方案 5	
丰水期	0.241	0.319	32.38	0.063	0.082	29.71	1.190	1.215	2.17
枯水期	0.285	0.420	47.54	0.056	0.077	38.91	1.786	1.854	3.81

表 11 各河道主要污染物质量浓度

单位:mg/L

河道	氨氮质量浓度				总磷质量浓度				总氮质量浓度			
	未连通	方案 1	方案 2	方案 5	未连通	方案 1	方案 2	方案 5	未连通	方案 1	方案 2	方案 5
扁担河	0.31	0.28	0.29	0.29	0.07	0.07	0.07	0.07	1.26	1.30	1.35	1.37
漕塘东山河	1.22	0.76	0.80	0.82	0.23	0.14	0.15	0.15	2.27	1.46	1.52	1.54
漕塘河	0.19	0.18	0.20	0.20	0.07	0.07	0.07	0.07	0.89	0.82	0.85	0.86
漕塘西山河	1.26	0.61	0.64	0.66	0.24	0.10	0.11	0.11	2.31	1.10	1.15	1.18
撑龙港河	1.17	1.17	0.33	0.35	0.22	0.22	0.07	0.07	2.20	2.20	1.30	1.32
官溪河	0.28	0.28	0.26	0.26	0.05	0.05	0.05	0.05	1.38	1.38	1.21	1.22
固城湖大湖区	0.10	0.10	0.10	0.11	0.03	0.03	0.03	0.03	0.78	0.77	0.80	0.79
固城湖小湖区	0.24	0.23	0.23	0.24	0.04	0.04	0.04	0.04	1.02	1.01	1.04	1.04
横溪河	0.32	0.31	0.34	0.34	0.07	0.06	0.07	0.07	1.23	1.23	1.31	1.31
茅城西段	0.47	0.46	0.46	0.47	0.10	0.10	0.10	0.10	1.40	1.39	1.43	1.43
茅城东段	0.31	0.30	0.33	0.33	0.07	0.06	0.07	0.07	1.24	1.24	1.32	1.32
漆桥河	0.29	0.29	0.30	0.40	0.06	0.06	0.06	0.08	1.68	1.68	1.73	1.72
石固河	0.26	0.25	0.25	0.26	0.05	0.05	0.05	0.05	1.19	1.18	1.19	1.19
时家河	0.39	0.38	0.42	0.41	0.08	0.08	0.09	0.09	1.34	1.33	1.41	1.41
狮树河	0.31	0.30	0.32	0.32	0.07	0.07	0.07	0.07	1.25	1.24	1.31	1.31
水碧桥河	0.36	0.35	0.37	0.38	0.08	0.08	0.08	0.08	1.19	1.17	1.21	1.22
水阳江	0.29	0.28	0.28	0.28	0.08	0.08	0.08	0.08	1.66	1.64	1.65	1.65
唐家河	0.38	0.36	0.39	0.39	0.08	0.08	0.09	0.09	1.32	1.32	1.39	1.39
薛城大河	0.24	0.23	0.23	0.23	0.06	0.05	0.05	0.05	1.16	1.14	1.12	1.12
胥河	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.89	0.69	0.73	0.75
运粮河	0.96	0.96	1.00	1.00	0.18	0.18	0.19	0.19	1.99	1.99	2.02	2.02
中流河	0.43	0.43	0.40	0.40	0.09	0.09	0.08	0.08	1.32	1.32	1.27	1.27
砖墙河	0.50	0.48	0.49	0.50	0.11	0.10	0.11	0.11	1.42	1.41	1.44	1.45

通性提高并减小与官溪河的水位差,连通性提升 1.07%;方案 3 清淤措施使相应河道水位下降,连通性降低 2.59%;方案 5 通过增加支流提升槽蓄容量,连通性提升 7.72%。

b. 连通情景 1 下,方案 1 显著改善漕塘西山河、漕塘东山河水质,其中漕塘西山河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低 0.65、0.14、1.21 mg/L,表明河道沟通可加速污染物衰减,且在污染物质量浓度较高的峰值处,方案 1 的削峰作用更明显。方案 2 打通撑龙港河,使其污染物年均质量浓度分别降低 0.84、0.15、0.90 mg/L,但引发部分河道质量浓度升高,表明当超出水体自净能力范围时,河道沟通会污染原本水质较好的水体;同时,因官溪河在方案 2 实施范围内,其水质改善效果优于中流河。方案 3 挖深河道对水环境影响不显著。

c. 连通情景 2 下,方案 4 拓宽河道对水环境影响不显著。方案 5 增加支流导致漆桥河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别上升 0.11、0.02、0.04 mg/L,进而对下游固城湖大湖区造成负面影响。此外,漆桥河丰水期污染物质量浓度变化率小于枯水期,表明丰水期恶化程度较低,进一步说明径流量大小对水质有较大影响。

参考文献:

[1] 丁洋,赵进勇,张晶,等. 河湖水系生态连通工程技术体系构建[J]. 中国农村水利水电, 2022 (4): 120-126. (Ding Yang,Zhao Jinyong,Zhang Jing,et al. Construction of engineering technology system for ecological connectivity of river and lake systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (4): 120-126. (in Chinese))

[2] 刘丹,王烜,李春晖,等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (7): 1702-1715. (Liu Dan,Wang Xuan,Li Chunhui,et al. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes;a review [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(7):1702-1715. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 李原园,徐震,黄火键,等. 农村水系生态环境主要问题与对策浅析[J]. 中国水利, 2021 (3): 13-16. (Li Yuanyuan,Xu Zhen,Huang Huojian,et al. Main eco-environmental problems and countermeasures of rural water system [J]. China Water Resources,2021(3):13-

16. (in Chinese))

[5] Ward J V. An expansive perspective of riverine landscapes:pattern and process across scales [J]. GAIA: Ecological Perspectives for Science and Society,1997,6 (1):52-60.

[6] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. Hydrological Processes, 2003,17(13):2685-2689.

[7] Poole G C,Stanford J A,Running S W,et al. Multiscale geomorphic drivers of groundwater flow paths:subsurface hydrologic dynamics and hyporheic habitat diversity [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006,25(2):288-303.

[8] Harvey J,Gooseff M. River corridor science:hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins [J]. Water Resources Research, 2015, 51 (9): 6893-6922.

[9] 陈森林,毛玉鑫,李丹,等. 基于逻辑规范的水系连通定义及分类 [J]. 水科学进展, 2021, 32 (6): 890-902. (Chen Senlin,Mao Yuxin,Li Dan,et al. Research on the definition and classification of interconnected water systems based on logic norms [J]. Advances in Water Science,2021,32(6):890-902. (in Chinese))

[10] 张欧阳,熊文,丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析 [J]. 人民长江, 2010, 41 (1): 1-5. (Zhang Ouyang,Xiong Wen,Ding Hongliang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin [J]. Yangtze River,2010,41(1):1-5. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 柳恒,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区典型水系连通工程优化分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (1): 91-96. (Liu Heng,Li Zhiwei,Hu Xuyue,et al. Connectivity analysis and optimization of typical river-lake connection projects in Dongting Lake area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):91-96. (in Chinese))

[13] 陆永军,赵雅慧,左利钦,等. 弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (5): 129-140. (Lu Yongjun,Zhao Yahui,Zuo Liqin,et al. Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025,45(5):129-140. (in Chinese))

[14] 胡亚伟,常东明,高子乐,等. 黄河下游引黄灌区水系连

- 通条件下水环境变化效应模拟[J]. 人民黄河, 2023, 45 (8): 1-5. (Hu Yawei, Chang Dongming, Gao Zile, et al. Simulation of variation effect of water environment under water system connectivity in Yellow River downstream irrigation area[J]. Yellow River, 2023, 45 (8): 1-5. (in Chinese))
- [15] 陈雪峰. 博斯腾湖北岸水系连通对大湖区水环境影响分析[J]. 水利技术监督, 2024 (1): 171-174. (Chen Xuefeng. Analysis of impact of north bank water system connection of Bosten Lake on water environment of the great lakes region[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024(1): 171-174. (in Chinese))
- [16] 徐芸蔚, 李一平, 赵海洲, 等. 水系连通改善入海闸控河流水质效果评估: 以练江流域为例[J]. 四川环境, 2023, 42 (1): 47-54. (Xu Yunwei, Li Yiping, Zhao Haizhou, et al. Evaluation of water system connection on improving water quality of river controlled by sea gate: a case study of river network in Lianjiang River[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(1): 47-54. (in Chinese))
- [17] 封琼, 毕忠飞, 汪惠, 等. 宜兴新城区水系连通方案研究[J]. 水力发电, 2022, 48 (5): 15-21. (Feng Qiong, Bi Zhongfei, Wang Hui, et al. Study on the water system connection scheme of Yixing New Urban Area[J]. Water Power, 2022, 48(5): 15-21. (in Chinese))
- [18] 刘晋, 胡永辉, 刘夏. 多目标协同下水系连通调度模拟[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 15-23. (Liu Jin, Hu Yonghui, Liu Xia. Simulation on water system connected dispatching under multi-object cooperation[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39 (6): 15-23. (in Chinese))
- [19] 冷湘梓, 蒋晓威, 叶懿安, 等. 基于格网 GIS 的流域水生态承载力评价研究: 以高淳西部圩区为例[J]. 江苏科技信息, 2023, 40 (11): 72-75. (Leng Xiangzi, Jiang Xiaowei, Ye Yian, et al. Evaluation of watershed water ecological carrying capacity based on grid GIS: taking the western polder area of Gaochun district as an example[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2023, 40(11): 72-75. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] Gao Yuqin, Liu Yunping, Lu Xiaohua, et al. Change of stream network connectivity and its impact on flood control [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13 (4): 253-264.
- [22] 诸发文, 陆志华, 蔡梅, 等. 太湖流域平原河网区水系连通性评价[J]. 水利水运工程学报, 2017 (4): 52-58. (Zhu Fawen, Lu Zhihua, Cai Mei, et al. Evaluation of river network connectivity in plain area of Taihu Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017 (4): 52-58. (in Chinese))
- [23] 刘云苹. 水系连通性对区域洪涝灾害影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.
- [24] Deng Xiaojun, Xu Youpeng, Han Longfei. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu Plain[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (8): 2575-2588.
- [25] Deng Xiaojun, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. Spatial-temporal changes in the longitudinal functional connectivity of river systems in the Taihu Plain, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 846-859.
- [26] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 11-19. (Zhang Ting, Xu Binxin, Kang Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 11-19. (in Chinese))
- [27] 于鹏飞. 半干旱内陆河生态安全评估研究-以锡林河为例[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [28] 刘李凌君. 黑龙江省水环境容量测算方法及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [29] 李萍. 岷江大桥断面-岷江东青交界断面水环境容量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [30] 怀红燕, 冯爱萍, 朱南华诺娃. 基于 DPeRS 模型的上海地区面源污染评估[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 南昌: 中国环境科学学会环境工程分会, 2022: 410-417.
- [31] 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))
- [32] 周震. 巢湖流域水系连通性及其对水质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

(收稿日期: 2025-03-07 编辑: 熊水斌)