

文章编号:0559-9350(2017)12-1429-09

平原河网区水系连通改善水环境效果评估

崔广柏¹, 陈星^{1,3}, 向龙^{1,3}, 张其成¹, 许钦^{2,3}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究所 水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;
3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 河流水系是城市重要的资源和环境载体, 经济社会快速发展的同时, 城市发展与水环境保护之间的矛盾日益突出, 尤其是平原河网地区, 由于地貌条件制约, 城市河道水环境改善难度大。城市水系的可持续发展将直接关系到城市乃至整个社会的健康发展, 贯彻现代水系治理思路, 通过水系连通促进水环境的改善成为城市治水的重要一环。论文选择常熟市城区作为研究区, 以引水实验与水量水质模型作为技术支撑, 找出水系连通改善水环境的关键问题, 基于此整合水系结构连通性与水力连通性概念, 提出水系连通度评价方法。引水实验结果表明, 骨干河道水流交换通畅, 重要河道水质在引水实验中改善率平均在20%~30%, 但主城区河道存在连通受阻。河道连通性的提升与水利工程的合理调度对于以水环境改善为目标的连通体系有着重要影响, 以本文两个连通情景为例, 河道的整治使得结构连通性增强, 河道水质平均改善率提升至30%~50%。从连通性指数的变化来看, 结构性连通的提升提高了调水效率, 极大地促进了水力连通与水质改善。论文建立的水系连通改善水环境的方法体系能够为水系连通决策提供理论依据, 对我国城市水系连通实践提供参考。

关键词: 水系连通; 常熟城区; 水环境改善; 引水实验

中图分类号: X171; X820

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170576

1 研究背景

近年来, 由于水资源统筹调配、河湖健康保障、水旱灾害防御等方面的需要, 江河湖水系连通已经成为国家江河湖治理的重大需求^[1-2]。随着城市化进程的加快, 一方面, 人类生产生活用水、生态环境需水和社会持续稳定发展对水量、水质、洪涝防御提出更高要求; 另一方面, 人类经济社会活动对江河水系的影响不断加剧, 导致江河水系连通性不足或减弱, 进而引发水资源与水环境承载能力不足、洪涝宣泄不畅、水安全风险加大等问题。良好的水系连通条件和丰沛的可调水源是城市水系发挥功能的前提, 水系连通调控是水生态文明建设的基础保障和重点内容^[3-6]。

平原河网地区水流运动复杂, 加上水利工程的控制, 水系连通不畅, 影响了河道自净能力。近年来, 很多城市通过从外部引调水, 实施生态引水改善城市水环境, 增加水力流动性, 提高水体自净能力, 通过对河网水循环水系连通进行科学有效的调控, 从而改善城市水生态环境问题^[7-9]。响应水环境问题的调水工程是改善河流水质的一项有效的辅助措施, 改善河流水质的根本措施是对污染源进行有效的治理, 但是要截除所有排入河流的污染源十分困难。通过综合调水, 科学地调度河网水流, 引入清洁水源, 尽量提高水体的流动性, 在一定程度上能够缓解区域水质恶化的问题^[10-11]。目前, 调水工程作为一种改善水环境的辅助措施在我国多有实践, 但关于引水效率与评价体系等问题

收稿日期: 2017-06-14; 网络出版日期: 2017-12-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171222.1055.001.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFA0601504); 国家自然科学基金(51579148, 51779146); 中央本级项目(SHZH-IWHR-73)

作者简介: 崔广柏(1938-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文与水环境保护研究。E-mail: gbcui@hhu.edu.cn

通讯作者: 陈星(1980-), 女, 新疆伊宁人, 博士, 副教授, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: chenxing@hhu.edu.cn

还有待进一步研究。国内外学者从水文、地貌、景观生态等角度提出了多种水系连通评价体系,本文针对平原河网区水系连通,目标是改善水环境。平原河网区水系人工改造程度高,不符合基于水文地貌的河流分级规律,且随着城市化影响,水系衍生出多样的社会功能属性。基于此,本文将水系连通分为三个层次并在此基础上构建评估体系:一是结构连通性,指连接通道的相互联系畅通;二是水力连通性,是指有水流且水流能够保证一定转移效率;三是河道水环境改善水平。

开展平原河网地区水系连通性改善水环境研究,可为优化平原水网区水系结构、寻求科学合理的水利工程调度运行规则提供理论支持。常熟市北临长江,地理位置独特,具备良好的调水提高水系水力连通性的条件。因此,本文以常熟城区作为一个典型区,根据区域特点着力于探索河网水力连通的方法,提出适用于平原河网地区的水系连通改善水环境的研究体系。

2 研究区域概况

常熟位于太湖流域下游,属长江三角洲冲积平原,地面高程大多在3~7 m之间(吴淞基面),境内水网密布,湖荡较多。常熟市属北亚热带季风气候,年平均温度15.4℃。年平均降水量1030.8 mm,年平均蒸发量1100.0 mm,降水量年内分配不均匀,6—9月的降水量平均占年降水量的54%。

常熟市共有水功能区36个,由于河道治理与截污工程的实施,2008—2013年水功能区达标率不断提高。2008年常熟市水功能区达标率为18.2%、2010年为43.6%、2013年为64.9%。2008年沿江河道以劣V类为主,2013年大部分沿江河道水质改善为IV类、V类,海洋泾水质由2008年的劣V类逐渐改善为2013年的III类;白茆塘以南河道水质也有所改善,2008年以V类、劣V类为主,2013年河道水质以IV类、V类为主。

常熟城区环形河有护城河、环城河和东环河3条,放射形河道有11条:南福山塘、耿泾、海洋泾、常浒河、青墩塘、白茆塘、横泾塘、元和塘、辛安塘、太平港、山前塘。虽然常熟城区紧邻望虞河,但由于望虞河东控工程的实施,原本与望虞河连通的河道白龙港、常清河、南福山塘、萝卜泾、新泾等均受闸门控制,目前正常水位在3.6 m左右,最高引水位达4.0 m。海洋泾是常熟城区最直接的通江引排河道,在保障防洪安全和改善水环境方面的地位日益重要。

3 数据与方法

3.1 引水试验 针对常熟市水流条件,在分析水系结构特点与人工调度特点的基础上,根据江河水系连通及城区河道连通情况,开展水位、流量、水质同步监测,作为常熟市城区河网水量水质模型与水系连通调控方案的研究基础。开展引水实验的目的,一是掌握实际调度规则下城区主要河道水位、流量的沿程变化情况,阐明江河连通调控条件下各区水系连通特征及问题;二是通过实测水位、流量、水质数据对水量水质模型参数进行率定。

常熟城区引水实验在2014年5月14日开展,设置水文水质监测断面8个、水文监测断面12个,水文监测指标为流量和水位,每隔30 min监测;水质监测指标为:TP、TN、NH₃-N和COD_{Mn},每隔60 min取样。引水实验监测断面分布见图1,主要水利工程调度规则见表1,监测断面涉及河道的特性见表2。引水河道为海洋泾,排水河道为耿泾和常浒河。利用高潮位海洋泾闸开启自引,为延长引水时间加大引水量,海洋泾泵站在低潮位时开启;排水依靠常浒河闸和耿泾闸在低潮位时自排。

3.2 基本方程 选择MIKE11的水动力模块(HD)和对流扩散模块(AD)分别模拟河网在引水过程中的水量分配情况与水质变化过程。HD模块采用圣维南方程组,它是由描述质量守恒的连续方程(式(1))和能量守恒的动量方程(式(2))组成,差分格式采用了六点中心隐式格式,数值计算采用追赶法,基本方程组如下所示:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

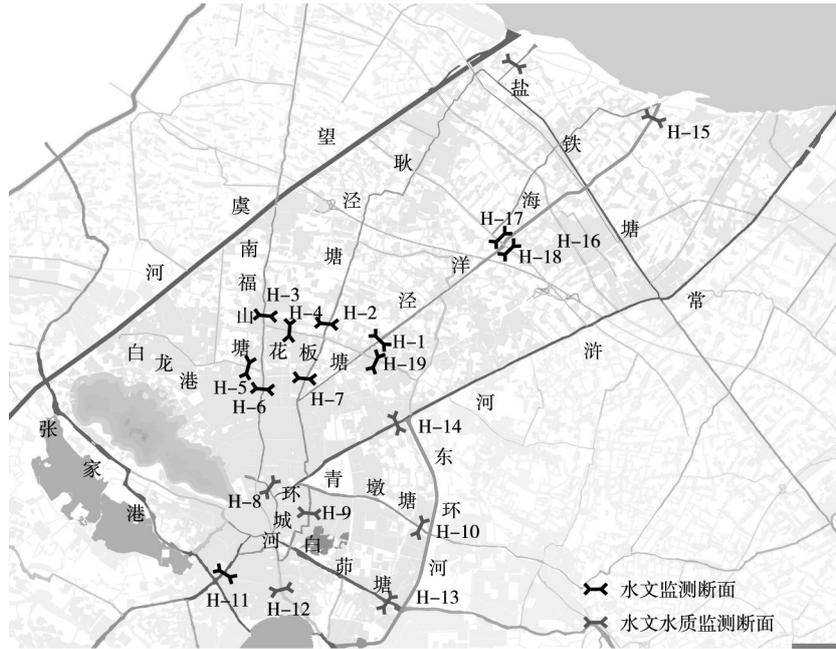


图1 常熟市主城区位置及引水实验监测断面

表1 引水实验引排闸门调度规则

控制工程	引/排	开启时间	关闭时间
海洋泾泵站	引水	9:00	12:40
海洋泾闸	引水	16:00	19:00
常浒河闸	排水	13:00	16:00
耿泾闸	排水	15:25	23:00
		16:30	23:30

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{\chi^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中： x 为距离坐标，m； t 为时间坐标，s； A 为河道过水断面面积， m^2 ； Q 为相应河道断面上的流量， m^3/s ； q 为单位长度上的旁侧入流流量，入流为正，出流为负， m^2/s ； α 为动量修正系数，为无量纲数； g 为重力加速度， m/s^2 ； h 为水位，m； χ 为谢才系数。

AD模块的控制方程为一维对流扩散方程，根据HD模块计算的水动力条件进行计算，基本方程为：

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) = -AKC + S \quad (3)$$

式中： C 为污染物浓度，mg/L； D 为纵向扩散系数，m/s； K 为降解系数，1/d； S 为源汇浓度，mg/L。

3.3 模型构建

(1)河网概化与断面设置。为体现模型模拟结果的准确性与计算效率，河道概化以引排水过程中常熟市主城区骨干河道为主(图1)，概化河道连通情况与实际现状、模拟方案条件保持一致。为尽可能达到精确模拟计算的要求，在断面文件中输入断面数据时，断面间距不大于100 m；为达到计算精度的预期目标，在特定地点(如河流交汇处)加密断面数据，以作控制。

(2)边界设定与调度。常熟市北临长江入海口，区域各沿江口门处水位受长江潮汐作用影响显著，因此以河口潮位作为水位边界条件，区域全局水位值采用正常水位3.2 m。潮位选择8月15日逐时监测资料作为典型潮位过程。具体调度利用潮水的涨落进行引排控制，在潮位上升至与内河水位相当时，考虑开启部分节制闸向市内补水，在潮位开始回落至内河常水位时，关闭引水河道闸门，

并调节排水河道控制闸门，保持适当的排水量。

(3)模拟时段。模拟时段为8月15日13:00—8月16日13:00，共24 h，模拟时段包含两个引排周期，第一周期为8月15日13:00—8月16日1:00，其中引水期为前6 h，排水期为后6 h；第二周期为8月16日1:00—13:00，引排水时段与第一周期一致。

3.4 模型率定 根据常熟城区引水实验监测成果，对水动力模型中的糙率系数进行率定。率定得到的研究区河道糙率值为0.03~0.05，对于河床较平整河道顺直，断面规则，岸壁为石质断面，糙率值取0.03；对于水流不够通畅，岸壁为土质并且长有杂草的断面，糙率系数值取0.04；对于河道弯曲，岸壁为土质，且杂草稠密的断面，糙率系数值取0.05。各断面流量模拟相对误差在15%以内，平均相对误差9.38%，见表2。

表2 常熟市主城区引水实验监测河道特性与水量水质模型模拟相对误差

监测断面	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7	H-8	H-9	H-10
所在河道	海洋泾	耿泾	南福山塘	花板塘	白龙港	南福山塘	耿泾	护城河	环城河	青墩塘
河宽/m	20~44	10~30	15~30	18~24	15	15~30	10~30	8~15	20~30	30~50
河道长度/km	15.2	1.6	8.7	6	5.2	8.7	1.6	2.3	4	11.6
Q模拟相对误差/%	10.5	12.2	7.9	8.8	13	9.8	6.7	7.7	5.8	8
COD模拟相对误差/%								9.3	13.7	15.1
NH ₃ -N模拟相对误差/%								4.9	20.8	16.2
监测断面	H-11	H-12	H-13	H-14	H-15	H-16	H-17	H-18	H-19	H-20
所在河道	元和塘	张家港河	白茆塘	常浒河	海洋泾	大皇塘	罗卜泾	罗卜泾	花板塘	耿泾
河口宽/m	80	40~70	50~110	46~65	20~44	15	20~25	20~25	18~24	10~30
河道长度/km	18.2	36.6	44.4	20.6	15.2	1.7	9.1	9.1	6	1.6
Q模拟相对误差/%	11.1	6.6	5.8	10.2	11.5	13.6	9	11.6	10.6	5.6
COD模拟相对误差/%		10.8	7.8	19.5	7.1					14.3
NH ₃ -N模拟相对误差/%		7.9	13.3	18.3	16.2					14.1

根据常熟河网污染特征，选用COD—NH₃-N耦合模型，率定的主要参数为污染物降解系数，模型计算边界条件取用边界断面各时段水质实测值。结合污染源调查数据，在水质模型中加入工业和生活废水的点污染源，率定得到的COD_{Mn}降解系数为0.08~0.15/d，NH₃-N降解系数为0.08~0.2/d。各断面水质模拟相对误差在25%以内，COD模拟平均相对误差12.2%，氨氮模拟平均相对误差13.97%，见表2。

4 结果与讨论

4.1 引水实验水量、水质变化规律 常熟市城区引水实验监测时间为8:00—24:00，在此期间，海洋泾实测引水总水量达106.4万m³，其中闸引88万m³，泵站引水18.5万m³。

图2所示为引水实验在引水期与排水期的流量与流速分布。引水期间海洋泾沿线交汇河道的闸门均为开启，分流作用明显，进入城区(内环河以内)的流量小，常浒河与耿泾作为排水河道对整个区域的退水拉动较好。引排水总体来看，一些骨干河道过水断面宽，分水能力强，引排水效果好，但一些小河道，水环境改善需求更大，但过水能力制约了其水力连通性，包括内环河区域以及南福山塘与白龙港之间的三角区。

表3所示为引水实验期间各项水质指标实测变化范围，主要引水通道海洋泾监测断面H-15除TN指标，各项水质要素浓度符合Ⅲ类地表水环境质量标准，最值与均值差异度较小，表明海洋泾引水水质较好且稳定，区域引水水源可靠。综合来看，研究区河道主要污染物为总氮、氨氮与COD，大部分断面这三项指标均为劣V类水平。在引水过程中，总磷、总氮、氨氮指标的变异性较大，且达标率低，说明在引水过程中，河道自净能力的提升不足以改善研究区主要河道水质，并且监测断面

距引水水源地愈远，引清水源愈难以改善断面水环境。

为更明确地表达引水过程对各河道的水质影响情况，计算引水前后水质指标改善率，以及引水过程中水质最优值相对引水前水质的改善率，如图3所示。可以看出引水对各断面的水质改善以正效应为主，但是对于城区河道水环境的改善不足以改变其水质类别，一方面由于骨干河道的分流，进入城区水量较少；另一方面部分河道的污染较重，在引水过程中发生污染转移。因此对于城市引水改善水环境实践，首先需要完善对污染源的控制，在截污的基础上增加河道水力连通性，才能够实现改善水生态环境的目标。

4.2 水系连通情景方案设定及模拟 常熟城区引水条件良好，通过水利工程的合理调度可以进一步改善水体连通性，河道的输水量和水体置换速度得到提高，稀释自净能力得到加强。引水实验的结

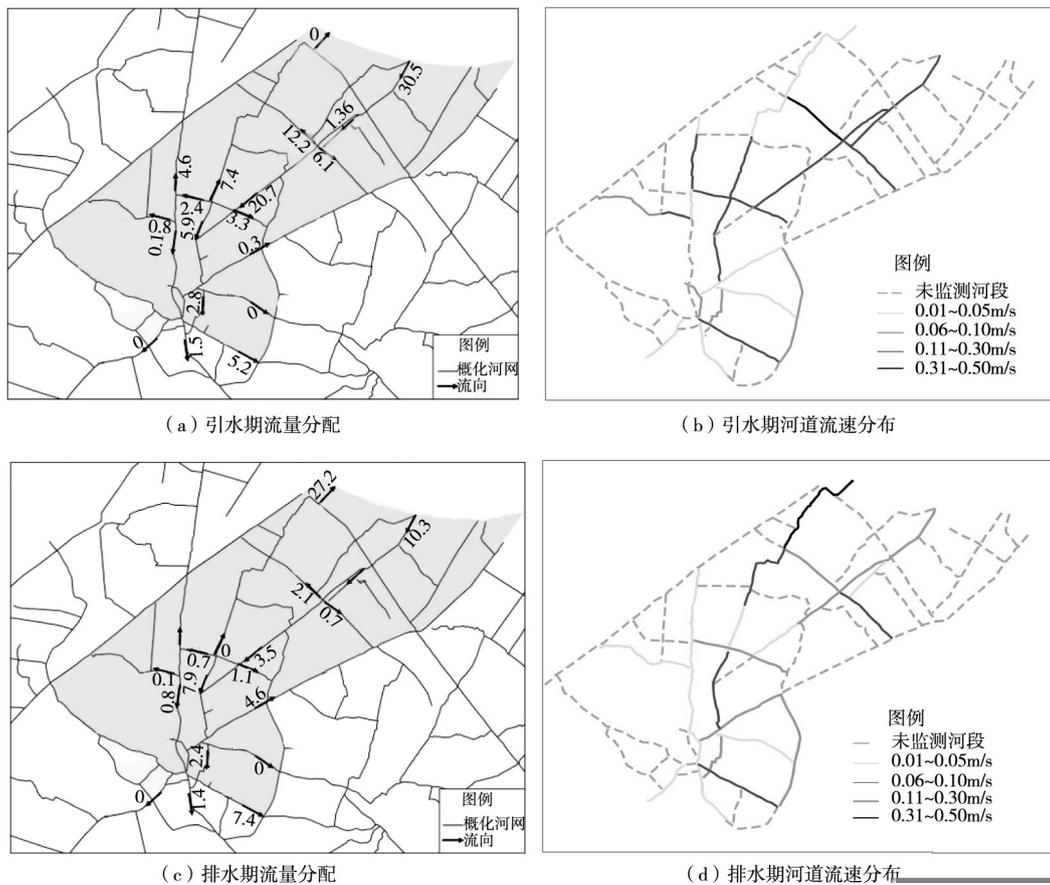


图2 常熟市区引水实验引水期与排水期主要河道流量分配与流速分布情况

表3 各断面引水期间水质要素浓度变化状况

断面	TP/(mg/L)		TN/(mg/L)		NH ₃ -N/(mg/L)		COD _{Mn} /(mg/L)	
	变化范围	水质类别	变化范围	水质类别	变化范围	水质类别	变化范围	水质类别
H-8	0.51 ~ 0.75	劣V	6.74 ~ 10.76	劣V	5.07 ~ 9.61	劣V	6.75 ~ 9.00	IV
H-9	0.35 ~ 0.50	IV—劣V	5.70 ~ 9.99	劣V	4.10 ~ 7.84	劣V	6.43 ~ 7.53	IV
H-10	0.19 ~ 0.28	II—III	4.17 ~ 5.75	劣V	2.15 ~ 4.54	劣V	5.18 ~ 6.40	IV
H-12	0.66 ~ 0.77	劣V	9.14 ~ 11.03	劣V	6.60 ~ 10.06	劣V	7.22 ~ 9.30	IV
H-13	0.24 ~ 0.36	IV	5.91 ~ 10.09	劣V	3.49 ~ 5.31	劣V	5.90 ~ 10.98	IV—V
H-14	0.33 ~ 0.52	IV—劣V	5.78 ~ 8.06	劣V	4.10 ~ 6.92	劣V	5.02 ~ 7.00	IV
H-15	0.05 ~ 0.09	I	2.86 ~ 4.39	劣V	0.09 ~ 1.15	I—IV	3.61 ~ 4.50	II—III
H-20	0.20 ~ 0.97	III—劣V	1.65 ~ 3.49	IV—劣V	0.04 ~ 0.77	I—II	6.43 ~ 26.8	IV—劣V

表4 情景一与情景二引水河道引水流量设计

(单位: m³/s)

引水河道		海洋泾	老海洋泾	白龙港	山前塘	耿泾	总流量
情景一	最大引水流量	74.9	29.2	10.0	3.24	0	
	12h平均引水流量	30.7	11.3	5.00	3.00	0	50.0
情景二	最大引水流量	74.9	29.2	10.0	3.24	39.5	
	12h平均引水流量	30.7	11.3	5.00	3.00	17.8	67.8

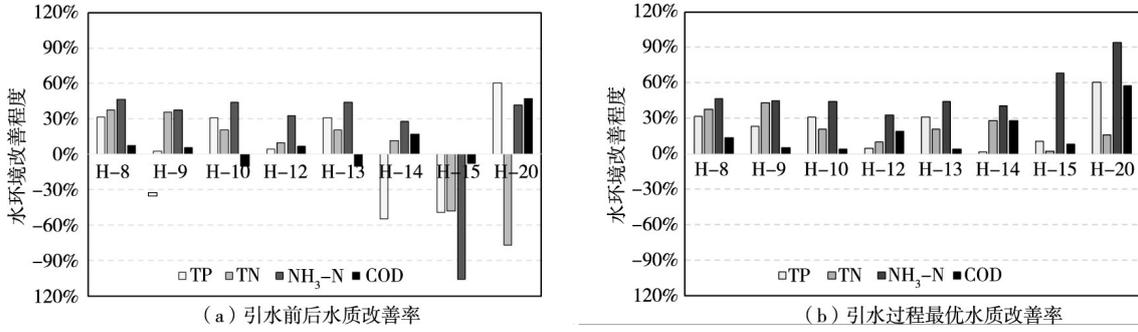


图3 常熟市城区引水实验引水期与排水期主要河道流量分配与流速分布情况

果表明, 该区域水系的结构连通性有待提高, 现状工况制约了引入水量在城区的分配。因此首先从提升研究区水系结构连通性出发, 对研究区内青墩塘、山前塘、南福山塘、耿泾塘、五里浜、方浜、草鞋浜、王六泾、罗卜泾、大滩塘、沈村河等11条河道进行拓宽疏浚, 提升河道过流能力与连通性。在此基础上考虑不同的水源组合、引排调度模式, 提升研究区水系水力连通性, 设置以下两种情景模式: (1)引水河道为海洋泾、老海洋泾、山前塘、白龙港, 排水河道为耿泾、常浒河、白茆塘; (2)引水河道为海洋泾、老海洋泾、山前塘、白龙港、耿泾, 排水河道为常浒河、白茆塘。情景二与情景一相比, 增加了耿泾作为引水河道, 扩大了引水影响范围, 并且加大了引水量(表4), 有利于促进研究区的水力连通性提升。但耿泾是海洋泾以西片区唯一排水河道, 当遭遇汛期或暴雨时, 耿泾应维持排水功能, 不宜引水。因此, 情景一适用于全年期的环境引水需求, 而增强引水的情景二适用于非汛期。

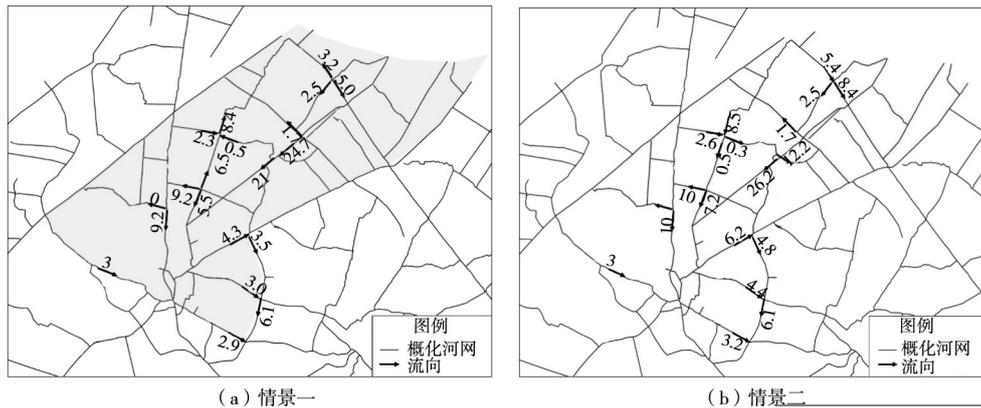


图4 不同情景下常熟市城区引水模拟流量分配情况

情景一模拟结果表明(图4(a)), 由于局部河道的拓浚, 滞水区有所减少, 区域内流量分配得到优化。白龙港引水流量增加, 引水经常青河、新九节、南福山塘、方浜汇入耿泾, 南福山塘以西三角区域的河道流量在1~5 m³/s左右, 耿泾退水通畅, 带动海洋泾以西河道的水动力条件明显改善。同时, 张家港河的分流增大, 入城流量略有增加。

情景二模拟结果表明(图4(b)), 海洋泾沿程分支河道分水流量减少, 进入城区的流量略有增加, 流量为26.2 m³/s, 南福山塘、耿泾流量分别增加至10、7.2 m³/s。耿泾引水流量较大, 引水可至

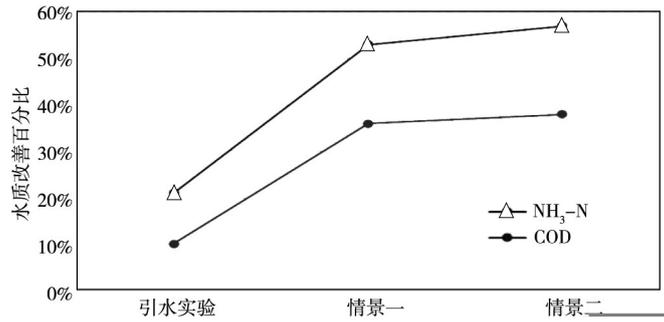


图5 常熟市城区引水实验不同情景下引水前后水质平均改善百分比

表5 水系连通性评价指标体系层次结构

目标层	准则层	指标层	计算方法	权重
A 水系连通性	B1 结构连通性	C1 河道断面尺寸	定量指标: A_i , 河道断面概化为矩形或梯形	0.137
		C2 河道功能定位	定性指标: Fu_i	0.213
		C3 河道空间位置	定性指标: Lo_i	0.225
	B2 水力连通性	C4 河道流速	定量指标: $V_i = \sum_{j=1}^m V_j / m$, 河段平均流速, m 为河段数	0.193
		C5 河道换水周期	定量指标: $T_i = W_i / Q_i$, W_i 为槽蓄量, Q_i 为平均流量	0.128
	B3 水质改善度	C6 水质改善指数	定量指标: $R = \frac{P_1 - P_2}{P_1}$, P_1 与 P_2 为初末时段的内梅罗指数	0.232

大滩塘, 并由大滩塘-陶沙泾汇入常浒河, 形成区域小循环, 河道水动力条件明显改善。其余节点流量分配基本不变。

相对于引水实验, 情景一和情景二模拟条件下的研究区河道结构连通性有很大提升, 使得进入主城区的水量增加, 引水在区域内的分配也更加合理, 由此各断面水质改善程度也有较大提升(图5)。情景二相比情景一在引水调度上有所不同, 造成局部水流条件和水环境改善程度有所差别, 但两者在整体研究区的平均效果相差不大。在实际操作中, 可以根据需要改善的重点区域来选择方案。

4.3 水系连通度评价 综合考量平原河网地区水系特征对连通性的影响敏感度, 筛选主要因子并进行归纳和分类, 从中遴选出能够较为灵敏地反映河网水系连通水平变化的关键性指标(表5)。将连通性评价指标体系分成3个层次, 分别为目标层、准则层和指标层。目标层为水系连通性指数, 准则层包括: 结构连通性、水力连通性、水质改善度3项。

河道断面尺寸为定量指标, 实际操作中将河道断面概化为矩形或梯形, 表达为 $A_i (1 \leq i \leq e)$ (单位: m^2), 其中 e 为组成河段数。河道功能定位与河道空间位置为定性指标, 取值表达为 $Fu_i (1 \leq i \leq e)$ 与 $Lo_i (1 \leq i \leq e)$, 共分为5级: 9(很重要)、7(比较重要)、5(一般重要)、3(不太重要)、1(不重要)。河道功能方面, 认为级别较高, 承担区域引排水的骨干河道对结构性连通的影响高于生态景观等功能为主的河道, 以及一些级别较低的河道。河道空间位置方面, 河道在沟通的水系片越多, 或者流经区域的重要性越高, 例如重要街道、居住区等, 则认为其对结构连通性影响越大。河道流速为定量指标, 以模型模拟结果为计算各河段平均流速, 表达为 $V_i (1 \leq i \leq e)$ (单位: m/s)。换水周期为定量指标, 河道槽蓄量除以河道平均流量, 表达为 $T_i (1 \leq i \leq e)$ (单位: d)。采用内梅罗指数^[12]定量反映综合水质情况, 内梅罗指数在引水前后的变化率作为水质改善指数, 在本文中污染物为 COD 与 NH_3-N 。

在确定指标权重前, 须对各指标进行归一化处理。指标值归一化时, 评价数据存在相对最佳

表6 水系连通性指数计算值

连通方案	引水试验	情景一	情景二
连通性指数 F_i	0.188	0.472	0.476

值, 则以最佳值为 1, 以其与最佳值的比值或比值的倒数为归一化后的值。本文利用熵权法对评价指标因子赋权, 即由评价指标值构成的判断矩阵确定指标权重, 权重计算结果见表 5。通过指标归一化和权重的确定, 建立线性加权综合评价模型(式(4)), 最终得到以改善水质为目标的水系连通性指数(表 6), 依据评价指数的大小评价水系连通性水平高低。

$$F_s = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n (l_i \cdot K_i \cdot W_i) \quad (4)$$

式中: S 为河网覆盖区域面积; l_i 为河段 i 长度; K_i 为水系连通性指标取值向量; W_i 为指标熵权向量。

情景一和情景二的连通性指数明显高于引水实验条件, 主要原因是对水系结构连通性进行了优化, 并且优化的引排水调度方案, 使得研究区水力连通性与水质指标也大幅度提升。情景二相对于情景一增加了耿泾作为引水水源, 加大了引水流量, 对耿泾周边区块, 特别是提升了海虞镇河道起到了很好的水力连通性。但总体来说, 相对情景一连通性指数提升并不显著。因此对常熟市城区水环境改善, 可以海洋泾引水为主, 如需强化海洋泾西片区的水环境改善, 可以增加耿泾为引水河道。

5 结论

常熟市属典型的平原河网地区, 地势平坦, 河网密布, 流速缓慢, 水体自净能力弱, 维持江河水系连通和河网良性水系连通对提升常熟市水环境质量具有重要意义。然而在实践中由于实际河网条件未充分考虑、引排水规划不合理等原因而造成河道水流不畅, 水质更加恶化。本论文以常熟市城区为研究区, 探讨了在水系连通实践中, 以引水实验现场监测结合模型数值模拟, 科学制定区域水系连通方案, 并定量评价连通水平, 为水系连通改善水环境建立了系统性的方案。

本文的研究结果表明结构连通是水力连通的基础, 而水力连通性代表了河道对污染物的稀释、转化、降解能力, 是水环境改善的必要条件。引水实验条件下, 结构连通性较差, 研究区水量分配与水质改善均受到限制, 部分断面水质甚至出现恶化, 暴露出河道截污问题, 引水能够增加水体含氧量、促进污染物降解, 但由此增加的水环境容量有限, 因此截污仍是水环境治理根本措施, 也是引水改善水环境的前提条件。在引水实验的基础上提出了河道连通提升方案与不同的水利工程调度方式, 结合水量水质模型分析了两个情景模式下区域水量分配与河道水环境提升效果, 证明河道连通条件的提高与合理的调配方案使得引水效果进步明显。在分析平原河网区特点的基础上, 综合考量水系连通的自然属性与社会属性, 提出了水系连通度的评价体系, 体现了平原河网的水系特点与城市河道的社会属性, 评价结果能够合理地反映出水系连通改善水环境的效果, 为我国水系连通实践提供一定理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 李宗礼, 李原园, 王中根, 等. 河湖水系连通研究: 概念框架[J]. 自然资源学报, 2011(3): 513-522.
- [2] 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(3): 386-391.
- [3] COTE D, DAN G K, BOURNE C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks[J]. Landscape Ecology, 2009, 24(1): 101-113.
- [4] LANE S N, REANEY S M, HEATHWAITE A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index[J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): 2263-2289.
- [5] GONZALES-INCA, KALLIOLA R, KIRKKALA T, et al. Multiscale landscape pattern affecting on stream water quality in agricultural watershed, SW Finland[J]. Water Resources Management, 2015, 29(5): 1669-1682.
- [6] 赵进勇, 董哲仁, 翟正丽, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 537-543.
- [7] 王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 523-529.
- [8] 左其亭, 崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J]. 水电能源科学, 2012(1): 1-5.

- [9] 徐慧, 徐向阳, 崔广柏. 景观空间结构分析在城市水系规划中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 108-112.
- [10] 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.
- [11] 窦明, 靳梦, 张彦, 等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1089-1096.
- [12] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 38-40.

Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area

CUI Guangbai¹, CHEN Xing^{1, 3}, XIANG Long^{1, 3}, ZHANG Qicheng¹, XU Qin^{2, 3}

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

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: River water system is an important resource and environmental carrier of the city. The contradiction between urban development and water environment protection is becoming more and more prominent in recent years, especially in the plain river network area. Due to geographical constraints, the improvement of urban river water environment is challenging. The sustainable development of urban water system will be directly related to the healthy development of cities and the whole society. Therefore implement modern water system management theory and promote water environment improvement through the interconnected river system has become an important step of urban water management. In this paper, the urban area of Changshu city is selected as the research area. The water transfer experiment and the hydraulic model are applied as technical support to formulate river interconnected schemes for the sake of water environment enhancement. Based on the concept of structural connectivity and functional connectivity, the river network connectivity assessment method is proposed. In the water transfer experiment, flow exchange in major rivers is satisfied and water quality of indexes is increased 20%–30% in average. Yet the river connectivity in the central downtown is limited which leads to less flow access. The improvement of river channel connectivity and the reasonable dispatching of water conservancy project have important influence on the connectivity system. Taking the scenario simulations in the paper as an example, channel regulation projects increase river connectivity and give rise to water quality about 30%–50%. The change of connectivity index also prove that structural connectivity greatly enhances water transfer efficiency, and promotes better flow distribution and water environment. The establishing methodology of interconnected water system to improve water environment can provide theoretical basis for water system connectivity decision, and provide reference for urban water system connectivity in China.

Keywords: interconnected water system; Changshu city; water environment improvement; water transfer experiment

(责任编辑: 韩 昆)