



· “十三五”水专项“雄安新区城市水系统构建与安全保障技术研究”专栏·

# 城市健康水环境维系技术方案规划与评价研究 ——以雄安新区核心区为例

欧阳子路<sup>1</sup> 潘俊豪<sup>1</sup> 范玉燕<sup>2</sup> 汪诚文<sup>1</sup>

(1 清华大学环境学院, 北京 100084; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:**健康水环境的维系是城市建设和管理过程中的重要内容。在查阅国内外城市健康水环境评价、构建与维系相关文献的基础上,以雄安新区核心区为例,构建了一套适用于规划筹建区域的健康水环境评价体系和基于 SWMM 及 WASP 模型的模拟方法,以此评估不同维系技术方案的实施效果并提出建议。

**关键词:**健康水环境; 维系; 规划; 评价

中图分类号: TU991; X52

文献标识码: A

文章编号: 1002-8471(2021)12-0040-07

DOI: 10.13789/j.cnki.wwel964.2021.12.008

引用本文: 欧阳子路, 潘俊豪, 范玉燕, 等. 城市健康水环境维系技术方案规划与评价研究——以雄安新区核心区为例[J]. 给水排水, 2021, 47(12): 40-46. OUYANG Z L, PAN J H, FAN Y Y, et al. Planning and evaluation of urban healthy water environment maintenance technology: a case study of the core area in Xiong'an New Area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(12): 40-46.

## Planning and evaluation of urban healthy water environment maintenance technology: a case study of the core area in Xiong'an New Area

OUYANG Zilu<sup>1</sup>, PAN Junhao<sup>1</sup>, FAN Yuyan<sup>2</sup>, WANG Chengwen<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Maintaining a healthy water environment has become an important part of urban construction and management. Based on domestic and foreign literature on urban healthy water environment assessment, construction and maintenance, taking the core area in Xiong'an New Area core area as an example, a set of healthy water environment assessment system and simulation method based on SWMM and WASP is established to evaluate the implementation effects of different maintenance technology schemes and put forward suggestions.

**Keywords:** Healthy water environment; Maintaining; Planning; Assessment

### 0 引言

城市水环境作为城市景观中重要的组成部分,

具有人工干扰明显、社会服务功能丰富等特点,其健康程度的维系与城市的可持续发展息息相关。城市水环境的破坏会导致严重的生态健康风险,进而影响城市居民健康和社会、经济的良性发展。近年来,

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07110-008-003)。



随着我国社会经济水平的发展<sup>[1]</sup>,城市对健康水环境的需求愈发强烈,健康水环境也愈发成为城市建设和管理过程中的重要内容。城市的水环境不仅应科学构建,还需要持续维系才能保持健康水平。本文以雄安新区核心区为例,构建了一套适用于规划筹建区域的健康水环境评价体系和模拟方法,以此评估不同维系技术方案的实施效果并提出规划方案建议。

## 1 研究区域概况

雄安新区核心区是我国华北缺水区域内规划待建城区,属于暖温带季风型大陆性气候,年平均气温 11.9℃;规划面积约 13 km<sup>2</sup>,远期人口规模不超过 1 万/km<sup>2</sup>;规划构建纵横交错的环状水系,包括 6 条人工河流;地势西北高东南低,地面坡度约 7‰,河水自西北向东南方向流动,下游出水经河口流入白洋淀。根据核心区“水城共融”的生态目标,当地水系的水量、水质情况应满足高要求:以多水源供水,水位水量可分级调控;地表水水质主要指标要求达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准。

## 2 健康水环境

### 2.1 内涵

根据国务院 2015 年发布的《水污染防治行动计划》(简称“水十条”),水环境的改善应以“安全、清洁、健康”为目标,在水污染防治、水生态保护和水资源管理三个方面系统地开展<sup>[2]</sup>。其中,水环境体系的“健康”应包括自然环境和社会经济两方面,即人一水关系协调,使水环境具有良好的自然生态状况和可持续的社会服务能力<sup>[3]</sup>。

基于城市水资源匮乏、水环境质量恶化的现状以及社会、经济等方面的发展需求,城市健康水环境目标可概括为:水量获得保障、水污染有效防治、水生态健康、社会服务可持续,且上述状态能够在技术可靠、管理可行、经济合理的条件下长效维持。

### 2.2 评价指标

水环境健康评价起源于对河流生态系统健康的研究。在过去近 50 年中,世界多个国家都建立了针对本国河流健康的评价体系,例如:澳大利亚河流评价计划(AUSRIVAS)、英国河流保护评价系统(SERCON)等。我国曾采用指标体系综合评价

法对黄浦江、长江等河流的健康进行评价。2018 年 1 月,中国水利水电科学研究所起草了《河湖健康评估技术导则》,从水文水资源、物理结构、水环境质量、水生生物、社会服务功能五个完整性准则层对河流、湖泊、水库三类水体分别制定标准<sup>[4]</sup>。

综合各评价指标体系内容,目前水环境健康评价主要可分为水质、水量、生态以及服务功能评价。其中,水质和水量评价较为直观,可分别依据国内外水环境质量标准与生态需水理论进行评价,并已广泛应用于水环境的现状分析或规划方案优化;而生态和服务功能较难定量分析,常需要通过实地调研、主观打分等方式间接量化<sup>[5]</sup>,因此难以应用于未建设区域的规划。因此,本文从水量和水质两个维度评价水环境健康水平以及维系技术方案效果,构建适用于雄安新区核心区的水环境健康评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 水环境健康评价指标体系内容

Tab. 1 Contents of water environmental health assessment

index system			
目标层	准则层	指标层	依据
水环境健康(A)	水动力健康(A <sub>1</sub> )	水深(A <sub>11</sub> ) 流速(A <sub>12</sub> )	河道生态需水量 生态水深—流速法
	水质健康(A <sub>2</sub> )	BOD <sub>5</sub> (A <sub>21</sub> ) NH <sub>3</sub> -N(A <sub>22</sub> )	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)

评价指标体系中 4 项指标的量化取值范围为  $A_{ij} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,  $\{i, j\} = \{1, 2\}$ 。为描述水环境的总体特征,定义水动力健康指数(A<sub>1</sub>)、水质健康指数(A<sub>2</sub>)和水环境健康指数(A)三项集成指标,计算方法如式(1)~式(3)所示:

$$A_1 = \sum (a_{1j} A_{1j}), j = \{1, 2\} \quad (1)$$

$$A_2 = \sum (a_{2j} A_{2j}), j = \{1, 2\} \quad (2)$$

$$A = \sum (a_i A_i), i = \{1, 2\} \quad (3)$$

式中  $A_{ij}$  ——各单项指标;

$a_{ij}$  ——该指标对应的权重,取等权重,即  $a_{1j}$ 、 $a_{2j}$ 、 $a_i$  均取 1/2。

各指标的评价标准如表 2 所示,指标值接近或高于 4 分代表较健康水平,可作为研究的优化目标。

生态水深与流速指标根据鲤鱼、草鱼等当地主要鱼类<sup>[6]</sup>的适宜生存条件确定,取水深大于 0.6 m<sup>[7]</sup>和流速位于 0.3~1.3 m/s 范围<sup>[8-9]</sup>为最优



表 2 水环境健康评价指标评价标准

Tab. 2 Evaluation standard of water environmental health assessment index system

指标		5	4	3	2	1
水动力	水深/m	>0.6	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0.05, 0.2]	≤0.05
	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	(0.3, 1.3]	(0.2, 0.3]或(1.3, 1.5]	(0.1, 0.2]或(1.5, 1.6]	(0.05, 0.1]或(1.6, 1.7]	≤0.05 或 >1.7
水质	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	≤4	(4, 6]	(6, 10]	(10, 18]	>18
	NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤1.0	(1.0, 1.5]	(1.5, 2.0]	(2.0, 8]	>8

水平(5分);BOD<sub>5</sub>和NH<sub>3</sub>-N两个水质指标参考研究区域“地表水体的主要水质指标不应低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准,并以Ⅲ类标准为水环境改善目标”的规划要求,取达到Ⅲ类标准对应本指标最高分(5分),Ⅳ、Ⅴ类标准分别对应4分和3分。

### 2.3 维系技术

历史上,国内外众多城市曾沿着“先污染,后治理”的道路发展,因此早年关于城市水环境的研究与实践集中于针对劣质水体的“修复(restoration)”,而非对于健康水环境的“维系(maintenance)”。例如:美国从20世纪80年代起开展的城市河流水环境与生态恢复工作,韩国在本世纪初开展的光州川河流净化工程<sup>[12]</sup>,我国在“十一五”“十二五”期间也研发并应用了一系列关于河湖水环境改善的技术成果。

近年来,随着“可持续发展”理念的广泛认可与采纳,城市在规划与建设时愈来愈重视水环境承载力的提高和健康水环境的维系。美国在2013年实施的圣地亚哥河流域管理计划(San Diego River Park Master Plan)<sup>[11]</sup>中提出了修复与维系健康河流系统的八点建议,包括定期补水、疏浚河道、河岸带生态修复、恢复河流弯曲形态、消除河流点源污染以及在开发过程中考虑河流的水文、水质、生态需求等;我国在构建“治水兴水”方案时,提倡遵循“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的原则,常选择使用再生水补给、河流强化复氧、人工湿地系统等广泛应用于河流修复而易于持续运行维护的手段<sup>[12-13]</sup>。

由此可见,尽管“维系”与“修复”针对不同状态的城市水系统,但是二者均以河湖的水文条件健康、水质状态达标、水系结构优化与水生态环境美化为目标,采取的治理思路与技术方法一脉相承。因此,早年国内外对于城市河流修复技术的研究成果与实践经验对于健康水环境维系的研究实践具有宝贵的

参考价值与借鉴意义。

综合国内外城市水环境修复与维系的研究成果,健康水环境的维系技术可以根据应用场景的不同归纳为四类,分别是补给水源保障技术、河道原位修复技术、河道旁路修复技术、河口强化净水技术,各类技术的定义与方法举例如表3所示。

表 3 健康水环境维系技术分类

Tab. 3 Classification of healthy water environment maintenance

technologies		
类别	定义	举例
补给水源保障技术	以洁净或低污染水源补给城市水体,并对其中水质未达标的水源进行净化处理,以维系水环境的水量、水质需求	再生水水质保障 低影响开发系统 建筑灰水原位处理
河道原位修复技术	在原有河床不变的基础上,采用物理、化学、生物及其组合技术对水体就地处理,以改善河道水质条件和生态结构	定期清淤疏浚 加药混凝沉淀 河道强化复氧 生物调控
河道旁路修复技术	在河道边岸建设水处理设施净化部分河水,以改善河道整体水质条件	曝气生物滤池 多介质土壤层渗透
河口强化净水技术	在河流入湖口利用原有沟、塘和湿地进行改造并新建生态净水设施,以改善河流末端入湖水质与生态结构	河口泵闸循环调控 人工湿地系统

## 3 雄安新区核心区水系统构建

### 3.1 模型建立

本研究选取暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)初步构建降雨径流模型和河道水动力模型,在此基础上利用水质分析模拟程序(Water Quality Analysis Simulation Program, WASP)对区域河湖水系的水质状况与变化规律进行模拟预测分析。SWMM是由美国环保署(USEPA)资助开发的动态降雨—径流模拟模型,操作界面简明便捷,降雨径流过程及河网水动力模拟功能成熟<sup>[14]</sup>,但是不具备模拟复杂生化反应过程的功能。WASP是USEPA开发且推荐使用的模拟软件,可以模拟河湖、河口、水库等水体的一维、二维水质过程,包括有机物、氮磷元素、重金属等污染



物的迁移与转化规律。

根据雄安新区核心区地形特点和规划用地类型,在 SWMM 模型中将区域划分为 18 个子汇水区;将水系概化为 30 条河段与 27 个节点,粗糙系数  $n$  取 0.013。水系模型与河道断面的示意分别如图 1 和图 2 所示。

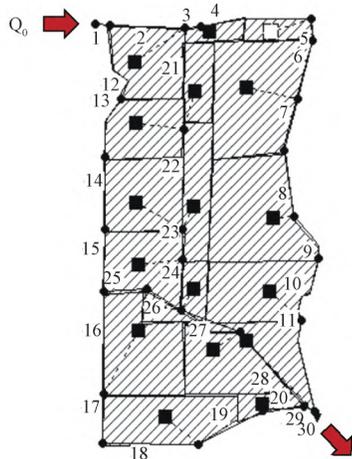


图 1 基于 SWMM 的雄安新区核心区水动力模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of XA core area hydrodynamic model based on SWMM

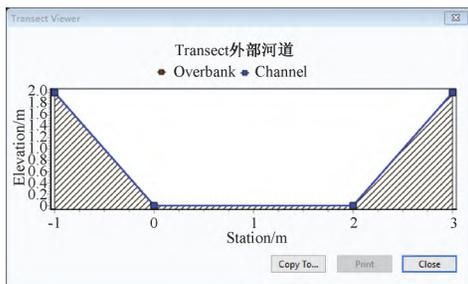


图 2 河道断面示意

Fig. 2 Schematic diagram of the river section

以 SWMM 水动力模型及其初步模拟结果为基础,使用 WASP 构建水动力-水质模型。水动力参数参考 SWMM 模型取值,并通过需水量分析确定上游来水的常时流量;水质参数包括  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{DO}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、叶绿素 (PHYTO) 浓度 4 个指标;太阳辐射取河北省年平均值  $500 \text{ W/m}^2$  输入;普通河流与人工湿地的  $\text{BOD}_5$  氧化速率常数、硝化与反硝化速率常数、植物呼吸与死亡速率常数、大气复氧速率等关键生化反应常数分别参考北方典型河道与表流人工湿地<sup>[15-17]</sup>取值,其余均采用模型参数手册推荐值或模型默认值,如表 4 所示。

表 4 WASP 模型主要参数取值

Tab. 4 Major parameter values in WASP model

符号	参数名称	一般河流	人工湿地
$k_D$	$\text{BOD}_5$ 氧化速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.2	3
$\theta_D$	$\text{BOD}_5$ 氧化速率温度修正系数	1.05	1.05
$K_D$	$\text{BOD}_5$ 氧化半饱和系数/ $(\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1})$	0.5	0.5
$f_D$	溶解性 $\text{BOD}_5$ 比例	0.5	0.5
$k_{71}$	溶解性有机氮矿化速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.05	0.05
$\theta_{71}$	溶解性有机氮矿化速率温度修正系数	1.04	1.04
$k_{12}$	硝化速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.2	8
$\theta_{12}$	硝化速率温度修正系数	1.07	1.07
$K_{NT}$	硝化半饱和系数/ $(\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1})$	0.5	0.5
$k_{2D}$	反硝化速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.045	0.6
$\theta_{2D}$	反硝化速率温度修正系数	1.04	1.04
$G_{pl}$	植物生长速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.4	0.4
$\theta_{pl}$	植物生长速率温度修正系数	1.045	1.045
$k_{1R}$	植物呼吸速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.1	0.125
$\theta_{1R}$	植物呼吸速率温度修正系数	1.07	1.07
$D_{pl}$	植物死亡速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.05	0.005
$k_a$	大气复氧速率/ $\text{d}^{-1}$	0.5	1
$\theta_{2D}$	大气复氧温度修正系数	1.024	1.024
$a_{oc}$	氧碳比/ $(\text{mgO}_2 \cdot \text{mgC}^{-1})$	2.667	2.667
$f_L$	植物光合作用可利用太阳光比例	0.464	0.464

### 3. 2 需水量分析

根据 SWMM 初步模拟,  $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$  的上游水量 ( $Q_0$ ) 可基本满足雄安新区核心区水系的水量需求。在 WASP 中改变  $Q_0$  大小, 试算得在  $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$  范围内, 随着  $Q_0$  的增大, 河道水深指标均分 ( $\overline{A_{11}}$ ) 和流速指标均分 ( $\overline{A_{12}}$ ) 分别呈上升和下降趋势, 水动力健康指数均分 ( $\overline{A_1}$ ) 在  $3.85 \sim 4.03$  波动; 当  $Q_0$  处于  $2.5 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  时,  $\overline{A_{11}}$  大于  $3.5$ ,  $\overline{A_{12}}$  大于  $4.2$ ;  $\overline{A_1}$  达到  $3.95$  分, 且在  $Q_0$  为  $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$  时取得极大值  $4.03$  分。因此, 认为  $Q_0$  位于  $2.5 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  时河道水动力情况良好, 取  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  为所构建水系的常时流量, 即假设水系上游来水量在常态下恒为  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 4 维系技术评估

针对雄安新区核心区可能出现的水环境问题, 本文研究两类需要采用技术措施加以维系的典型情景: ①上游水量不足: 当水量未达到目标流量  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 河道的水深、流速条件可能无法满足生态需求; ②上游水质恶化: 当水质未达到目标水质 IV 类标准时, 河道的水质将随之恶化, 且对下游接纳水体水质造成冲击。利用 SWMM、WASP 构建上述两类情景下

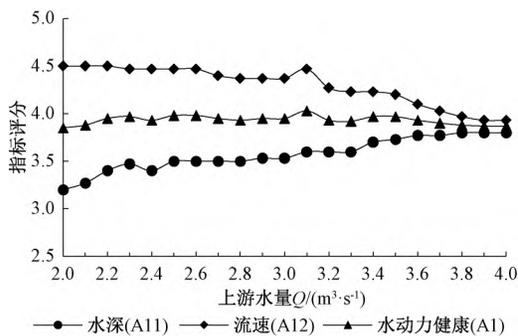


图 3 不同上游水量下各河段水动力指标平均评分

Fig. 3 Average scores of hydrodynamic index under different upstream water volumes

的水动力-水质模型,并在各情景下分别模拟单一或组合维系技术措施对水环境健康改善的响应关系并评估其对于核心区水环境维系的适宜性。

4.1 上游水量不足情景

雄安新区核心区自然资源匮乏,而雨水、再生水等补给水源的水量波动较大,水系面临水量不足的风险。当补给水源流量下降时,河道的水深或流速减小,水动力健康水平降低。

假设上游水量  $Q_0$  减小为  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其他条件不变。此时水系模拟平均水深仅为  $0.29 \text{ m}$ ,较一般状态下降约  $30\%$ (见图 4),指标平均值  $\bar{A}_{11}$  仅为  $2.83$  分,与优化目标(4 分)相距甚远,该水平不适宜大部分鱼类生存;平均流速  $0.83 \text{ m/s}$ ,指标平均值  $\bar{A}_{12}$  为  $4.80$  分;平均水动力健康指数  $\bar{A}_1$  为  $3.82$  分。

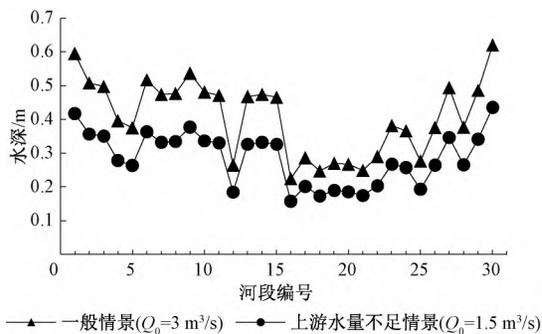


图 4 一般情景与上游水量不足情景下各河段水深对比

Fig. 4 Comparison of water depth under the general scenario and the upstream water shortage scenario

为缓解本情景下水系水量不足的问题,采用水系循环技术以提高水系等效流量,降低区域对补给

水量的需求,即在水系末端河道设置水泵,抽取水系末端(第 30 条河段)出水的一定比例( $b$ )通过外部河道循环至入流口,构建外循环式环状水系。示意图与模型概化方法如图 5 所示。

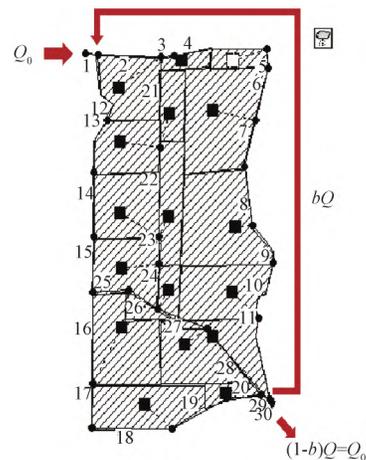


图 5 外循环式水系构建方法示意

Fig. 5 Schematics of construction method of external circulation drainage system

根据物质守恒定律,河道进出流量相等,故水系等效总流量为  $Q = Q_0 / (1 - b)$ 。理论上,调整循环比例  $b$  的大小,使等效流量  $Q$  为  $2.5 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  即可满足河道生态流量需求。经过试算,在本模型中取  $b = 40\%$ ,即  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  时,此时水系的平均水环境健康指数  $\bar{A}$  达到 4 分,各指标模拟结果与评分如表 5 所示。与未循环情景相比,循环措施下的河道水深指数显著提升,流速指数保持高水平,且水体对  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  的自净效果略微增强。因此水体循环技术可以一定程度上降低雄安新区对补给水源水量的需求,在上游水量不足情景下提升区域的水动力健康以及水环境综合健康水平。

4.2 上游水质恶化情景

规划要求雄安新区的地表水、再生水水质满足地表水 IV 类标准,因此一般情景下水系的入流水质维持在较优水平。然而,由于自然条件与人为活动的高度不确定性,上游点源排放、区域降雨径流等污染源使上游水质存在恶化风险,从而可能对水系及其下游接纳水体水质造成冲击。

假设上游来水的水质介于地表水 IV 类与 V 类标准之间,对应本研究中水质健康指数  $4 \sim 3$  分,区内各水质指标的取值与评分按照内插法确定。图 6



表 5 水系循环前后模拟结果与评分对比

Tab. 5 Comparison of simulation results and scores before and after circulation

指标	$Q_0=1.5\text{ m}^3/\text{s}, b=0$				$Q_0=1.5\text{ m}^3/\text{s}, b=40\%$			
	水深	流速	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	水深	流速	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N
均值	0.29 m	0.83 m/s	5.92 mg/L	1.49 mg/L	0.36 m	1.01 m/s	5.89 mg/L	1.48 mg/L
均分	2.8	4.8	4	4	3.5	4.5	4	4

表 6 不同规模人工湿地的充氧效果

Tab. 6 Oxygenation effect of constructed wetlands of different scales

湿地规模		充氧量 /(kg·d <sup>-1</sup> )	出水水质		
长度 /m	宽度 /m		BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N /(mg·L <sup>-1</sup> )	水质健康 指数 A <sub>2</sub>
250	250	0	8.97	1.49	3.5
		1 200	7.34	0.97	4
		10 000	6.03	0.68	4
300	250	0	8.86	1.45	3.5
		1 000	7.44	0.99	4
		2 400	5.99	0.67	4.5
400	250	0	8.64	1.37	3.5
		800	7.45	0.99	4
		1 750	5.99	0.67	4.5
500	250	0	8.41	1.28	3.5
		650	7.41	0.98	4
		1 500	5.98	0.67	4.5
600	250	0	8.17	1.2	3.5
		450	7.46	0.99	4
		1 300	5.98	0.67	4.5

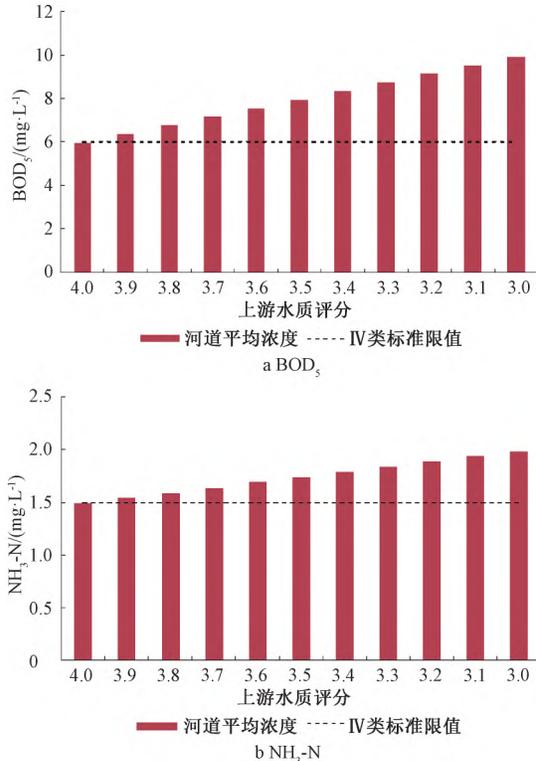


图 6 不同上游水质条件下河道平均水质情况

Fig. 6 Average water quality of river under different upstream water quality conditions

反映了不同上游水质条件下雄安新区核心区河流的平均水质情况。随着上游来水中污染物浓度的上升,河流对 BOD<sub>5</sub> 的去除量从 0.059 mg/L 上升至 0.091 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 的去除量从 0.012 mg/L 上升至 0.015 mg/L;但是由于污染物浓度基数的增长,河流对 BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 的去除率呈下降趋势;河流的平均水质急剧恶化,水质健康指数 A<sub>2</sub> 逐渐下降至 3.5 分,区域水环境处于不健康水平。

根据规划,在雄安新区核心区的西北部具有规模不超过 600 m×250 m 的区域可以建设人工湿地,同时由于该区域水面开阔、流速较缓,因此可与强化复氧技术(如:单级或多级跌水、人工曝气)耦合以强化净水效果。利用 WASP 构建上游人工湿地系统水质模型,主要参数根据表 4 取值。在 WASP

模型中固定湿地宽度为 250m,在 250~600m 内阶梯性改变湿地长度,模拟评估不同规模湿地的出水水质情况,并试算使湿地出水水质达到优化目标(A<sub>2</sub>≥4 分)所需的充氧量大小,结果如表 6 所示。

如果不对人工湿地进行充氧,上述规模的湿地出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度降低至 1.5 mg/L 以下,满足地表水 IV 类标准,在本研究的指标体系中对应该评分 4 分;但是 BOD<sub>5</sub> 浓度仍然维持在 8 mg/L 以上,属于 V 类水质,对应指标评分 3 分。当湿地规模取最大值,即宽度为 250 m、长度为 600 m 时,出水 BOD<sub>5</sub> 浓度为 8.17 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 浓度为 1.20 mg/L,较进水分别下降 18.3% 和 40.0%;水质健康指数 A<sub>2</sub> 为 3.5 分,与优化目标 4 分仍然存在差距,说明仅构建人工湿地而不采用强化充氧措施无法有效维系雄安新区核心区水环境健康。

如果将人工湿地与强化复氧技术耦合,试算发现不超过 1 200 kg/d 的充氧量可使出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度降低至 III 类标准限值(1 mg/L)以下,对应指标评分 5 分;此时 BOD<sub>5</sub> 浓度在 7~8mg/L,属于 V 类标



准,对应评分 3 分;水质健康指数  $A_2$  为 4 分,达到优化目标。而对于宽度为 250 m、长度介于 300~600 m 的人工湿地,进一步增大充氧量至 1 300~2 400 kg/d 可使出水  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  浓度分别满足 IV 类和 III 类标准,出水水质优于地表水 IV 类标准,此时水质健康指数  $A_2$  为 4.5 分。

由此可见,人工湿地耦合强化复氧技术能够有效维系雄安新区核心区的水环境健康,并且可通过调整充氧量大小改变湿地的水质净化效果,从而灵活保障不同情景(如:季节变化、有无降雨)条件下的水质目标。

## 5 结语

本文基于对雄安新区核心区的模拟研究,分析不同情景下各维系方案的实施效果。研究表明,当上游水量不足时水体循环技术可一定程度上满足河道的生态水量需求,提升水系的水动力健康水平;当上游水质恶化时人工湿地耦合强化复氧技术可显著降低上游来水中氨氮浓度,有效保障水系水源的水质,提升水系及其下游接纳水体的水质健康水平。

本研究为雄安新区核心区的健康水环境的维系提供了技术支持和决策参考;同时丰富了城市水环境的规划与评估相关理论,研究方法与成果有望对我国其他城市健康水环境的维系提供借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 曲久辉. 城市水环境与水质的演化及调控[J]. 建设科技, 2009(15):62-63.
- [2] 国务院. 水污染防治行动计划[Z]. 国发[2015]17号,2015.
- [3] 周静远. 人水系统和谐评价体系、模型构建及应用创新[A]. 中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(三)[C]. 中国环境科学学会环境工程分会:《环境工程》编辑部,2019:4.
- [4] 中华人民共和国水利部. 河湖健康评估技术导则 [EB/OL]. 2018. [http://gjkj.mwr.gov.cn/jsjd1/bzh/bzzqyj/201801/t20180103\\_1019216.htm](http://gjkj.mwr.gov.cn/jsjd1/bzh/bzzqyj/201801/t20180103_1019216.htm).
- [5] 郝弟,张淑荣,丁爱中,等. 河流生态系统服务功能研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 106-111.

- [6] 王所安. 河北动物志:鱼类[M]. 石家庄:科学技术出版社, 2001.
- [7] 李梅,黄强,张洪波,等. 基于生态水深一流速法的河段生态需水量计算方法[J]. 水利学报, 2007, 38(6):738-742.
- [8] 李莉. 基于河流健康预测性评价的城市水系规划方案比选研究[D]. 北京:清华大学, 2019.
- [9] 王甲荣,李森焱,孙秀玲,等. 天然河流弯道不同生态治理方案的数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2017, 035(1):97-100,187.
- [10] 梁耀元,陈小奎,李洪远,等. 韩国城市河流生态恢复的案例与经验[J]. 水资源保护, 2010, 26(6):93-96,100.
- [11] City of San Diego. San Diego River Park Master Plan[EB/OL]. 2013. <https://www.sandiego.gov/planning/san-diego-river-park-master-plan>.
- [12] 张瑞,刘操,孙德智,等. 北京地区再生水补给型河湖水质改善工程案例分析与问题诊断[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12):1872-1881.
- [13] 崔亚丰,李炳橙,郭友红. 近郊河流湿地水域构建与水体维系技术探究——以唐山惠丰湖湿地为例[J]. 矿山测量, 2017(2).
- [14] 范玉燕,汪诚文,喻海军. SWMM 模型河道及明满流模拟能力分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1):4-9.
- [15] 朱文博. 北方季节性河流生态反应器水质模型研究[D]. 济南:山东大学, 2015.
- [16] 陈德坤,朱文博,王洪秀,等. WASP 水质模型在表流人工湿地中的优化与应用[J]. 工业水处理, 2018, 38(2):70-74.
- [17] 冯媛. 表面流人工湿地水动力—水质模拟与分析[D]. 济南:山东大学, 2016.



○ 通信作者:汪诚文,男,1968 年出生,北京人,博士,教授。主要研究方向为新型排水系统、城市水系统处理技术及相关资源化技术。

E-mail:wangcw@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2021-07-08