

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.03.012

# 考虑初期雨水污染的平原河网地区活水效果分析

高成, 顾春旭

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**以盐城市核心区为例,构建水量水质数学模型,在常态补水方案的基础上,充分考虑随初期雨水径流进入河道的污染物,分析初期雨水污染对活水效果的影响。结果表明,活水方案的水质改善效果与引水水质和污染物浓度分布有关;活水目标相同时,考虑初期雨水污染的活水时间较未考虑初期雨水污染的长;由于汇流时间不同,考虑初期雨水污染时,上游断面的污染物浓度峰值时刻和达标时间较下游断面有所推迟。

**关键词:**平原河网;初期雨水;活水补水;水量水质数学模型

**中图分类号:**TV125;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)03-0069-07

**Analysis of live water effect in plain river network area considering initial rainwater pollution**// GAO Cheng, GU Chunxu (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Taking the core area of Yancheng City as an example, the mathematical model of water quantity and quality was constructed. On the basis of the normal water supply scheme, the pollutants entering the river with the initial rainwater runoff were fully considered and the influence of the initial rainwater pollution on the living water effect was analyzed. The results show that the water quality improvement effect of the living water scheme is related to the water quality of diversion water and the distribution of pollutant concentration. When the target of living water is the same, the time of living water considering initial rainwater pollution is longer than that without considering initial rainwater pollution. Due to different confluence time, the peak time and the time of reaching the standard of pollutant concentration in the upstream section are delayed compared with that in the downstream section when the initial rainwater pollution is considered.

**Key words:** plain river network; initial rainwater; living water and water supply; mathematical model of water quantity and quality

近年来,我国城市化进程不断加快,城市水系水环境质量也在不断恶化。流经城市的河流水质恶化,大部分城市水体达不到景观娱乐水质标准<sup>[1-2]</sup>。平原河网地区水系错综复杂,河流坡度很小,水动力条件差,水环境问题更加突出<sup>[3-4]</sup>。在控源截污的同时,活水补水能够有效改善平原河网地区水动力条件,是保证水体流动的重要措施。研究活水补水的水环境改善效果,对解决平原河网城市水环境问题具有重要参考意义。

目前国内关于活水补水的研究主要针对水动力条件改善、水质的改善以及引水格局和补水方式,研究区域主要集中在长江三角洲平原。从江苏、浙江、上海等地的引水配水、畅流活水、引清活水的研究案例来看,通过调水引水来改善水环境质量,主要体现

在河道断面流速加大、主要污染物浓度降低和河道水位的抬升等方面<sup>[5-6]</sup>。通过优化引水路线、引水格局,可以实现重要节点的水质达标<sup>[7-8]</sup>;通过优化补水方式,可以在保证水质目标实现的前提下,实现引水水源和水量的优化<sup>[9]</sup>。目前已有的研究主要从常态下活水补水的工程建设、调度方式、引调水量等方面对水质改善效果的影响进行研究,未考虑雨天初期雨水污染这一重要因素对活水效果的影响。本研究利用 Mike 系列软件,建立水量水质耦合模型,对有无初期雨水污染下的活水补水方案进行模拟计算,研究初期雨水污染对活水效果的影响。

## 1 研究区概况

研究区域为盐城市第Ⅲ防洪区,位于里下河腹

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(2014B16814);江苏省水利科技专项(2017006)

作者简介:高成(1983—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源及水环境研究。E-mail:gchohai@163.com

地东翼,境内河网密布,纵横交错,同时也是盐城市的核心区,人口稠密,经济发达。研究区面积 108.73 km<sup>2</sup>,外围由 54 座水闸、闸站分隔区内河道和区外河道包围,形成一个封闭的防洪区。研究区水系见图 1,区内河道 118 条,总长 309.20 km,主要功能定位是排涝、调蓄、景观,水流流向为自西向东、自西南向北。区外河道有蟒蛇河、新越河、新洋港、通榆河、小新河、三墩港和大马沟等,区外河道是区域的行洪通道。非汛期,通过调度外围水闸及闸站,从外河向内河补水,维持一定景观水位;汛期,关闭外围水闸,利用排涝闸站将区内涝水抽排进入外河<sup>[10]</sup>。



图 1 研究区水系

受周边点源、面源和内源污染的影响,第Ⅲ防洪区整体水质状况不佳,COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 均超标,其中 NH<sub>3</sub>-N 为主要污染物。以 NH<sub>3</sub>-N 为标准,研究区劣 V 类水体占到 57%,重度黑臭河道有 24 条,占 9.3%,轻度黑臭河道 28 条,占 16%。区域内的污染来源有生活污水、工业企业污水、污水处理厂尾水、种植业、河道底泥以及初期雨水径流污染,其中生活污水以及初期雨水径流污染为主要污染来源。

## 2 研究方法

### 2.1 常规活水方案

在综合考虑研究区的水源及水利工程分布情况的基础上,结合西南高、东北低的地形特点,根据“东西南三面进水,北面排水”的原则,拟定了活水方案,封闭第Ⅲ防洪区外围所有口门,从通榆河预处理水厂引水 30 万 m<sup>3</sup>/d 至串场河世纪大道桥下,从盐龙湖水库引水 30 万 m<sup>3</sup>/d 至盐塘河西端,从通榆河引水 15 万 m<sup>3</sup>/d 至朝阳河、分界河,从小新河引水 10 万 m<sup>3</sup>/d 进入东干渠,从大马沟引水 15 万 m<sup>3</sup>/d 进入向阳河、利民河,从串场河闸站和小洋河东支闸站

排水 100 万 m<sup>3</sup>/d 进入新洋港。活水方案见图 2。



图 2 活水方案

### 2.2 初期雨水污染负荷计算方法

初期雨水污染负荷的计算方法主要有 3 种:①根据水质水量同步监测数据计算初期雨水污染负荷;②通过分析大量的实测数据,统计分析初期雨水污染负荷;③通过模拟污染物的产生过程,利用模型计算初期雨水污染负荷<sup>[11-12]</sup>。本研究区域缺乏相关的降雨水质实测资料,需要对初期雨水污染负荷进行估算。对于无资料的地区,有学者建议屋面雨水取 2~3 mm、地面雨水取 3~5 mm 作为初期雨水量<sup>[13]</sup>;也有国外的学者在研究雨水污染初期效应时采用 20/80 或 30/70 法则,即认为一场降雨中前 20% 的径流包含了 80% 的污染负荷,或降雨的前 30% 径流包含了整场降雨大约 70% 的污染负荷;还有研究者认为降雨径流最初的 12.7 mm (0.5 英寸) 径流中包含了大部分的污染物,即半英寸法等。本次计算中根据排水体制不同,确定不同的计算标准<sup>[14]</sup>。合肥市老城区与本研究区均为城市核心区,且地理位置相对接近,具有一定的参考意义。合肥市老城区合流制系统的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度为 10.6 mg/L,城中村冲沟的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度为 10.9 mg/L,混接分流制系统的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度为 10.6 mg/L<sup>[15]</sup>。本研究考虑最不利的初期雨水污染情况,选取降雨量为 8 mm,降雨历时为 3 h 的降雨过程计算初期雨水径流量。对 118 条河道划积分水区域,模拟各个河段的初期雨水径流过程,结合排水分区,合流制区域和分流制区域 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度均取 11 mg/L,初雨径流污染沿河进入河道。

### 2.3 模型构建

#### 2.3.1 模型介绍

Mike 系列模型包括 Mike Zero、Mike Urban、

Mike C-MAP、WEST 和 FEFLOW,其中主要用于地表水模拟的 Mike Zero 又包含 Mike11、Mike21、Mike3、Mike SHE、Mike HYDRO 等一系列组件。本次研究采用的 Mike11 软件主要用于河渠的水流、水质以及泥沙的一维模拟,软件由水动力模块、对流扩散模块、水质模块、降雨径流模块、洪水预报模块组成,其核心模块为水动力模块。水动力模块(HD 模块)可以模拟河道断面的水位、流量、流速等,对流扩散模块(AD 模块)可以模拟物质在水体中的对流扩散过程,通过耦合水动力模块和对流扩散模块可以进行河道的水质模拟<sup>[16-17]</sup>。Mike11 HD 模块采用 6 点 Abbott-Ionescu 有限差分格式求解圣维南方程组<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) + gAS_f - uq = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A$  为河道过水面积,  $m^2$ ;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $u$  为侧向来流在河道方向的流速,  $m/s$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $x$  为沿水流方向的水平坐标,  $m$ ;  $q$  为河道的侧向来流量,  $m^2/s$ ;  $\alpha$  为动量修正系数;  $g$  为重力加速度,  $m^2/s$ ;  $y$  为水位,  $m$ ;  $S_f$  为摩阻坡降。

在 Mike11 HD 模块的基础之上, Mike11 AD 模块根据 HD 模块产生的水动力条件,应用对流扩散方程<sup>[19-21]</sup>进行计算:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - K\rho \quad (2)$$

式中: $\rho$  为模拟物质的质量浓度,  $mg/L$ ;  $\bar{\mu}$  为河流平均流速,  $m/s$ ;  $E_x$  为对流扩散系数,  $m^2/s$ ;  $K$  为模拟物质的一级衰减系数,  $mg/L$ 。

### 2.3.2 河网概化

河道概化是模型构建的基础,河道概化必须保证概化后的河道能够模拟区域的蓄水能力和水流方向。对于平原河网地区,河道概化遵循先主干河道后次要河道的原则。根据研究区的河道断面测量资料,对河网进行概化,得到 118 条河道、930 个节点、1500 个河道断面,总长约 300 km。根据污染源调查结果,将面源、内源污染分别概化到 118 条河道,概化了 500 处点源污染排放口。

### 2.3.3 模型参数

HD 模块参数主要是定义模拟的初始条件和河床糙率。初始条件设定的一个很重要目的是让模型平稳启动,所以原则上初始水位和流量的设定应尽可能与模拟开始时刻的河网水动力条件一致<sup>[22]</sup>。本次设置初始水位为区内正常蓄水位;河床糙率根据地质资料及河道整治情况,按照糙率表进行初步选定。根据河道不同断面及护坡类型,参考《水力

计算手册(第二版)》,本次河道糙率选择范围为 0.025 ~ 0.035。根据 2011 年洪水相关成果,最高水位在 2.20 m 左右。考虑 2011 年防洪已形成闭合保护圈,排涝泵站抽排能力 208  $m^3/s$ ,据此设置模型,计算得到最高水位为 2.15 m。计算值偏小,可能是由于本次模拟考虑泵站全开,与实际调度方式不符。同时,根据《盐城市城市防洪规划(2015—2030 年)》,规划现状最高水位为 2.00 m,而本次模型计算水位为 1.98 m,基本相符,说明参数选择基本合理。

AD 模块参数主要是定义模拟污染物的初始浓度和物质特性。本次研究选取  $NH_3-N$  作为主要水质指标,因现状水质大部分处于 V 类甚至劣 V 类,所以  $NH_3-N$  的质量浓度初始值取 2.0  $mg/L$ 。昆山市位于太湖流域平原河网区,水流速度极缓,与研究区气候、水力等条件相差不大,因此结合全国地表水水环境容量核定中给出的参考值以及昆山市的相关研究成果<sup>[6]</sup>,  $NH_3-N$  的衰减系数取 0.04  $d^{-1}$ ,扩散系数  $D$  根据经验公式确定:

$$D = av^b \quad (3)$$

式中: $v$  为流速,由 HD 模块得到; $a$  和  $b$  为系数。

根据经验,小溪的扩散系数一般在 1 ~ 5  $m^2/s$ ,河流的扩散系数一般在 5 ~ 20  $m^2/s$ 。一般说来,流速越大,扩散系数越大。

### 2.3.4 边界条件

在活水方案的基础上,设计晴天和雨天两个方案进行模拟。晴天(方案 1)主要考虑点源污染,包括生活污水排放、工业企业污水排放、污水处理厂尾水排放、种植业污染和内源污染的释放。而雨天(方案 2)在晴天的基础上增加由降雨所带来的初期雨水污染。两种方案的水量、水质计算边界相同,水量计算边界为:从串场河闸站、小洋河东支闸站抽排 100 万  $t/d$ ,从通榆河、小新河、大马沟、盐龙湖水库、通榆河预处理水厂向区内补水 100 万  $t/d$ ;水质计算边界为:通榆河、盐龙湖水库、通榆河预处理水厂补水水源  $NH_3-N$  质量浓度为 1.2  $mg/L$ ,小新河、大马沟补水水源  $NH_3-N$  质量浓度为 1.0  $mg/L$ 。综合考虑当地实际活水时间周期及断面基本达标所需时间,计算历时取 216 h。

## 3 结果分析

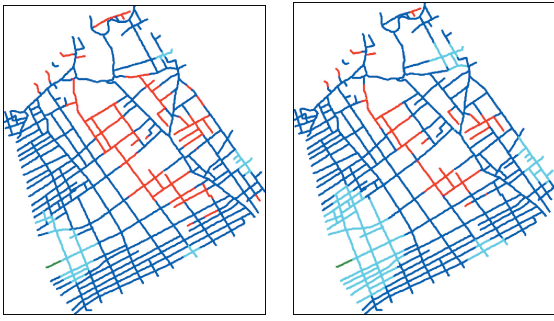
### 3.1 污染物浓度总体分布

以  $NH_3-N$  浓度为指标,分析计算各方案下河道内  $NH_3-N$  浓度分布,动态模拟结果见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可知,中部地区水质较差,而西南地区水质较好,主要原因是中部地区人口密集,污染

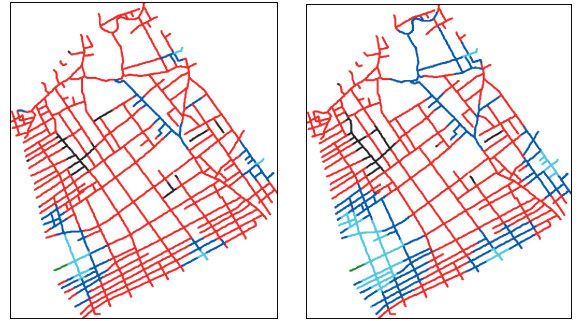
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$  3.0 2.0 1.5 1.0 0.5

$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$  3.0 2.0 1.5 1.0 0.5



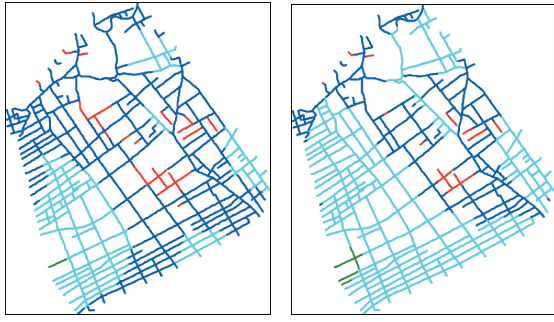
(a) 24 h

(b) 48 h



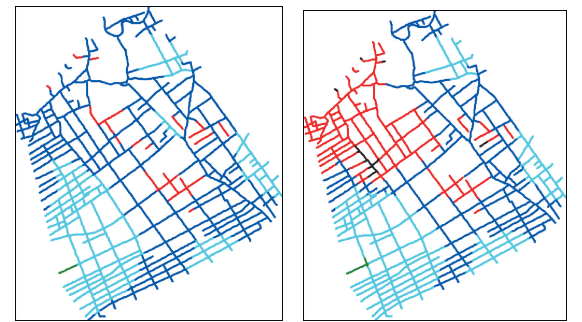
(a) 24 h

(b) 48 h



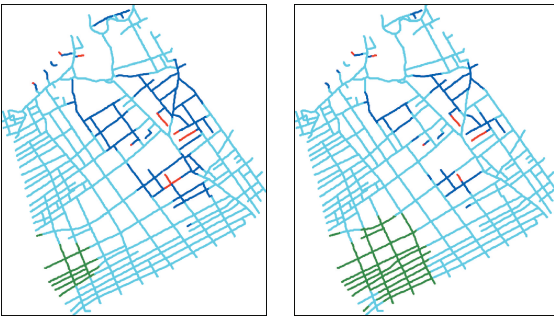
(c) 72 h

(d) 120 h



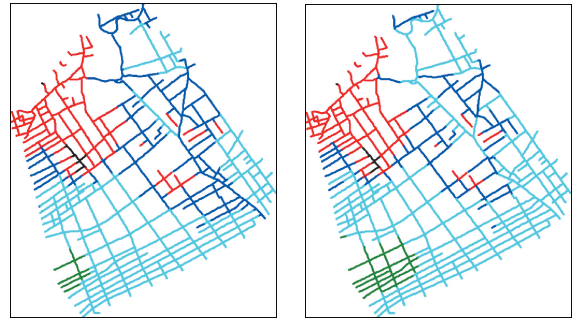
(c) 72 h

(d) 120 h



(e) 168 h

(f) 216 h



(e) 168 h

(f) 216 h

图3 方案1下不同活水时间  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度分布

图4 方案2下不同活水时间  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度分布

排放较多,而西南部郊区开发程度较低,污染较少。总体来看,由于雨天初期雨水污染汇入河道,方案2下的  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度要高于方案1,活水 168 h 后,方案1下大部分断面  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度达到 IV 类水标准,方案2下大部分断面  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度达到 V 类水标准。活水后不同  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度的断面占比见表 1。

由表 1 可知,方案1下,  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度大于 2.0 mg/L 的断面占比呈递减趋势;  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度介于 1.5 ~ 2.0 mg/L 的断面占比亦呈递减趋势;  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度介于 1.0 ~ 1.5 mg/L 的断面占比呈递增趋势;  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度小于等于 1.0 mg/L 的断面占比亦呈递增趋势。方案2下,  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度大于 2.0 mg/L 的断面占比呈递减趋势;  $\text{NH}_3\text{-N}$

表 1 活水后不同  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度的断面占比

方案	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	不同 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的断面占总断面百分比/%								
		活水 24 h 后	活水 48 h 后	活水 72 h 后	活水 96 h 后	活水 120 h 后	活水 144 h 后	活水 168 h 后	活水 192 h 后	活水 216 h 后
方案 1	>2.0	15.0	8.3	4.8	3.1	2.6	2.1	1.4	0.9	0.8
	(1.5,2.0]	77.2	70.6	60.3	44.5	32.6	24.1	16.5	11.4	8.6
	(1.0,1.5]	7.6	20.8	34.4	51.6	63.1	70.2	76.0	78.1	74.9
	$\leq 1.0$	0.2	0.3	0.6	0.8	1.7	3.6	6.1	9.7	15.8
方案 2	>2.0	84.1	62.6	41.9	31.8	27.0	24.7	22.7	21.4	20.1
	(1.5,2.0]	13.1	27.5	39.2	41.6	37.3	30.5	27.0	22.0	17.7
	(1.0,1.5]	2.6	9.7	18.6	26.1	34.9	43.2	47.0	51.3	53.8
	$\leq 1.0$	0.2	0.2	0.3	0.6	0.8	1.7	3.3	5.3	8.4

质量浓度介于 1.5 ~ 2.0 mg/L 的断面占比呈先增后减趋势,峰值出现在活水后 96 h;NH<sub>3</sub>-N 质量浓度介于 1.0 ~ 1.5 mg/L 的断面占比呈递增趋势;NH<sub>3</sub>-N 质量浓度小于等于 1.0 mg/L 的断面占比亦呈递增趋势。

方案 1 水质改善效果活水前 96 h 较好,120 h 后水质改善效果不明显,方案 2 水质改善效果活水前 144 h 较好,168 h 后水质改善效果不明显,这与研究区内水体水质和补水水源水质有关。方案 1 下,活水后 24 ~ 72 h 大部分水体为 V 类水,从 96 h 开始,IV 类水已经有 50% 以上,而外部补水为 III、IV 类水,故补水活水效果最好在前 96 h,96 h 后水质改善效果有所下降。方案 2 下,活水后 24 ~ 72 h,劣 V 类水占比最大,活水后 96 ~ 120 h, V 类水占比最大,从活水后 144 h 开始,IV 类水占比最大,外部补水为 III、IV 类水,故补水活水效果最好在前 144 h,144 h 后水质改善效果有所下降。

对比方案 1 和方案 2,从活水后 24 ~ 216 h,方案 2 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度大于 2.0 mg/L 的断面占比始终要大于方案 1;活水 216 h 后,方案 1 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度小于等于 1.5 mg/L 的断面占比达到 90.7%,而方案 2 下该类断面占比仅达到 62.2%。由于初期雨水污染的汇入,方案 2 下水质要比方案 1 同期水质差,方案 2 下活水效果较方案 1 差。

### 3.2 控制断面污染物浓度

根据水质考核要求,选取两处国考断面进行研究,其中控制断面 1 位于串场河世纪大道桥补水点下游 6.4 km,控制断面 2 位于串场河世纪大道桥补水点下游 2.8 km,计算分析各方案下控制断面 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度变化情况。控制断面位置分布见图 2,两种方案下控制断面 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度变化见表 2。

表 2 两个控制断面 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度变化

活水时间/h	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			
	方案 1		方案 2	
	控制断面 1	控制断面 2	控制断面 1	控制断面 2
6	2.00	2.00	2.00	2.00
12	2.00	1.98	2.00	1.98
18	2.00	1.90	2.13	2.12
24	1.99	1.81	2.13	1.98
36	1.99	1.73	2.15	1.88
48	1.94	1.64	2.17	1.79
72	1.89	1.60	2.20	1.75
96	1.78	1.55	2.26	1.72
120	1.69	1.50	2.29	1.68
144	1.61	1.45	2.27	1.63
168	1.54	1.41	2.22	1.56
192	1.47	1.36	2.16	1.50
216	1.41	1.32	2.09	1.44

由表 2 可知,方案 1 中,活水开始后,控制断面 1 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度递减,最终达到 IV 类水标准;控制断面 2 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度递减,最终也达到 IV 类水标准。方案 2 中,活水开始后,控制断面 1 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度先增后减,在 120 h 达到峰值 (2.29 mg/L),最终接近 V 类水标准;控制断面 2 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度在 6 ~ 12 h 略有降低,12 ~ 18 h 增加并达到峰值 (2.12 mg/L),18 h 之后浓度又开始降低,最终达到 IV 类水标准。

对比方案 1 和方案 2,对于控制断面 1,方案 2 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度高于方案 1 下相同时刻的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度;方案 1 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度降至 1.50 mg/L 需要 180 h,方案 2 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度在 216 h 仍在 2.00 mg/L 之上。对于控制断面 2,方案 2 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度亦高于方案 1 下相同时刻的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度;方案 1 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度降至 1.50 mg/L 需要 120 h,方案 2 下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度降至 1.50 mg/L 需要 192 h。方案 1 下,两个断面的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度均呈递减趋势,方案 2 下,两个断面的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度则均呈先增后减趋势。据此不难发现,由于初期雨水污染的汇入,控制断面 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度迅速增加,相同活水方案下,考虑初期雨水污染后,活水效果变差,为保证控制断面 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度达标,需要更长的活水时间。

对比控制断面 1 和控制断面 2,在方案 1 和方案 2 下,活水 12 h 后,控制断面 1 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度均要高于相同时刻控制断面 2 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度。结合活水方案,不难发现,控制断面 1 位于控制断面 2 下游,上游水质优于下游水质。方案 2 下,控制断面 1 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度峰值出现在活水后 120 h,控制断面 2 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度峰值出现在活水后 18 h,由于控制断面 1 和控制断面 2 位于汇流通道的不同位置,雨水径流汇到下游的时间较长,故位于下游的控制断面 1 的 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度峰现时间较位于其上游的控制断面 2 长。

## 4 结论

a. 活水方案的水质改善效果与引水水质和污染物浓度分布有关,当区域内 50% 的水体接近引水水质时,水质改善效果已不明显。

b. 初期雨水污染的汇入增加了全区域的污染物浓度,整体水环境质量下降。活水目标为大部分达到 IV 类水时,考虑初期雨水污染的活水时间较未考虑初期雨水污染的活水时间多 48 ~ 72 h。

c. 初期雨水污染导致了降雨初期断面污染物浓度短期内迅速增加。保证控制断面 2 水质达标

时,考虑初期雨水污染的活水时间较未考虑初期雨水污染的活水时间多 72 h。由于汇流时间不同,控制断面 1 的污染物浓度峰现时间较控制断面 2 推迟 102 h。

## 参考文献:

[ 1 ] 关许为. 河网地区引清补水分区及改善水环境方案研究[J]. 水利规划与设计, 2015 ( 4 ) : 29-32. ( GUAN Xuwei. Study on water diversion and recharge zones and improvement of water environment in river network area [J]. Water Resources Planning and Design, 2015(4) :29-32. (in Chinese) )

[ 2 ] 张金池,何志锋,张银龙,等. 平原河网城区河道生态环境需水量研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32 ( 2 ) : 103-108. ( ZHANG Jinchi, HE Zhifeng, ZHANG Yinlong, et al. Environmental and ecological water requirements of urban flows in plain river system [J]. Journal of Nanjing Forestry University ( Natural Science Edition ), 2008, 32(2) :103-108. (in Chinese) )

[ 3 ] 陈诗吉,郑祥民,周立旻,等. 城市黑臭河网外源调水技术研究进展[J]. 环境工程, 2014, 32 ( 2 ) : 1-5. ( CHEN Shiji, ZHENG Xiangmin, ZHOU Limin, et al. A review of technology of transporting clean water from outer water source to treat urban black-odors rivers[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(2) :1-5. (in Chinese) )

[ 4 ] 李晓,唐洪武,王玲玲,等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44 ( 5 ) : 393-399. ( LI Xiao, TANG Hongwu, WANG Lingling, et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network area [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2016, 44(5) :393-399. (in Chinese) )

[ 5 ] 徐贵泉,褚君达. 上海市引清调水改善水环境探讨[J]. 水资源保护, 2001 ( 3 ) : 26-30. ( XU Guiquan, CHU Junda. Water environment improvement by clean water diversion in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2001(3) :26-30. (in Chinese) )

[ 6 ] 尚钊仪,张亚洲,戴晶晶,等. 昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J]. 水资源保护, 2017, 33 ( 6 ) : 125-132. ( SHANG Zhaoyi, ZHANG Yazhou, DAI Jingjing, et al. Study on water environment improvement scheme by living water flow in Kunshan main city and its surrounding areas [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6) :125-132. (in Chinese) )

[ 7 ] 刘贵平,唐洪武,雷燕,等. 上海世界博览会园区河网水环境调控[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41 ( 3 ) : 204-210. ( LIU Guiping, TANG Hongwu, LEI Yan, et al. Water environmental regulation for river network in Shanghai World Expo Park [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2013, 41(3) :204-210. (in

Chinese) )

[ 8 ] 陈浩,王飞,施巍巍. 苏州古城区水环境改善方案研究: 自流活水之配水工程[J]. 水利规划与设计, 2015 ( 7 ) : 86-89. ( CHEN Hao, WANG Fei, SHI Weiwei. Study on the water environment improvement scheme in the ancient city of Suzhou : water distribution project of self flowing water [J]. Water Resources Planning and Design, 2015 (7) :86-89. (in Chinese) )

[ 9 ] 陈建标,钱小娟,朱友银,等. 南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J]. 水资源保护, 2014, 30 ( 1 ) : 38-42. ( CHEN Jianbiao, QIAN Xiaojuan, ZHU Youyin, et al. Simulation of improvement of water environment in river network of Nantong City by water diversion from Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (1) :38-42. (in Chinese) )

[ 10 ] 杜军. 利用城市防洪工程改善市区水环境的思考[J]. 治淮, 2009 ( 9 ) : 11-12. ( DU Jun. Thinking of improving urban water environment by using urban flood control projec [J]. Harnessing the Huaihe River, 2009 (9) : 11-12. (in Chinese) )

[ 11 ] 薛英文,文倩倩. 初期雨水截留池容积计算理论研究[J]. 中国农村水利水电, 2009 ( 7 ) : 36-38. ( XUE Yingwen, WEN Qianqian. Theoretical research on volume calculation of interception basin of early-stage rainfall [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(7) :36-38. (in Chinese) )

[ 12 ] 车伍,张炜,李俊奇,等. 城市雨水径流污染的初期弃流控制[J]. 中国给水排水, 2007 ( 6 ) : 1-5. ( CHE Wu, ZHANG Wei, LI Junqi, et al. Initial split-flow control of urban rainwater runoff pollution [J]. China Water & Wastewater, 2007 (6) :1-5. (in Chinese) )

[ 13 ] 张千千,李向全,王效科,等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23 ( 2 ) : 352-358. ( ZHANG Qianqian, LI Xiangquan, WANG Xiaoqi, et al. Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff [J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23 (2) : 352-358. (in Chinese) )

[ 14 ] 李家科,李亚娇,李怀恩. 城市地表径流污染负荷计算方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21 ( 2 ) : 5-13. ( LI Jiake, LI Yajiao, LI Huaen. Study on the calculation method for urban surface runoff pollution load [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(2) :5-13. (in Chinese) )

[ 15 ] 张显忠. 合肥市老城区初期雨水污染现状与调蓄策略[J]. 中国给水排水, 2012, 28 ( 22 ) : 38-42. ( ZHANG Xianzhong. Present situation and storage strategy of initial rainwater pollution in Hefei old town [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(22) :38-42. (in Chinese) )

- [16] 樊文杰. 基于多模型的水环境远程模拟仿真技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [17] 张荣保. 典型平原河网地区污染负荷模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [18] 宋为威, 逢勇. 秦淮河流域控源截污与生态补水联合效应研究 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(1): 31-39. (SONG Weiwei, PANG Yong. Joint effect of pollution source interception and ecological water replenishment in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(1): 31-39. (in Chinese))
- [19] 王欢, 逢勇, 卫朴, 等. 不同降雨条件下内秦淮河引水方案优化 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 89-93. (WANG Huan, PANG Yong, WEI Pu, et al. Optimization of diversion scheme for the Inner Qinhuai River under different rainfall conditions [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 89-93. (in Chinese))
- [20] 童朝锋, 岳亮亮, 郝嘉凌, 等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果 [J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 49-54. (TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 49-54. (in Chinese))
- [21] 熊鸿斌, 张斯思, 匡武, 等. 基于 MIKE11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1422-1432. (XIONG Hongbin, ZHANG Sisi, KUANG Wu, et al. Environment capacity of the Guohe River in the water transfer project from Yangtze River to Huaihe River based on a MIKE 11 model [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1422-1432. (in Chinese))
- [22] 李梓嘉, 董增川, 樊孔明, 等. MIKE11 模型在泗洪县城城区河网引水冲污工程中的应用 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 100-103. (LI Zijia, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of MIKE11 model in water diversion and flushing pollutants of urban river network in Sihong City [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 100-103. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-12-11 编辑: 王芳)

(上接第 68 页)

- [8] 宋亚霖, 杜新强, 刘文娜, 等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验 [J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 56-59. (SONG Yalin, DU Xinqiang, LIU Wenna, et al. Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 56-59. (in Chinese))
- [9] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨 [J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))
- [10] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))
- [11] FLETCHER T, DUNCAN H, POELSMA P. Stormwater flow and quality and the effectiveness of non-proprietary stormwater treatment measures: a review and gap analysis [R]. Canberra: CRC for Catchment Hydrology, 2004.
- [12] WILSON S, NEWMAN A P, PUEHMEIER T, et al. Performance of an oil interceptor incorporated into a pervious pavement [J]. ICE Proceedings: Engineering Sustainability, 2003, 156(1): 51-58.
- [13] DIERKES C, KUHLMANN L, KANDASAMY J. Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements [C] // Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Portland: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-13.
- [14] 赵现勇, 程方, 张杏娟, 等. 不同结构透水路面对雨水径流污染物的削减作用 [J]. 天津城市建设学院学报, 2012, 16(4): 280-285. (ZHAO Xianyong, CHENG Fang, ZHANG Xingjuan, et al. The effect of different structure permeable pavement on the reduction of rainwater runoff pollutants [J]. Journal of Tianjin Urban Construction College, 2012, 16(4): 280-285. (in Chinese))
- [15] 陈莎, 陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 13-19. (in Chinese))
- [16] 杨秋侠, 晁昕逸. 基于复杂网络方法的既有雨水管段脆弱性判定 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 27-33. (YANG Qiuxia, CHAO Xinyi. Vulnerability assessment of existing storm sewer sections based on complex network method [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 27-33. (in Chinese))
- [17] 张玉玉. 高效渗透减排透水铺装对径流的控制研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.

(收稿日期: 2018-11-20 编辑: 熊水斌)