

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.014

# 基于正交分析的河道水质达标边界条件研究

杨楠<sup>1,2</sup>, 张永森<sup>1,2</sup>, 张书晴<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 周正印<sup>1,2</sup>

(1. 天津市市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392; 2. 天津市基础设施耐久性企业重点实验室, 天津 300392)

**摘要:** 河道水质达标的绩效考核是黑臭水体治理工程中的重要考核内容, 制定科学、合理的水质达标边界条件是项目能够顺利推进、运维通过考核的关键。以西南某现状城区河道治理工程为研究对象, 采用水动力水质耦合数学模型, 基于正交分析法研究了降雨量、截流量、上游来水量对河道水质达标的影响程度, 得到雨后河道水质达标的最佳因素水平组合。并通过校核分析, 确定了河道水质达标的合理边界条件和工程规模。正交分析方法的运用具有科学简便、分析全面、结果准确的特点。

**关键词:** 河道水质; 绩效考核; 多因素分析; 正交分析; 数学模型

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0082-06

## Boundary Conditions of River Water Quality to Meet Surface Water Standard Based on Orthogonal Analysis

YANG Nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-sen<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-qing<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>,  
ZHOU Zheng-yin<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300392, China)

**Abstract:** River water quality to meet surface water standard is an important assessment content in black and odorous water treatment projects. The establishment of scientific and appropriate boundary conditions for water quality to meet the surface water standard is the key to the smooth promotion of the project and passing the assessment. Influence of precipitation, interception and upstream inflow on water quality of a river improvement project in an urban area in Southwestern China was analyzed by using hydrodynamic coupled mathematical model and orthogonal analysis method, and the optimal factor combinations for river water quality to meet the surface water standard after precipitation was obtained. Reasonable boundary conditions and project scale for river water quality to meet the surface water standard were determined through checking and analyzing. The application of orthogonal analysis method has the advantages of simplicity, comprehensive analysis and accurate results.

**Key words:** river water quality; performance assessment; multivariate analysis; orthogonal analysis; mathematical model

2015 年国务院正式印发《水污染防治行动计划》(以下简称《水十条》),《水十条》要求到 2020

基金项目: 天津市交通运输科技发展计划项目(交委 2017B-38)

年地级及以上城市建成区黑臭水体数量均控制在10%以内,2030年城市建成区黑臭水体总体得到消除。城市黑臭水体治理成为了国家重点关注的工作,应运而生了众多黑臭水体治理工程。由于此类工程规模大、资金需求量大,因此后期运维考核尤为关键,其中重要的考核指标就是对河道水质达标的绩效考核。在工程实践中明确一个科学、合理的水质考核边界条件是此类项目能够顺利推进、运维通过考核的关键。

近年来基于城市河道水动力水质耦合模型的研究已经广泛应用在河道水质分析中,由于影响水质的因素较多,逐个因素全面分析工作量巨大,在工程实践中往往都是只分析不同截流量条件下的水质达标情况,不进行多因素综合分析。这样的水质达标边界条件单一,不能客观体现造成河道水质变化的各个影响因素,在工程实践中难以应对复杂的实际环境,不利于项目的绩效考核。笔者以西南地区某现状城区河道治理工程为例,基于数学模型工具,采用正交分析法对河道水质达标的边界条件进行系统的多因素分析。

## 1 研究区域

西南地区某现状城区河道治理长度约10 km,河道上游为人工水库,中下游横穿现状城区。目前城区全域基本为合流制地区,管道汇水面积534.42 hm<sup>2</sup>,全流域面积约12 km<sup>2</sup>,平均污水量为 $2.25 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。现状河道上游人工水库的来水水质稳定且水质较好,为地表水Ⅱ类水。进入城区后水质逐渐变差,特别是雨后由于合流制溢流污染及初期雨水污染的叠加效应,即河道水质变差的主要问题在于城市污染物进入河道。本工程需要通过工程措施使城区内河道水质主要指标(COD、氨氮、总磷)恢复到Ⅲ类水标准,通过对影响城区河道水质的多因素分析,得出水质恢复的合理边界条件并确定工程内容及规模。

## 2 河道水质达标的影响因素分析

现状城区给排水管网及城市开发建设已经基本完成,造成城区河道水质恶化的影响因素有城市点源污染、面源污染和内源污染等。根据各地工程实践,内源污染一般通过河道清淤能够短时间内解决,而点源污染和面源污染治理绝非一蹴而就。特别是在老城区合流制或混接分流制条件下,需要实施管道修复、雨污分流改造才能改善污染物入河情况。

由于是现状老城区,施工难度大、周期长,改造必须是一个循序渐进的过程<sup>[1]</sup>。雨季雨水夹带着管道内的污染物溢流进入河道,对河道水质污染严重,虽然通过河道水体的流动及自净能力会对污染物有一定的降解作用,但是其有限的自净能力难以使水质符合较高的水质标准。因此通过设置规模合理的沿河截流措施是对点源、面源污染进行控制的核心工作之一<sup>[2]</sup>。

当河道底部多年沉积的营养物质达到一定量后会逐渐向水体再次释放,内源污染是城区河道污染源之一。本工程伴随着河道拓宽及堤岸建设,河道底部的污染物将一并被去除,因此内源污染不再作为影响河道水质的因素。

降雨带来的雨水径流对汇水面上污染物起到了淋洗、冲刷和输送作用,是导致溢流污染的重要原因。降雨过程中,径流污染物浓度出现在降雨历时的某一时刻而不是初期<sup>[3]</sup>,在不同降雨强度下,污染物浓度曲线存在较大差异。因此需要分析不同降雨强度下污染物的排放规律,从而为后续河道水质达标论证打下基础。

流水不腐,水体流动是保障河流生态系统健康的重要前提。本工程河道上游来水水质良好,其对城区内雨后受污染的河道水体起到稀释作用,但是我国水资源情况不容乐观,60%以上的城市受到水资源缺乏的影响,水资源的匮乏已成为影响经济发展的首要障碍之一,将优质的上游来水作为提高城市河道水质的主要措施并不符合《水十条》中关于“全面控制污染物排放”的规定。因此需根据河道天然水文节律,本着节约水资源的前提来确定河道基本的生态流量<sup>[4]</sup>。

综上所述,本研究选择截流量、降雨量和河道上游来水量作为自变量,雨后河道水质恢复时间作为因变量,通过对自变量和因变量的多因素分析,得出相对准确的城区河道水质达标的边界条件。

## 3 水质达标论证技术路线

影响河道水质的因素较多,因此河道水质论证分析属于典型的多因素分析。当影响因素 $\geq 3$ 个时,由于水质分析需要采用数学模型法,如果选择全面分析,则因分析周期长、计算数据量大而难以满足工程设计周期的需要。正交分析是一种研究多因素多水平的分析方法,可根据因素数、水平数以及是否具有交互作用等需求查找相应的正交表,再依托正

交表的正交性从全局情况中挑选出部分有代表性的点进行分析,可以实现以最少的分析次数达到与大

量、全面分析等效的结果。整个水质达标论证分析技术路线详见图 1。

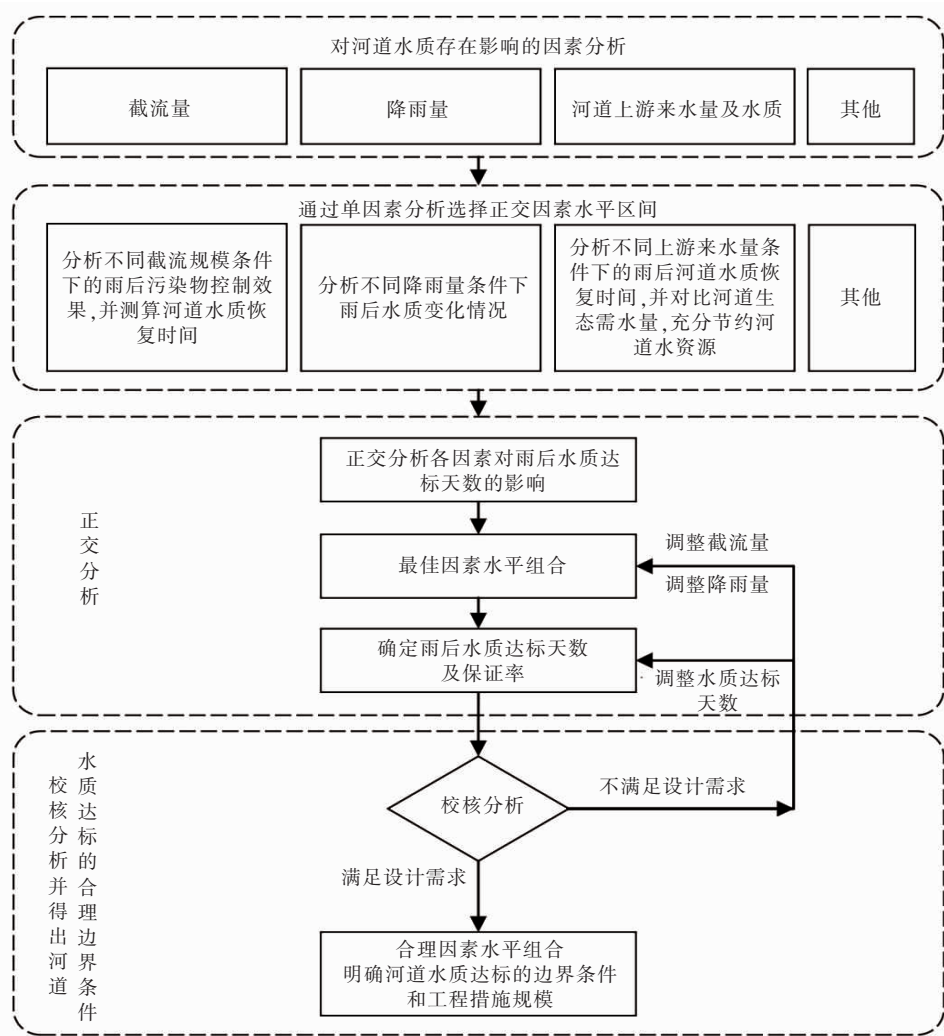


图 1 基于正交分析的水质达标论证方法技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of water quality standard demonstration method based on orthogonal analysis

整个技术路线可归纳为四个部分:①明确对河道水质存在影响的因素。②通过单因素分析确定影响因素的主要水平区间。每个因素变化对结果影响的规律不同,需要在固定其他因素变量的情况下,逐个分析每个单因素的变化对雨后水质的影响。③通过正交分析明确各影响因素对河道水质达标的影响程度,得出最佳因素水平组合,确定雨后水质达标的天数和全年达标保证率。④对最佳因素水平组合的各单项因素进行校核分析,常见需要校核的指标有生态需水量、造价等。如果所需上游来水量大于生态需水量或工程造价超过了项目预期,应先调整组合模式,延长雨后水质达标的天数或降低全年达标

保证率,最终获得河道水质达标的合理边界条件和工程规模。

## 4 河道水质达标论证分析

### 4.1 数学模型的构建

为了相对准确地分析河道的水质情况,通过构建数学模型对地表污染产生情况、河道水动力及水质变化情况进行模拟分析。

#### 4.1.1 陆域产流产污特征模型分析

基于研究区域的高分辨率卫星影像图,通过地理信息系统(GIS)识别解析下垫面。图 2 为汇水区域下垫面解析结果。该下垫面共划分 222 个子汇水区,概化 321 段排水管网,设置 207 个节点、45 个排

出口。通过 SWMM 地表产流模型、汇流模型、管道汇流过程模型,分析不同降雨强度下夹带的污染物在地表流行的过程,得出对应的排口流量过程线和污染物浓度变化情况。

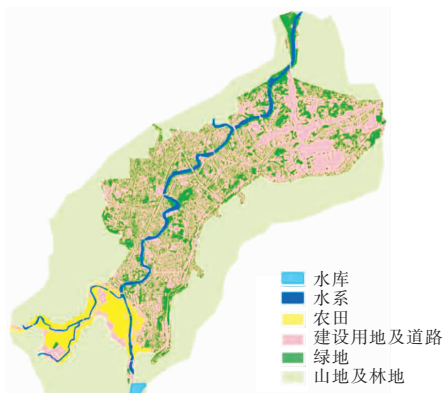


图2 汇水区域下垫面解析结果

Fig. 2 Analytical results of underlying surface of catchment area

#### 4.1.2 河道水动力水质耦合模型分析

河网概化主要涉及主河道和支流,对中心城区的河道适当进行加密处理,以河道支流汇入前后为计算点,最终将整体河网概化为5个河段和7个计算断面。

河网水动力方程采用基于圣维南方程组的一维非恒定流方程,河网水质方程采用一维水体水质模型。模型中主要参数为污染物衰减系数,根据相关研究成果<sup>[5-6]</sup>,COD 衰减系数为  $0.009 \sim 0.47 \text{ d}^{-1}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  衰减系数为  $0.105 \sim 0.350 \text{ d}^{-1}$ , TP 衰减系数为  $0.056 \sim 0.573 \text{ d}^{-1}$ 。

本工程河道所在区域为丘陵地区,河道纵坡较大,水体流动性较好,据此选取 COD 的衰减系数为  $0.20 \text{ d}^{-1}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  衰减系数为  $0.18 \text{ d}^{-1}$ 、TP 衰减系数为  $0.15 \text{ d}^{-1}$ 。

### 4.2 单因素分析

采用数学模型法对影响河道水质的各因素进行逐个分析,确定各因素的主要水平区间。

#### 4.2.1 不同截流量单因素分析

以上游来水量为  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  与降雨量为  $56 \text{ mm}$  的工程情景为基准,借助数字模型分析不同截流量(4、6、8、10、12、14 mm)对河道水质状况的影响,结果如图3所示。可知,当截流量为4~12 mm时,水质改善效果最为明显。当截流量大于12 mm时,水质改善效果不显著。

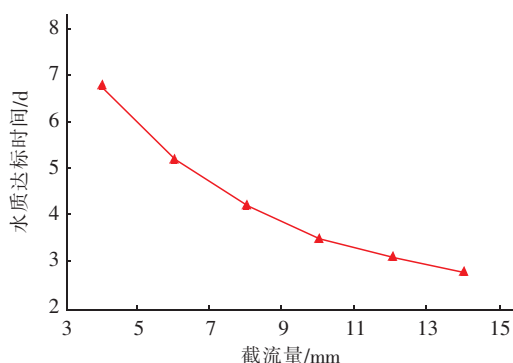


图3 截流量对河道水质达标时间的影响

Fig. 3 Influence of interception on the time to reach the standard of river water quality

#### 4.2.2 不同降雨量单因素分析

以上游来水量为  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  与截流量为  $6 \text{ mm}$  的工程情景为基准,借助数字模型分析不同降雨量(9、11、17、30、56、79 mm)对河道水质状况的影响,结果如图4所示。可知,当降雨量为11~56 mm时,随着降雨量的增大污染物进入河道的总量不断增大,雨后河道水质达标所需天数越来越长。当降雨量大于56 mm时,雨水所产生的稀释作用使得河道中污染物浓度有所降低,雨后河道水质达标所需天数有所变短。

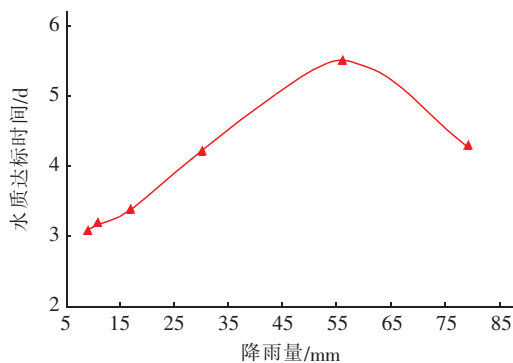


图4 降雨量对河道水质达标时间的影响

Fig. 4 Influence of precipitation on the time to reach the standard of river water quality

#### 4.2.3 不同上游来水量单因素分析

以降雨量为  $30 \text{ mm}$  与截流量为  $6 \text{ mm}$  的工程情景为基准,借助数字模型分析不同上游来水量( $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.8$ 、 $1.2$ 、 $1.5$ 、 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ )对河道水质的影响情况,结果如图5所示。从图5可以看出,在上游来水量为  $0.2 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  的条件下,水质改善的效果最为明显,当上游来水量大于  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  时,水质改善效果不显著。



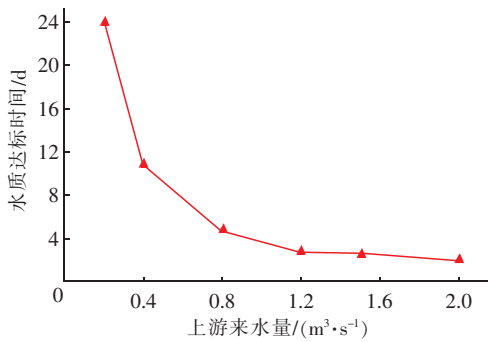


图 5 上游来水量对河道水质达标时间的影响

Fig. 5 Influence of upstream inflow on the time to reach the standard of river water quality

本工程上游来水水质良好,因此随着上游来水量的增大,势必有效改善水质达标时间。但是根据建设部和环保部印发的《城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》,需严控以恢复水动力为理由的各类调水冲污行为,因此确定科学合理的生态需水量是构建河流健康生态系统的边界条件。拟采用蒙大拿法<sup>[7]</sup>、保证率分析法和水量平衡法进行生态需水量分析,结果见表 1。

表 1 生态需水量计算结果

Tab. 1 Calculation results of ecological water demand

项 目		生态需水量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
蒙大拿法	基本生态环境需水量	0.80
	最大生态环境需水量	2.30
保证率分析法	基本生态环境需水量	0.42
	最大生态环境需水量	0.73
水量平衡法	维持水位稳定基本补水保障需水量	0.04
	允许水位波动补水需水量	0.18

根据上述不同方法下生态条件需水量的计算成果,本着节约水资源的原则,以保证河道维持最基本生态需求为目标,按照三种算法中基本生态需水量最大的蒙大拿法作为计算结果,从而确定日生态补水基本规模为  $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.3 正交分析

基于单因素河道水质达标天数的分析结果设计正交分析表,利用数学模型分析不同因素水平组合条件下河道水质达标的时间,结果如表 2 所示。通过正交分析结果可以看出,本工程上游来水量极差最大,因此对雨后水质恢复期影响最大,其次是截流量,最后是降雨量。根据影响程度的大小,最佳因素水平组合为降雨量 17 mm、截流量 6 mm、上游来水

量  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 2 正交分析结果

Tab. 2 Calculation results of orthogonal analysis

序列	因素			分析结果 水质达标 天数/d
	降雨量/ mm	截流量/ mm	上游来水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	
1	11	4	0.2	25
2	11	6	0.4	8.1
3	11	8	0.8	2.7
4	11	12	1.2	1.1
5	17	4	0.4	8.9
6	17	6	0.2	14
7	17	8	1.2	2.1
8	17	12	0.8	3.1
9	30	4	0.8	5.2
10	30	6	1.2	2.3
11	30	8	0.2	19.7
12	30	12	0.4	10
13	56	4	1.2	3.1
14	56	6	0.8	5.5
15	56	8	0.4	11
16	56	12	0.2	20
$K_{N1}$	9.225	10.550	19.675	
$K_{N2}$	7.025	7.475	9.500	
$K_{N3}$	9.300	8.875	4.125	
$K_{N4}$	9.900	8.550	2.150	
极差	2.875	3.075	17.525	

#### 4.4 校核分析并得出水质达标的合理边界条件

根据正交分析得出了水质达标时间最短的最佳因素水平组合,但是还需要经过参数校核才能得到最为合理的因素水平组合。根据单因素分析结果可知,为了节约水资源,日生态补水基本规模为  $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最佳组合中上游来水量已经大于了生态补水量,因此需要将上游来水量降低标准调整为  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过正交分析可知,降雨量对水质达标天数影响最小,因此为了调高整个分析的全年达标率,调高降雨量参数至最高等级,即 56 mm。截流量为 6 mm 的工程造价满足工程预期,为最佳选择结果,保持不变。通过对三个参数的校核分析,合理因素组合为降雨量 56 mm、截流量 6 mm、上游来水量  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。基于此边界条件,利用模型分析可以得出,氨氮达标( $1 \text{ mg/L}$ )需要 3 d,COD 和总磷达标( $20, 0.2 \text{ mg/L}$ )需要 5 d,如图 6 所示。由于降雨量为 56 mm 是最不利条件下的降雨量,因此可以认为降雨量不需要再计入本工程水质达标的边界条件,从而本工

程水质达标的合理边界条件为截流量 6 mm、上游来水量  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此条件下河道水质在降雨后 5 d 可以达标。

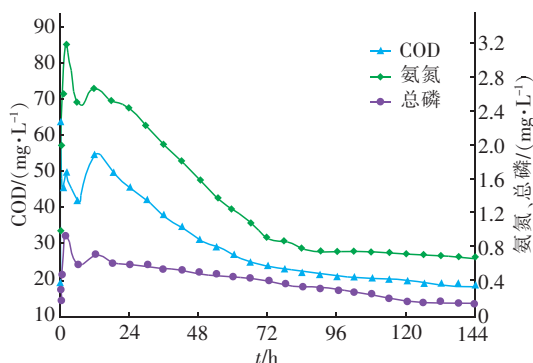


图6 合理边界条件下雨后河道水质恢复情况

Fig. 6 River water quality recovery after rain under reasonable boundary conditions

## 5 结论

现状城区河道水质达标分析是一个多因素分析过程,常见的河道水质影响因素有降雨量、截流量、上游来水量及水质等。采用正交分析的多因素分析方法可以有效降低分析次数、减少工作量,并全面分析各因素的影响程度,得出最佳因素水平组合。需对最佳因素水平组合的各单项因素进行校核分析,常见需要校核的指标有生态需水量、工程造价等。校核后的因素组合即为本河道水质达标的合理边界条件。基于多因素的合理边界条件是河道水质达标的前提条件,也是此类项目后期河道运维水质考核的基础要素。

## 参考文献:

- [1] 杨楠,张栋俊,张练,等. 平原老城区污水处理提质增效实施策略分析[J]. 给水排水,2020,46(7):22-26. YANG Nan, ZHANG Dongjun, ZHANG Lian, et al. Analysis of implementation strategies for improving wastewater treatment quality and effectiveness in the old urban plain area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020,46(7):22-26(in Chinese).
- [2] 赵明,孙坚. 污水截流系统问题分析及改良策略[J]. 中国给水排水,2020,36(20):100-104. ZHAO Ming, SUN Jian. Problem analysis and strategies for improvement of sewage interception system[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (20): 100 - 104 (in Chinese).
- [3] 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,2007,23(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, 23(6):1-5(in Chinese).
- [4] 葛金金,彭文启,张汶海,等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法[J]. 南水北调与水利科技, 2019,17(2):75-80. GE Jinjin, PENG Wenqi, ZHANG Wenhai, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2):75-80(in Chinese).
- [5] 冯帅,李叙勇,邓建才. 太湖流域上游平原河网污染物综合衰减系数的测定[J]. 环境科学学报,2017,37(3):878-887. FENG Shuai, LI Xuyong, DENG Jiancai. Determination of comprehensive pollutants attenuation coefficients of the plain river networks in the upper reaches of Lake Taihu Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(3): 878 - 887 (in Chinese).
- [6] 郭儒,李宇斌,富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析[J]. 气象与环境学报,2008,24(1):56-59. GUO Ru, LI Yubin, FU Guo. Controlling factors of degradation coefficient on organic pollutant in river[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(1): 56 - 59 (in Chinese).
- [7] 徐志侠,董增川,周健康,等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. 水利水电技术,2003,34(11):15-17. XU Zhixia, DONG Zengchuan, ZHOU Jiankang, et al. The Montata method for ecological water requirements and its application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(11): 15 - 17 (in Chinese).

作者简介:杨楠(1985-),男,安徽合肥人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,主要从事市政给排水设计工作。

E-mail: yangnan022@qq.com

收稿日期:2021-04-22

修回日期:2021-06-29

(编辑:任莹莹)