

小清河(济南段)水质污染现状调查及研究

滕少香¹, 张水燕², 王全勇¹, 丁程程², 李珊¹, 韩雯雯¹

(1. 中国城市建设研究院有限公司 山东分院, 山东 济南 250100; 2. 济南市环境监测中心站, 山东 济南 250100)

摘要: 通过对小清河(济南段)流域内干、支流水量及水质的实地排查和检测,分析了小清河(济南段)水质污染规律,并采用 MIKE11 软件对小清河(济南段)进行了河道水动力和水质模拟,构建了小清河流域的降雨径流模型(NAM)、一维水动力模型(HD)和对流扩散模型(AD)。通过模型运算分析了小清河各类污染源的污染权重值,结果如下:小清河现状水源(污染源)中,污染贡献程度排序为污水厂(站)尾水(34.0%)>雨水径流(33.0%)>直排污水(29.1%);水量贡献程度排序为污水厂(站)尾水(58.8%)>雨水径流(26.1%)>直排污水(5.5%);削减难易程度排序为直排污水>污水厂(站)尾水>雨水径流。

关键词: 小清河(济南段); 水质污染; MIKE11 软件; 污染权重

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0063-06

Investigation of Water Pollution in Jinan Section of the Xiaoqinghe River

TENG Shao-xiang¹, ZHANG Shui-yan², WANG Quan-yong¹, DING Cheng-cheng²,
LI Shan¹, HAN Wen-wen¹

(1. Shandong Branch, China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Jinan 250100, China; 2. Jinan Environmental Monitoring Center, Jinan 250100, China)

Abstract: The pattern of water pollution in Jinan section of the Xiaoqinghe River was analyzed through the field investigation of water quantity and water quality. MIKE11 software was used to simulate the hydrodynamic and water quality of Xiaoqinghe River, a rainfall-runoff mode, a one-dimensional hydrodynamic model, and an advection-dispersion model were built. The pollution weights of various pollution sources in Xiaoqinghe River were analyzed. The results showed that in the current pollution sources of Xiaoqinghe River, the pollution contribution ranked as wastewater treatment plant (station) effluent (34.0%)>rainfall runoff (33.0%)>wastewater discharge (29.1%); and the quantity contribution ranked as wastewater treatment plant (station) effluent (58.8%)>rainfall runoff (26.1%)>wastewater discharge (5.5%). The order of reduction difficulty was wastewater discharge > wastewater treatment plant (station) effluent > rainfall runoff.

Key words: Jinan section of the Xiaoqinghe River; water quality pollution; MIKE11 software; pollution weight

小清河上游起于济南市睦里庄,自西向东与黄河平行横贯济南市,流经济南市5区,从辛丰庄出济

南界,全长为70.3 km,流域面积为2 803 km²。小清河是济南市最主要的排水、防洪、排涝河道,也是济南各污水厂及污水站的最终受纳水体。经过多年治理,小清河水质环境、景观、水利基础设施建设和水质

都得到提升,已成为济南城区北部主要景观河道,对促进区域经济发展、改善人居环境起到重要作用。

1 水质污染现状评价

2015 年小清河各断面水质评价见表1。

表1 2015 年小清河断面水质评价

Tab.1 Evaluation of water quality of Xiaqinghe River in 2015

位 置	功能区类别	目标水质	实际水质	主要污染指标(超标倍数)	水质状况
睦里庄断面	源头水质保护区	Ⅲ类	Ⅳ类	氨氮(0.22)、总磷(0.03)	轻度污染
还乡店断面	一般景观用水功能区	V类	劣V类	氨氮(5.87)、总磷(2.75)	重度污染
大码头断面	农业用水功能区	V类	劣V类	氨氮(4.38)、总磷(2.42)、COD(0.08)	重度污染
辛丰庄断面	农业用水功能区	V类	劣V类	氨氮(3.23)、总磷(2.32)、COD(0.27)	重度污染

2015 年,小清河睦里庄断面水质为Ⅳ类,部分指标未达到功能区用水水质标准,主要污染物为氨氮、总磷,水质状况为轻度污染。

还乡店断面水质为劣V类,部分指标未达到一般景观用水功能区标准,主要污染指标为氨氮、总磷,水质状况为重度污染。

大码头断面和辛丰庄断面水质均为劣V类,部分指标未达到农业用水功能区标准,主要污染物为氨氮、总磷、COD,水质状况为重度污染。

2011 年—2015 年小清河监测断面主要污染物浓度变化对比见表2。2011 年—2015 年,4 个断面的 COD 浓度均达到了功能区用水水质标准,浓度稍有波动;睦里庄断面氨氮浓度逐年上升,2015 年超过功能区用水水质标准,还乡店和大码头断面氨氮浓度在2013 年之前上升、之后下降,辛丰庄断面氨氮浓度有所波动;睦里庄断面总磷浓度有所波动,2015 年稍有超标,大码头和还乡店断面总磷浓度变化趋势一致,辛丰庄断面总磷浓度逐年上升。

表2 2011 年—2015 年小清河监测断面主要污染物浓度变化

Tab.2 Variations of main pollutants concentration of Xiaqinghe River in 2011 - 2015

项 目	睦里庄断面	还乡店断面	大码头断面	辛丰庄断面
COD	监测值/(mg·L ⁻¹)	10.6 ~ 14.3	24.0 ~ 26.9	21.6 ~ 26.5
	超标率/%	—	0 ~ 8.3	—
	2015 年与 2010 年相比/%	-14.4	-41.5	-51.6
BOD ₅	监测值/(mg·L ⁻¹)	2.00 ~ 2.26	3.05 ~ 4.88	2.60 ~ 4.38
	超标率/%	—	—	—
	2015 年与 2010 年相比/%	10.8	-50.2	-50.7
氨氮	监测值/(mg·L ⁻¹)	0.393 ~ 1.220	6.09 ~ 8.43	5.38 ~ 7.56
	超标率/%	8.3 ~ 41.7	91.7 ~ 100	91.7 ~ 100
	2015 年与 2010 年相比/%	449.5	-15.3	-43.2
总磷	监测值/(mg·L ⁻¹)	0.105 ~ 0.206	0.466 ~ 0.818	0.407 ~ 0.724
	超标率/%	8.3 ~ 41.7	50 ~ 91.7	50 ~ 100
	2015 年与 2010 年相比/%	186.1	24.3	-7.8
石油类	监测值/(mg·L ⁻¹)	0.04 ~ 0.05	0.05 ~ 0.16	0.06 ~ 0.16
	超标率/%	0 ~ 8.3	—	—
	2015 年与 2010 年相比/%	—	20	40

2 污染规律分析

2.1 污染物沿程变化规律

2015 年,小清河睦里庄断面、还乡店断面、大码头断面和辛丰庄断面主要污染物沿程变化趋势见图1。可以看出,还乡店断面之后,COD 浓度变化不大,氨氮、总磷浓度呈下降趋势,原因主要是水体的

自净能力及洁净支流的稀释。

2015 年小清河4 个断面——睦里庄、还乡店、大码头、辛丰庄的综合污染指数分别为0.45、1.17、1.01、0.88,分担率分别为12.8%、33.3%、28.8%、25.1%。可以看出,对小清河污染指标贡献最大的断面为还乡店,其次为大码头,这两个断面的污染物

浓度以及污染物种类也与其接纳市区生活污水和工业废水的情况相一致。

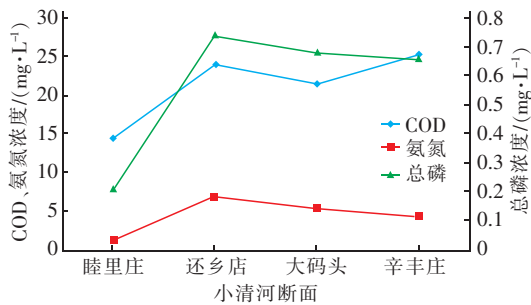
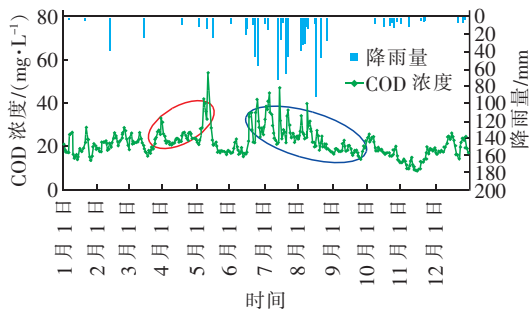


图1 2015年小清河主要污染物浓度沿程变化

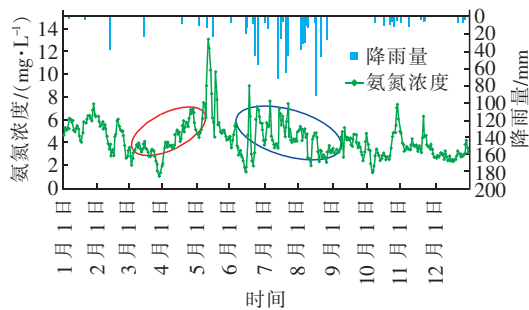
Fig. 1 Variation of main pollutants concentration along the Xiaoqinghe River in 2015

2.2 污染物浓度与降雨量的关系

选取2016年度降雨资料与辛丰庄断面水质监测数据,考察污染物浓度(COD、氨氮)与降雨量的关系,见图2。



a. COD浓度与降雨量的关系



b. 氨氮浓度与降雨量的关系

图2 2016年辛丰庄断面污染物浓度与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between pollutants concentration and rainfall at Xinfengzhuang section in 2016

从全年来看,4月—5月的降雨通常伴随着河道水质的恶化,分析其原因:一是冬季降水较少,雨水管渠累积较多的污染物,这部分污染物随春季雨水集中入河,造成河道水质恶化;另外,济南市目前还存在部分污水直排现象,冬季生活污水进入河道,一

些含氮、磷有机污染物在污泥底层被降解为氨氮、溶解磷等,初春气温回升,这些污染物随水的对流由底泥中溶出而扩散到水中,造成河道水质恶化。

从单场降雨来看,降雨后水质波动很大,降雨当天(或第2天)通常水质变差。对济南市路面的径流水质进行了取样和检测。结果显示,车流量大、人口密集的老城区市政道路地表径流污染最为严重,初期雨水的COD浓度可达140~200 mg/L;车流量和人口密度适中的高新区市政道路地表径流污染较轻,初期雨水的COD为70 mg/L左右;车辆较少的办公园区道路径流污染最轻,初期雨水的COD为50 mg/L左右。污染在降雨初期最为严重,随着降雨历时的延长,COD浓度大幅下降,降雨60 min后趋于平稳,在30 mg/L左右。根据径流水质检测结果,推测雨水径流携带的污染物是降雨时小清河水质波动的因素之一。另外,考虑到小清河的实际情况,部分黑臭水体晴天积蓄的污水在降雨时随雨水下泄至小清河,也是造成其水质波动的重要原因。

3 污染权重分析

采用MIKE11软件对小清河(济南段)进行河道水动力和水质模拟,构建了小清河(济南段)降雨径流模型(NAM)、一维水动力模型(HD)和对流扩散模型(AD)。

3.1 模型构建

3.1.1 研究范围

考虑到本研究的目的,小清河(济南段)一维水动力模型的模拟范围包括小清河从上游睦里庄闸(桩号0+000)至下游辛丰庄闸(桩号73+434)及其支流,包括腊山河、兴济河、西工商河、东工商河、西泺河、东泺河、柳行河、全福河、大辛石河、小汉峪沟、龙脊河、韩仓河、刘公河、巨野河等。模型的上游边界设置在睦里庄断面、下游边界设置在辛丰庄断面。HD模型上游边界采用流量过程线(NAM模型的计算结果),下游边界采用水位过程线。

3.1.2 NAM模型、HD模型的构建

为提高模型的可用性,将研究区域划分为多个子流域并构建每个子流域的降雨径流模型,子流域划分及雨量站取用如下:南太平河的面积22.4 km²,雨量站为刘家庄、吴家铺;虹吸干河的面积14.03 km²,雨量站为刘家庄、吴家铺;北太平河的面积40.9 km²,雨量站为吴家铺;腊山河的面积18.22 km²,雨量站为吴家铺、东红庙;兴济河的面积

为 76.01 km²,雨量站为邵而、东红庙、兴隆;西工商河的面积为 8.33 km²,雨量站为热电公司;东工商河的面积为 5.48 km²,雨量站为天桥区防办;西泺河的面积为 31.93 km²,雨量站为泉城广场;东泺河的面积为 6.35 km²,雨量站为泉城广场;柳行河的面积为 18.21 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;全福河的面积为 24.66 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;大辛石河(含张马河)的面积为 88.33 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;小汉峪沟的面积为 31.08 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;龙脊河的面积为 47.68 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;韩仓河的面积为 77.81 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;刘公河(包括土河)的面积为 101.03 km²,雨量站为燕子山、黄台桥;巨野河(包括杨家石河)的面积为 332 km²,雨量站为燕子山、黄台桥。

各子流域中,兴济河、西泺河、全福河和东工商河子流域设有水文站,可通过实测出口流量资料对 NAM 模型参数进行率定,其他子流域缺乏实测流量资料,模型参数的选取参考上述子流域,并通过与 HD 模型耦合进行联合率定。

根据 NAM 模型与 HD 模型的率定结果,对 2016 年 8 月 4 日—22 日辛丰庄断面日均流量进行预测,并与实测流量进行对比验证,结果见图 3。8 月 4 日—22 日期间,实测径流量为 100 880 640.4 m³,模拟径流量为 94 708 656.98 m³,误差仅为 -6.118%,符合《水文情报预报规范》的要求,预测结果可靠。模型中洪峰流量产生的时间与实测值相比略有提前或滞后,这可能是由河道支流上闸门的启闭造成的。

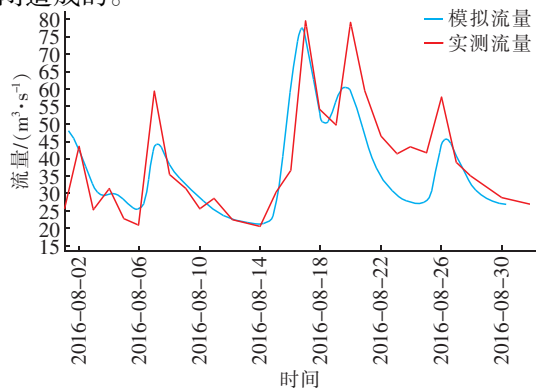


图3 2016年8月辛丰庄断面日均流量预测及实测结果

Fig.3 Simulation and measurement results of daily average flow at Xinfengzhuang section in August 2016

3.1.3 AD 模型构建

根据 HD 模型产生的水动力条件,构建小清河(济南段)对流扩散模型,对水体中可溶性物质(以 COD 为例)的对流和扩散过程进行模拟。

小清河是济南市最主要的排水、防洪、排涝河道,同时也是济南市各污水厂及污水站的最终受纳水体。小清河(济南段)污染源主要有污水厂(站)尾水、雨水、直排污水及泉水排泄。

① 泉水排泄

济南市泉水通过大明湖汇集后排入小清河。4 大泉群的喷涌量与趵突泉的水位呈线性正相关关系,本研究根据趵突泉水位折算泉水喷涌总量。泉水的 COD 和氨氮浓度相对固定,取实测均值,平均浓度分别为 15 和 0.12 mg/L。

② 直排污水

济南市目前还存在部分污水直排现象,直排污水位置、流量、污染物浓度采用济南市环保局巡查检测数据,研究范围内污水直排点共计 20 处,污水直排量约为 9.1×10^4 m³/d, COD 为 114 ~ 428 mg/L。

③ 雨水

雨水径流量数据采用 NAM 模型的计算结果,径流中污染物浓度采用径流事件平均浓度(EMC)。根据 2017 年 8 月 28 日、8 月 29 日、9 月 26 日、10 月 9 日降雨径流水质检测结果计算 EMC 值。

$$EMC = \frac{\sum_{n=1}^N c_n q_n}{\sum_{n=1}^N q_n} \quad (1)$$

式中: c_n 为第 n 个时间段所测污染物浓度,mg/L; q_n 为第 n 个时间段的径流量,一般按两个样品采集时间间隔之中间值划分流量区间,m³; N 为时间分段数^[1]。

计算得不同降雨条件下 COD 的 EMC 值为 35 ~ 49 mg/L,模型选用 50 mg/L。

④ 污水厂(站)尾水排放

根据现场调研,以小清河为受纳水体的污水处理厂共有 11 座、污水处理站共有 21 座。污水处理厂出水水质基本执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准;污水站出水水质标准则是 COD ≤ 45 mg/L、氨氮 ≤ 4.5 mg/L,其余指标执行一级 A 标准。结合各污水处理厂(站)的建设及运行情况,去除停产、间歇运行、水量较少的污水处理厂(站),列入 AD 模型点源边界的共有 9 座污水处理厂和 11 座污水处理站,见表 3。

其中,光大水务(济南)有限公司 5 座污水处理厂的尾水排放量及污染物浓度采用 2016 年每日实测值,其他污水处理厂及污水处理站尾水排放量及污染物浓度采用 2016 年年均值。

表 3 污水处理厂(站)点源污染统计
Tab.3 WWTPs in the research area

项 目	平均污水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	出水 COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
光大水务一厂	61 636 ~ 464 216	10.2 ~ 36.2
光大水务二厂	152 808 ~ 281 784	10.1 ~ 44.3
光大水务三厂	133 149 ~ 262 926	13.2 ~ 33.0
光大水务四厂	27 521 ~ 71 982	10.1 ~ 33.8
光大水务大金污水处理厂	22 109 ~ 61 196	10.1 ~ 19.4
济南临港开发区污水处理厂	21 920	18.1
济南中科成水质净化厂	48 000	20
巨野河污水处理厂(一期)	6 500	30
济南梅兰德水质净化厂	2 627	20
污水站 11 座	53 660	31.5

⑤ 模型参数

AD 模型需设置的参数主要有纵向扩散系数和衰减系数。纵向扩散作用主要是由于天然河流中横断面上流速不均匀造成的。小清河各河段纵向扩散系数 D 值如下^[2]: D_1 (睦里庄—匡山) = $1.11 \text{ m}^2/\text{s}$; D_2 (匡山—井家村) = $2.62 \text{ m}^2/\text{s}$; D_3 (井家村—辛丰庄桥) = $9.39 \text{ m}^2/\text{s}$ 。衰减系数反映污染物降解速率的快慢。结合 2016 年小清河各断面水质监测及水文数据,计算污染物衰减系数。计算公式为^[3]:

$$K = 86.4 (\ln c_1 - \ln c_2) v / L \tag{2}$$

式中: K 为河流综合衰减系数, d^{-1} ; c_1 、 c_2 分别为河段上、下断面的污染物浓度, mg/L ; v 为河段平均流速, m/s ; L 为河段上、下断面间距, km 。

计算得 COD 的衰减系数为 $0.06 \sim 0.47 \text{ d}^{-1}$, 平均衰减系数为 0.25 d^{-1} 。

3.2 结果分析

2016 年度小清河辛丰庄断面 COD 浓度模拟结果见图 4。根据 2016 年水质模拟数据,分析各类排水对小清河污染物的贡献程度,结果见表 4。各类污染源的水量贡献率、COD 贡献率随时间的变化见图 5。

经计算,COD 月均浓度模拟值及实测值的偏差如下:1 月为 10.8%,2 月为 3.9%,3 月为 -0.4%,4 月为 -1.4%,5 月为 -6.9%,6 月为 -1.9%,7 月为 -18.8%,8 月为 15.2%,9 月为 20.5%,10 月为 14.8%,11 月为 11.1%,12 月为 -24%。大部分月份模拟浓度与实测浓度的偏差在 20% 以内,COD 浓度预测数据较好,模型可靠。

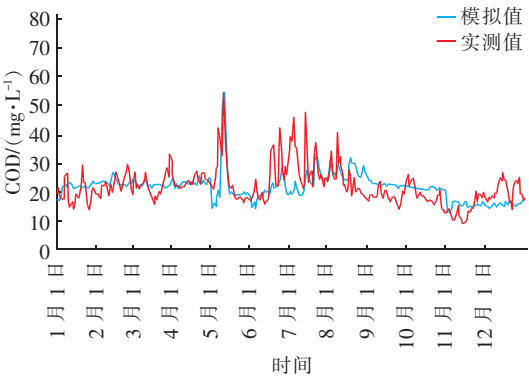


图 4 2016 年辛丰庄断面 COD 浓度模拟结果

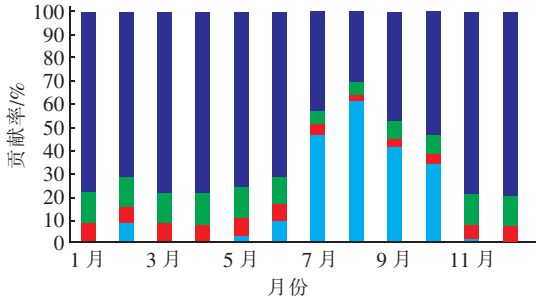
Fig.4 Simulation results of COD at the Xinfengzhuang section in 2016

表 4 小清河污染物来源及各自贡献程度

Tab.4 Weight of pollution sources in the Xiaoqinghe River

项 目	水量/ 10^4 m^3	水量贡 献率/%	污染物贡 献量/ 10^4 t	污染物贡 献率/%
雨水径流	15 694	26.1	0.73	33.0
直排污水	3 322	5.5	0.64	29.1
泉水 + 源头水	5 795	9.6	0.09	3.9
污水厂(站)尾水	35 403	58.8	0.75	34.0

■ 雨水 ■ 直排污水 ■ 泉水+源头水 ■ 污水厂(站)尾水



a. 不同月份水量贡献率

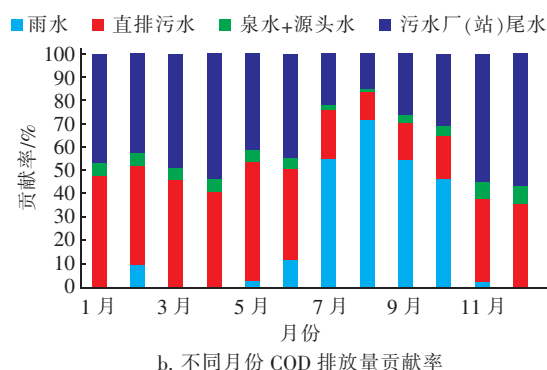


图5 不同月份污染物来源及各自贡献程度

Fig.5 Weight of pollution sources in different months

4 结论及建议

① 分析期内,小清河(济南段)各断面均未能达到功能区用水水质标准,主要污染指标为氨氮、总磷;小清河水质恶化主要发生在还乡店断面和大码头断面之前,污染源主要来自于济南市区各类污染物的排放。

② 降雨对小清河水质存在影响,从单场降雨来看,降雨后水质波动很大,降雨当天或第2天通常水质变差;从全年来看,雨季降雨频繁,虽水质波动,但整体趋势则是污染程度减轻。

③ 运用 MIKE11 软件的 NAM、HD、AD 模块构建小清河流域降雨径流模型、水动力模型和对流扩散水质模型。结果表明,小清河现状水源(污染源)中污染贡献程度为:污水厂(站)尾水(34.0%) > 雨水径流(33.0%) > 直排污水(29.1%);水量贡献程度为:污水厂(站)尾水(58.8%) > 雨水径流(26.1%) > 直排污水(5.5%);削减难易程度为:直排污水 > 污水厂(站)尾水 > 雨水径流。

综合考虑,小清河(济南段)水质保障及提升工程应首先解决直排污水的收集及处理;其次,推动济南市污水处理厂的提标改造,使出水水质优于地表水Ⅴ类水体;同时,结合济南市海绵城市试点建设区的不断扩大,通过下凹式绿地、植草沟、生物滞留设施等低影响开发措施,实现降雨径流污染的削减;另

外,应加强生态河道的建设,增强河道自净能力。

参考文献:

- [1] 何梦男,张劲,陈诚,等. 上海市淀北片降雨径流过程污染时空特性分析[J]. 环境科学学报,2018,38(2): 536-545.
He Mengnan, Zhang Jin, Chen Cheng, et al. Analysis of the temporal and spatial characteristics of rainfall-runoff pollution in Dianbei basin of Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 536-545 (in Chinese).
- [2] 潘再东. 小清河济南段水环境容量研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008.
Pan Zaidong. Research on Water Environment Capacity in Jinan Reach of Xiaoqing River[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2008 (in Chinese).
- [3] 张亚丽,申剑,史淑娟,等. 淮河流域污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测,2015,31(2): 64-67.
Zhang Yali, Shen Jian, Shi Shujuan, et al. Dynamic change of the river pollutions' composite degradation coefficient in Huaihe River's tributary [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(2): 64-67 (in Chinese).



作者简介:滕少香(1986-),女,山东济南人,硕士,工程师,从事市政给排水规划及设计工作。

E-mail: tengshaoliang@126.com

收稿日期:2019-03-21