

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.12

基于龙王庙断面水质达标的城南河流域水环境容量

瞿一清¹, 逢勇^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为保证南京市浦口区城南河龙王庙断面水质稳定达标,综合考虑水文、水质和污染源现状,对研究区域入城南河的污染源进行排污口概化,构建水环境数学模型,计算得到基于龙王庙断面水质达标的城南河水环境容量,以此与现状入河的污染物量比较,确定污染物的削减比例。结果表明:在保证龙王庙断面水质达标的情况下,城南河 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的水环境容量分别为 2 183 t/a、201 t/a 和 154 t/a,污染物削减率与水质超标率的差距在 20% 以内。

关键词:水环境容量;水质达标;城南河;龙王庙断面

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)05-0076-05

Water environmental capacity of Chengnan River Basin based on water quality standard of Longwangmiao Section

QU Yiqing¹, PANG Yong^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to ensure the water quality of Longwangmiao Section of Chengnan River in Pukou District of Nanjing City to reach the standard, considering the hydrology, water quality, and pollution source status, the pollution source of the Chengnan River into the study area was generalized and the water environment mathematical model was established. The water environmental capacity of Chengnan River was calculated based on the water quality of Longwangmiao Section, and the reduction ratio of pollutants was determined by comparing with the pollutant quantity entering the river. The results show that the environmental capacity of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, and TP is 2 183 t/a, 201 t/a, and 154 t/a, respectively, under the condition that the water quality of Longwangmiao Section reaches the standard. And the difference between pollutant reduction rate and water quality exceeding standard rate is less than 20%.

Key words: water environmental capacity; water quality standard; Chengnan River; Longwangmiao Section

目前应用较为普遍的水环境容量计算方法有 4 种:模型试错法^[1]、解析法^[2]、系统分析法^[3]和概率稀释模型法^[4]。周刚等^[5]以赣江下游水质指标 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为例,提出二维水环境模型,结合粒子群算法中 RPSM (repulsive particle swarm method)

非线性优化方法计算河流的水环境容量;张茜等^[6]通过建立二维水动力-水质模型模拟长荡湖风生环流场及污染物浓度场,基于水质响应系数利用线性规划法计算了长荡湖水环境容量;韩梓流等^[7]以京杭运河五牧断面水质达标为导向通过建立一维水

作者简介:瞿一清(1994-),女,硕士研究生,研究方向为环境规划与影响评价。E-mail: qyiqing@163.com

通信作者:逢勇,教授。E-mail: pangyonghhu@163.com

质水量模型对京杭运河的水环境容量进行研究;花月等^[8]从张家港河 3 个控制断面水质达标角度出发,通过构建张家港河一维稳态水环境数学模型,得出来水水质、污染源变化与控制断面水质的动态响应关系并计算张家港河水环境容量,进而确定整治区域各类污染物的削减比例;王雪等^[9]通过构建 MIKE11 一维非稳态数学模型开展秃尾河河流总量控制的研究;于雷等^[10]优化河流水环境容量传统一维计算方法,提出考虑设计河段水质达标比例、设计断面水质超标幅度和设计河段计算单元长度的计算方法,对广西左江的某河段进行示例计算分析。本研究针对南京市浦口区的主要入长江水体——城南河,为消除其劣 V 类水质并从严核定其纳污能力,对其水环境容量进行研究。

1 研究区域概况

城南河是南京市浦口区注入长江的主要小流域河之一,现在正处于水质恶化、水体黑臭化的阶段。城南河发源于老山南部,从江浦街道主城区穿城而过,呈“Y”状,东西两条支流在凤凰台汇聚后汇入长江,全长 8 km,流域汇水面积为 62.8 km²。龙王庙断面位于城南河河首,是城南河入江前的主要监测断面。城南河作为南京市主要入江支流,至 2017 年龙王庙断面水质需总体达到 V 类水质要求,其远期水功能区划执行 GB3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类水体标准。

1.1 城南河水文情况

根据南京市地区各站 1979—2015 年共 37 年的降雨量资料,采用 P-Ⅲ 频率曲线进行频率分析,可得到南京市不同降雨量保证率下的降雨量值,结合浦口区地表径流系数可得到不同降雨量保证率下的径流量(表 1)。

表 1 城南河不同降雨保证率下径流计算结果

保证率/%	降雨量/mm	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)
10	1 391.27	1.20
25	1 214.79	1.00
50	1 049.76	0.80
75	916.82	0.80
80	889.32	0.60
90	820.56	0.54
95	774.72	0.50

1.2 城南河水质情况

龙王庙断面位于城南河河首,是城南河入江前的主要监测断面,选取 COD、NH₄⁺-N 和 TP 3 个水质指标作为城南河水质评价的主要考核因子。以 2016 年的污染物实测数据为基础年,以近期城南河龙王庙考核断面 V 类水质目标为指导,按丰、

平、枯不同水期对考核断面污染物指标进行超标率计算,结果见表 2。由表 2 可见,COD 和 TP 在 2016 年各水期均达到 V 类水质标准,而 NH₄⁺-N 在丰、平、枯水期中均超标,枯、平水期超标率达到 67%,由此确定城南河近期断面达标的最不利因子为 NH₄⁺-N。

表 2 龙王庙断面 2016 年水质超标率情况

污染物	水期	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	超标率/%
COD	丰水期	13.60	
	枯、平期	13.50	
	3—12 月均值	13.67	
NH ₄ ⁺ -N	丰水期	2.12	50
	枯、平期	1.85	67
	3—12 月均值	2.21	63
TP	丰水期	0.21	
	枯、平期	0.20	
	3—12 月均值	0.22	

1.3 研究区域污染源分析

根据研究区域年鉴中人口、耕地面积、畜牧业生产情况等相关资料和环保部门提供的污染源普查、环境统计资料,采用入河量计算方法,得到研究区域 2016 年 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的入河量分别为 2 183 t/a、286 t/a 和 154 t/a,各类污染物入河量来源占比情况见图 1。由图 1 可见,城镇生活对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的入河量贡献都是最大的,其次为种植业;工业对 COD 和 NH₄⁺-N 贡献量较小,对 TP 无贡献量;3 种污染物入河量都无农村生活占比。

2 数学模型构建

2.1 水动力及水质模型

选用二维模型对河道进行模拟。水动力控制方程为笛卡尔坐标系下不可压流体三维雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深方向积分的连续方程和动量方程^[11]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hQ \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{lx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s Q \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{ly}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s Q \end{aligned} \tag{3}$$

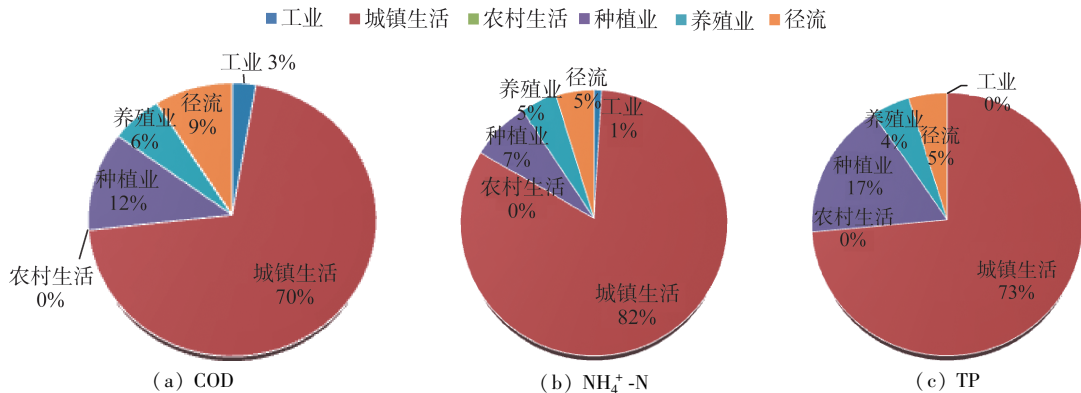


图1 研究区域各类污染物入河量来源占比情况

式中: t 为时间; x,y 是笛卡尔坐标; h 为总水深; η 为水位; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的相对密度; $\bar{u},\bar{v}$ 分别为 x,y 方向水速的平均值; f 为 Coriolis 因子; S_{xx},S_{xy},S_{yy} 分别为 x 方向正应力张量, y 方向切应力张量和 y 方向正应力张量; p_a 为大气压; Q 为点源的排放量; g 为重力加速度; u_s,v_s 为外界源(汇)项排放到环境水体的速率; τ_{sx},τ_{sy} 为不同方向水面风应力张量; τ_{bx},τ_{by} 为河床床面应力张量。

水质控制方程是污染物在二维非均匀流中的对流扩散基本方程:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + K_i C_i + S_i \quad (4)$$

式中: C_i 为污染物浓度; u,v 分别为 x,y 方向上的流速分量; E_x,E_y 为 x,y 向上的扩散系数; K_i 为污染物降解系数; S_i 为源(汇)项。

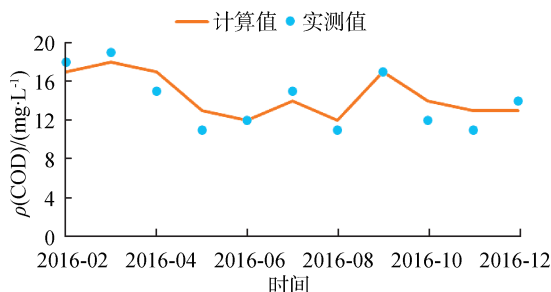
2.2 模型验证

选取城南河道的主干流域范围,对已建立的模型验证,其范围西起龙王庙断面上游 1 000 m,东至长江。水动力条件根据城南河上游来水及区域降雨量、蒸发资料进行产汇流分析所得,水位边界为龙王庙断面上游 1 000 m 处;水质边界根据城南河 2016 水质监测资料确定,图 2 为计算结果与实测值对比。由图 2 可见,COD、 NH_4^+-N 和 TP 的相对误差分别为 18%、21.5% 和 17.6%,模拟结果与实际情况拟合较好。得到研究区域内 COD、 NH_4^+-N 和 TP 的降解系数分别为 $0.08 \sim 0.12 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.07 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$ 和 $0.12 \sim 0.17 \text{ d}^{-1}$ 。

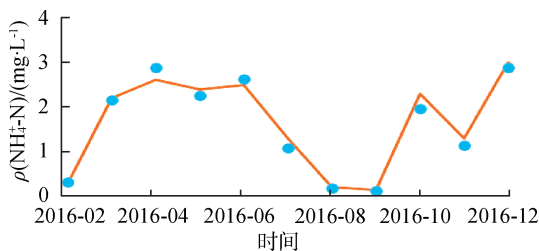
3 水环境容量计算

龙王庙断面影响区域内污染源共概化 13 个排污口,具体位置见图 3。控制断面达标情况下的水环境容量基本模型^[12-14]如下:

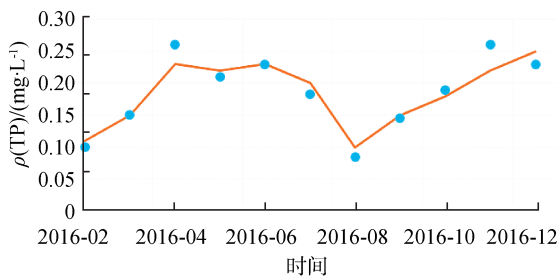
$$C = \frac{W + Q_0 C_0}{Q_0} \exp \left(-k \frac{z}{86400u} \right) \quad (5)$$



(a) COD



(b) NH_4^+-N



(c) TP

图2 城南河水水质验证结果

式中: z 为污染源与计算断面纵向距离; C 为 z 距离处水体污染物浓度值; k 为污染物降解系数; u 为流速; W 为概化排污口排污量; C_0 为边界水质浓度值; Q_0 为河流流量。

3.1 计算结果

计算得到满足龙王庙断面 V 类水质目标的不同水期条件下各概化排污口的允许排污量,进而得到城南河的 2016 年水环境容量(表 3)。由表 3 可见,

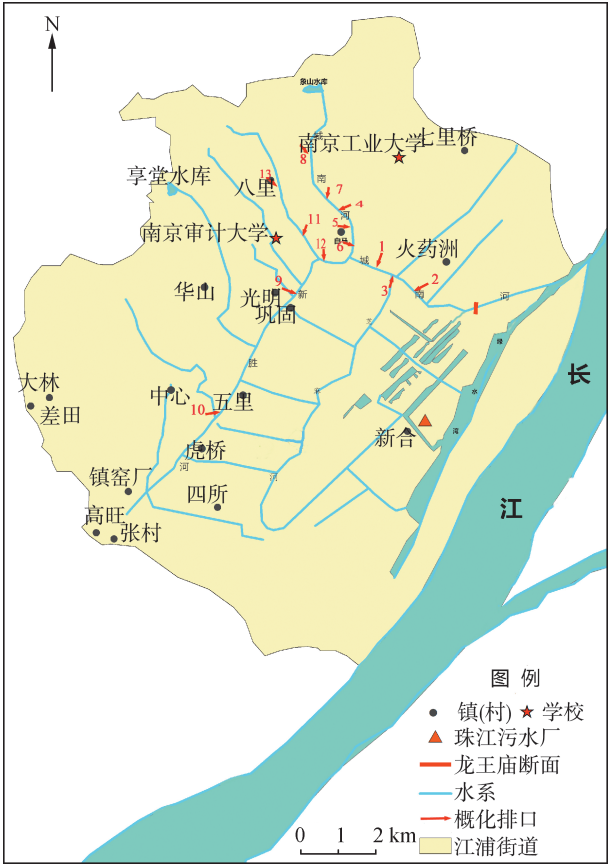


图3 研究区域污染源概化排口位置

COD 和 TP 水环境容量即为现状排放量; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的水环境容量为 201 t/a, 现状排放量为 286 t/a, 可见其环境容量仅为现状排放量的 70%, 需要进行削减, 其削减率应为 30%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的水质超标为

10%, 二者的差距在 20% 以内, 说明上述方法得到的水环境容量基本合理。

3.2 水环境容量提升措施

龙王庙断面主要超标因子为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 是因为水体水质受生活污水影响较大, 一方面以主城区的雨污合流排放现象仍存在, 街道污水处理管网设备不全, 污水收集处理率不高; 另一方面城南河受地表径流因素影响很大, 在缺少径流补给的枯水期水质下降明显, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 超标严重。为使龙王庙断面水质达标并增加城南河水环境容量, 可以设计对城南河进行生态补水。根据浦口区水资源情况, 因地制宜设计两种调水方案: 方案一是通过高旺河引调长江水, 方案二是通过城南河东支从象山水库调水。方案对比情况统计见表 4, 调水引流示意图见图 4。

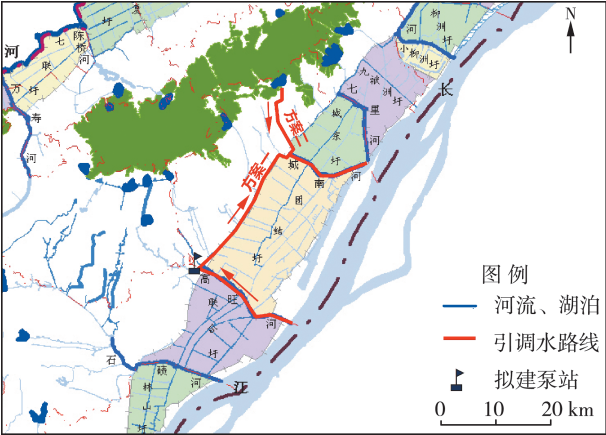


图4 各方案调水引流示意图

表3 城南河 2016 年不同水期水环境容量 t/a

排污口	COD			$\text{NH}_4^+ - \text{N}$			TP		
	丰水期	枯平期	年总量	丰水期	枯平期	年总量	丰水期	枯平期	年总量
1	31	25	56	2	2	4	3	2	4
2	13	11	24	1	1	2	1	1	2
3	8	7	15	1	0	1	1	0	1
4	156	128	284	17	11	29	13	8	21
5	40	32	72	3	2	5	3	2	5
6	156	128	284	12	8	20	13	8	21
7	238	195	432	18	11	29	20	11	31
8	58	48	106	5	3	8	5	3	8
9	117	96	213	9	6	15	10	6	16
10	151	124	274	13	8	21	10	6	16
11	78	63	141	12	8	20	7	4	10
12	78	63	141	18	12	30	7	4	10
13	78	63	141	11	7	19	7	4	10
合计	1201	982	2183	123	78	201	97	57	154

表4 调水方案对比情况

方案	调水线路	调水情况	优点	缺点
方案一	通过高旺河引调长江水	相机调水	长江水质和水量足够调水需求	需新建抽水泵站, 调水线路长, 工程量较大
方案二	通过城南河东支从象山水库调水	2m ³ /s 调水	调水距离短、工程量小、易实施, 而且已有临时调水泵站安全调水的先例	象山水库的水量和水质不能得到保证; 调水线路沿线污染源较多

4 结 论

a. 以龙王庙断面水质达Ⅴ类水质标准为目标,对城南河水质现状进行评价,确定了城南河主要超标因子为 NH_4^+ -N。

b. 建立水环境数学模型,计算了基于龙王庙断面达Ⅴ类水质标准的城南河的水环境容量, COD、 NH_4^+ -N 和 TP 的水环境容量分别为 2183 t/a、201 t/a 和 154 t/a。将水环境计算结果现状排放量进行对比,确定 NH_4^+ -N 的削减率为 30%。

c. 为帮助龙王庙断面水质稳定达标,增大城南河水环境容量,缓解小流域河流枯水期水量小、水质差的问题,提出两种长期调水方案,为区域水环境治理提供参考。

参考文献:

[1] 袁寿荣. 陆良县水污染控制系统规划研究[J]. 云南环境科学, 2000, 19 (4) : 20-22. (YUAN Shourong. Water pollution control system of Luliang County [J]. Yunnan Environmental Science, 2000, 19 (4) : 20-22. (in Chinese))

[2] 戴正德,王蕾,马生伟,等. 杞麓湖水污染总量控制和工程治理的效益分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2000, 22 (1) : 18-19. (DAI Zhengde, WANG Lei, MA Shengwei, et al. Water pollution control system of Luliang County [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 2000, 22 (1) : 18-19. (in Chinese))

[3] 赵军. 浅论污染物排放总量控制[J]. 山东环境, 2000 (增刊 1) : 28-29. (ZHAO Jun. Discussion on total amount control of pollutant discharge [J]. Shandong Environment, 2000 (Supl) : 28-29. (in Chinese))

[4] 林国强. 南流江玉林城区段污染物总量控制及方案[J]. 广西水利水电, 2002 (1) : 54-57. (LIN Guoqiang. Pollutant total control and its scheme of the Yulin proper section of the Nanlijiang River [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2002 (1) : 54-57 (in Chinese))

[5] 周刚,雷坤,富国,等. 河流水环境容量计算方法研究[J]. 水利学报, 2014, 45 (2) : 227-234. (ZHOU Gang, LEI Kun, FU Guo , et al. Calculation method of river water environmental capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (2) : 227-234. (in Chinese))

[6] 张茜,韩龙喜. 基于水质响应系数的浅水湖泊水环境容量计算方法[J]. 四川环境, 2017 (1) : 47-52. (ZHANG Xi, HAN Longxi. A water environmental capacity calculation method of the shallow lake based on water quality response coefficient [J]. Sichuan Environment,

2017 (1) : 47-52. (in Chinese))

[7] 韩梓流,逢勇. 基于京杭运河五牧断面水质达标的水环境容量计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016 (4) : 81-87. (HAN Ziliu, PANG Yong. Water environment capacity calculation based on water quality standards at Wumu section in the Grand Canal [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016 (4) : 81-87. (in Chinese))

[8] 花月,王金龙,刘洋,等. 阳澄湖入湖河流张家港河控制断面水质达标分析[J]. 污染防治技术, 2016, 29 (1) : 30-34. (HUA Yue, WANG Jinlong, LIU Yang, et al. Analysis of water quality control sections of Zhangjiagang River in Yangcheng Lake Region [J]. Pollution Control Technology, 2016, 29 (1) : 30-34. (in Chinese))

[9] 王雪,逢勇,谢蓉蓉,等. 基于控制断面水质达标的秃尾河流域总量控制[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (1) : 123-130. (WANG Xue, PANG Yong, XIE Rongrong, et al. Total amount control of water quality standard at the control section in Tuwei River Basin [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (1) : 123-130. (in Chinese))

[10] 于雷,吴舜泽,范丽丽,等. 河流水环境容量一维计算方法[J]. 水资源保护, 2008, 24 (1) : 39-41. (YU Lei, WU Shunze, FAN Lili, et al. One-dimensional calculation method for river water environmental capacity [J]. Water Resources Protection, 2008, 24 (1) : 39-41. (in Chinese))

[11] 逢勇,陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[12] 程声通. 河流环境容量与允许排放量[J]. 水资源保护, 2003, 19 (2) : 8-10. (CHENG Shengtong. Environmental capacity and permissible discharge of rivers [J]. Water Resources Protection, 2003, 19 (2) : 8-10. (in Chinese))

[13] 阎非,苏保林,贾海峰. 基于排污口权重的一维河流水环境容量计算[J]. 水资源保护, 2006, 22 (2) : 16-18. (YAN Fei, SU Baolin, JIA Haifeng. Calculation of water environmental capacity for one-dimensional river based on weight of sewage outfall [J]. Water Resources Protection, 2006, 22 (2) : 16-18. (in Chinese))

[14] 陈玥,李一平,高小孟,等. 山丘区水环境容量计算及限制排污总量分析:以临海市“五水共治”规划为例[J]. 水资源保护, 2016, 32 (2) : 123-128. (CHEN Yue, LI Yiping, GAO Xiaomeng, et al. Calculation of water environmental capacity and analysis of total quantity control of pollution discharge in hilly area: a case study of co-governance on five water categories in Linhai City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2) : 123-128. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-09 编辑:王 芳)