

郑岩杭, 李翠梅, 黄瑜琪. 合流污水系统最优截流倍数研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 173-179.
 ZHENG Yanhang, LI Cuimei, HUANG Yuqi. Study on optimal interception ratio of combined sewerage system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 173-179.

合流污水系统最优截流倍数研究

郑岩杭¹, 李翠梅¹, 黄瑜琪²

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215000;
 2. 贵阳建筑勘察设计有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 在合流污水系统的改造过程中, 截流倍数(n_0)的选取直接关系到改造项目的经济与环境效益。为了实现雨污分流改造的最优化, 本研究以合流污水系统为研究对象, 通过建立合理有效的合流污水系统的SWMM模型, 构建了以“工程费用与环境污染损失最小”为目标函数的最优截流倍数模型。通过模拟分析不同截流倍数(n_0)下合流污水对受纳水体水环境的影响及系统改造费用的变化, 确定改造项目环境与经济效益最优化的截流倍数。研究结果表明: 合流污水系统改造的最优截流倍数为 $n_0=3$ 。此时, 年总费用取得最小值180.78万元, 截流式合流制系统年溢流总量减少28.95%, 年截流总量增加15.51%, 年总溢流污染负荷TSS、COD、TN、TP分别减少18.17%、21.25%、14.72%、17.49%, 年总截流对应污染负荷分别增加18.38%、19.31%、18.67%、15.18%, 实现了合流污水系统改造的最优化。

关键词: 合流污水系统; SWMM模型; 最优化; 截流倍数

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0173-07



Study on optimal interception ratio of combined sewerage system

ZHENG Yanhang¹, LI Cuimei¹, HUANG Yuqi²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 2. Guiyang Architectural Design & Surveying Prospecting Co., Ltd, Guiyang 550000, Guizhou, China)

Abstract: During the reconstruction of the combined sewerage system, the selection of the interception ratio (n_0) is directly related to both the economic and the environmental benefits of the project to be reconstructed. In order to realize the optimization of the reconstruction of rainwater-sewage separation, the combined sewerage system is taken as the study object, for which an optimal interception ratio model with the objective function of “the minimum project cost and environmental pollution loss” is established through building up a reasonable and effective SWMM model for the combined sewerage system. Through the simulative analysis made on the influence from the combined sewerage on the water environment of the receiving water body and the change of the system reconstruction cost under the conditions of different interception ratios (n_0), the interception ratio for optimizing both the environmental and economic and benefits of the reconstruction project is determined. The study result shows that the optimal

收稿日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109153); 2017苏州市水利科技项目(2017003)

作者简介: 郑岩杭(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事污水处理与回用技术研究。E-mail: zyhang05@163.com

通信作者: 李翠梅(1974—), 女, 教授, 博士, 主要从事水资源与饮用水安全保障研究。E-mail: cuimeili@163.com

interception ratio for the reconstruction of the sewerage system is $n_0=3$. At this time, the minimum value of 1.807 8 million yuan is obtained for the total annual cost, while the annual total overflow of the intercepting combined system is reduced by 28.95%, the annual total interception is increased by 15.51%, the annual total overflow pollution loads of TSS, COD, TN, TP are decreased by 18.17%, 21.25%, 14.72%, 17.49% respectively and the annual total interceptions corresponding to the pollution loads are increased by 18.38%, 19.31%, 18.67%, 15.18% respectively as well. In this way, the optimization of the reformation of the combined sewerage system is realized.

Keywords: combined sewage system; SWMM model; optimization; interception ratio

0 引言

合流污水管网雨季污水溢流、混接管道旱季污水直排,使未经处理的混合污水大量排入城市水体中,对水环境造成了严重的污染。为减少溢流污染对天然水体的影响,从源头对直排污水进行截污治理,有效削减水体污染物,切实改善提升并长久维持良好的水环境,合流污水系统改造势在必行。合流污水系统的改造有利于促进城市可持续发展,对推进我国黑臭水体治理和海绵城市建设具有重要意义。目前我国在不具备雨污分流改造条件的地区多采用干管截流的改造方式^[1-2],截流倍数 n_0 作为合流制管网改造中工程设计的关键参数,可直接影响水环境污染的控制程度与工程投资总费用。

随着 n_0 取值的增大,截流水量增加,溢流水量的减少,水环境的改善会不断得到优化,但是大幅度提高 n_0 ,截流效率逐渐变弱,在暴雨时所能够截获的污染负荷也是有限的,还会导致截流干管等建设成本与污水厂运行管理等工程投资大幅增加,同时会给城镇污水处理厂带来不同程度的负担^[3-4]。因此,对 n_0 进行定性定量的研究,因地制宜的选取满足水环境容量和溢流污染控制要求,切合本地实际情况的最优 n_0 显得尤为重要。西方发达国家多追求环境效益的最大化,因此 n_0 取值一般较高^[5-6],英国通常取 5,德国取 4,美国取值范围是 1.5~5。我国现行规范要求 n_0 取值一般采用 1~5,可选择范围较大,国内做的较好的城市 n_0 取值一般在 1~3 之间^[7-8]。国外发达国家因其基础设施建设较发达,截流倍数优化研究较少,研究更多的集中在溢流污染控制技术、雨水综合利用、水环境容量等面源污染控制^[9]。而国内对城市面源污染控制方面研究较少,主要以管网改造和提高截留倍数的方式控制面源污染,溢流污染控制主要集中在定性和半定量研究,针对 n_0 的确定还没有形成成熟、统一的方法。现有 n_0 的确定方法主要有经验估算法、反推法与模型分析法^[10],前两种方法属于半经验半理论化的方法,而模型分析法是通

过搜集大量的数据来确定最优的 n_0 取值,可因地而异得出更有效的 n_0 。国内外使用的城市非点源径流污染模型中,因 SWMM 模型所包含的四大计算模块(径流、输送、扩充输送和贮水处理)的运行灵活性及在地表径流、地表污染物的累计与冲刷方面具有一定的优势,能够很好的对合流制排水系统的水质水量进行动态模拟。故综合模型适用范围和机理考虑,本研究选用 SWMM 模型作为研究工具,为进一步分析 n_0 选取提供技术支持。

本文以某县合流污水系统为研究对象,建立截流式合流制排水系统的 SWMM 模型,定量分析不同 n_0 方案的溢流量与截流量及相应污染负荷,以工程投资作为研究的经济制约因素,以溢流污染所产生的环境污染经济损失作为研究的环境制约因素,将多目标转化为单目标模型以“费用”作为 n_0 选取统一的评价标准,综合分析社会-经济-环境的影响,研究合流污水系统改造的最优 n_0 的选取,为城市水环境的改善和城市排水工程建设提供参考依据。

1 建立研究区域 SWMM 模型

1.1 研究区域排水概化

研究对象某县位于贵州省西南部,降雨受亚热带季风控制,主要集中在 5—9 月,多年平均降水量为 1 222.7 mm。研究区域总面积为 98.05 hm²,划分为 31 个子汇水区,33 根管段,其中截流干管为 12 段,节点 35 个,溢流口 7 个,末端出水口 1 个,其概化结果如图 1 所示。

1.2 模型参数设定

1.2.1 模型水文参数设定

产流模型采用 Horton 模型^[11],Horton 模型描述了降雨时间与下渗率的变化关系,其公式为

$$f = (f_0 - f_\infty) e^{-kt} + f_\infty \quad (1)$$

式中 f 为入渗能力; f_0 为初始入渗率; f_∞ 为稳定入渗率; t 为时间; k 为入渗衰减系数。

汇流模型采用非线性水库模型^[11],模拟采用动力波进行演算。用非线性水库模型表述研究区地表汇

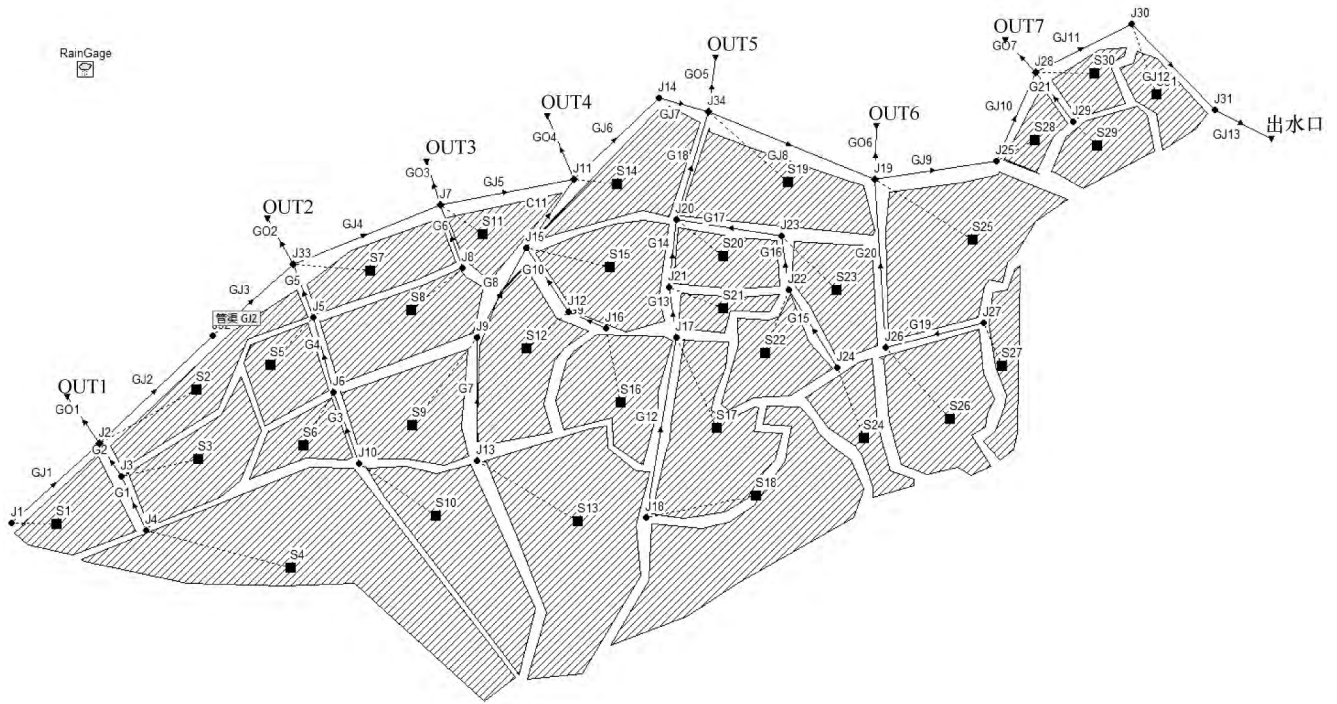


图1 研究区域概化示意

流过程，需耦合曼宁方程和连续方程求解 Q 和 d ，公式分别如下

$$Q = L \frac{1.49}{n} (h - h_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai - Q \quad (3)$$

式中， L 为子汇水区宽度； n 为曼宁系数； h_p 为注蓄水深； S 为子汇水区坡度； V 为排水子流域总流量； A 为子汇水区面积； d 为水深； t 为时间； i 为净雨； Q 为出流量。

参考SWMM用户手册并借鉴相关文献进行本模型的水文参数选取^[12-15]。研究区域最大入渗率、最小入渗率、衰减系数分别为16.8 mm/h、7.2 mm/h、 4 h^{-1} ，透水区、不透水区的最大注蓄量分别为6.20 mm和1.40 mm；渗透性、不渗透性地表曼宁系数和管道曼宁系数分别为0.140、0.013、0.013。

1.2.2 模型水质参数设定

本文水质模拟过程考虑污染物的累积和冲刷过程，分别选用饱和函数和指数函数进行模拟^[16]，主要水质参数设置如表1所列。其表达式分别如下

$$B = \frac{C_1}{C_4 + t} \quad (4)$$

$$W_t = C_1 q^{C_2 B} \quad (5)$$

式中， C_1 为最大累积量； C_4 为半饱和常数，达到最大

累积量需要的天数； W_t 为污染物冲刷负荷； q 为单位面积径流量； C_1 为冲刷系数； C_2 为冲刷指数； B 为单位面积污染物累积量。

表1 地表污染物累积和冲刷模型参数^[12-15]

土地利用类型	参数	TSS	COD	TN	TP
商业区	最大累积量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	400.00	260.000	120.00	15.000
	累积速率常数	1.00	1.000	1.00	1.000
	半饱和和累计时间/d	6.00	6.000	6.00	6.000
	冲刷系数	0.01	0.012	0.08	0.003
高密度居住区	最大累积量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	270.000	180.000	30.000	4.000
	累积速率常数	1.000	1.000	1.000	1.000
	半饱和和累计时间/d	4.000	4.000	4.000	4.000
	冲刷系数	0.011	0.012	0.008	0.003
低密度居住区	最大累积量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	140.000	80.000	8.000	2.000
	累积速率常数	1.000	1.000	1.000	1.000
	半饱和和累计时间/d	4.000	4.000	4.000	4.000
	冲刷系数	0.010	0.012	0.004	0.002
	冲刷指数	1.800	1.800	1.700	1.700

1.3 降雨条件设定

在贵阳市暴雨强度公式基础上，采用芝加哥雨型进行雨量时程分配^[17]。根据国内外大量资料表明，当研究区域缺少大量的雨量资料时，通常取 $r = 0.4$ 最为贴近真实降雨^[18-19]。因此本研究选取 $r = 0.4$ ，

重现期为 0.5a、1.0a、2.0a、3.0a、4.0a、5.0a 六种情况, 设计 2 h 降雨量。暴雨强度公式为

$$q = \frac{1887 \times (1 + 0.7071 \lg P)}{(t + 9.35P^{0.031})^{0.695}} \quad (6)$$

式中, q 为暴雨强度; P 为重现期; t 为降雨历时。

1.4 模型校核与验证

随机选取 2016 年 8 月的一场实测降雨数据对模型进行校准与验证其实测数据与模拟结果比较如图 2 所示。

由图 2 可知, 实测数据与模拟值具有较高的一致性, 其中水量的 Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 为 0.85, 出水口处各水质指标 TSS、COD、TN、TP 的系数 E_{ns} 分别为 0.82、0.86、0.83、0.85, 均大于 0.80, 说明本研究构建的模型具有较高的准确性和可靠性, 可以用来进行下一步的研究。

2 研究区合流污水溢流过程模拟与分析

2.1 不同截流倍数溢流分析

根据已有资料, 研究区截流干管设计的暴雨重现期是 1a, 故本研究模型的基础条件设为 $P=1$ 、 $r=0.4$, 选取 $n_0=1\sim 5$ 五种不同截流倍数进行研究, 因在整个过程中 7 个溢流口的变化趋势均保持较高的一致性, 本研究选取溢流口 OUT5 为代表进行模拟, 研究系统的溢流情况。其水量和水质的变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。

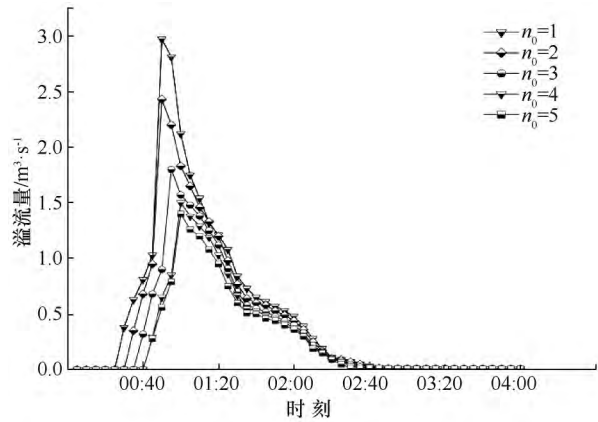


图 3 不同截流倍数条件下水量变化过程

由图 3 可以看出, 随着截流倍数 n_0 的增大, 溢流持续时间与溢流量均逐渐减小, 溢流推后。其中 $n_0=1$ 增加到 $n_0=3$ 时, 溢流峰值流量从 $2.79 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到 $1.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而当 $n_0=3$ 增加到 5 时, 峰值流量降至 $1.40 \text{ m}^3/\text{s}$ 。说明当 $n_0>3$ 时, 溢流量的减小幅度减缓。

由图 4 可知, 当截流倍数从 $n_0=1$ 增至 $n_0=3$ 时, TSS、COD、TN、TP 的溢流峰值浓度分别减少 452.84 mg/L 、 216.10 mg/L 、 19.27 mg/L 、 10.21 mg/L 。而当截流倍数从 $n_0=3$ 增大到 $n_0=5$ 时, TSS、COD、TN、TP 的溢流峰值浓度分别减少 96.20 mg/L 、 123.50 mg/L 、 5.80 mg/L 、 1.03 mg/L 。说明随着截

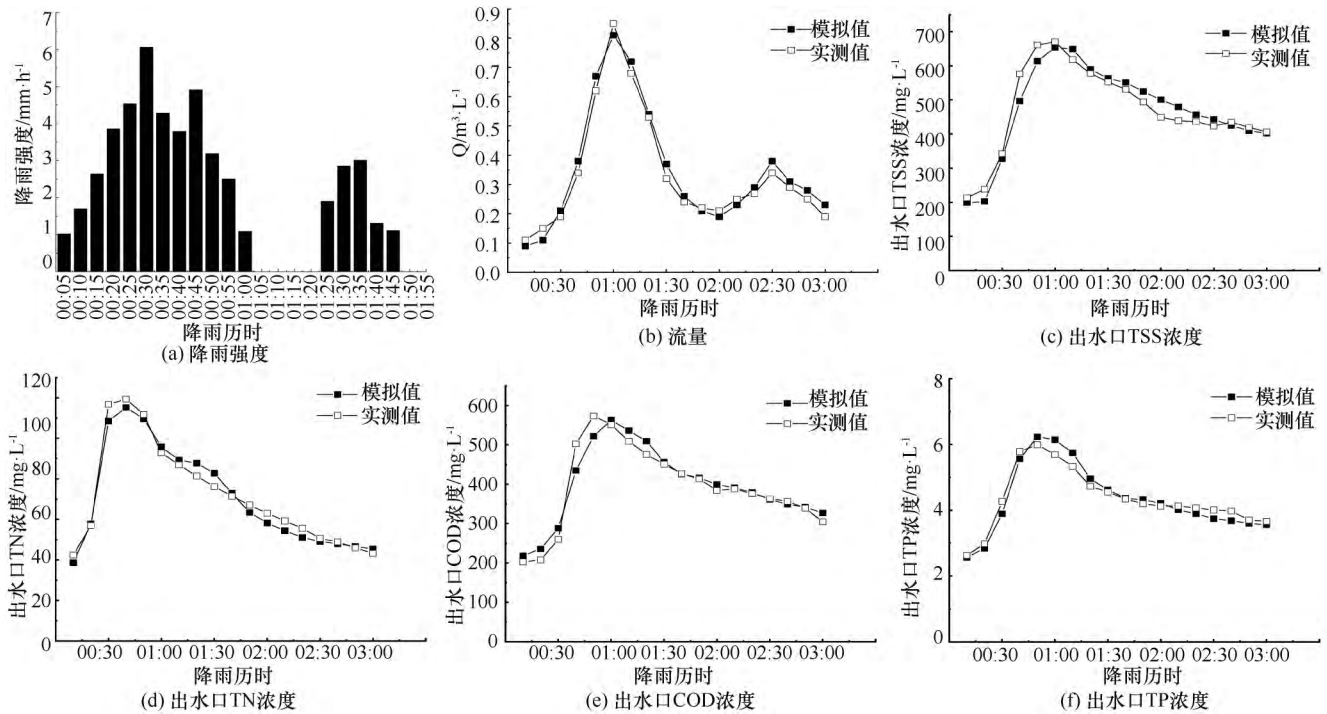


图 2 降雨量分布及水文水质验证曲线

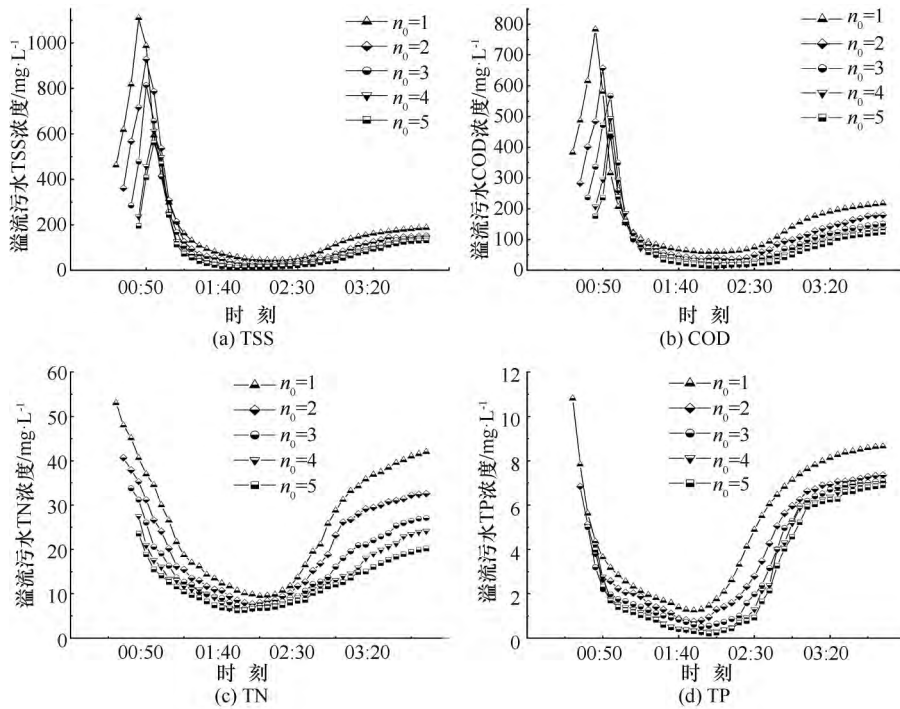


图4 不同截流倍数条件下水质变化过程

流倍数继续增大到 $n_0 > 3$ 时, 污染物浓度降低幅度同样有所减缓。结合溢流量在 $n_0 > 3$ 时的变化可以看出, 随着 n_0 的继续增大系统对污染物的削减量的增加幅度也会逐渐降低, 而其工程投资费用却会逐渐增加, 因此, 继续增加 n_0 所带来的环境效益需要结合工程投资费用进行进一步的考察。此外, 由图4还可以看出, TN和TP对 n_0 的变化较TSS和COD更为敏感, 分析其主要原因是由于TN和TP有明显的“初期效应”所致。因此, 适度的增大截流倍数对降低管网的溢流量与减小水环境污染具有很大的意义。

2.2 不同截流倍数下系统年溢流量及年截流量测算

据统计, 该县年平均降雨总量为 1 240 mm, 而由芝加哥雨型合成所得单场降雨 ($P=1, r=0.4$) 的累积降雨量为 46.45 mm, 将二者相除算出年平均降雨次数为 27 次, 进而可以计算出不同截流倍数时的年溢流总量及年截流总量, 计算结果如表 2 和表 3 所列。

由表 2 和表 3 统计结果可知, 当截流倍数 $n_0 = 1$ 时, 年溢流总量可达 38.85 万 m^3 , TSS、COD、TN、TP 溢流污染总量分别为: 186.34 t、157.23 t、8.81 t、1.35 t; 相对应的管网年截流总量为 45.40 万 m^3 , 截流污染物总量分别为: 180.22 t、189.60 t、19.47 t、2.16 t; 以 $n_0 = 1$ 的结果为基准,

随着 n_0 从 2 增大到 5, 系统年溢流总量分别减少 17.00%、28.95%、35.74%、38.87%, 年截流总量分别增加 7.84%、15.51%、20.35%、23.61%。当 $n_0 = 3$ 时, 年总溢流污染负荷 TSS、COD、TN、TP 分别减少 18.17%、21.25%、14.72%、17.49%, 年总截流量对应污染负荷分别增加 18.38%、19.31%、18.67%、15.18%。说明 n_0 越大, 年溢流总量及污染负荷越来越小, 而年截流总量及污染负荷越来越大; 当 n_0 从 1 增大到 3 时溢流减小幅度较大, 截流增大幅度也较大, 而当 $n_0 \geq 3$ 时溢流减小幅度明显降低, 截流增大幅度也随之降低。

表 2 不同截流倍数时年溢流量及污染物总量

截流倍数 n_0	年截流量/ m^3	年截流量变化率/%	TSS/ $kg \cdot a^{-1}$	COD/ $kg \cdot a^{-1}$	TN/ $kg \cdot a^{-1}$	TP/ $kg \cdot a^{-1}$
1	388 503		186 394	157 232.61	8 808.21	1 354.05
2	322 461	17.00	167 543.1	137 794.23	8 003.61	1 238.22
3	276 021	28.95	152 530	123 814.71	7 511.55	1 117.26
4	249 642	35.74	142 531.1	118 981.17	7 382.70	1 046.52
5	237 492	38.87	136 550.1	112 617.27	7 176.13	996.84

表 3 不同截流倍数时年截流量及污染物总量

截流倍数 n_0	年截流量/ m^3	年截流量变化率/%	TSS/ $kg \cdot a^{-1}$	COD/ $kg \cdot a^{-1}$	TN/ $kg \cdot a^{-1}$	TP/ $kg \cdot a^{-1}$
1	454 005		180 223.65	189 596.7	19 471.59	2 161.35
2	489 618	7.84	197 834.4	208 121.7	21 360.51	2 333.34
3	524 421	15.51	213 342.66	226 199.8	23 106.87	2 489.40
4	544 968	20.35	225 700.02	242 148.7	24 311.34	2 640.87
5	561 195	23.61	234 519.57	257 153.4	25 358.13	2 781.27

根据以上的模拟结果,说明采用我国现行规范所推荐的截流倍数取值范围(1~5),能有效截流污水,削减入河污染物,利于保持水体功能。但是当 $n_0 \geq 3$ 时,截排效果逐渐减弱,即大幅度提高 n_0 所能截获的水量和污染负荷是有限的;至 $n_0 = 5$ 时,系统依然存在溢流污染问题,必须继续增大 n_0 才能够进一步减小溢流量,但是工程费用会随之大幅度地增加。所以,需要综合考虑截流倍数对环境和经济效益的共同影响来选取最优截流倍数。

3 不同截流倍数条件下对经济的影响分析

3.1 对环境污染经济损失的影响

基于损害和基于成本的评价方法,是目前对环境污染经济损失的两种主要评价方法^[20]。基于损害的评价方法,主要从人们经济和生活层次的客观角度分析,方法较为复杂,需实地调研、对研究人员有较高的要求。而基于成本的评价方法更为简单、应用更加广泛,且评价结果可进行经济可行性研究。因此本文研究截流倍数所带来的环境污染经济损失选用虚拟处理成本法,《中国环境经济核算技术指南》(2009年版)中,生活污水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ (占总氮的60%)和COD的单位治理成本分别为4.8元/kg、5.2元/kg。据此,不同截流倍数条件下的环境污染经济损失计算结果如表4所列。

表4 不同截流倍数条件下的环境污染经济损失对比

截流倍数 n_0	1	2	3	4	5
$\text{NH}_3\text{-N}$ 年溢流量/kg	5 284.926	4 802.12	4 506.93	4 429.62	4 305.68
$\text{NH}_3\text{-N}$ 年治理成本/万元	2.54	2.31	2.16	2.13	2.07
COD年溢流量/kg	157 232.61	137 794.23	123 814.7	118 981.3	112 617.4
COD年治理成本/万元	81.76	71.65	64.38	61.87	58.56
年总环境污染经济损失/万元	84.30	73.96	66.55	64.00	60.63

通过计算结果分析可知,截流倍数与相应的年环境污染经济损失二者呈负相关,说明截流倍数的增大有利于环境效益,可减少环境污染的治理费用。同时可以看出,当截流倍数 $n_0 > 3$ 时,环境污染经济损失的降低幅度显著降低,因此,在实际工程中需要考虑工程的投资成本,不能为了减少环境经济的损失而盲目的增大截流倍数。

3.2 对工程年建设成本及运行费用的影响

根据截流工程的设计方案可知,截流倍数的改变,对工程的建设投资及运行费用都会产生不同程度

的影响,工程建设投资费用主要包括截流干管、污水提升泵站以及污水处理厂一级处理构筑物三部分投资费用,不同截流倍数条件下费用计算结果如表5所列。

表5 不同截流倍数时工程年建设成本及运行费用对比

费用项目	截流倍数 n_0	1	2	3	4	5
截流干管建设费用	年造价/万元	57.78	60.77	63.87	67.33	68.44
	比 $n_0 = 1$ 的造价增加/%		5.18	10.55	16.53	18.44
提升泵站建设费用	年造价/万元	32.10	34.15	36.08	37.33	38.44
	比 $n_0 = 1$ 的造价增加/%		6.37	12.37	16.28	19.74
初沉池建设费用	年造价/万元	10.08	10.55	10.98	11.23	11.39
	比 $n_0 = 1$ 的造价增加/%		4.67	8.96	11.42	12.98
运行费用	年运行费用/万元	2.86	3.08	3.30	3.42	3.54
	比 $n_0 = 1$ 的造价增加/%		7.84	15.51	19.74	23.61
合计/万元		102.84	108.56	114.23	118.07	121.91
比 $n_0 = 1$ 的造价增加/%			5.56	11.08	14.81	18.55

由表5可知,当 n_0 从1增大到5时,各部分的投资费用随之增加,工程的投资总额也会随之发生较大的变化。当 $n_0 \geq 3$ 时,项目的建设费用和运行费用的增长率有所降低。其次,若 n_0 取值过大,在晴天和雨天时会造成污水厂来水的冲击负荷变化程度较高,对污水厂的稳定运行不利。因此,截流倍数的选取应综合考虑其经济性和有效性进行合理选取。

4 截流倍数最优模型

以经济较小、溢流较小和污染较小为原则,充分考虑 n_0 对经济、环境和社会的综合影响下,将约束条件统一转化为“费用”,即利用单一目标控制代替多目标控制,建立截流倍数最优化模型

$$Q = \min_{1 \leq n \leq 5} (X_n + Y_n) \quad (7)$$

式中, Q 为最优方案年总费用; n 为截流倍数 n_0 的取值; X 为工程投资; Y 为环境污染年经济损失。

综合最优化截流倍数模型公式及工程投资的结果,计算不同 n_0 条件下年总费用,其中年总费用最小值对应的截流倍数即为最优截流倍数。不同 n_0 方案下年总费用变化曲线如图5所示。

从图5的变化趋势可以看出, $n_0 = 3$ 时年总费用最小,仅为180.78万元。当 n_0 从1增大到3时,年总费用在大幅度地降低,说明在此阶段,虽然工程经济投资在不断地增加,但是由于环境污染所造成的经济损失在大幅度的降低,且其降低幅度是高于工程经济投资的增长幅度的。因此,在该范围内系统对污染物的截流效率是随 n_0 逐渐增加。当 $n_0 \geq 3$ 时,年总费用又呈现出逐渐增加的趋势,说明在该阶段由于污染物溢流所造成的经济损失低于截流倍数增加所造成

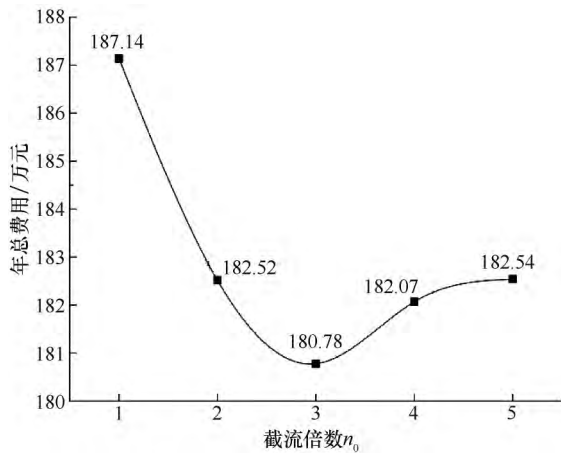


图5 不同截流倍数下年总费用变化曲线

的工程投资费用,环境效益不明显,即该阶段增大 n_0 对环境治理的效率在降低,投资效率也在降低。由图五和前文分析可看出 $n_0=4$ 和 5 时与 $n_0=3$ 相比,虽然年总费用仅增加2万元左右,而截流量却更大,但是为了避免因一味增大截流量而忽略大量截流混合污水对污水处理厂造成不利冲击,以及一般雨天和晴天输送量的区别所导致工程投资的浪费,因此综合受纳水体水环境容量和自净能力,并结合总费用综合分析后,最终确定以“费用”为评价标准的最优 $n_0=3$,此时年总费用达到最小,实现经济效益和环境效益的最优化。

综合上述分析,合流污水系统改造最优截流倍数为 $n_0=3$,该条件下能够兼顾工程经济与环境效益的同时,将水环境污染程度降到最低。在环境容量较小的敏感区域可适当增大截流倍数来进一步减少污染物进入受纳水体,但同样也要兼顾工程的经济效益。

5 结论

利用SWMM模型,模拟分析了不同截流倍数下合流污水系统改造过程中环境效益与经济效益的变化,以实现环境效益和经济效益最优化为目标选取最优截流倍数。主要结论如下:

(1) SWMM模型的水质水量校验结果 E_{ms} 均大于0.80,表明采用该模型研究截流倍数优化选取是可行的。

(2) 随着 n_0 从1增加到5,年溢流总量逐渐减小,相应的年截流总量逐渐增大;所取得的环境价值随之减小,而工程投资逐渐增加。当 $n_0 \geq 3$ 时,其对各项的影响效率均降低。

(3) 直排式合流制改造成截流式合流制时,建议最优截流倍数为 $n_0=3$,此时可达到工程投资和环境效益最优化。

参考文献:

- [1] 周飞祥. 基于海绵城市建设的雨污分流改造模式研究——以鹤壁市为例[J]. 给水排水, 2018, 54(12): 25-30.
- [2] 贾旭亮, 方娟, 袁静. 截流式合流制对排水体制选择和管渠设计的影响[J]. 给水排水, 2012, 48(S1): 442-443.
- [3] ZHANG W, ZHANG S, WAN C, et al. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall [J]. Environmental Pollution, 2007, 153(3): 594-601.
- [4] 张超, 姜应和. 合流制排水系统截流倍数优选[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2771-2776.
- [5] 邢玉坤, 曹秀芹, 江坤, 等. 合流制管网与混接管网截流系统的设计研究[J]. 给水排水, 2019, 55(9): 115-120.
- [6] ANDREAS P, ANDREAS C, JOACHIM D. Advanced real time control of a combined sewer system [J]. Water Science Technology, 1998, 37(1): 319-326.
- [7] 王宇尧. 重庆地区合流制排水区域污水主干管截流倍数的选择[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 36-39.
- [8] 马英, 林宇峰. 小城镇合流制污水系统截流倍数的选取——以中山市坦洲镇为例[J]. 水利水电建设, 2008, 5(4): 203-204.
- [9] 孙樱珊. 基于Mike Urban模型的北京市老城区合流制溢流污染控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [10] 黄维. 重庆地区小城镇合流制排水系统截流倍数研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [11] 刘家宏, 李泽锦, 张颖春, 等. 基于城市水文模型的海绵城市智慧管控[J]. 水利水电技术, 2019, 50(9): 1-9.
- [12] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0 [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [13] 贺靖雄, 李翠梅, 程桂, 等. 海绵城市雨水花园水文水质过程模拟[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 9-12.
- [14] ATUOMEL C, SILLANPÄÄ N, KOIVUSALO H. Assessment of stormwater pollutant loads and source area contributions with storm water management model (SWMM) [J]. Journal of environmental management, 2019, 233: 719-727.
- [15] XU Z, XIONG L, LI H, et al. Runoff simulation of two typical urban green land types with the Stormwater Management Model (SWMM): sensitivity analysis and calibration of runoff parameters [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(6): 343.
- [16] 崇佳文, 徐乐中, 李翠梅, 等. 渗透铺装对降雨径流水文水质调控效果分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 115-121.
- [17] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水, 2008, 44(S1): 354-357.
- [18] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [19] 刘金星. 城市暴雨径流模型及透水性管道设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [20] 过孝民, 於方, 赵越. 环境污染成本评估理论与方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

(责任编辑 郭利娜)