

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.020

# 海绵城市径流污染控制模型参数研究

王永<sup>1</sup>, 赵萍<sup>1</sup>, 顾亚玮<sup>2</sup>, 刘宏远<sup>2</sup>, 梁振凯<sup>1</sup>, 谢宇菲<sup>1</sup>

(1. 浙江省城乡规划设计研究院, 浙江 杭州 310030; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 海绵城市通过低影响开发模式解决径流污染问题,但对污染削减的量化要进行全面监测较为困难,通常借助模型模拟来完成,因此模型参数的设置至关重要;并且,对SS指标的研究较为透彻,而对其他指标如COD、氨氮、TP等的研究较少。为此,分析了SS指标从去除率到削减率的发展历程,通过归纳杭州市的既有研究成果,对径流污染物COD、氨氮、TP的累积和冲刷模型参数取值给出了建议,并结合不同地形对降解系数 $K$ 也给出了取值建议;同时,根据杭州市上城区不同居住小区在不同类型降雨条件下的径流水质离线监测数据,按照总体误差控制的原则,对杭州市径流污染控制模型的累积、冲刷、降解参数进行率定,为模型参数的应用提供了实践支撑。

**关键词:** 海绵城市; 径流污染控制; 模型; 居住小区; 杭州

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0129-05

## Parameters of Runoff Pollution Control Models of Sponge City

WANG Yong<sup>1</sup>, ZHAO Ping<sup>1</sup>, XIE Ya-wei<sup>2</sup>, LIU Hong-yuan<sup>2</sup>, LIANG Zhen-kai<sup>1</sup>,  
XIE Yu-fei<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Urban & Rural Planning Design Institute, Hangzhou 310030, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Sponge city reduces runoff pollution through low impact development modes. However, it is difficult to comprehensively monitor the quantification of pollution reduction, and the work is usually accomplished with the help of model simulation. Therefore, it is crucial to set model parameters. In addition, research on SS index is more thorough, while the research on other indexes such as COD, ammonia nitrogen and TP is less. This paper analyzed the development process of SS index from removal rate to reduction rate, suggested the parameters of accumulation and wash-off models of COD, ammonia nitrogen and TP by summarizing the existing research results in Hangzhou, and proposed the value of degradation parameter  $K$  in combination with different terrains. According to the principle of overall error control, the accumulation, wash-off and degradation parameters of Hangzhou runoff pollution control model were calibrated based on the off-line monitoring data of runoff quality in different residential areas in Shangcheng District, Hangzhou under different types of rainfall scenarios, which provided practical support for the application of model parameters.

**Key words:** sponge city; runoff pollution control; model; residential area; Hangzhou

“十四五”期间,海绵城市被写入《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中。新时代的海绵城市建设不仅要关注量,也要关注质,对海绵城市建设后地表径流污染的削减要更加关注,并在定性的基础上进行定量。“十三五”期间海绵城市建设在水质控制方面重点体现在SS指标上,笔者前期对杭州市的SS削减模型参数进行了探索<sup>[1]</sup>,本研究在此基础上进一步分析了SS削减率与去除率的区别,并对COD、氨氮、TP的模型参数进行了研究,同时通过实际监测数据对模型参数进行检验。

### 1 从SS去除率到SS削减率的发展历程

SS削减率(原SS去除率)作为表征海绵城市对水环境污染控制的重要指标被列入重点关注范围,通常认为SS与COD、氨氮、TP具有相关关系,因此将SS作为海绵城市独有的水质指标,且考虑到其具有易测性,因此常与年径流总量控制率一同被提出并作为控制指标。但SS削减率的提出也经历了一个历史发展过程。

2014年《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中指出:低影响开发(LID)雨水系统的年SS总量去除率一般可达到40%~60%。此处的年SS总量去除率可用下述方法进行计算:年SS总量去除率=年径流总量控制率×LID设施对SS的平均去除率。

而2018年的《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)中改用SS削减率作为评价指标,具体项目中改造区不低于40%、新建区不低于70%(公园及防护绿地除外)。这是对2014年原指南中采用SS去除率的修正,是几年来海绵城市建设理论体系和实践操作发展的经验总结。假设研究区域的地表污染物本底浓度为 $M_0$ ,LID建设前(传统开发模式下)流出研究区域的污染物浓度为 $M_1$ ,LID建设后(海绵城市建设模式下)流出研究区域的污染物浓度为 $M_2$ ,则原指南中提出的SS去除率 $= (M_0 - M_2) / M_0$ ,但 $M_0$ 涉及降雨本身污染和下垫面污染的变化情况(即上述的累积、冲刷模型),很难测定,因此引入了年径流总量控制率指标。但采用年径流总量控制率与LID设施去除率相乘的这种方法有个前提,即LID设施对研究区域内的硬化面积产流100%控制,这显然属于理想状态,对于产流无法收集处理的硬

化区域,原指南并未规定其SS去除率的计算方法。总而言之,对于 $(M_0 - M_2) / M_0$ 没有一个确定的值来衡量,因为本底值 $M_0$ 的监测难度大,何况年径流总量控制率的计算本身也会有误差,这让SS去除率的准确计算难上加难。

2018年的新标准采用SS削减率则解决了这一难题,即SS削减率通过 $(M_1 - M_2) / M_1$ 计算,由于 $M_1$ 和 $M_2$ 均可测,且具有对比性,因此可操作性大大增强。另外,若采用模型计算,不管 $M_0$ 的计算模式和参数如何不同,SS削减率的计算主要考虑 $M_1$ 和 $M_2$ 的变化,因此弱化了 $M_0$ 的计算模式对结果的影响,同时这一改变也摆脱了SS污染计算对年径流总量控制率的完全线性依赖关系,但也不是完全无关,即根据累积-冲刷模型原理,在年径流总量控制率较高的情况下,SS削减率也会相应提高,因为减少了冲刷量。

### 2 其他污染物模型参数研究

径流污染削减率可采用污染物累积模型和降雨冲刷模型进行计算<sup>[2]</sup>。笔者前期对杭州市的SS削减模型参数进行了探索<sup>[1]</sup>,本研究重点对其他污染物如COD、氨氮、TP等的模型参数进行研究探讨。仍按照累积和冲刷模型概化,累积指数增长函数模型如下:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (1)$$

式中: $B$ 为污染物累积量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $C_1$ 为最大可能累积量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $C_2$ 为累积速率常数, $\text{d}^{-1}$ ;  $t$ 为时间, $\text{d}$ 。

降雨冲刷指数模型如下:

$$W = C_3 q^{C_4} B \quad (2)$$

式中: $W$ 为冲刷负荷, $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$ ;  $q$ 为单位时间的径流量, $\text{mm}/\text{h}$ ;  $C_3$ 为冲刷系数, $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})^{-C_4}/\text{h}$ ;  $C_4$ 为冲刷指数。

COD、氨氮、TP考虑降解,降解模型如下:

$$C = C_0 e^{-Kt} \quad (3)$$

式中: $C_0$ 为初始浓度, $\text{mg}/\text{L}$ ;  $C$ 为降解后浓度, $\text{mg}/\text{L}$ ;  $K$ 为降解系数, $\text{d}^{-1}$ 。

具体参数可结合监测实验研究确定,当缺乏数据资料时,可参考相关文献、结合项目实践研究获取<sup>[3]</sup>。笔者在评估实践探索过程中,确定了杭州的径流污染物COD、氨氮、TP的累积和冲刷模型参数(如表1所示),以及它们的降解系数,分别为0.5、0.2、0.07  $\text{d}^{-1}$ (山区)或0.15、0.15、0.07  $\text{d}^{-1}$ (平原)。

表1 杭州市降雨径流污染物COD、氨氮和TP的累积和冲刷模型参数参考值  
Tab.1 Parameters reference values for accumulation and wash-off models of COD, NH<sub>3</sub>-N and TP in runoff in Hangzhou City

用地性质	累积模型						冲刷模型					
	$C_1/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$			$C_2/\text{d}^{-1}$			$C_3/[(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})^{-C_4}\cdot\text{h}^{-1}]$			$C_4$		
	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP
公建	44.75	3.85	0.395	0.490	0.280	0.200	31.25	10.95	6.35	1.800	1.865	1.675
居住	45.00	3.85	0.395	0.535	0.320	0.200	30.50	12.00	6.30	1.795	1.810	1.685
商业	45.00	3.95	0.400	0.525	0.295	0.200	31.00	11.10	6.05	1.780	1.840	1.690
公园	31.25	2.95	0.355	0.450	0.180	0.205	20.75	7.65	5.65	1.745	1.800	1.630
道路	63.00	4.40	0.445	0.525	0.430	0.200	35.50	12.00	7.40	2.005	1.885	1.690
工业	44.25	4.05	0.390	0.515	0.290	0.200	34.25	14.25	6.65	1.725	1.830	1.685

3 居住用地径流污染控制模型参数检验

由于上节所述的模型参数是基于理论分析和经验数值所得,为了检验这些模型参数值是否适合实际,笔者在杭州市上城区6个居住小区进行了地表径流污染的离线监测,利用监测数值来检验模型参数的合理性。

3.1 检验样本的代表性

为了保证检验样本的代表性,在杭州市上城区选取了6个小区,在空间上分布比较均匀,其中有老旧小区如南班巷、滨江新苑,也有以前的工人宿舍如电厂二宿舍,还有新式住宅区如海月花园,因此下垫面具有足够的代表性。共设了8个采样点,其中,电厂二宿舍、海月花园、滨江新苑、劳动路社区各设1个采样点,编号分别为GYS1429、8YS4028、Y201098、7YS1674;新工社区和南班巷各设2个采样点,编号分别为Y901780、Y10615和Y94218、Y9277。监测的降雨有小雨、中雨、大雨和暴雨,雨前晴天数从几天到几十天不等(如表2所示),因此降雨也具有足够的代表性。

表2 降雨基本情况

Tab.2 Basic information of rainfall

日期	前期晴天数/d	降雨类型
2019-09-06	4	中雨
2019-09-15	5	大雨
2019-11-27	47	小雨
2020-06-03	9	中雨
2020-06-11	8	中雨
2020-06-22	5	大雨
2020-07-14	7	中雨
2020-08-04	26	暴雨
2020-08-26	22	小雨
2020-09-14	13	大雨

3.2 初期雨水EMC参数分析

统计各小区在不同降雨条件下的平均冲刷浓度,获得杭州市初期雨水径流污染物COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP的EMC(事件平均浓度)值分别为60、7.1、21、2.8 mg/L,与其他地区<sup>[4-7]</sup>相比,杭州居住区的雨水径流中氮、磷浓度相对较高,因此杭州在富营养化控制方面仍需加强。

3.3 累积与冲刷模型参数检验

建立SWMM模型,加载2019年1月3日—12月1日的1 h步长(采样降雨日内加密为1 min步长)连续降雨,采用上述参数,对电厂二宿舍、新工社区、南班巷、滨江新苑、劳动路社区的雨水径流污染情况进行模拟,检验参数的合理性(海月花园只有2020年的监测值,本研究只收集到了2019年的连续降雨,因此暂不列入率定序列)。

2019年监测的3场雨中,9月6日为中雨、9月15日为大雨(台风雨、冲刷过快)、11月27日为小雨,为了具有普遍性,同时考虑到取样过程中的缺失(如南班巷在11月27日未确定具体采样时刻),因此基本采用9月6日的降雨进行率定检验。

2019年劳动路社区和新工社区全部的采样时间缺失,因此不便参与率定;电厂二宿舍的氨氮以及滨江新苑的氨氮和TP测量值与其他小区差别过大,可能存在绿化施肥等偶然性误差,因此也不参与率定。

率定检验的原则为“实事求是”,即不盲目为匹配结果而随意改动参数——因为采样、检测均可能存在误差,同时也要考虑到对样本整体缩小误差,而非迁就某一样本。分析结果如下:

① 南班巷

南班巷降雨径流水质的模拟值和实测值如图1

所示。对于COD,模拟值在10:18—10:37从40.36 mg/L降至40.20 mg/L,基本未发生变化,而实测值则经历了从52 mg/L降至32 mg/L的变化,但总体来说模拟值与实测值基本相当,COD实测值变化较大,而模拟值则变化较小,说明模型概化程度较高,因此对结果的判定偏于宏观,要进一步吻合时,需要对模型进一步划分细致的子汇水分区,深化建模。对于氨氮,模拟值在10:18—10:37从2.16 mg/L降至1.55 mg/L,而实测值则经历了从2.84 mg/L降至1.85 mg/L的变化,模拟值比实测值总体偏低,有可能是因为现实中小区园林施肥等活动影响所致。对于TP,模拟值在10:18—10:37从0.47 mg/L降至0.38 mg/L,而实测值则从0.51 mg/L降至0.28 mg/L,总体来看模拟值与实测值大致吻合。

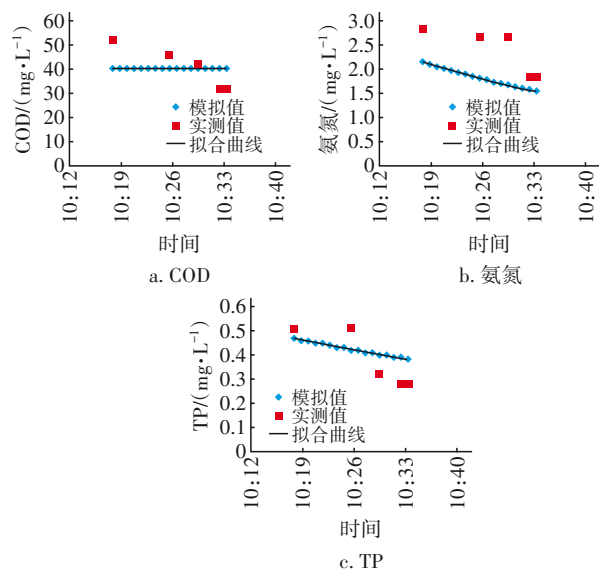


图1 南班巷2019年9月6日降雨径流水质模拟值与实测值的对比

Fig.1 Comparison of simulated and measured results of runoff water quality in Nanbanxiang on Sep. 6, 2019

## ② 电厂二宿舍

电厂二宿舍降雨径流水质的模拟值和实测值如图2所示。可以看出,COD的模拟值在实测值波动范围内,随时间变化较平缓,并接近实测值的平均值;氨氮模拟值相比实测值偏低,由于氨氮实测值在5~7 mg/L之间,与3.2节的EMC值接近,因此可参与率定。电厂二宿舍与南班巷两个案例说明,模型的COD参数值基本可靠,但氨氮参数值可能偏小。另外,电厂二宿舍的TP模拟值相比实测值也偏低很多,TP实测值显著高于3.2节的EMC值,说明

存在施肥的可能性很大。

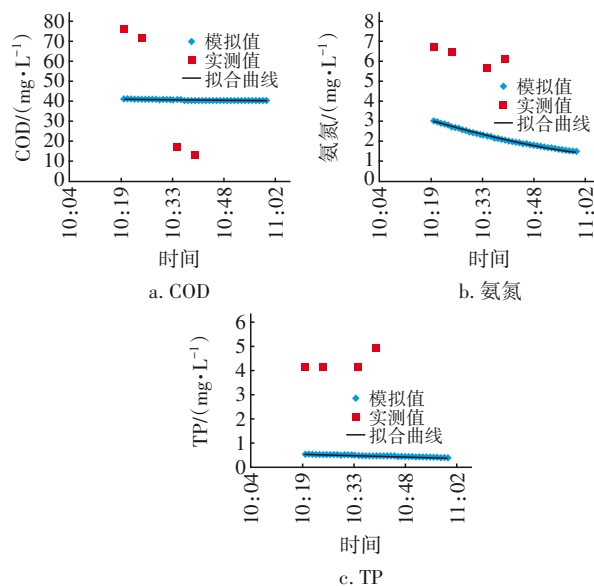


图2 电厂二宿舍2019年9月6日降雨径流水质模拟值与实测值的对比

Fig.2 Comparison of simulated and measured results of runoff water quality in Dianchangersushe on Sep. 6, 2019

## ③ 滨江新苑

滨江新苑降雨径流水质的模拟值和实测值如图3所示。

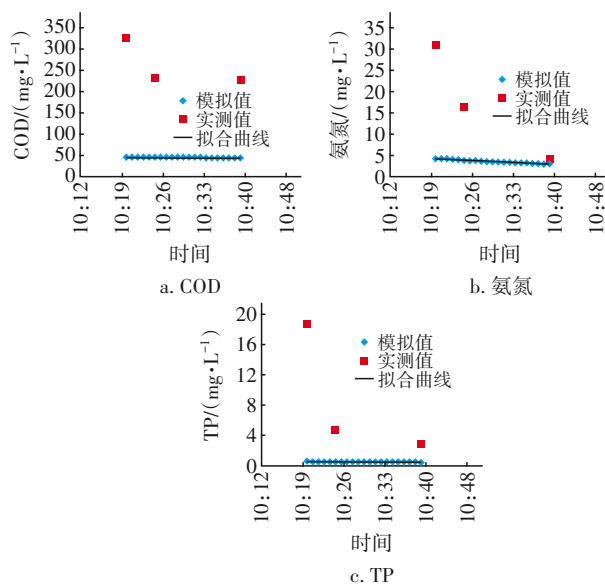


图3 滨江新苑2019年9月6日降雨径流水质模拟值与实测值的对比

Fig.3 Comparison of simulated and measured results of runoff water quality in Binjiangxinyuan on Sep. 6, 2019

由图3可知,COD模拟值偏低,但取样之前9:10模拟值达到了250 mg/L,到9:20降至100 mg/L,到



10:20已经降至45 mg/L,因此模拟的过程比实测过程提前,说明模型场地较大,模型概化的流程比实际短,因此模型的初期雨水冲刷效应提前发生了。氨氮和TP的模拟值也比实测值低很多,说明滨江新苑的地面冲刷污染远高于一般小区,受到施肥等偶尔活动的影响很大,不适合用于模型参数率定。

综合3个小区、9组数据的检验(排除4组偶然误差大的异常数据),证明相关研究所确定的杭州居住用地的COD、氨氮、TP的累积和冲刷模型参数基本可靠,可应用于杭州市“十四五”期间海绵城市建设过程中的规划、设计、评估等环节。其中,氨氮的参数值可能总体略偏低,后续可结合进一步深化研究进行调整。

#### 4 结论

通过总结海绵城市建设中径流污染控制的关键指标SS从去除率到削减率的历史进程,以及其他指标如COD、氨氮、TP的污染规律,给出了相应的模型参数设置建议;并通过实测不同类型居住小区在不同降雨条件下的径流水质,对给出的污染模型参数进行了检验,为模型参数的应用提供了实践支撑;同时,径流水质离线监测数据表明,杭州地表清扫较为及时,COD污染可控,但氮、磷控制依然任重道远,通过海绵城市建设对氮、磷等营养物质进行有效控制,对提升水环境质量意义重大。

由于采样不可避免存在误差,受降雨数据和取样数量的限制,可用于检验模型参数的样本数量较少,缺乏连续监测资料导致模型率定可能只能就某一采样时段去对应,因此更精细的参数研究尚需更多的数据积累支持,尤其是后期可着手调整氨氮的参数值;但从另一层面来说,径流污染控制应着眼大范围、长时间的污染物影响,而非只是某一时刻、某一局部的准确性,总体的全局影响更加关键,因此建议海绵城市径流污染模型参数设置应从大局出发,宜粗则粗、宜细则细,不应一概而论。

#### 参考文献:

- [1] 李国君,王永,梁振凯,等. 海绵城市建设区域化效果评估探讨[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 76-80.
- LI Guojun, WANG Yong, LIANG Zhenkai, *et al.* Evaluation of regionalized effect of sponge city

construction [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 76-80 (in Chinese).

- [2] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.0) [M]. Washington DC: US EPA, 2009.
- [3] 陈新拓,陈琳,余佳,等. 成都市典型黑臭河道水质特征的SWMM模型分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S1): 212-217.
- CHEN Xintuo, CHEN Lin, SHE Jia, *et al.* Analysis on water quality character of typical malodorous river in Chengdu City by SWMM model [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(S1): 212-217 (in Chinese).
- [4] 李海燕,罗艳红,张悦. LID措施在道路雨水利用工程中的应用[J]. 节水灌溉, 2013(11): 44-49.
- LI Haiyan, LUO Yanhong, ZHANG Yue. Application of LID in road runoff utilization engineering [J]. Water Saving Irrigation, 2013(11): 44-49 (in Chinese).
- [5] 贺涛,管伟,杨乐亮,等. 快速城市化地区典型城市路面径流污染试验及特征分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 30-33.
- HE Tao, GUAN Wei, YANG Leliang, *et al.* Test and characteristics analysis of road surface runoff pollution of typical city in rapidly urbanized area [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 30-33 (in Chinese).
- [6] 肖海文. 城市径流特征与人工湿地处理技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- XIAO Haiwen. Study on Characteristic of Urban Runoff and the Technology of Constructed Wetland for Urban Runoff Treatment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010 (in Chinese).
- [7] 王业雷. 南昌市城区降雨径流污染过程与防治措施研究[D]. 南昌:南昌大学, 2008.
- WANG Yelei. The Study on the Rainfall Runoff Pollution Process and Prevention Measure in Nanchang Urban [D]. Nanchang: Nanchang University, 2008 (in Chinese).

作者简介:王永(1985-),男,陕西彬州人,硕士,高级工程师,研究领域为海绵城市、排水防涝、综合管线、给排水水力水质建模等。

E-mail:254622933@qq.com

收稿日期:2022-01-30

修回日期:2022-04-06

(编辑:刘贵春)