

基于SWMM的LID措施对城市面源污染削减效果研究

李连文^{1,2}, 代张路³, 李 昂¹, 刘加强¹, 苏林萌²

[1.徐州工程学院环境工程学院,江苏 徐州 221111;2.济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司徐州分公司,江苏 徐州 221007;
3.江苏瑞杰项目管理顾问有限公司徐州分公司,江苏 徐州 221007]

摘 要:城市面源污染已成为我国城市水环境治理的重点对象,但由于时空分布不均、污染途径随机及成分复杂多变等特点,使城市面源污染的治理难度较高。在充分调研的基础上,建立徐州经济技术开发区三八河流域 SWMM 模型,模拟分析研究不同重现期下(1 a、2 a、3 a、5 a、10 a)单一 LID 措施及组合 LID 措施对面源污染削减的效果。模拟结果表明:LID 控制措施占比越高,对污染物的削减效果越好;城市径流污染受降雨强度影响较大,降雨强度越大,径流污染物平均浓度越低;生物滞留设施对污染物削减效果要优于雨水花园和绿色屋顶;LID 措施组合使用时,多种源头控制措施并没有呈现叠加效果,建议应用源头控制措施加末端控制措施组合方案以提高污染物削减效果。

关键词:SWMM 模型;城市面源污染;LID 控制措施;组合措施方案;污染物排放平均浓度;污染物削减率

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2022)12-0203-05

0 引 言

“十三五”期间,我国污染防治攻坚战和生态系统整治取得了重大成效,但挑战压力仍在。我国对黑臭水体进行了综合整治,但治理后城市内河出现大量返黑返臭的现象^[1]。在我国点源污染已基本被控制的情况下,城市面源污染的治理成为水环境治理的主要对象及新挑战^[2]。城市面源污染是地表累积的污染物随着降雨径流,经排水系统进入受纳水体,造成城市水体污染。其时空分布离散、污染途径随机、成分复杂多变的特点使其治理难度较大。城市面源污染控制技术由原来的围绕末端处理设施过渡到现在的重视源头控制技术,当前推崇采用低影响开发源头削减措施来治理城市径流污染^[3]。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中规定“用于分流制排水系统径流污染控制的雨水调蓄设施的设计应按当地相关规划确定的年径流总量控制率、年径流污染控制率等目标计算调蓄量,并应以源头减排设施为主”^[4]。本文以徐州市经济技术开发区房亭河水环境综合整治工程为研究对象,探讨单一 LID 措施及组合措施在城市面源污染控制上的实际应用及削减效果,为

下一步工程设计及实施提供依据。

1 研究区概况

研究对象为徐州经济技术开发区三八河排水片区,排水区面积约为 12.8 km²,三八河汇水区属于已建成区,排水分区范围内徐海路以北建筑密度高,徐海路以南为金龙湖生态风景区,建筑密度相对较低。三八河汇水区范围图如图 1 所示。



图 1 三八河汇水区范围图

区域内排水体制采用雨污分流制,雨水管道及管渠材质为钢筋混凝土,施工质量较好,雨水管道管径为 d400~d2000,管渠尺寸介于 $B \times H = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \sim 5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 之间,基本上能够满足 2 年重现期要求,雨水管道(渠)数据来源于最新管网普查数据。排水管网普查图如图 2 所示。

收稿日期:2022-04-19

基金项目:徐州市重点研发计划(KC19218)

作者简介:李连文(1992—),男,硕士,助理工程师,主要从事城市防洪排涝及面源污染研究与设计工作。

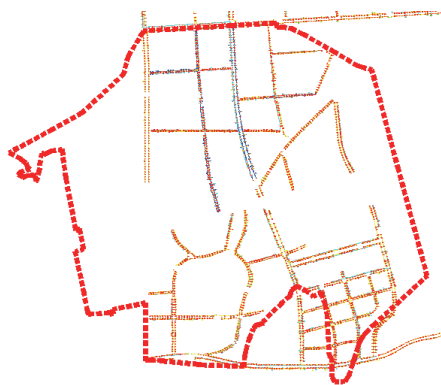


图2 排水管网普查图

2 SWMM 模型构建

2.1 子汇水区划分

首先利用 ArcGIS 软件对研究区进行子汇水区划分,然后根据道路分布及雨水管道情况进行手动调整,得到子汇水区 491 个,节点 524 个(包含排出口),结果如图 3、图 4 所示。

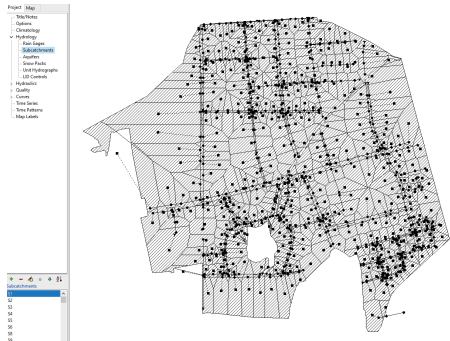


图3 SWMM 概化图



图4 建筑图层 shp

2.2 不透透系数计算

不透透系数根据子汇水区内的不同的下垫面性质加权平均得出。对研究区内测量资料进行分析,将其下垫面性质分为道路、建筑、其他及绿地四种,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)和文献研究成果^[5]得到道路、建筑、其他及绿地综合径流系数取值分别为 0.75、1、0.3、0.2,然后利用 ArcGIS 软件进行加权平均计算。

2.3 模型参数取值

因研究内容为城市面源污染削减,需搭建水文模型和水质模型。

(1)水文模型:地表产流模型采用 Horton 下渗模型,汇流模型采用非线性水库模型;(2)水质模型:污染物累积模型采用 EXP 累积方程,污染物冲刷模型采用 EXP 冲刷方程。

根据 SWMM 模型用户手册及文献研究^[6-9],SWMM 模型水文参数获取方法及取值表、SWMM 模型水质参数取值表见表 1、表 2。

表 1 SWMM 模型水文参数获取方法及取值表

参数名称	取值
最大入渗率	60 mm/h
最小入渗率	4 mm/h
衰减系数	4 h ⁻¹
透水区曼宁 n 值	0.15
不透水区曼宁 n 值	0.012
透水区注蓄量	5 mm
不透水区注蓄量	2 mm

表 2 SWMM 模型水质参数取值表

土地利用类型	水质参数	取值	
		COD	TN
道路	污染物最大累积量/(kg·hm ⁻²)	150	6
	污染物累积速率常数(d ⁻¹)	10	10
	污染物冲刷常数	0.007	0.002
	污染物冲刷指数	1.6	1.7
建筑屋面	污染物最大累积量/(kg·hm ⁻²)	80	4
	污染物累积速率常数(d ⁻¹)	10	10
	污染物冲刷常数	0.006	0.002
绿地	污染物冲刷指数	1.5	1.7
	污染物最大累积量/(kg·hm ⁻²)	40	10
	污染物累积速率常数(d ⁻¹)	10	10
	污染物冲刷常数	0.004	0.001
	污染物冲刷指数	1.1	1.2

2.4 降雨数据

降雨数据采用合成数据,采用芝加哥雨型与徐州市暴雨强度公式合成降雨数据,降雨历时取 180 min,雨峰系数取为 0.4,分别模拟重现期为 1 a、2 a、3 a、5 a 和 10 a 五种不同重现期的降雨,降雨过程如图 5 所示。徐州市暴雨强度公式如式(1):

$$q=\frac{167(16.007+11.48\lg P)}{(t+17.217)^{0.7069}}$$

(1)

式中:q 为暴雨强度,(L/s)/ha;P 为设计重现期,a;t 为降雨历时,min。

2.5 模型率定

选用 20210820、20210901 两场降雨进行模型率

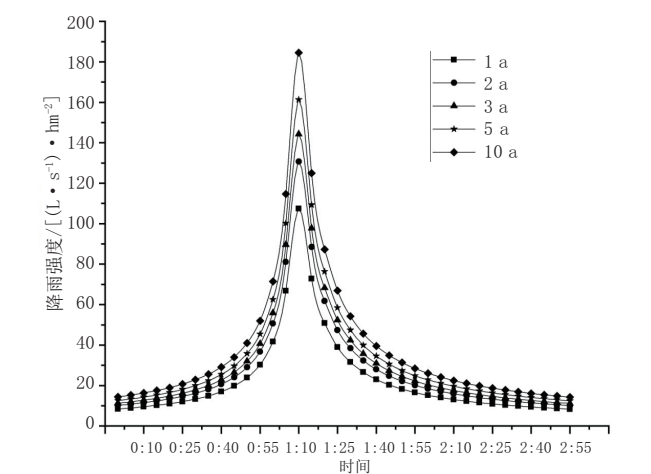


图5 不同重现期下降雨过程线

定与验证,降雨数据及径流数据均来源于经开区水务处,COD_{Cr}浓度数据来源于课题组实验检测数据,其结果分别如图6、图7所示。两场降雨模拟和实测峰值偏差分别为5.13%、6.38%,峰现时间分别相差7 min、9 min,根据《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS647—2019),模型结果具有可信度^[10]。

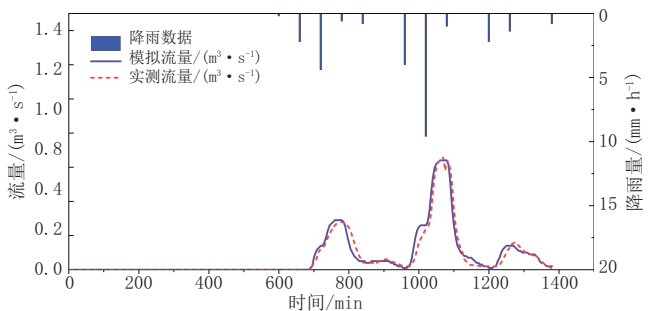


图6 20210901 径流模拟—实测曲线

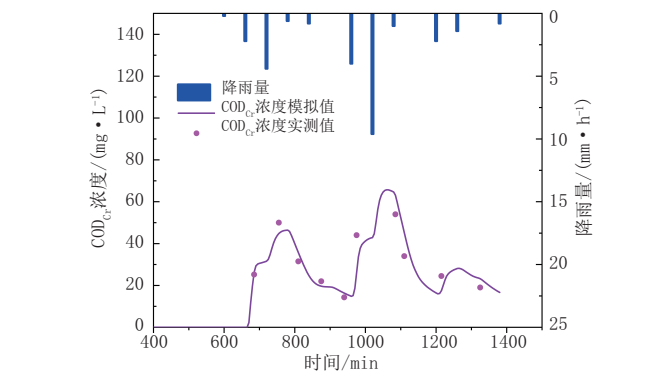


图7 20210820 COD_{Cr} 模拟—实测曲线

3 LID 措施的设置

3.1 LID 措施选取及参数设置

结合相关研究文献以及工程实际^[11-12],考虑到研究区域为已建成区,进行渗透路面等改造较为复杂且施工困难,因此拟采用绿色屋顶、生物滞留设施、雨水花园三种常见的LID措施进行研究。根据

SWMM 中文手册及查阅相关文献,绿色屋顶、生物滞留设施、雨水花园具体参数设置见表3、表4、表5。

表3 绿色屋顶参数设置一览表

项目	参数名称	参数取值
表面层	蓄水深度/mm	60
	植被覆盖小数	0.1
	表面粗糙度	0.1
	表面坡度/%	2
土壤层	厚度/mm	150
	孔隙率	0.45
	产水能力	0.2
	枯竭点	0.1
	导水率	12.5
	导水率坡度	10
	吸水头	110
排水垫层	厚度/mm	200
	空隙率	0.5
	粗糙系数	0.1

表4 生物滞留设施参数设置一览表

项目	参数名称	参数取值
表面层	蓄水深度/mm	300
	植被覆盖小数	0.2
	表面粗糙度	0.1
	表面坡度/%	0.3
土壤层	厚度/mm	300
	孔隙率	0.5
	产水能力	0.2
	枯竭点	0.1
	导水率	10
	导水率坡度	10
	吸水头	90
蓄水层	高度/mm	500
	空隙比	0.75
	下渗率	0.5

表5 雨水花园设施参数设置一览表

项目	参数名称	参数取值
表面层	蓄水深度/mm	200
	植被覆盖小数	0.8
	表面粗糙度	0.1
	表面坡度/%	2
土壤层	厚度/mm	400
	孔隙率	0.5
	产水能力	0.2
	枯竭点	0.1
	导水率	12.5
	导水率坡度	10
	吸水头	110

3.2 LID 措施设置原则

LID 措施应用中,采用雨水花园应用于对现状绿地进行改造,生物滞留设施应用于对现状裸露地表

进行改造,绿色屋顶应用于对建筑屋面进行改造。考虑 LID 措施的可实施性,需要对各子汇水区的现状绿地、裸露地表面积和建筑面积进行计算,计算步骤如下(以建筑面积计算为例):(1)将“建筑”用地性质径流系数定义为 100,其它所有的用地性质径流系数定义为 1;(2)采用子汇水区综合径流系数计算方法计算出该种情况下各个子汇水区的综合径流系数;(3)利用如下公式计算出“建筑”图层的面积在各个子汇水区中所占比例。

$$100X+1\times(1-X)=C$$

(2)

式中: X 为用地性质所占子汇水区的比例; C 为此种情况下的综合径流系数。

采用同样的方法计算出现状绿地、裸露地表两种用地性质所占各个子汇水区的比例,结果见表 6。

表 6 不同用地性质所占各子汇水区的比例(部分)

名称	面积/hm ²	建筑 /%	裸露地表 /%	绿地 /%
S1	26.91	24	9	22
S2	7.28	13	12	25
S3	3.12	14	23	21
S4	11.55	44	18	13
S5	0.71	14	49	12
S6	0.90	21	23	19
S8	4.41	22	10	23
S9	24.14	23	7	24
S10	1.39	21	17	21

生物滞留设施、雨水花园与绿色屋顶对应的改造比例分别设置 20%、40%、60%、80% 四种情况。

4 模拟结果与分析

在进行径流污染控制效果分析时,污染物削减率以污染物排放总量来进行计算,污染物排放浓度以 EMC(场次降雨平均浓度)表示,以便与《地表水环境质量标准》中各类水体标准进行对比。

4.1 单一 LID 措施削减效果分析

将生物滞留设施、雨水花园与绿色屋顶三种 LID 措施设置在 SWMM 模型中,按面积占比分别为 20%、40%、60%、80%,模拟 1 a、2 a、3 a、5 a、10 a 降雨情况下的污染物削减与排放情况,其结果如图 8 至图 10 所示(以 COD 削减率及排放平均浓度为例)。

根据结果可知,生物滞留设施、雨水花园与绿色屋顶面积占比越高,即改造面积越大,COD、TN 污染物削减率越高。改造比例分别为 20%、40%、60%、

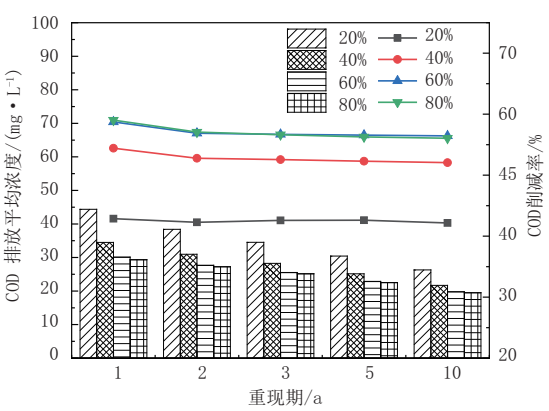


图 8 生物滞留设施 COD 削减率及排放平均浓度

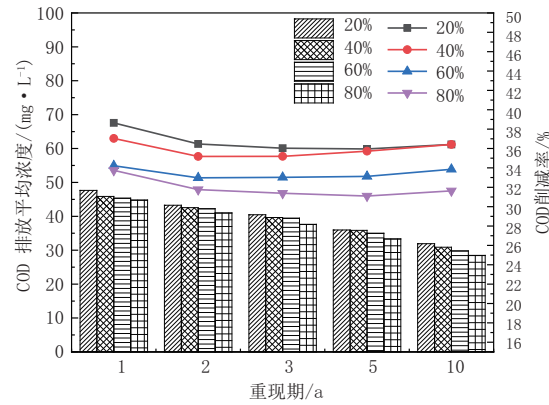


图 9 雨水花园 COD 削减率及排放平均浓度

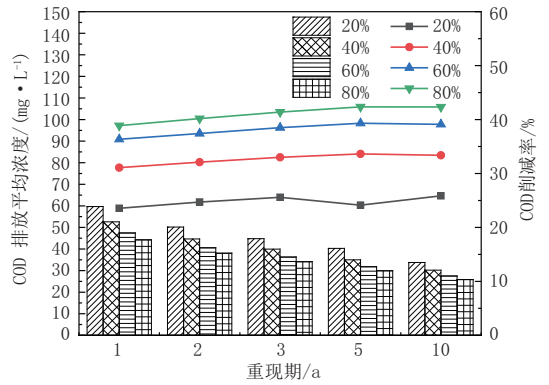


图 10 绿色屋顶 COD 削减率及排放平均浓度

80%时,生物滞留设施不同重现期下的 COD 平均污染物削减率介于 42.50%~57.10%之间,TN 平均污染物削减率介于 48.09%~54.93%之间;雨水花园不同重现期下的 COD 平均污染物削减率介于 31.92%~36.71%之间,TN 平均污染物削减率介于 27.02%~33.33%之间;绿色屋顶不同重现期下的 COD 平均污染物削减率介于 24.77%~41.03%之间,TN 平均污染物削减率介于 19.48%~33.76%之间。

在同一重现期条件下,LID 措施改造面积占比越高,COD、TN 污染物排放平均浓度越低。在 1 a 一遇降雨强度时,分别设置生物滞留设施、雨水花园与绿色屋顶措施后,COD 污染物排放平均浓度分别在 19.51~26.31 mg/L、31.92~47.67 mg/L、33.77~

59.68 mg/L, TN 污染物排放平均浓度分别在 0.97~1.60 mg/L、1.58~1.68 mg/L、1.73~2.03 mg/L; 在 10 a 一遇降雨强度时, COD 污染物排放平均浓度分别在 19.51~26.31 mg/L、28.48~44.79 mg/L、25.89~44.29 mg/L, TN 污染物排放平均浓度在 1.06~1.49 mg/L、1.50~1.57 mg/L、1.36~1.44 mg/L。COD、TN 污染物排放平均浓度也均高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中Ⅲ水体 COD、TN 的污染物指标值。

根据以上对单一生物滞留设施、雨水花园与绿色屋顶径流污染效果分析可知, 污染物控制效果生物滞留设施>雨水花园/绿色屋顶, 雨水花园与绿色屋顶污染物控制效果相近, 随着改造面积的增大, 雨水花园污染物控制效果变化率相对更小。

4.2 组合 LID 措施削减效果分析

根据单一 LID 措施污染物削减效果, 单一 LID 措施无法达到Ⅲ类水体排放标准。本文设置两种组合措施方案进行削减效果研究。方案一: 改造比例为 60% 的生物滞留设施 + 8 mm 调蓄量的调蓄池, 调蓄池设置位置、原则详见其他研究成果; 方案二: 改造比例为 60% 的生物滞留设施 + 改造比例为 40% 的绿色屋顶 + 改造比例为 20% 雨水花园, 其模拟结果如图 11、图 12 所示。

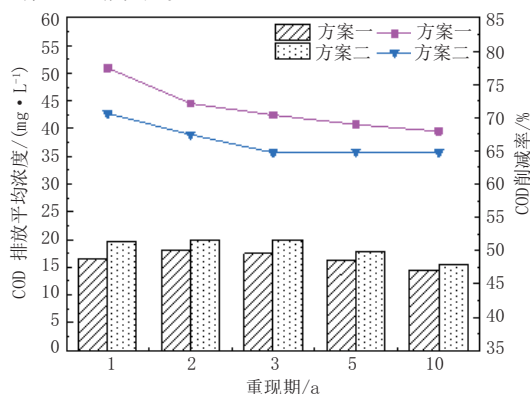


图 11 组合方案 COD 削减率及排放平均浓度

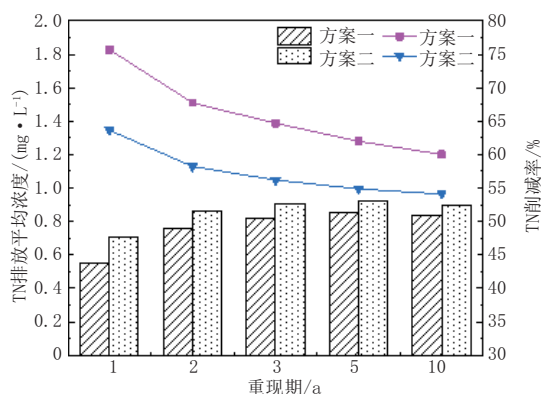


图 12 组合方案 TN 削减率及排放平均浓度

由图 11、图 12 可知, 在暴雨重现期分别为 1 a、2 a、3 a、5 a、10 a 时, 方案一的 COD 污染物削减率分别为 77.45%、72.11%、70.38%、68.95%、67.93%, TN 污染物削减率分别为 75.70%、67.74%、64.68%、61.99%、60.02%; 方案二的 COD 污染物削减率分别为 70.61%、67.45%、64.71%、64.88%、64.77%, TN 污染物削减率分别为 63.64%、58.20%、56.21%、54.85%、54.10%。随着降雨强度的增加, COD、TN 污染物的削减率随之减少。

在不同暴雨重现期时, 方案一组合措施下的 COD 污染物排放平均浓度在 14.45~17.99 mg/L 之间, TN 污染物排放平均浓度在 0.55~0.84 mg/L 之间; 方案二组合措施下的 COD 污染物排放平均浓度在 15.60~19.93 mg/L 之间, TN 污染物排放平均浓度在 0.71~0.92 mg/L 之间。

经组合方案一与组合方案二对径流污染物进行削减后, 其排放水质能够达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中Ⅲ水体 COD、TN 的污染物指标值。组合方案一污染物削减效果要高于组合方案二, 这是因为多种源头控制措施同时使用具有效果递减效应, 源头控制措施 + 末端控制措施往往能够达到更高的削减效果。

5 结论

(1) 径流污染受降雨强度影响较大, 降雨强度越大, 径流污染物总量越高; 但随着降雨量增加, 排入受纳水体的水量也随之增加, 降雨量增加率要高于污染物增加率, 即降雨强度越小, 排放水质污染物浓度越高。

(2) 单一 LID 控制措施较难达到地表Ⅲ类水体排放标准的控制目标, 需要对 LID 控制措施进行组合使用。生物滞留设施污染物削减效果要优于雨水花园和绿色屋顶, 故在组合措施方案使用时, 建议以生物滞留设施为主。

(3) 源头控制措施同时使用时, 污染物削减效果要优于单一 LID 控制措施, 但其具有效果递减效应, 当排水水质要求较高时, 建议采用源头控制措施 + 末端控制措施组合使用, 以达到更高的污染物削减效果。

参考文献:

- [1] 李永新, 王威, 何妹, 申泰铭. 基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2257~2263.
- [2] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源

(下转第 232 页)