

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220614

基于 SWMM 模型的服务区降雨径流和非点源污染控制研究

倪 栋¹, 王 笑¹, 张 杰²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 为解决高速公路服务区降雨径流污染物控制问题,以铁山服务区为例,采用 SWMM 模型构建了服务区水文和水质模型,基于 LID 设施选取原则与服务区场地条件,研究了不同暴雨重现期条件下无 LID 设施、渗透铺装与绿色屋顶组合、下凹式绿地与绿色屋顶组合、渗透铺装与下凹式绿地组合 4 种方案下服务区雨水径流及污染物的控制效能。结果表明,3 种组合 LID 设施对服务区降雨径流量、径流峰值、污染物浓度和污染物总负荷均有一定的削减作用,其中渗透铺装与下凹式绿地的 LID 组合设施方案截污减排效果最优;LID 设施在降雨强度小时对降雨径流和污染物的控制效能较降雨强度大时更强。

关键词: SWMM; LID 组合设施; 服务区降雨径流; 污染控制

中图分类号: TV121.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0031-04

1 引言

作为高速公路的重要附属设施,高速公路服务区的行车道、停车位及建筑物等不透水下垫面占比非常大,不仅使得雨水下渗量很小,且通常累积了大量污染物。这些污染物在降雨的淋洗、冲刷作用下进入雨水径流,最终排入天然水体,是一种典型的非点源污染,极易造成周围水体污染和黑臭问题。通过模型模拟区域水文水质过程是研究雨水径流和非点源污染控制的重要手段,美国国家环境保护局开发的 SWMM 模型自 5.1 版本后加入了 LID 模块,不仅能够模拟连续变化的雨水水量及水质,且可模拟设置在汇水区域内的渗透铺装、雨水花园、绿色屋顶、下凹式绿地、生物滞留设施、渗滤沟等 LID 措施,因此 SWMM 模型被广泛应用于区域降雨径流和非点源污染的控制研究。SEENU P Z 等^[1]基于 SWMM 模拟了印度南部海德拉巴市的暴雨内涝时空变化;JANG S 等^[2]基于 SWMM 对韩国四个规划区的排水系统及污染负荷进行了评估;陆昕等^[3,4]采用 SWMM 研究了不同 LID 设施对普洱隧道服务区 and 那柯里服务区径流控制效果;王丽娟等^[5]采用 SWMM 对某服务区排水系统进行了优化研究。然而,目前大多海绵服务区的研究主要集中在服

务区雨洪的控制,而较少考虑服务区非点源污染的控制。为此,本文以铁山服务区为例,采用 SWMM 模型构建了服务区水文和水质模型,基于 LID 设施选取原则与服务区场地条件,研究了在不同暴雨重现期和不同 LID 组合设施条件下服务区雨水径流及污染物的削减效果,以期海绵服务区建设提供参考。

2 SWMM 模型基本原理

2.1 地表产汇流

采用霍顿(Horton)模型计算产流过程的下渗,其计算公式为:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

式中, f_t 为历时 t 的下渗率; f_c 为稳定下渗率; f_0 为土壤初始下渗率; k 为下渗衰减常数; t 为历时。

地表汇流是指各子汇水区的净雨汇集至出口断面的过程。SWMM 模型采用非线性水库法,通过联立连续方程和曼宁方程计算地表径流量,计算公式为:

$$dV/dt = A dh/dt = Ai^* - Q \quad (2)$$

式中, V 为总蓄水量; A 为子汇水区面积; h 为水深; i^* 为净雨强度; Q 为径流量。

2.2 管网汇流

选择动力波法计算管网的水流特征,其控制

收稿日期: 2022-03-30, 修回日期: 2022-05-10

作者简介: 倪栋(1982-),男,硕士,副研究员,研究方向为水环境,E-mail:81205401@qq.com

通讯作者: 王笑(1990-),女,博士,助理研究员,研究方向为水环境数值计算,E-mail:1029323406@qq.com

方程包括管道控制方程和节点控制方程。

(1)管道控制方程。管道控制方程包括连续方程和动量方程,即:

$$\partial Q/\partial x + \partial A_s/\partial t = 0 \quad (3)$$

$$gA_s \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A_s)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gA_s S_f = 0 \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度; A_s 为过流断面面积; S_f 为摩阻坡度。

(2)节点控制方程。管网节点的控制方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A_{sk}} \sum_{i=1}^m Q_{ii} \quad (5)$$

式中, m 为节点的管网数目; Q_{ii} 为 t 时刻第 i 个进出节点的流量; A_{sk} 为节点的自由表面积。

2.3 污染物累积—冲刷

SWMM 模型提供了 3 种污染物累积模型,包括幂函数、指数函数和饱和函数。采用指数函数模拟污染物的累积过程,其表达式为:

$$b = B_{\max}(1 - e^{-K_B t}) \quad (6)$$

式中, b 为单位面积上的累积量; B_{\max} 为最大累积量; K_B 为衰减常数; t 为衰减时间。

SWMM 模型提供了 3 种污染物冲刷模型,包括比例径流曲线、场次平均浓度模型和指数函数冲刷模型。采用指数冲刷模型来模拟污染物的

冲刷过程,其表达式为:

$$\omega = K_w q^{N_w} m_B \quad (7)$$

式中, ω 为单位面积的冲刷负荷; K_w 为冲刷系数; q 为径流速率; N_w 为冲刷指数; m_B 为剩余的地表污染物累积量。

3 研究区 SWMM 模型构建

3.1 铁山服务区概况

铁山服务区位于广西北海市境内,地处低纬度,属亚热带海洋性气候,温暖潮湿。区域多年平均气温 22.6℃,年均降水量为 1 548 mm,多集中于 6~9 月,降雨量占全年的 83% 以上,年平均暴雨日数为 8.2 d,年平均蒸发量为 1 869.6 mm,周围最大的地表水体为铁山港。铁山服务区是兰海高速沿线广东茂名与广西北海间重要的门户节点,服务区的地势总体上呈西北高、东南低。

3.2 模型概化

根据铁山服务区设计文件,结合服务区排水管网走向和雨水口、停车场、绿化区域、建筑物及道路分布情况,构建了适用于服务区雨洪模型的排水管网拓扑结构,见图 1。服务区雨洪模型被概化为 115 个子汇水区,雨水管段 69 条(L1~L69),节点 69 个(J1~J69),排水口两个(O1 和 O2)。

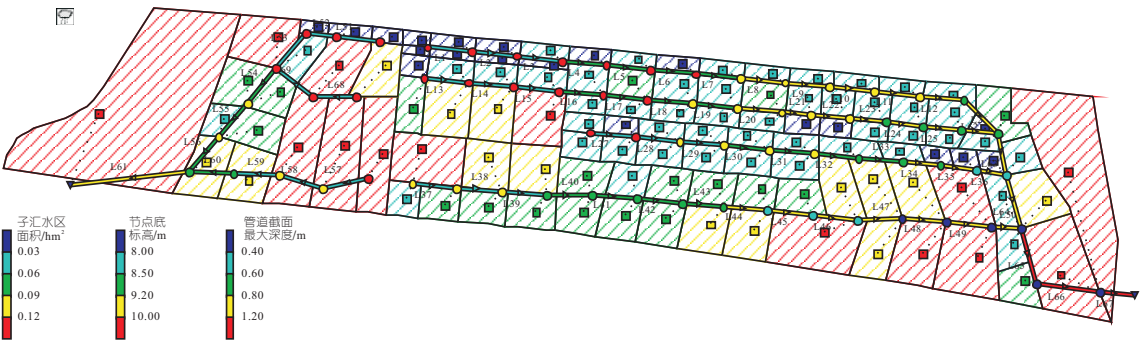


图 1 铁山服务区雨洪模型

Fig. 1 Storm water model of Tieshan service area

3.3 参数选取及率定验证

由于服务区还在施工中,无法获取实测的流量数据和径流污染物浓度。因此,采用无需实测数据的综合径流系数法对水文模型参数进行率定^[6],该方法通过对比综合径流系数和径流系数模拟值实现模型参数率定,而水质模型参数通过参考 SWMM 用户手册及相关文献获取^[7,8]。表 1 为 SWMM 水文模型参数率定结果。污染物累积和冲刷模型参数取值见表 2、3。

3.4 工况设计

设计降雨采用芝加哥雨型,暴雨重现期取为 2、5、10 年,模拟时间 120 min,结合《北海市城市排水(雨水)防涝综合规划》,雨峰系数取为 0.3,

表 1 SWMM 水文模型参数率定结果

Tab. 1 Parameter calibration results of SWMM hydrological model

注蓄量/mm	糙率系数		Horton 下渗参数				
	不透水区	管道透水区	不透水区	最大下渗率/(mm·h ⁻¹)	最小下渗率/(mm·h ⁻¹)	衰减常数/h ⁻¹	
10	2	0.014	0.3	0.013	80	5	3

表 2 不同土地利用地表污染物累积参数参考值

Tab. 2 Reference values of pollutant buildup parameters for different land uses

污染物	停车场、路面		屋面		绿地	
	最大累积量	半饱和累积时间/d	最大累积量	半饱和累积时间/d	最大累积量	半饱和累积时间/d
SS	270	10	140	10	60	10
COD	170	10	80	10	40	10

注:最大累积量单位为 kg/hm²。

表 3 不同土地利用地表污染物冲刷参数参考值

Tab. 3 Reference values of pollutant washoff parameters for different land uses

污染物	停车场、路面		屋面		绿地	
	冲刷系数	冲刷指数	冲刷系数	冲刷指数	冲刷系数	冲刷指数
SS	0.008	1.8	0.007	1.8	0.004 0	1.2
COD	0.007	1.8	0.006	1.8	0.003 5	1.2

降雨量分别为 105.57、122.68、135.62 mm。

根据 LID 设施选取原则,综合考虑铁山服务区场地条件,选取透水沥青路面、雨水花园、绿色屋顶作为铁山服务区可选 LID 设施,两两组合,形成 3 种 LID 组合方案。其中,方案 1 为渗透铺装+绿色屋顶;方案 2 为下凹式绿地+绿色屋顶;方案 3 为渗透铺装+下凹式绿地。

4 结果与分析

4.1 径流控制效果

表 4 对比了不同暴雨重现期下传统开发模式(未采取 LID 设施)和采取不同 LID 设施组合 4 种工况条件下服务区径流量、径流峰值及峰现时刻。由表 4 可看出,3 种 LID 组合方案具有明显的径流控制效果。从径流峰值削减率来看,方案 2 的总体控制效能要优于方案 1、3,然而,随降雨强度的增加,方案 1 对径流削减程度明显降低,方案 2 对径流峰值的削减程度略有降低,方案 3 对径流峰值的削减程度有所提高,且方案 3 的效能逐渐优于方案 1,这表明随降雨强度的增加,下凹式绿地的效能优于渗透铺装和绿色屋顶。从峰现时刻来看,方案 1、3 峰值延迟均为 1 min,且优于无延迟的方案 2,这就表明径流峰值延迟与渗透铺装的滞蓄作用有关。

表 4 不同暴雨重现期下径流模拟结果

Tab. 4 Runoff simulation results under different rainstorm return periods

重现期	开发模式	径流量 /mm	削减率 /%	径流峰值 / $(m^3 \cdot s^{-1})$	削减率 /%	峰值时 刻/min	峰值延迟/min
2	无 LID	75.595	—	3.011 7	—	37	—
	方案 1	70.566	6.65	2.699 0	10.38	38	1
	方案 2	67.888	10.20	2.625 8	12.81	37	0
	方案 3	66.336	12.25	2.763 6	8.24	38	1
5	无 LID	92.263	—	3.704 5	—	37	—
	方案 1	87.224	5.46	3.443 5	7.05	38	1
	方案 2	83.179	9.08	3.238 3	12.58	37	0
	方案 3	81.870	11.26	3.382 7	8.69	38	1
10	无 LID	105.062	—	4.280 8	—	37	—
	方案 1	100.018	4.80	4.049 7	5.40	38	1
	方案 2	95.385	9.21	3.773 9	11.84	37	0
	方案 3	94.204	10.33	3.877 8	9.41	38	1

4.2 出水口污染物浓度变化

根据赵剑强等^[9,10]对高速公路路面及服务区径流水质特性分析的研究成果,本文着重选择了 SS、COD 两个污染物指标进行分析。图 2 对比了不同暴雨重现期和不同 LID 组合设施条件下,服务区排水口 O₂ 污染物浓度变化。由图 2 可看出,不同暴雨重现期条件下,污染物的排放浓度随降雨强度增加而增大,各污染物排放浓度变化趋势基本一致,主要在降雨开始后 10~40 min 内,当污染物浓度达到峰值后逐渐递减,最终趋于稳定浓度。此外,随降雨强度的增加污染物浓度变化曲线峰的形状越来越尖,表明了降雨对前期地表累积污染物的冲刷作用和后期衰减均较快。对于污染物峰值浓度削减程度来看,方案 3>方案 1>方案 2,这就表明各项 LID 设施的截污减排效能为渗透铺装>下凹式绿地>绿色屋顶。

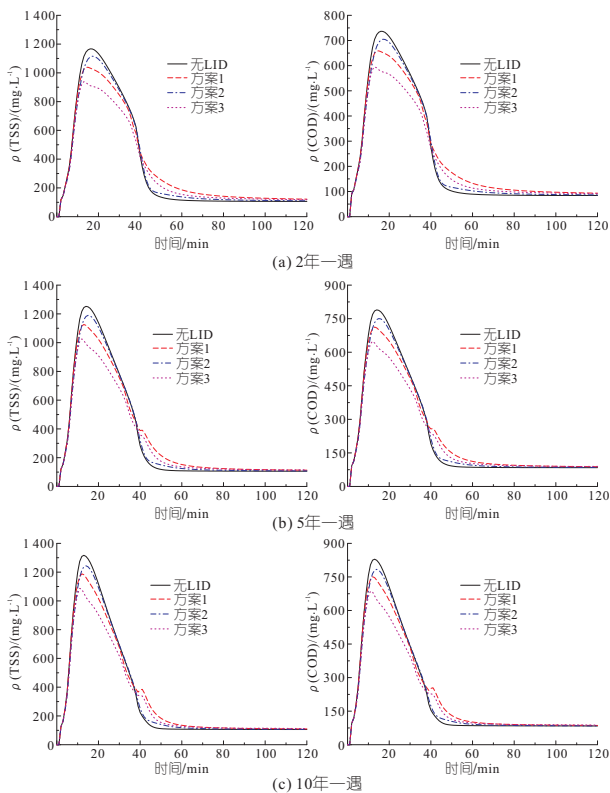


图 2 不同暴雨重现期条件下排水口 O₂ 污染物平均质量浓度变化过程线

Fig. 2 Variation of average mass concentration of pollutants at drainage outlet O₂ under different rainstorm return periods

4.3 服务区非点源污染负荷分析

表 5 为不同暴雨重现期和不同 LID 组合设施条件下服务区污染物排放总量。由表 5 可看出,对污染物去除效能来看,方案 3>方案 2>方案 1。随降雨强度的增加,3 种方案对污染物的处理效果均有所降低,这是因为随降雨强度的增加冲刷作用增强,LID 设施有限的削减能力已处理不了逐渐增多的污染物。

表 5 不同暴雨重现期下非点源污染负荷模拟结果

Tab. 5 Non-point pollution load results under different rainstorm return periods

重现期 /a	开发 模式	SS/kg	去除率 /%	COD/kg	去除率 /%
2	无 LID	1 906.415	—	1 295.898	—
	方案 1	1 774.349	6.93	1 207.442	7.02
	方案 2	1 718.698	9.85	1 167.819	10.17
	方案 3	1 603.355	15.90	1 093.883	16.03
5	无 LID	2 068.271	—	1 423.422	—
	方案 1	1 963.919	5.05	1 351.493	5.05
	方案 2	1 874.534	9.37	1 289.043	9.44
	方案 3	1 782.261	13.83	1 229.827	13.60
10	无 LID	2 192.587	—	1 521.380	—
	方案 1	2 094.955	4.45	1 453.346	4.47
	方案 2	1 995.385	8.99	1 383.748	9.05
	方案 3	1 915.440	12.64	1 332.320	12.43

注：“—”表示无数据。

5 结论

a. 本文应用 SWMM 模型构建了铁山服务区水文和水质模型,模拟分析了铁山服务区在未建设海绵和建设海绵后降雨径流和污染控制效能。结果表明,3 种组合 LID 设施对服务区降雨径流和污染物浓度和负荷均有一定的削减作用,其中方案 3(渗透铺装+下凹式绿地)的截污减排效果最优;随着降雨强度的增加,LID 设施对降雨径流和污染物的控制效能有所降低。

b. 由于铁山服务区尚处于建设中,本文研究中水质模型参数缺乏实测的径流污染物数据进行验证,因此待工程完工后仍需进一步校正优化模型。

参考文献:

[1] SEENU P Z, VENKATA RATHNAM E, JAYAKUMAR K V. Visualisation of urban flood inundation using SWMM and 4D GIS[J]. Spatial information research, 2020, 28(4):459-467.

[2] JANG S, CHO M, YOON J, et al. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment[J]. Desalination, 2007,212:344-356.

[3] 陆昕. 海绵城市理念下高速公路服务区低影响开发技术研究[D]. 西安:长安大学, 2019.

[4] 杨柳. 那柯里海绵服务区建设方案研究[D]. 西安:长安大学, 2019.

[5] 王丽娟, 江卜涛, 李晓宁, 等. 基于 SWMM 的高速公路服务区排水系统优化研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 15-19.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准:GB50014-2021[S]. 北京:中国计划出版社, 2021.

[7] LEWIS A ROSSMAN. Stormwater management model user's manual vision5.1[M]. Cincinnati: USEPA, 2015.

[8] 王蓉, 秦华鹏, 赵智杰. 基于 SWMM 模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015,51(1):141-150.

[9] 赵剑强, 刘珊, 邱立萍, 等. 高速公路路面径流水质特性及排污规律[J]. 中国环境科学, 2001(5): 445-448.

[10] 徐沛斌. 高速公路路面沉积物及径流污染特性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.

Study on Rainfall Runoff and Non-point Source Pollution Control in Service Area Based on SWMM

NI Dong¹, WANG Xiao¹, ZHANG Jie²

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
2. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: In order to solve the control problem of rainfall runoff and pollutants in highway service area, SWMM model was used to establish hydrology and water quality model of Tieshan service area. Based on the selection principle of LID measures and the site conditions of Tieshan service area, the control efficiency of rainfall runoff and pollutants in the service area were studied under four schemes of without LID measures, combination of infiltration pavement and green roof, combination of sunken lawn and green roof, and combination of permeable pavement and sunken lawn under different rainfall return periods. The results show that the three combined LID measures can effectively reduce the rainfall runoff, peak runoff, pollutant concentration and total pollutant load in the service area, among which the LID combined measure scheme of permeable pavement and sunken lawn has the best effect on pollution interception and emission reduction. In addition, the LID measures are more effective in controlling rainfall runoff and pollutants when the rainfall intensity is low than that is high.

Key words: SWMM; LID combination measure; rainfall runoff in service area; pollution control