文章编号:1674-2869(2025)01-0113-06

基于暴雨洪水管理模型的道路海绵措施结构参数影响研究

卓 浩[1],王曜国[*1],杨 兵[2]
1. 中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430056;
2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045

摘 要:海绵措施的结构层类别、尺寸与工程造价息息相关,同时影响海绵城市的雨洪控制效果。为研究最优海绵措施结构参数,构建昆明市海绵城市道路暴雨洪水管理模型,采用控制变量法,通过改变下凹式绿地、透水路面、透水人行道3种道路海绵措施结构参数构建海绵城市研究工况,模拟分析不同结构参数下的3种道路海绵措施的雨洪控制效果。研究表明:100~250 mm下沉深度的下凹式绿地径流削减率为15.09%~49.97%,粉砂壤土、壤砂土、细砂土土质的下凹式绿地径流削减率为15.08%~34.69%;50~300 mm/h面层渗透性的透水路面峰值削减、迟滞时间及径流削减相同,0~400 mm厚基层透水路面径流削减率为1.02%~5.64%,50~300 mm/h铺装渗透性透水人行道径流削减率为0.04%~2.21%,粉砂壤土、壤砂土、细砂土土质的透水人行道径流削减率为11.20%~28.96%。

关键词:海绵道路;暴雨洪水管理模型;海绵措施;结构参数
中图分类号:U412.37 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202310020

Study on the influence of structural parameters of road sponge measures based on a storm water management model

ZHUO Hao[1], *WANG Yaoguo*[*1], *YANG Bing*[2]
1. China Traffic Second Highway Survey and Design Research Institute Co., Ltd, Wuhan 430056, China;
2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400045, China

Abstract: The types and dimensions of the structural layer of sponge measures are closely related to the engineering costs, and also affect the strom water control effectiveness of sponge cities. To explore the optimal structural parameters of sponge measures and establish a storm water management model for the sponge city roads in Kunming, by adopting a controlled variable method, we changed the structural parameters of three road measures——sunken green spaces, permeable pavements, and permeable sidewalks——to create a sponge city research scenario. This allowed us to simulate and analyze the storm water control effects of these three road sponge measures under different structural parameters. This study shows that the runoff reduction rate of sunken green spaces with a sinking depth of 100−250 mm is 15.09%−49.97%, while the runoff reduction rate of sunken green spaces with silty loam, loamy sand, and fine sand soils is 15.08%−34.69%; For permeable pavements with a surface permeability of 50−300 mm/h, the peak reduction, lag time, and runoff reduction are the same; While those with a base layer thickness of 0−400 mm, the runoff reduction

收稿日期:2023-10-25
基金项目:重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2021jxjl20015)
作者简介:卓 浩,硕士,工程师。Email:632997589@qq.com
***通信作者**:王曜国,学士,助理工程师。Email:1042457769@qq.com
引文格式:卓浩,王曜国,杨兵. 基于暴雨洪水管理模型的道路海绵措施结构参数影响研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(1):113-118.

rates range from 1.02% to 5.64%; Permeable sidewalks with a paving permeability of 50−300 mm/h have runoff reduction rates of 0.04%−2.21%, while those with sandy loam soil, loamy sand soil, and fine sand soil achieve runoff reduction rates of 11.20%−28.96%.

Keywords: sponge road; storm water management model; sponge measures; structural parameters

我国快速城镇化建设导致“城市病”问题越来越突出,落后的排水设施是许多城市逢雨必涝的根本原因。为充分利用雨洪资源缓解城市水问题,我国大力推行海绵城市建设[1-2]。然而海绵措施在国内应用还不成熟,理论体系和计算方法不够完善,海绵措施的尺度效应也未得到很好地验证,道路作为城市主要产水单元之一,对城市水环境影响程度巨大[3-4],研究道路海绵措施结构参数影响意义重大。因此,本文构建昆明市某市政道路暴雨洪水管理模型(storm water management model,SWMM),模拟3种典型海绵措施在不同结构参数下的雨洪过程,分析不同结构参数下的海绵措施雨洪控制效果,为海绵措施结构参数设计提供参考。

1 海绵道路及SWMM模型建立

1.1 海绵道路及常见的道路海绵措施

所谓“海绵道路”,指在满足道路功能前提下,将海绵措施巧妙融入道路给排水设计中,从而减少地表径流,改善路面径流水质[5-6]。市政道路中常见的海绵措施有3种:(1)人行道设置透水砖[7];(2)非机动车道设置透水路面[8];(3)绿化带设置下凹式绿地[9]。

1.2 SWMM模型及模型概化

SWMM模型是美国环境保护署开发的城市暴雨水量水质管理模型,通过输入降雨、流域、泄水、蓄水和处理等系统来模拟完整的城市降雨径流过程[10]。

本研究对象为昆明市官渡区飞虎大道某段,该区多年平均降雨量为1 006.7 mm,降雨主要集中在6−10月份,可达全年降雨量的85%。所选路段概化结果见图1,包括20个子汇水区(S),4条雨水管(C),4个节点(J)和1个排水口(Out)。

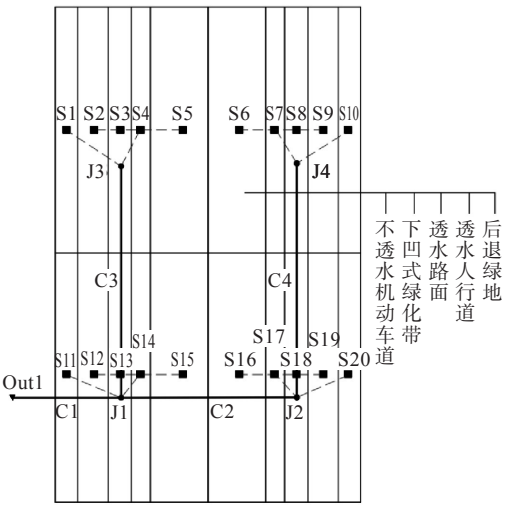

图1 研究道路概化图

Fig. 1 Study area generalization map

1.3 模型参数设置

(1)水文、水力参数

子汇水区面积、特征宽度、管道长度、偏移高度等结构性参数通过现场调研、设计文件获取,地表洼蓄量、入渗模型参数和曼宁粗糙率根据2021年7月一场降雨事件的监测数据进行率定。率定结果见表1。

表1 参数率定结果

Tab. 1 Parameter calibration results

类型	参数名称	率定值
地表洼蓄量	不透水洼蓄量 / mm	2
	透水洼蓄量 / mm	7.51
	无低洼地不透水百分比 / %	25
入渗模型参数	最大渗透速率 / (mm/h)	25
	最小渗透速率 / (mm/h)	1.01
	衰减常数 / h	4.5
	干燥时间 / d	6
曼宁粗糙率	不透水粗糙率	0.01
	透水粗糙率	0.1
	管道粗糙度	0.012

(2)海绵措施参数

根据设计文件、研究论文及SWMM使用手册[11-13]确定3种海绵措施参数,见表2。

(3)降雨参数

根据昆明市暴雨强度公式[14],利用芝加哥雨水生成器[15]生成本次降雨参数,得到2 a、10 a和100 a一遇降雨,降雨量分别为74.50、113.21、168.61 mm。

$$q = \frac{1226.623\left(1 + 0.958\lg p\right)}{(t + 6.714)^{0.648}} \tag{1}$$

式(1)中:q为平均暴雨强度,mm/min;p为设计降

表2　海绵措施原参数

Tab. 2　Sponge measures original parameters

项目	项目特征	透水铺装	透水路面	下凹式绿地
表面层	存水高度 / mm	2	2	100
	表面粗糙度 n	0.015	0.015	0.16
	表面覆盖系数	0	0	0
	表面坡度 / %	1	2	1
路面层	厚度 / mm	50	100	500
	孔隙率	0.16	0.16	0.503
	不渗透表面分数（下凹式绿地为产水能力）	0	0	0.281
	渗透性（下凹式绿地为萎蔫点）/（mm/h）	222	222	0.138
	堵塞因子（下凹式绿地为导水率）/（mm/h）	1.04	0	6.4
	导水率坡度	–	–	10
	吸上水头 / mm	–	–	168.7
蓄水层	厚度 / mm	100	0	100
	孔隙比	0.62	0	0.62
	渗水速率 /（mm/h）	1.01	0	1.01
	堵塞因子	0	0	0
暗渠	流量系数	–	3.3	–
	流量指数	–	0.5	–
	偏移高度 / mm	–	0	–

雨重现期，a；t为设计降雨历时，min。

1.4　分析工况

本次研究所有工况均同时设置3种海绵措施，模拟道路在不同海绵结构参数下的雨洪过程，共计57种工况，详细情况见表3。

2　海绵措施结构参数分析

根据设计工况，采用控制变量法调整下凹式绿地、透水路面及透水人行道的结构参数，分析参数调整前后的径流对比情况。

2.1　下凹式绿地结构参数分析

（1）不同下沉深度下凹式绿地雨洪过程分析

采用SWMM对不同下沉深度下凹式绿地（同时设置3种海绵措施，以下类同）和仅设置透水人行道+透水路面的海绵道路产汇流情况进行模拟，得到不同下沉深度下凹式绿地设置前后主要径流指标对比情况，如图2所示。

结果表明：下沉深度为100~250 mm的下凹式绿地峰值削减率为14.31%~86.82%，峰值迟滞时间为2~4 min，径流削减率为15.09%~49.97%，下凹式绿地下沉深度的增加可有效削减径流峰值和径流量，但对迟滞时间影响不大。另外，随着降雨强度的增加，径流峰值和径流量削减效果有所降低。

（2）不同土壤类别下凹式绿地雨洪过程分析

根据SWMM手册及现场试验数据确定3种土壤的水文参数，如表4所示。

表3　工况设置

Tab. 3　Working condition settings

工况	参数设置		不同降雨条件下的工况数量 / 种		
	参数类别	设置值	2年一遇	10年一遇	100年一遇
下凹式绿地	下沉深度	100、150、200、250 mm	4	4	4
	土壤类别	粉砂壤土、壤砂土、细砂土	3	3	3
透水路面	面层渗透性	50、150、300 mm/h	3	3	3
	透水基层厚度	0、200、400 mm	3	3	3
透水人行道	面层渗透性	100、200、300 mm/h	3	3	3
	土壤类别	粉砂壤土、壤砂土、细砂土	3	3	3

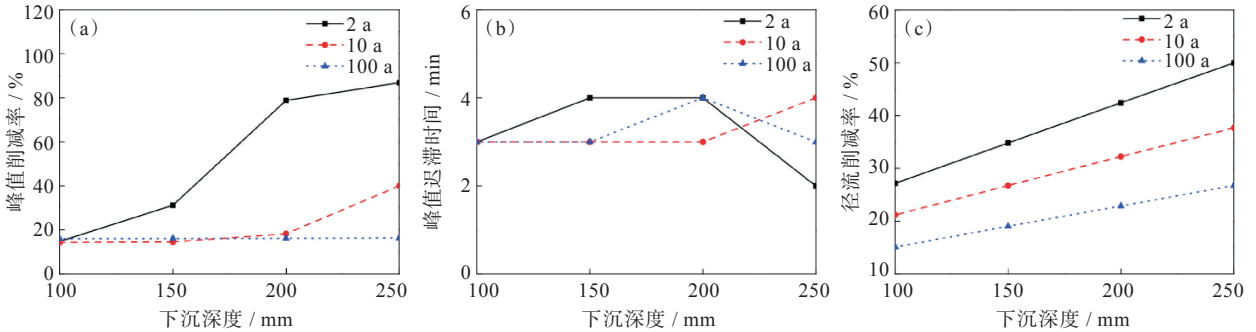

图2 不同下沉深度指标对比:(a)峰值削减率,(b)峰值迟滞时间,(c)径流削减率

Fig. 2 Comparison of different sinking depth indicators:(a)peak reduction rate,(b)peak delay time,(c)runoff reduction rate

表4 不同土壤类别参数设置

Tab. 4 Parameter settings for different soil categories

土壤类别	厚度 / mm	孔隙率	产水能力	萎蔫点	导水率 /(mm/h)	导水率坡度	吸上水头 / mm
粉砂壤土	500	0.501	0.284	0.135	6.6	10	169.93
壤砂土	500	0.437	0.105	0.047	29.97	8	60.96
细砂土	500	0.437	0.062	0.024	120.4	5	49.02

模拟不同土壤类别下凹式绿地海绵道路和透水人行道+透水路面海绵道路产汇流情况,得到不同土壤类别下凹式绿地设置前后主要径流指标对比情况,如图3所示。

结果表明:粉砂壤土、壤砂土、细砂土土质的下凹式绿地峰值削减率为14.34%~83.53%,峰值迟滞时间为2~4 min,径流削减率为15.08%~34.69%,土壤性质对径流量和峰值削减率的影响由弱到强依次为粉砂壤土、壤砂土、细砂土。

2.2 透水路面结构参数分析

根据设计工况透水路面设置面层渗透性为50、150、300 mm/h,透水基层厚度设置为0、200、400 mm,分析2种不同结构参数下的透水路面雨洪径流情况。

(1)不同面层渗透性透水路面雨洪过程分析

模拟不同面层渗透性透水路面海绵道路和下凹式绿地+透水人行道海绵道路产汇流情况,得到不同面层渗透性透水路面设置前后主要径流指标(图4)。

图4显示3种面层渗透性透水路面的海绵道路的峰值削减、迟滞时间及径流削减相同,即透水路面面层渗透性对海绵道路雨洪控制无影响。

(2)不同基层厚度透水路面雨洪过程分析

模拟不同基层厚度透水路面海绵道路和下凹式绿地+透水人行道海绵道路产汇流情况,得到不同基层厚度透水路面设置前后主要径流指标(图5)。

结果表明:基层厚度为0 mm时峰值削减和流量削减远低于200 mm基层透水路面,但基层厚度为200和400 mm时峰值削减和流量削减几乎不变,说明基层厚度超过200 mm后,改变基层厚度对峰值及径流量影响不大。另外,在2 a一遇降雨中,0与200 mm基层透水路面流量削减差别也不大。

2.3 透水人行道结构参数分析

根据设计工况透水人行道设置铺装渗透性为50、150、300 mm/h,土壤类别指标参数同表4,分析2种不同结构参数下的透水人行道雨洪控制效果。

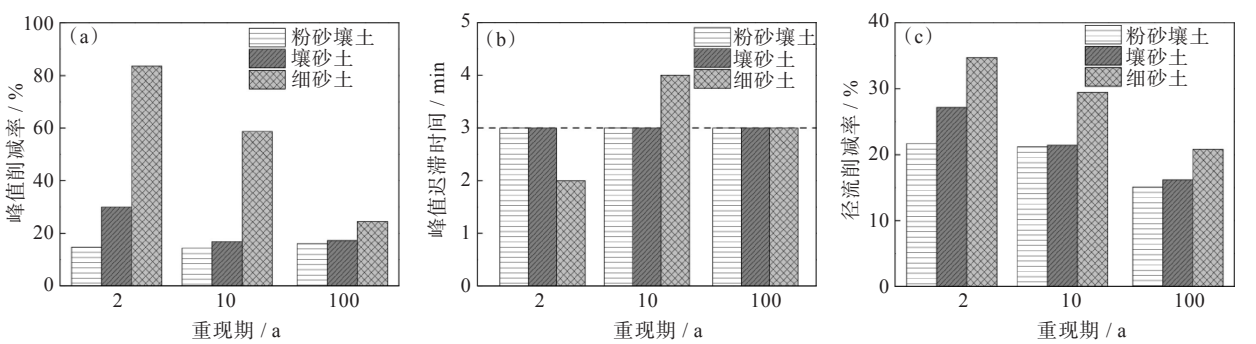

图3 不同土壤类别指标对比:(a)峰值削减率,(b)峰值迟滞时间,(c)径流削减率

Fig. 3 Comparison of indicators for different soil types:(a)peak reduction rate,(b)peak lag time,(c)runoff reduction rate

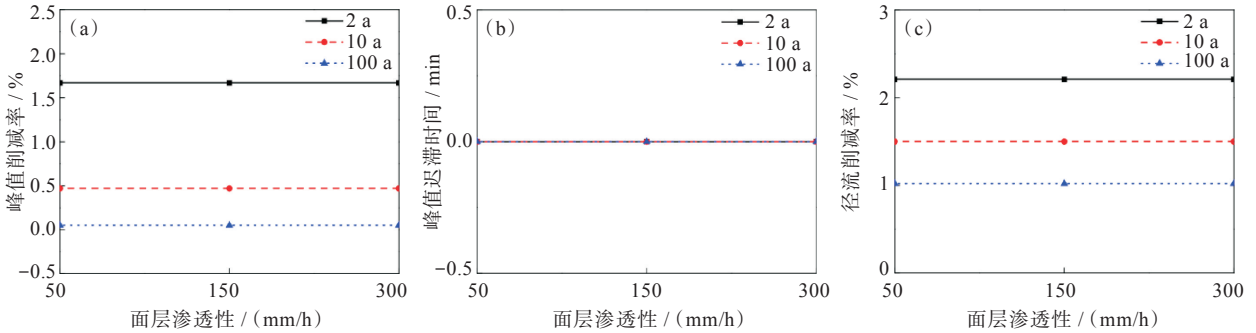

图4　不同面层渗透性指标对比：(a)峰值削减率，(b)峰值迟滞时间，(c)径流削减率

Fig. 4　Comparison of permeability indicators of different surface layers: (a)peak reduction rate, (c)peak lag time, (c)runoff reduction rate

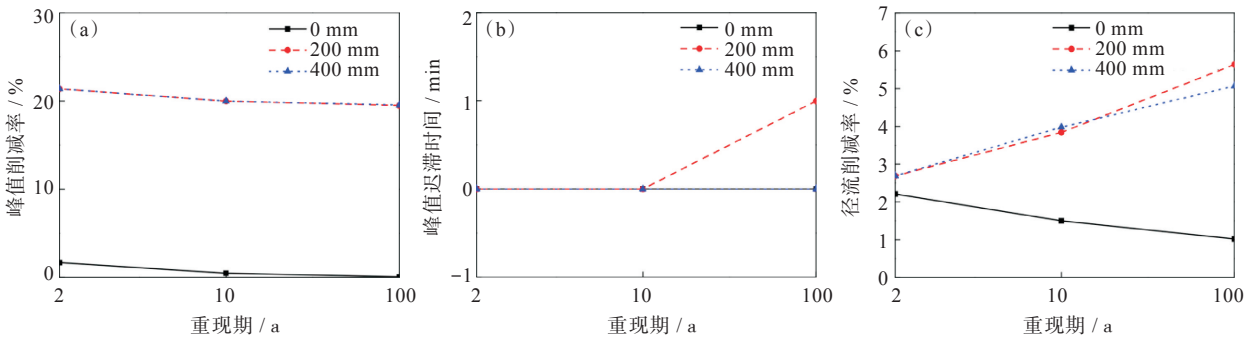

图5　不同基层厚度指标对比：(a)峰值削减率，(b)峰值迟滞时间，(c)径流削减率

Fig. 5　Comparison of different base layer thickness indicators: (a)peak reduction rate, (b)peak delay time, (c)runoff reduction rate

(1)不同铺装渗透性透水人行道雨洪过程分析

模拟不同铺装渗透性透水人行道海绵道路和下凹式绿地+透水路面海绵道路产汇流情况，得到不同铺装渗透性透水人行道设置前后主要径流指标对比情况，如图6所示。

图6显示3种透水人行道的峰值削减率、峰值迟滞时间、径流削减率接近，透水人行道的铺装渗透性对雨洪控制效果影响不大。

(2)不同土壤类别透水人行道雨洪过程分析

模拟不同土壤类别透水人行道海绵道路和下凹式绿地+透水路面海绵道路产汇流情况，得到不同土壤类别透水人行道设置前后主要径流指标对比情况，如图7所示。

结果表明：粉砂壤土、壤砂土、细砂土土质的透水人行道峰值削减率为3.78%~32.78%，峰值迟滞时间为0~1 min，径流削减率为11.20%~28.96%，土壤性质对径流量和峰值削减率的影响由弱到强依次为粉砂壤土、壤砂土、细砂土，其中壤砂土与细砂土接近。

综上所述，对于下凹式绿地，下沉深度的增加可有效削减径流峰值和径流量，但下沉深度过大，

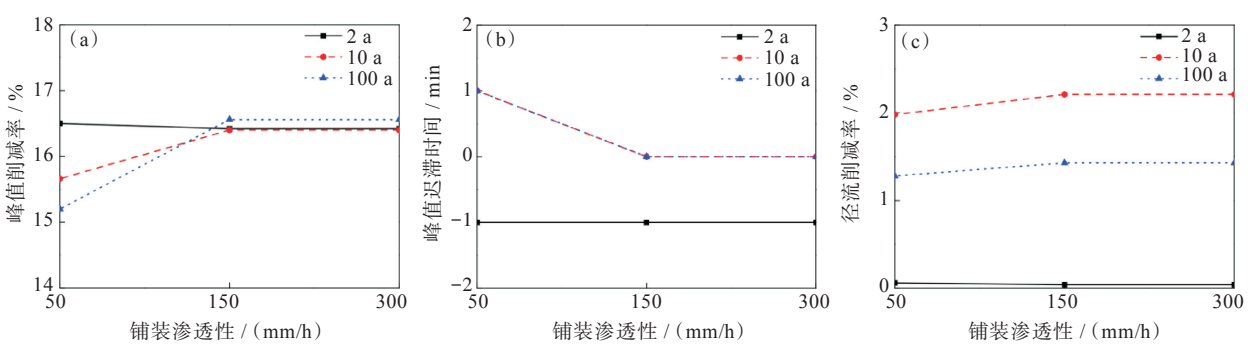

图6　不同铺装渗透性指标对比：(a)峰值削减率，(b)峰值迟滞时间，(c)径流削减率

Fig. 6　Comparison of different pavement permeability indicators: (a)peak reduction rate, (b)peak lag time, (c)runoff reduction rate

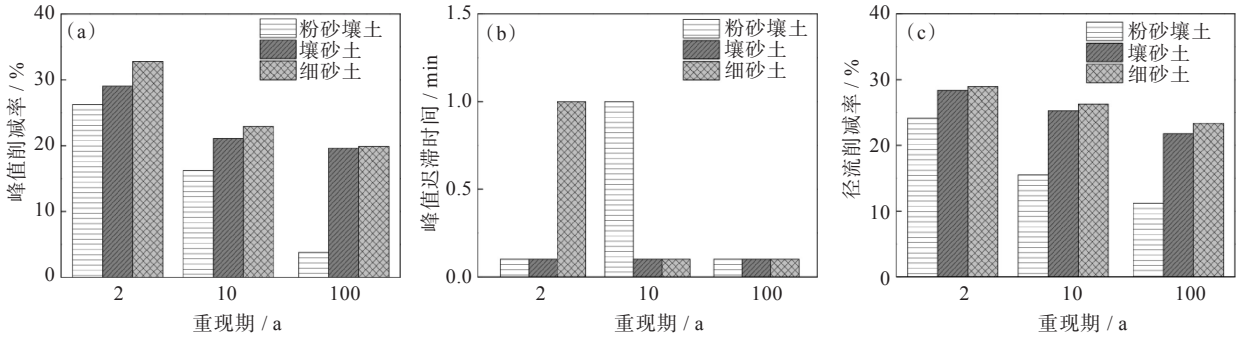

图7 不同土壤类别指标对比:(a)峰值削减率,(b)峰值迟滞时间,(c)径流削减率

Fig. 7 Comparison of different soil category indicators:(a)peak reduction rate,(b)peak delay time,(c)runoff reduction rate

会导致绿化带长时间淹水,影响植被的生长,故下凹式绿地的最优结构参数为15 mm下沉深度,土壤性质为细砂土。

对于透水路面,面层渗透性的增大会导致工作性能的减弱,基层厚度的增加会增加工程造价,故透水路面最优结构参数为50 mm/h面层渗透性,200 mm基层厚度。

对于透水人行道,最优结构参数为50 mm/h面层渗透性,土壤性质为细砂土。

3 结 论

(1)对于下凹式绿地,下沉深度的增加可有效削减径流峰值和径流量;土壤性质对径流量和峰值削减率的影响由弱到强依次为粉砂壤土、壤砂土、细砂土。

(2)对于透水路面,面层渗透性对海绵道路雨洪控制无影响;基层厚度为0 mm峰值和流量削减远低于200 mm基层透水路面,但基层厚度超过200 mm后,改变基层厚度对峰值及径流量影响均不大。

(3)对于透水人行道,铺装渗透性对雨洪控制效果影响不大;土壤性质对径流量和峰值削减率的影响由弱到强依次为粉砂壤土、壤砂土、细砂土,其中壤砂土与细砂土接近。

(4)3种海绵措施结构参数的改变对峰值迟滞时间影响均不大。

参考文献

[1] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724.

[2] 田敏,任建民,刘碧云,等.基于SWMM模型与成本效益的LID径流控制效果研究[J].水文,2023,43(5):89-94,100.

[3] 刘昌明,张永勇,王中根,等.维护良性水循环的城镇化LID模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J].自然资源学报,2016,31(5):719-731.

[4] 康得军,邱福杰,温儒杰,等.基于SWMM的LID参数局部与全局敏感性分析[J].中国给水排水,2023,39(17):131-138.

[5] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97.

[6] 徐宗学,叶陈雷.城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J].水利学报,2021,52(4):381-392.

[7] 吴京戎,方舒婷.LID组合设计对径流影响及成本效益分析[J].水电能源科学,2022,40(9):35-39.

[8] 刘成帅,许营营,孙悦,等.产流模式空间分布对城市雨洪过程模拟的影响[J].水资源保护,2024,40(2):28-34,116.

[9] 陶文华,李元松,冉小青,等.基于暴雨洪水管理模型的海绵道路非点源污染负荷削减效果评估[J].武汉工程大学学报,2022,44(2):219-225.

[10] 董新宇,张静慧,袁鹏,等.基于多目标优化的低影响开发设施布局方法[J].环境科学学报,2021,41(7):2933-2941.

[11] 陈韬,夏蒙蒙,刘云鹏,等.基于SWMM的海绵改建小区雨水径流调控研究[J].中国给水排水,2020,36(11):103-111.

[12] 陈哲夫,莫操湖,陈端吕,等.常德市海绵城市建设示范区雨洪适应性评价与分区[J].自然资源学报,2022,37(8):2195-2208.

[13] SPARKMAN S A, HOGAN D M, HOPKINS K G, et al. Modeling watershed-scale impacts of stormwater management with traditional versus low impact development design [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(5): 1081-1094.

[14] 卓浩,王云,李元松,等.基于SWMM的海绵道路典型LID设施布局影响分析[J].公路,2019,64(7):1-7.

[15] 孙会航,李俐频,田禹,等.基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J].环境科学学报,2020,40(10):3605-3614.

本文编辑:苗 变