

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.019

基于SWMM的半透式透水沥青路面 年尺度滞蓄雨水效果评价

刘佩贵¹, 马海姝¹, 刘猛², 陆公仁³, 姚梅⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省水利科学研究院, 安徽 合肥 230088; 3. 安徽江淮汽车集团股份有限公司, 安徽 合肥 231600; 4. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022)

摘要:为研究透水沥青路面长期使用过程中的整体滞蓄雨水能力,文章以颖上县纬八路为例,建立研究道路的暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),通过设计短历时降雨雨型剖析了路面在丰水、平水、枯水年3种情景下的滞蓄雨水能力,并对路面在设计使用年限内的综合滞蓄雨效果进行模拟分析。结果表明:路面在平水年以及枯水年下年径流总量控制率分别达到72.14%和75.37%,表现出较强的雨水滞蓄能力;丰水年下路面的雨水滞蓄能力略低,除了特丰水年外,丰水年间的年径流总量控制率仅略低于目标年径流总量控制率,在3%以内;路面在设计使用年限内总平均年径流总量控制率为66.34%,符合海绵城市建设要求。

关键词:透水沥青;暴雨洪水管理模型(SWMM);年尺度降雨模拟;滞蓄雨水效果

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)10-1428-05

Evaluation of annual-scale rainwater retention effect of semi-permeable asphalt pavement based on storm water management model

LIU Peigui¹, MA Haishu¹, LIU Meng², LU Gongren³, YAO Mei⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 3. Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei 231600, China; 4. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to study the overall rainwater retention capacity of permeable asphalt pavement during the long-term service, this paper takes Weiba Road in Yingshang County as research object. The storm water management model (SWMM) model of the road was established, and the rainwater retention capacity of the pavement in wet, flat and dry years was analyzed through the design of short-duration rainfall pattern. A simulation analysis was conducted on the comprehensive rainwater retention effect of the pavement during the designed service life. The results show that the total annual runoff control rates of the pavement in flat and dry years reach 72.14% and 75.37%, respectively, showing strong rainwater retention capacity. The rainwater retention capacity of the pavement is slightly lower in wet years. Except for extremely wet years, the total annual runoff control rate in wet years is only slightly lower than the target rate, which is less than 3%. The total average annual runoff control rate of the pavement during the designed service life is 66.34%, which meets the requirements of sponge city construction.

Key words: permeable asphalt; storm water management model (SWMM); annual-scale rainfall simulation; rainwater retention effect

收稿日期:2023-06-06;修回日期:2023-06-24

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202203a07020034);安徽省自然科学基金资助项目(2208085US07)

作者简介:刘佩贵(1981—),女,山东莒县人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:liupg2512@163.com.

随着海绵城市建设的推进及城市雨洪水资源利用率的提高,部分路面被改造或建设为透水沥青路面。透水沥青路面由于本身使用的高孔隙率和透水性材料,一方面导致透水沥青路面相较于传统路面其承载能力有所下降,但另一方面也使其具有了良好的雨水滞蓄效果,因此一直以来是学者的研究热点^[1-2]。文献[3]对南京市某区域构建暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),发现短历时降雨下透水路面具有良好的雨水滞蓄效果,研究区路面平均径流峰值和总量削减率分别达 34.7%、35.7%^[4],结合生物滞留措施能对雨水中的污染物起到净化作用^[5]。目前,关于透水沥青路面的雨水滞蓄效果主要聚焦于短历时降雨的模拟,沥青道路的设计使用年限一般为 8~15 a,因此,有必要针对道路长期运行下的雨水滞蓄效果进行研究。

本文在前人研究基础上,以颖上县纬八路为例,建立研究区内的 SWMM,通过设计短历时降雨雨型对模型准确性进行验证;在丰水、平水、枯水年情景下对透水沥青路面进行年尺度的长历时

降雨模拟,研究其可持续滞蓄雨水的能力,最后通过往年降雨资料,对道路在设计使用年限内的雨水滞蓄效果进行分析,以期为透水沥青路面的研究应用及海绵城市的建设提供参考。

1 研究区概况

研究区域属暖温带半湿润性季风气候区,季风明显,气候温和,四季分明,雨量适中,多年平均降雨量 800~900 mm,6—9 月份的降雨量占全年降雨量的 60%以上,为流域的主汛期。道路呈东西走向,全长约 1.03 km,为双向六车道,功能定位为城市主干路,规划道路红线宽度 40 m。其结构形式为半透式透水沥青路面(以下简称路面),具体为 14 cm 的透水沥青上、下面层+25 cm 蓄水基层+隔水封层+25 cm 底基层,如图 1 所示。目前研究表明,该半透式透水沥青路面承载能力符合城市主干路的要求。道路两边埋设有较为完善的排水管网,管材为球墨铸铁管,管径为 500~1 200 mm。道路管网综合布置如图 2 所示。本研究选取约 350 m 路段进行模拟分析。

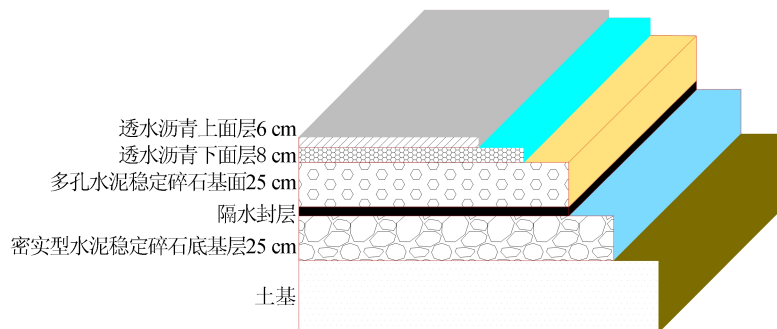


图 1 半透式透水沥青路面结构示意图

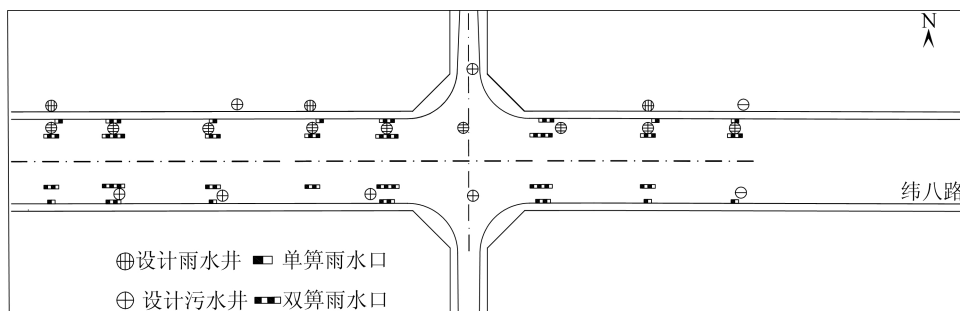


图 2 研究区域管网布置图

2 SWMM 的构建

2.1 道路结构概化

研究区域面积较小,且相关管道布置、流向资料和雨水井分布情况掌握齐全,结合 SWMM 子

汇水区划分原则,采用人为手动划分子汇水区的方法进行道路模型的概化。具体做法如下:

1) 根据管网布置图,将道路两侧雨水井概化为排水节点,落入子汇区内的雨水就近流入节点,管网末端出水口设置为自由流出。

2) 假设各子汇水区接受的降雨量是均匀的, 即每个子汇水区的降雨强度是一样的^[6]。

3) 根据研究区域的实际情况, 主要研究区域为机动车道, 因此对机动车道子汇水区进行细分, 非机动车、绿化带和人行道的雨水经管网流入雨水井后与落入机动车道的雨水一并流向排放口。

4) 根据路外汇水区域以及管道流向, 在道路

管网末端设置 2 个出水口。

综上, 将研究区域划分为 34 个子汇水区。概化结果如图 3 所示。图 3 中: S1~S22 为机动车道; S23~S26 为绿化带; S27~S30 为非机动车道; S31~S34 为人行道; R1 为雨量计, 用于模拟实际降雨情况; J1~J24 为雨水井; PFK1 和 PFK2 为出水口。

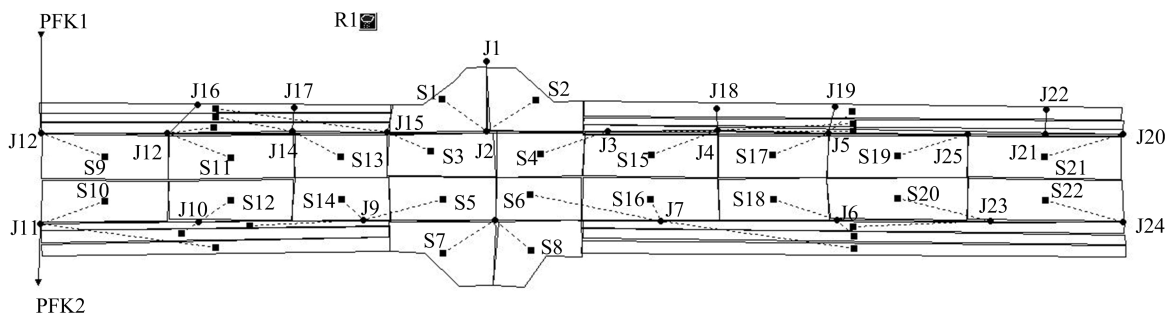


图 3 研究区概化图

2.2 参数设置及设计降雨雨型

采用 Horton 入渗模型, 结合研究区下垫面条件, 最大入渗率设置为 78 mm/h, 最小入渗率设为 3.5 mm/h, 衰减系数为 4。子汇水区不渗透率的设置情况为: 机动车道与非机动车道的为 90%, 绿化带的为 5%, 人行道的为 85%。LID 的设置参数应结合具体确定的路面结构厚度来设置, 研究道路结构形式为 14 cm 的透水沥青上、下层+25 cm 蓄水基层+隔水封层+25 cm 底基层, 基于此, 在 LID 模块中将路面层厚度设置为 140 mm, 蓄水层厚度设置为 250 mm。LID 模块主要参数设置具体见表 1 所列。

表 1 LID 参数取值

结构层	参数	数值
表面层	护堤高度/mm	2
	表面坡度/%	1.5
路面层	表面粗糙度	0.012
	厚度/mm	140
	孔隙比	0.22
蓄水层	渗透率/(mm/h)	324
	厚度/mm	500
	孔隙比	0.25

采用芝加哥降雨模型来生成雨量过程线, 其基本假设为降雨均匀分布在研究区域内^[7]。芝加哥降雨模型会在所选择的时间内造峰, 造峰之前的湿度条件与产生最大径流强度有关^[8]。雨量过程线的形状对任何暴雨历时的降雨均适用, 只是

平均强度不同。

根据安徽省气象局于 2017 年更新的数据, 最新修订的暴雨强度计算公式为:

$$q = \frac{166.7A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

其中: q 为设计暴雨强度; t 为降雨历时; P 为设计重现期; A_1 为雨力参数, 即降雨重现期为 1 a 时 1 min 的设计降雨量, 取 17.08 mm; C 为雨力的变动参数, 取 0.524; b 为降雨历时的修正系数, 取 17.154; n 为暴雨衰减系数, 取 0.749。

基于修正后的暴雨强度公式, 结合芝加哥暴雨过程曲线的合成, 计算得到降雨重现期为 2 a 的降雨过程曲线如图 4 所示。

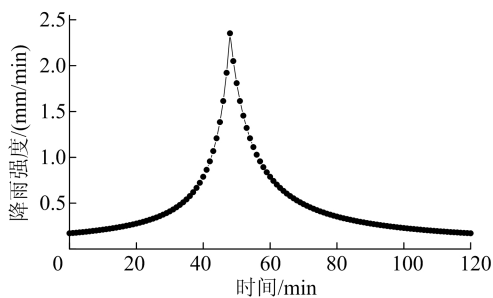


图 4 重现期为 2 a 的降雨过程曲线

2.3 模型验证

道路是拟建道路, 现阶段缺乏研究区域内实测地表径流与管道排放流量数据, 因此此次模型验证采用综合径流系数法进行验证。根据不同类型下垫面面积占比乘以其径流系数, 相加得到研

究区域的综合径流系数,见表 2 所列。为确定所建模型的实际综合径流系数,对模型进行两年一遇降雨历时为 2 h 的径流模拟,最终得到实际综合径流系数为 0.874,结果显示,模型的综合径流系数与实际综合径流系数间误差为 6.5%,未超过 10%^[9]。因此,可认为基于综合径流系数法进行验证下的模型较为合理。

表 2 区域下垫面条件

下垫面情况	面积/ hm ²	径流系数	总面积占比/%	综合径流系数
沥青路面	1.23	0.9	77.8	0.821
绿化带	0.14	0.3	8.9	0.821
人行道	0.21	0.7	13.3	0.821

3 滞蓄雨水效果评价

3.1 路面雨水滞蓄能力分析

在基于年降雨资料进行长历时模拟时,不同年份降雨总量及总体降雨强度存在较大差异。本研究收集研究区 1956—2015 年共计 60 a 的日降雨资料,用 P-Ⅲ型频率曲线进行拟合得到丰水年 ($P=25\%$)、平水年 ($P=50\%$)、枯水年 ($P=75\%$) 相对应降雨量分别为 1 035.07、874.49、725.45 mm。基于 SWMM 进行年尺度的长历时降雨模拟,三者年径流总量控制率与降雨量关系如图 5 所示。

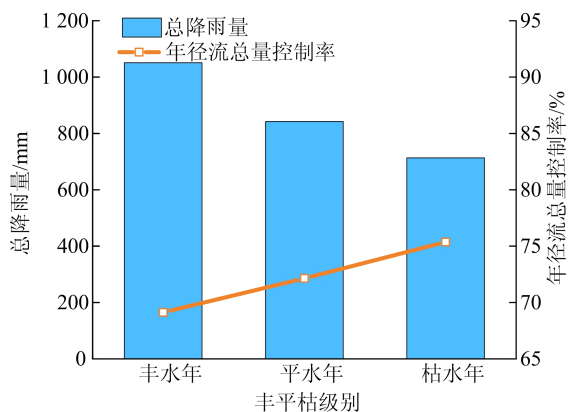


图 5 降雨量与年径流总量控制率对比

从图 5 可以看出:路面在枯水年时具有良好的雨水滞蓄效果,其路面渗透量为 414.17 mm,地表径流量为 175.69 mm,年径流总量控制率达 75.37%;平水年时的渗透量为 471.38 mm,地表径流量为 234.69 mm,年径流总量控制率下降 72.14%;丰水年渗透量为 496.91 mm,地表径流

量为 324.52 mm,因为雨量以及强降雨次数增多,发生超渗产流的时间增加,所以对雨水的控制效果继续下降,年径流总量控制率仅 69.12%,比枯水年下降近 6%。由此可知,在某些特丰水年中,年径流总量控制率会进一步下降,而在特枯水年中,由于降雨的稀少及降雨强度偏低,产生超渗产流的时间较少,透水路面能实现对雨水良好的控制效果。

3.2 路面设计使用年限内雨水滞蓄效果分析

我国年径流总量控制率大致分为 5 个区域^[10],研究区位于Ⅳ区,研究区域本身为道路区域,将路面设计使用年限内的目标年径流总量控制率定为不小于 60%,即路面使用年限内总年径流总量控制率不低于 60%时,符合海绵城市的建设标准。

拟建道路设计使用年限为 15 a,根据掌握降雨资料的详尽程度以及丰、平、枯水年的分布情况,选取研究区域 1996—2010 年的降雨资料作为雨量计的降雨源数据。由于模拟时长较长,须考虑模拟时间段内的蒸发量所带来的影响,根据年降雨量的不同以及参考文献[11]对模型中的蒸发速率进行设置。此外,透水沥青路面由于其本身的高孔隙率结构,导致其随着使用年限的增加出现堵塞问题进而影响其渗透能力,模拟中通过根据使用年限的增加改变路面层和蓄水层的堵塞因子来实现。

将研究区域 1996—2010 年年降雨资料整理成 txt 形式输入 SWMM 中进行模拟分析,采用渗透量与总降雨量的比值 ω 来衡量路面的渗透能力,其模拟结果见表 3 所列。由表 3 可知,路面在设计使用年限中表现出良好的雨水滞蓄能力。在 1996—2010 年间,年径流总量控制率最大值出现在 1999 年,达到了 72.96%,这是由于当年 ω 值相较于初始值并未下降太多,路面堵塞程度较轻,加之当年总降雨量仅 598.32 mm 为枯水年,路面产生超渗产流的时间较少;而最小值出现在 2010 年,仅为 61.53%,当年为设计使用年限的最后一年,路面堵塞程度较重,滞蓄雨水能力大幅下降。这 15 年来 ω 值逐渐下降,这是由于路面在使用过程中堵塞程度逐渐加重,雨水滞蓄能力逐渐下降; ω 从初始值 0.47 降为 0.31,下降了约 34%,这是由于路面本身因车辆轮胎泵吸作用而具有自清洗效应,因而路面不会完全堵塞。1996—2010 年总降雨量为 14 799.85 mm,总径流量为 4 981.79 mm,总平均年径流总量的控制率为 66.34%,符合海绵城市的建设要求。

表 3 设计使用年限内路面雨水控制效果分析

年份	总降雨量/mm	蒸发量/mm	渗透量/mm	w	径流量/mm	年径流总量控制率/%
1996	1 050.90	232.46	493.92	0.47	324.52	69.12
1997	679.05	170.24	312.36	0.46	196.45	71.07
1998	1 263.02	271.05	580.99	0.46	410.98	67.46
1999	5 98.32	173.25	263.26	0.44	161.81	72.96
2000	1 219.16	322.47	524.24	0.43	372.45	69.45
2001	496.00	144.21	213.28	0.43	138.51	72.07
2002	1 055.30	255.16	443.23	0.42	356.91	66.18
2003	1 609.80	453.19	595.63	0.37	560.98	65.15
2004	713.30	230.82	256.79	0.36	225.69	68.36
2005	1 328.80	393.79	478.37	0.36	456.64	65.64
2006	978.20	288.59	342.37	0.35	347.24	64.50
2007	1 147.10	350.98	378.54	0.33	417.58	63.60
2008	943.80	280.29	311.45	0.33	352.06	62.70
2009	913.40	279.49	283.15	0.31	350.76	61.60
2010	803.70	245.34	249.15	0.31	309.21	61.53

4 结 论

本文通过建立研究区域的 SWMM 模型,对研究道路改为透水沥青路面后的雨水滞蓄效果进行模拟分析。研究表明,基于年径流总量控制率情景下,在丰水年、枯水年、平水年 3 种情景中,年径流总量控制率分别达到 69.12%、75.37%、72.14%,均表现出良好的雨水滞蓄能力;以 1996—2010 年为例,在道路设计使用年限内,路面堵塞程度随使用年份的增加而逐渐加重,滞蓄雨水效果也随之逐渐下降,年径流控制率最大值为 72.96%,最小值为 61.53%,总降雨量为 14 799.85 mm,总径流量为 4 981.79 mm,总平均年径流总量控制率为 66.34%,符合海绵城市建设要求。

基于 SWMM 以年为尺度的长历时降雨模拟中,蒸发因素以及堵塞因素难以准确量化。此次模拟是在参考用户操作手册和相关文献的基础上对相关参数进行设置,难免会有所偏差,后续将从此方面展开更深入的研究。

[参 考 文 献]

[1] 王文奇,罗忠贤,朱开成,等. 基于格子 Boltzmann 法的透水沥青路面材料水渗流模拟[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 1-7.

[2] 蒋玉龙,高博,杨幼江,等. 基于海绵城市体系典型透水路面模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019,

38(6):42-47.

[3] 周昕,高玉琴,吴迪. 不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 26-31.

[4] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(12): 1146-1157.

[5] 张硕,贺泳超,罗舒婷,等. 基于 SWMM 的道路 LID 措施优化研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2020, 32(2): 80-84.

[6] ZHANG S H, GUO Y P. SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(8): 6014010.

[7] 王宏宇,吴昊,马宏伟,等. 绵城市建设中三种类型透水路面削减内涝效果研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(12): 44-48.

[8] CHEN W, ZHENG M L, GAO Q, et al. Simulation of surface runoff control effect by permeable pavement[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2021, 83(4): 948-960.

[9] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等. 昆明市明通河流域降雨径流水量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1961-1972.

[10] 王磐岩,牛萌. 打通城市绿地的“海绵”路径: 海绵城市绿地建设管理技术指南[J]. 园林, 2021, 38(1): 2-7.

[11] 王宗圣. 基于土壤入渗能力下限的丘陵区下凹式绿地滞蓄雨水效能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.

(责任编辑 吴 亮)