

基于暴雨洪水管理模型的下凹绿地 和透水路面模拟研究

张超, 丁志斌

(中国人民解放军理工大学国防工程学院, 江苏南京 210007)

摘要:以南京某小区为研究区域,采用暴雨洪水管理模型,模拟研究区域进行下凹绿地和透水路面改造后对区域内地面径流情况的影响。模拟结果表明,下凹绿地和透水路面均可有效消减地面总径流量和峰值流量,减小径流系数,同时改善研究区域的地下水环境。通过进一步改变下凹绿地和透水路面在模型中的规模后可知:下凹绿地面积占小区总面积的比例不应低于30%;透水路面面积占总面积的比例不应低于20%。

关键词:地面径流;暴雨洪水管理模型;下凹绿地;透水路面

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0185-05

Research on simulation of sunken lawn and porous pavement based on management model of storm and flood

ZHANG Chao, DING Zhibin

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Taking a district in Nanjing as study area, using the management model of storm and flood, the paper studied the effect reconstruction of sunken lawn and porous pavement on surface runoff in study region. The simulation results showed that both concave down greenbelt and permeable pavement can effectively reduce the total surface runoff, peak flow and runoff coefficient, meanwhile it can improve the environment of groundwater in study regional. Through changing the scale of sunken lawn and porous pavement in the model, the conclusion was gotten that the ratio of the sunken lawn area to total area shall not be less than 30%; the ratio of the porous pavement area to total area shall not be less than 20%.

Key words: surface runoff; management model of storm and water; sunken lawn; porous pavement

随着城市化进程的加快,城市的气候和下垫面条件均发生了明显改变。城市“热岛效应”的出现,亦增加了降雨强度和频率^[1]。一方面城市在发展的过程中不可避免地会建造新的建筑物、硬化道路等不透水区域,从而增大了不可渗透雨水区域的面积,城市产汇流的时间大大缩短;另一方面,城市区域内的河流、湖泊和湿地等水体面积也逐渐减小,这样也在一定程度上削弱了城市的蓄洪能力^[2]。这些变化使得降雨所产生的地面径流变大,增加了城市地区遭受洪涝灾害的风险。因此,在城市发展过程中如何有效地控制并且合理利用雨水资源就显得非常重要。

低冲击开发(Low Impact - Development,简称LID)是美国于二十世纪九十年代提出的全新理念,它是一种基于保护生态、控制径流源头的城市暴雨

管理措施。LID的核心理念是为了使开发后的区域尽量接近于开发前的自然水文状态,其途径则是通过采用小规模、分散的源头控制措施来达到对暴雨所产生的地面径流和污染物影响的控制。其中,下凹绿地和透水路面即为两种较为常见的LID措施。目前,美国、欧洲已经开始进入低冲击开发法规化、系统化的应用阶段,并且逐渐出台了一系列具有LID理念的雨水管理导则和规范。虽然我国的LID相关研究尚处于起步阶段,但是LID在国内雨洪控制利用工程中应用已经逐渐得到了重视。2013年下发的《国务院办公厅关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》(国办发^[2013]23号)中便提出,应当“积极推行低影响开发建设模式”。本文选取位于南京市某居民小区作为研究区域,利用SWMM软件建立模型,分析研究下凹绿地和透水路面对研究

区域产汇流过程的影响。

1 模型介绍

暴雨洪水管理模型 (Storm Water Management Model, 简称 SWMM) 是由美国环保署开发的一个动态模型, 主要是用来模拟城市在某一单一或者长期降水条件下的降水 - 径流的过程。SWMM 中的径流模块部分用于模拟和处理在某一降雨事件中在各个集水区产生地面径流和雨水污染; 汇流模块则依靠模型中建立起来的雨水管网、蓄水设施、水泵、调节装置和排放口等进行水量运输。在任意时间步长条件下, SWMM 模型均可模拟任何时刻每个集水区所产生的雨水地面径流的水量、水质、管道流量等情况^[3]。

在 SWMM 模型中, 每个子流域都是相对独立的水力学单元, 并且假设只有一个排放点来汇集各个子流域所产生的地面径流。因此, 如何合理划分子流域以及确定径流汇集的排放点对于 SWMM 模型的建立是至关重要的。子流域中包括可透水区域和不可透水区域, 不可透水区域则又被分为储蓄洼地和非储蓄洼地。3 部分的出流量之和即为整个子流域的总出流量。

无滞蓄库容的不透水区域产流量 R_1 (mm) 的计算公式:

$$R_1 = (i - f) \times \Delta t - E - D \quad (1)$$

可滞蓄库容的不透水区域产流量 R_2 (mm) 的计算公式:

$$R_2 = P - E - D \quad (2)$$

透水地面区域产流量 R_3 (mm) 的计算公式:

$$R_3 = P - E \quad (3)$$

式中: P 为降雨量, mm; E 为蒸发量, mm; D 为洼蓄量, mm; I 为降雨强度, mm/h; f 为入渗强度, mm/h; Δt 为时间间隔, h。

对于可渗透区域的下渗量计算方法, SWMM 模型分别提供了 Horton 模型、Green - Ampt 模型和 Curve Number Method 模型。因为 Horton 模型对于城市区域划分后的子流域更为适用, 因此本文在构建城区雨洪模型时将采用 Horton 模型来计算下渗量^[4-5]。

2 下凹绿地和透水路面技术

2.1 下凹绿地

下凹绿地是指低于周边地面标高的绿地, 并且能够积蓄、下渗自身及周边地面径流的绿地。下凹

绿地不仅可以提高下渗的雨水量, 同时其较低的高程可引入其他硬化路面的雨水, 然后滞蓄在绿地中并且下渗。因此, 下凹绿地具有滞蓄雨水、减少地面径流等优点, 更为重要的是下凹绿地是一种天然的雨水设施, 具有去除污染、美化环境的功能^[6]。图 1 为下凹绿地截面图。

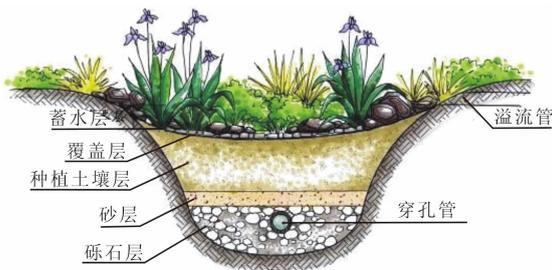


图 1 下凹绿地截面图

SWMM 模型中下凹绿地与普通绿地之间的区别在于滞蓄深度的不同, 普通绿地的滞蓄深度一般为 0 ~ 12 mm, 而本次研究中将下凹绿地的深度设定为 100mm。由此可见, 相同绿地面积条件下, 下凹绿地可蓄集的雨水要远远大于普通绿地。

2.2 透水路面

透水路面不同于一般的硬化路面, 其通过增加路面的透水特性, 以达到减小径流系数、减少地面径流量、提高城市路面使用性等目的^[7]。

根据透水形式, 透水路面可分为缝隙透水和自透水两种。缝隙透水主要是在不透水砖的路面下, 人为地将相邻砖块之间留有空隙, 空隙中填充砂砾或者种植草地等。自透水路面的组成材料具有一定的渗透性, 当雨水降落在路面上时, 雨水则顺着材料孔隙下渗到基层和土壤中。两种不同类型的透水路面实例见下图。



图 2 两种常见的透水路面

为将研究区域中的路面改造成透水性路面, 在 SWMM 模型可以假设存在一块透水性为 100% 的区域来模拟结果^[8]。修建透水性路面所用的透水性混凝土的厚度为 20.3 cm, 其孔隙率为 0.2; 储存区域的厚度为 30.5 cm, 其孔隙率为 0.4。

3 模型应用

3.1 模型建立

选取南京市某小区作为研究区域,位于南京市秦淮区,小区内主要由建筑物、道路、停车场和绿地组成,并且没有水体景观。依据相关资料可知,研究区域总面积是 5.2 hm²,其中不透水部分的面积为 3.3 hm²,占总面积的 65%;透水面积是 1.9 hm²,占总面积的 35%。

根据研究区域地形、地表特征将研究区域概化为 8 个子流域,然后对子流域中的不透水区域和透水区域的面积进行统计,然后通过对应的排放节点将雨水排入小区管网中。研究区域 A 内雨水管网系统可概化为 8 个子流域对应排放节点和 8 个雨水管道,管道的末端设有 1 个排放口。

模型中相关参数由实际测量值而得来,主要有平均坡度、透水面积、不透水面积、管道长度和管径等;同时,由于缺乏部分数据,模型中某些参数需要通过选取 SWMM 模型用户手册中的典型参考值进行模拟,包括地表及管道的曼宁系数、透水地面及不透水地面的洼蓄量等^[9-10]。另外,本次研究中采用 Horton 入渗模型来模拟地表降水的入渗过程,需要输入的参数包括最大入渗率、最小入渗率和衰减系数等。设定模型参数后,建立的研究区域 SWMM 模型见图 3。

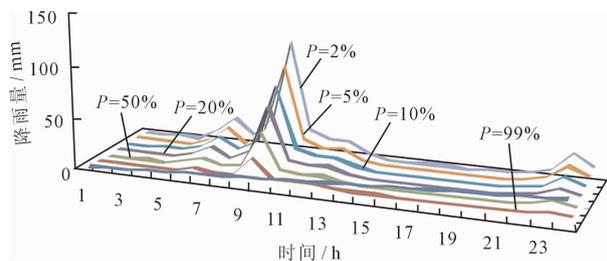


图 4 南京不同降雨频率下设计暴雨时程分配示意图

3.2 下凹绿地模拟

3.2.1 相同绿地面积 研究区域模型中透水面积为 1.9 hm²,并且均为普通绿地,现考虑将普通绿地改造为下凹绿地,其下凹深度为 100 mm。利用模型模拟降雨频率在 99%、50%、20%、10%、5% 和 2% 条件下的地面径流情况,模拟结果见表 1,并且与研究区域未进行下凹绿地改造时的数据进行对比。

表 1 不同降雨频率下研究区域采用下凹绿地后地面径流数据对比 m³, m³/s, %

降雨频率	出口径流量		径流系数		峰值流量	
	普通	下凹	普通	下凹	普通	下凹
	绿地	绿地	绿地	绿地	绿地	绿地
99	1475	1241	0.648	0.631	0.181	0.172
50	2629	2187	0.763	0.638	0.457	0.336
20	4063	3558	0.825	0.641	0.749	0.509
10	4894	4254	0.856	0.663	0.952	0.632
5	5357	4788	0.879	0.720	1.148	0.821
2	5861	5265	0.900	0.773	1.399	1.201

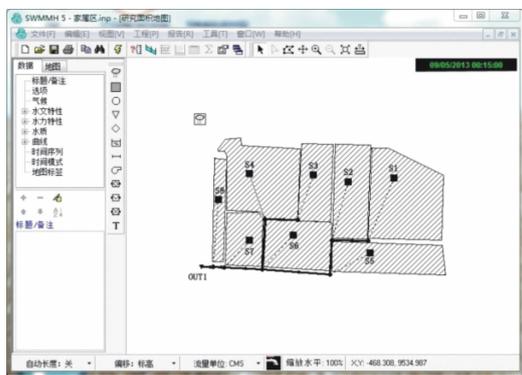


图 3 研究区域模型生成图

本次研究中将分别模拟降雨频率 99%、50%、20%、10%、5% 和 2% 条件下的研究区域地面径流量情况,分别对应则是重现期为 1、2、5、10、20 和 50 a。同时利用水文手册、《中国暴雨统计参数图集》中绘制的暴雨参数等值线图,查算出研究区域不同频率下 24h 降雨历时的设计降雨过程,见下图。

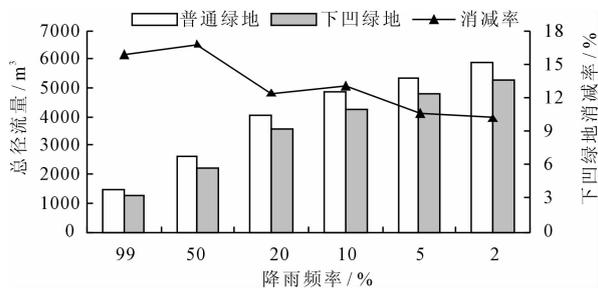


图 5 不同降雨频率下研究区域采用下凹绿地后消减率曲线

由表 1 可知,研究区域进行下凹绿地改造后,对于区域内的地面总流量、径流系数和峰值流量的消减作用还是较为明显的。以降雨频率 50% 条件为例,采用下凹绿地后的地面总流量、径流系数和峰值流量相比较普通绿地则分别消减了 16.8%、16.4% 和 26.5%。

从图 5 可以看出,下凹绿地的消减率曲线总体上呈下降趋势,分析原因为下凹绿地的下渗率是和土壤的饱和程度都是一定的,下凹绿地中滞蓄的

雨水无法及时渗入地下,所以在这种情况,下凹绿地内一旦蓄集了较多的雨水则其对地面径流的消减作用也就有限。

3.2.2 改变绿地面积占有率 上一小节已经比较了研究区域在将普通绿地改造成下凹绿地后,对排放口总径流量的消减率。本小节将假设改变绿地面积占有率,进一步分析下凹绿地的消减规律。

考虑到实际情况,模型中绿地占有率分别设为20%、25%、30%、35%和40%。以降雨频率P=50%的径流为例,具体模拟结果见表2。

表2 不同绿地占有率条件下总径流量 $m^3, \%$

绿地占有率	普通绿地	下凹绿地	消减率
20	2874	2713	5.6
25	2789	2561	8.2
30	2707	2307	14.8
35	2629	2187	16.8
40	2547	2083	18.2

从表中可以看出,随着绿地占有率的提高,无论是普通绿地还是下凹绿地,总径流量都有着不同程度的降低,并且下凹绿地消减的径流量要大于普通绿地。另外,下凹绿地比普通绿地多消减的径流量也随着绿地占有率呈正比例关系。

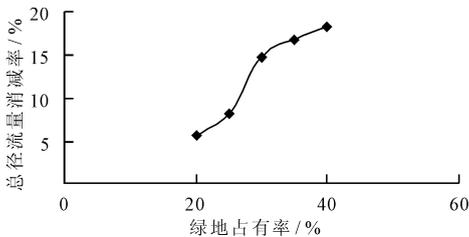


图6 绿地占有率与总径流量消减率的曲线关系图

图6是下凹绿地在不同绿地占有率条件下相比较普通绿地的消减率曲线图。因为城市小区进行下凹绿地改造当然不能只是单纯地增大绿地面积,不仅不切实际而且工程造价也非常高。根据图中可知,当下凹绿地面积占小区总面积的30%的时候,总径流量的消减最明显,随后的曲线便已经趋于平缓。由此可知,当下凹绿地面积占有率为30%时,既可以有效地减少总径流量,还可以减少下凹绿地改造的工程量,降低工程成本。

3.3 透水路面模拟

3.3.1 相同路面面积 研究区域中原有不透水路面3.3 hm^2 ,其中包括1.0 hm^2 的道路、人行道和停车场,现考虑将此部分路面改造为透水路面,模型中的相关参数见表3。

表3 透水性路面的主要特征参数 $hm^2, \%, cm$

LID措施	透水路面面积	不透水占区域面积百分比	透水区域的蓄水深度	透水性区域的曼宁系数
透水性路面	1.0	0	30.5	0.1

利用研究区域模型中模拟得出在降雨频率99%、50%、20%、10%、5%和2%设计降雨频率条件下的数据,详见表4。

表4 研究区域透水路面改造后地面径流数据对比 $m^3, m^3/s, \%$

降雨频率	出口径流量		径流系数		峰值流量	
	原有路面	透水路面	原有路面	透水路面	原有路面	透水路面
99	1475	1263	0.648	0.481	0.181	0.132
50	2629	2292	0.763	0.583	0.457	0.348
20	4063	3509	0.825	0.629	0.749	0.580
10	4894	4324	0.856	0.667	0.952	0.741
5	5357	4827	0.879	0.687	1.148	0.895
2	5861	5468	0.900	0.706	1.399	1.093

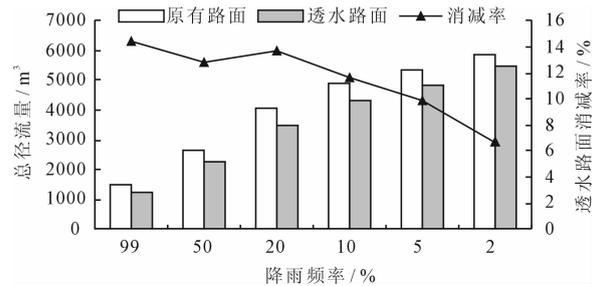


图7 不同降雨频率下研究区域采用透水路面后消减率曲线

由表4可知,进行透水路面改造后,研究区域内的地面径流量、径流系数和峰值流量都有着不同程度的降低,仍以降雨频率50%为例,三者的消减率分别为12.8%、23.6%和23.9%。

根据图7中曲线走势可知,研究区域在铺设透水路面后的消减率曲线随着降雨频率的降低而呈总体下降趋势,这亦说明了透水路面面对几十年一遇的强降雨时,消减作用就不甚明显了。

3.3.2 改变透水路面占有率 本小节将假设改变透水路面面积占总面积的比例后,对总径流量的影响,并分析关系曲线的规律。以降雨频率P=50%条件下的A区域为研究对象,透水路面面积占总面积的比例分别为0%、5%、10%、15%、20%和25%,输入SWMM模型后的结果见下表。

表 5 改变透水路面所占比例后的总径流量消减率

透水路面 所占比例	m ³ , %					
	0	5	10	15	20	25
总径流量	2629	2499	2432	2377	2292	2258
比较透水路面所 占比例为 0 时的 总径流量消减率	0	4.9	7.5	11.1	14.0	16.4

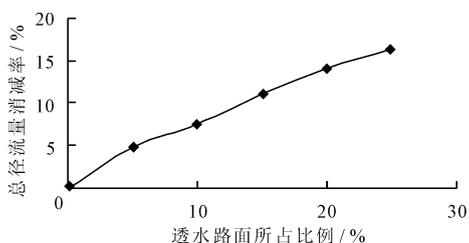


图 8 透水路面所占比例与总径流量的关系曲线图

上图为改变透水路面面积占总面积的比例后,与其相对应的总径流消减率的曲线图。从曲线中可以看出,当透水路面所占比例达到 20% 后,曲线已经趋于平缓。因此,当透水路面所占比例为 20% 时,不仅保证了对地面径流的消减效果,同时也避免了工程量过大而导致的资源浪费。

3.4 下凹绿地和透水路面消减效果比较

上文已分别模拟了不同降雨频率下凹绿地和透水路面的地面径流情况,可知两者对于研究区域内的地面总径流量、径流系数和峰值流量均有较为明显的消减作用,表 6 列出了下凹绿地和透水路面在不同降雨频率时对这 3 项参数的平均消减率。

表 6 下凹绿地和透水路面的平均消减率 %

参数项目	下凹绿地	透水路面
地面总径流量	11.4	13.9
径流系数	16.4	23.6
峰值流量	26.5	23.9

由表 6 可知,透水路面对于研究区域总径流量和径流系数的消减效果要好于下凹绿地,而峰值流量的平均消减率则略小于下凹绿地。总的来说,下凹绿地和透水路面作为两种常用的 LID 措施,不仅可以消减研究区域内地面径流,减轻市政管网压力,而且增加了雨水下渗量,改善了区域内水文环境。

4 结 语

本文利用暴雨洪水管理模型(SWMM)模拟分

析了下凹绿地和透水路面这两种 LID 措施对南京某小区地面径流情况的影响。模拟结果表明,采用下凹绿地和透水路面可以消减地面总径流量和峰值流量,减小径流系数,有利于改善区域内地下水环境。

模型中通过改变下凹绿地和透水路面在研究区域所占比例,并且绘制出所占比例与总径流量消减率之间的曲线关系。由曲线关系可知,如果单独考虑下凹绿地时,当研究区域内下凹绿地面积占总面积的比例为 30% 时,不仅可以有效消减地面径流,同时也尽量减小了下凹绿地改造的工程量;如果单独考虑透水路面时,当透水路面面积占总面积的比例为 20% 时,既取得了较好的效果又保证了经济性。

本文仅模拟分析了两种 LID 措施对研究区域的地面径流消减效果,今后将进一步扩大研究范围,模拟其他 LID 措施以及多个 LID 措施组合的功效,为今后的城市 LID 工程规划提供参考。

参考文献:

- [1] 王萍,郑悦华. 城市化进程对中国大城市降雨特征影响研究[J]. 中国人口资源与环境,2002(10):36-38.
- [2] 李树平,黄廷林. 城市化对城市降雨径流的影响及城市雨洪控制[J]. 中国市政工程,2002(3):35-37+67.
- [3] 董欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用[J]. 给水排水,2006,32(5):106-109.
- [4] 唐绍杰,翟艳云,容义平. 深圳市光明新区门户区——市政道路低冲击开发设计实践[J]. 建设科技,2010(13):47-55.
- [5] 车伍,张伟,王建龙,等. 低影响开发与绿色雨水基础设施——解决城市严重雨洪问题措施[J]. 建设科技,2010(21):48-51.
- [6] 侯爱中,唐莉华,张思聪. 下凹式绿地和蓄水池对城市型洪水的影响[J]. 北京水务,2007(2):42-45.
- [7] 晋存田,赵树旗,闫肖丽,等. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(1):40-42+46.
- [8] 许道坤,吕伟娅. 低冲击开发模式应用——透水路面发展综述[J]. 新型建筑材料,2012,39(3):31-34.
- [9] Dietz M E, Clausen J C. Storm water runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision[J]. Journal of Environmental Management, 2008,87(4):560-566.
- [10] Bedan E S, Clausen J C. Storm water runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds[J]. Journal and American Water Resources Association, 2009,45(4):998-1008.