

下凹式绿地对地表径流的调节作用研究

李港妹,张兴奇,孙媛

(南京大学地理与海洋科学学院,江苏南京210023)

摘要:下凹式绿地是城市低影响开发建设的手段之一,为评价下凹式绿地对城市地表径流的调节作用,通过对不同暴雨重现期下的下凹式绿地雨水渗透率、临界下凹深度、临界面积比例进行计算,设计研究区下凹式绿地建设方案,并对各方案的径流拦蓄效果和减峰效果进行对比分析。结果表明:当暴雨重现期为3、5和10 a时,在研究区实施两种不同下凹深度(0.15、0.2 m)和不同下凹式绿地率(20%~45%)的下凹式绿地建设方案,其拦蓄效果和减峰效果均能达到99.92%以上。下凹式绿地对城市地表径流调控具有显著的调节效果。

关键词:下凹式绿地;城市暴雨过程;地表径流;内涝防治;地表径流调节

中图分类号:TU992

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)02-0031-06

Regulating effect of concave green land on surface runoff

LI Gangmei, ZHANG Xingqi, SUN Yuan

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: The concave green land is one of the measures of low impact development for urban construction. To evaluate the effects of the concave green land on regulating urban surface runoff, this paper calculates the rainwater infiltration rate, critical depth of depression, critical area ratio of the concave green lands under different rainstorm periods. The construction schemes of concave green land in the study area were designed, and the runoff interception effect and peak flow reduction effect of each scheme were compared and analyzed. The results showed that when the rainstorm return period was 3, 5 and 10 years, both the interception effect and the peak flow reduction effect of the two concave green space construction schemes with different concave depths (0.15m, 0.2m) and different concave green land rates (20% ~ 45%) in the study area can reach more than 99.92%. The concave green lands have significant effects on regulating urban surface runoff.

Key words: concave green land; urban rainstorm; surface runoff; prevention and control of urban waterlogging; regulation of surface runoff

1 研究背景

快速城市化导致城市不透水下垫面面积急剧增加,绿地等透水下垫面面积不断减少,使城市水文循环发生变化^[1],城市降雨径流特征发生改变,为城市水资源利用和防洪排涝带来了挑战^[2]。传统的城市内涝防治理念以“排水”为主,随着城市不透水面积的增加,雨水下渗量急剧下降,城市地表径流量随之增加,其弊端十分明显,传统城市排水系统有限的排水能力已经不能满足城市防洪排涝的需求。当

出现较大降雨强度和连续性降雨的时候,传统的城市排水系统就变得不堪重负,城市内涝事件频发,造成了严重的内涝灾害与负面的社会影响。

为解决城市化带来的城市水问题,20世纪70年代末,部分发达国家已经开始采用雨水滞留池、下凹式绿、透水路面、植草沟、集雨桶等方法延缓降雨径流过程^[3]。20世纪80年代末,美国马里兰州开始采用生物滞留技术,主要利用植物、土壤的物理和生物属性来调节地表径流,同时补充地下水^[4]。20世纪90年代初,“低影响开发”理念在美国被提

收稿日期:2018-07-19; 修回日期:2018-09-23

基金项目:江苏省水利科技项目(2015057)

作者简介:李港妹(1993-),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事城市水文环境研究。

通讯作者:张兴奇(1964-),男,贵州仁怀人,博士,副教授,主要从事水资源与水土保持研究。

出^[5]。随后,很多国家对低影响开发进行研究并广泛应用于城市建设之中^[6],以缓解城市发展面临的洪涝、水污染等问题。至今,基于低影响开发视角的城市规划建设逐渐兴起,对低影响开发已有较为深入的研究和大量的实践应用。我国对城市雨洪管理的研究相对较晚,近年来低影响开发理念逐渐进入城市规划和城市水文等相关领域研究人员的视野^[7-8]。Jia Haifeng等^[9]指出我国低影响开发建设应与城市总体规划相结合,从布局、系统功能等方面实现成本-效益最优化。王家彪等^[10]对比分析了城市地区两种径流控制模式,得出总量控制模式能较好地反映年均产流水平,场次控制模式能较好地反映城市对降雨的消纳能力,但两种模式下的最优控制率相差不大。冯博^[11]运用SWMM模型对研究区低影响开发建设前后雨水管道的排水能力进行模拟,发现低影响开发技术可有效降低地表径流,缓减城市内涝。

近几年,有关下凹式绿地的研究逐渐深入,常江等^[12]对不同暴雨情景和植物耐淹能力下凹式绿地的溢流口高度及下凹深度进行研究,得出下凹式绿地的下凹深度设计不仅与当地水文学土壤条件有关,还与植物耐淹时间、溢流口设施质量以及暴雨重现期有着密切关系;王建龙等^[13]对低影响开发的技术体系和具体实施方法进行了简要分析;朱永杰等^[14]通过实验研究不同暴雨强度、不同雨水口高度、不同汇水区面积情况下研究区的产流状况,全面分析了汇水面积、产流历时、产流速率、下凹式绿地率等之间的关系;马姗姗等^[15]将绿色屋顶与下凹式绿地两种低影响开发建设手段相结合,通过InfoWorks CS建立排洪模型,对研究区产汇流进行模拟,发现不同的低影响开发措施的合理配置能有效增强径流控制作用;在下凹式绿地对水质净化方面的研究方面,张晓菊等^[16]通过实验系统研究了不同基质厚度、不同植被种类以及暴雨重现期对径流污染物去除效果的影响;裔士刚等^[17]通过实验模拟降雨,对改良型下凹式绿地的污染物去除效果进行检测,得出不同暴雨重现期及服务面积比情况下改良型下凹式绿地对污染物的去除率不同,但均有显著的去除效果。

与传统的城市绿地建设方式相比,下凹式绿地能较好地调节地表径流,缓减洪涝问题^[18],同时也能发挥净化水质,减少面源污染等作用。迄今为止国内低影响开发技术虽仍处于探索阶段,尚未形成一套较为完善的城市地表径流控制技术标准和管理体系^[19-20],关于下凹式绿地的理论与应用研究需要加强,将暴雨重现期、下凹式绿地渗蓄率、临界下凹式绿地率、绿地临界下凹深度等进行综合分析,针对下凹式绿地对降雨径流的减峰效果及拦蓄效果的研究还不多见。

南京大学仙林校区自建成以来发生过多起严重内涝灾害,对广大师生的工作、学习和生活秩序带来了严重的影响。因此,本文以南京大学仙林校区为研究区,以下凹式绿地为研究对象,探讨下凹式绿地在城市地表径流调节中的作用与意义。

2 下凹式绿地雨水渗蓄能力计算

2.1 研究区概况

南京大学仙林校区位于东经 $118^{\circ}57'$,北纬 $32^{\circ}06'$,属于北亚热带季风气候,每年6月下旬至7月中旬为梅雨季节,是暴雨内涝频发时段。研究区自2006年开始建设,至2010年基本建成,之后一直处于部分建设中,下垫面类型由建设前的农地逐渐向建设用地转变。研究区下垫面构成及现状见表1和图1。

至今,不透水下垫面面积已超过2007年的8倍。由表1可知,研究区总面积 2.547 km^2 ,屋顶、道路和其他建设用地等硬质下垫面面积达 1.102 km^2 ,占总面积的43.26%。目前,研究区已有低影响开发建设面积为 0.052 km^2 ,占总面积的2.01%,已有的低影响开发建设手段为透水路面和透水停车位。研究区内虽然已经采用低影响开发建设手段以减少降雨径流量,但是因其占比较少,所能发挥的作用有限,内涝现象依然时有发生,需要增加低影响开发技术手段和建设面积,以缓减内涝频发的现状。研究区内绿地面积达 0.597 km^2 ,占研究区总面积的23.46%,但其中大部分仅具有景观绿化与生态功能,此设计没有发挥绿地的水文功能,具有较大低影响开发建设潜力,为下凹式绿地的建设提供了良好基础。

表1 研究区下垫面构成

面积及占比	透水路面	透水停车位	水体	不透水路面	山地	屋顶	绿地	其他建设用地	总面积
面积/ km^2	0.027	0.025	0.043	0.280	0.754	0.321	0.597	0.500	2.547
比例/%	1.05	0.96	1.68	11.00	29.59	12.61	23.46	19.65	100

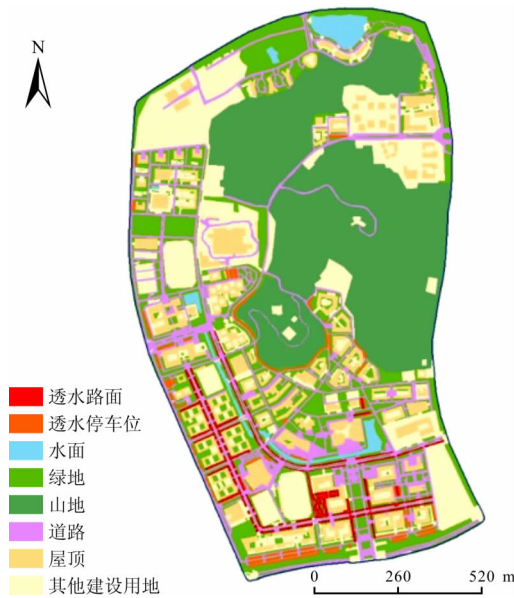


图1 研究区下垫面现状图

2.2 城市暴雨强度公式

根据《建筑给水排水设计手册》,城市暴雨强度计算公式如下:

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

式中: i 为 t 时段内的平均暴雨强度, mm/min ; t 为降雨历时, min ; P 为设计暴雨重现期, a ; n 为暴雨衰减系数; A_1 、 C 、 b 为地区参数。

根据《南京市暴雨强度公式(修订)查算表》,南京市 A_1 、 C 、 b 、 n 分别为 64.300、53.800、32.900、1.011。

则 t 时段内的降雨量为:

$$H = i \cdot t = \frac{(A_1 + C \lg P)t}{(t + b)^n} \quad (2)$$

2.3 下凹式绿地水量平衡分析

降雨发生时,雨水以降雨和汇水区汇流等形式进入下凹式绿地;同时,下凹式绿地的出水主要通过下渗、蒸发、蒸腾和溢流外排等产生。假设当降雨发生时,下凹式绿地集水为降雨和汇水区汇水,无其他外来水;除下渗、蒸发、蒸腾和溢流无其他出水,则下凹式绿地水量平衡关系如下^[21]:

$$Q_0 + U_0 = W + Z + Z' + P + U \quad (3)$$

式中: Q_0 为 t 时段内下凹式绿地的雨水入流总量, m^3 ; U_0 为下凹式绿地的初始储水量, m^3 ; W 为 t 时段内下凹式绿地的雨水下渗量, m^3 ; Z 为 t 时段内下凹式绿地雨水蒸发量, m^3 ; Z' 为 t 时段内下凹式绿地植物蒸腾量, m^3 ; P 为 t 时段内下凹式绿地雨水外排

量, m^3 ; U 为降雨终止时下凹式绿地的储水量, m^3 。

假设降雨开始时研究区下凹式绿地无初始储水,且降雨过程中,下凹式绿地雨水未出现溢流外排现象,同时,忽略雨水蒸发量和植物蒸腾量;即, U_0 、 Z 、 Z' 和 P 均为 0。研究区透水路面和透水停车位面积占比较小,忽略其对降雨径流的影响。则研究区下凹式绿地的雨量平衡公式可以简化为:

$$Q_0 = W + U \quad (4)$$

2.4 下凹式绿地渗蓄能力计算

渗蓄率 N 通常是衡量下凹式绿地蓄渗能力的重要指数,表示降雨过程中下凹式绿地雨水下渗量与蓄积量之和占下凹式绿地降雨量与汇水区汇入下凹式绿地的径流量之和的比例^[21],下凹式绿地蓄渗率计算公式如下^[22]:

$$N = \frac{W + U}{(HF_y \Psi_c + HF_g)/1000} \times 100\% \quad (5)$$

式中: H 为降雨量, mm ; F_y 为不透水汇水区面积, m^2 ; F_g 为下凹式绿地面积, m^2 ; Ψ_c 为研究区不透水下垫面径流系数,一般为 0.8 ~ 0.9,考虑到汇流过程会产生径流损失,故 Ψ_c 取 0.8。

降雨初期,雨水入渗速率并不稳定,一般呈现由快转慢的现象,为方便计算,下凹式绿地雨水下渗量 W 的计算通过土壤稳定入渗速率来计算,计算公式如下:

$$W = 60KJF_g t \quad (6)$$

式中: K 为研究区土壤稳定入渗速率, m/s ; J 为水力坡度,垂直下渗时 $J = 1$ 。

$$U = F_g h \quad (7)$$

式中: h 为下凹式绿地与溢流口之间的高度差, m 。

2.5 情景设计

根据《室外排水设计规范 GB 50014 - 2006》(2016 年版),中国大陆地区设计暴雨重现期一般地区为 1 ~ 3 a、重要地区为 3 ~ 5 a、特别重要地区为 10 年。根据《南京统计年鉴》,2015 年,南京市常住人口数为 823.59 万人,属于特大城市。同时,根据近几年南京市内涝频发的现状,本文设计暴雨重现期取 3、5、10 a。杨金玲等^[23]采用双环法对南京城市土壤的水分下渗特征进行了分析。本文根据其研究结果综合分析计算,取土壤稳定入渗率为 $2 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{s}$ 。从植物耐淹方面和安全性方面考虑,下凹式绿地的下凹深度一般不超过 0.25 m^[24],取下凹深度分别为 0.1、0.15、0.2 m。由表 2 可知,当下凹式绿地面积与汇水区面积比值 f ($f = F_g/F_y$) 一

定时,下凹式绿地的雨水渗蓄率随着暴雨重现期的增大而减小,随着下凹深度的增大而增大。当 $f = 20\%$,暴雨重现期为3 a,下凹深度为0.2 m时,下凹式绿地的渗蓄率为98%。当 $f = 30\%$,暴雨重现期为3 a,下凹深度为0.15 m时,下凹式绿地的雨水渗蓄率为100%;暴雨重现期为10 a,下凹深度为0.2 m时,下凹式绿地的雨水渗蓄率大于100%。当 $f = 40\%$ 时,暴雨重现期为10 a,下凹深度为0.15 m时,下凹式绿地的渗蓄率为93%。按上述情景设计,下凹式绿地能基本满足研究区降雨径流调节的要求。

表2 不同设计参数下的下凹式绿地雨水渗蓄率 %

下凹式绿地比例 $f/\%$	绿地下凹深度 h/m	设计暴雨重现期 P/a		
		3	5	10
10	0.10	27	24	21
	0.15	41	36	31
	0.20	54	48	41
20	0.10	49	43	37
	0.15	73	65	56
	0.20	98	86	74
30	0.10	67	59	51
	0.15	100	88	76
	0.20	133	118	102
40	0.10	82	72	62
	0.15	122	108	93
	0.20	163	144	124

注:当下凹式绿地雨水渗蓄率大于100%时,表示在此条件下,下凹式绿地能服务更大面积的区域。

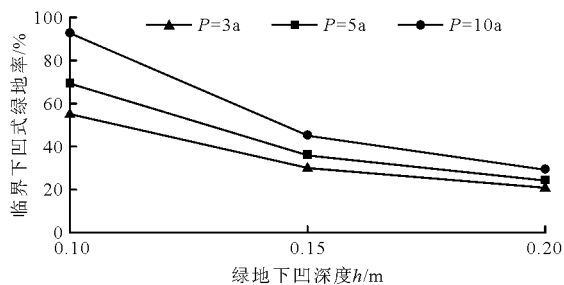


图2 不同设计参数下的临界下凹式绿地率

由图3可知,当设计暴雨重现期一定时,临界下凹深度随着下凹式绿地率的增加而减少;当下凹式绿地率一定时,临界下凹深度随暴雨重现期的增大而增大。

本文下凹式绿地的下凹深度分别为0.1、0.15、0.2 m,当绿地下凹深度太大时,对植物耐淹程度要求较高,且存在安全隐患,所以方案设计不考虑下凹

在土壤雨水渗蓄率为100%时,所对应的下凹式绿地比例 f_0 为研究区开发后径流不增加的临界值,称为临界下凹式绿地率。在暴雨重现期一定时,利用临界下凹式绿地率能较为准确地分析不同下凹深度下所需的下凹式绿地面积以衡量各设计方案。当渗蓄率 $N = 100\%$ 时,临界下凹式绿地率的计算公式如下:

$$f_0 = \frac{\Psi_c H / 1000}{600KJt + h - H / 1000} \quad (8)$$

式中: f_0 为临界下凹式绿地率; Ψ_c 为不透水下垫面径流系数; H 为降雨量,mm; h 为下凹式绿地与溢流口之间的高度差,m; K 为研究区土壤稳定入渗速率,m/s。

由图2可以看出,当设计暴雨重现期一定时,临界下凹式绿地率随着绿地下凹深度的增加而减少;当绿地下凹深度一定时,临界下凹式绿地率随暴雨重现期的增加而增加。当下凹式绿地占比较大时,实践应用的可行性很小,故不考虑下凹深度为0.1 m的方案。

下凹式绿地是一种雨水蓄渗设施,具有临时蓄水、增加下渗、调节径流的功能,其通过调节降雨径流来减缓降雨强度和研究区雨水下渗速率之间的矛盾。在土壤雨水渗蓄率为100%时,所对应的绿地下凹深度 h_0 为研究区开发后径流不增加的临界值,称为绿地临界下凹深度。临界下凹式绿地率的计算公式如下:

$$h_0 = \frac{\Psi_c H}{1000f} + \frac{H}{1000} - 60KJt \quad (9)$$

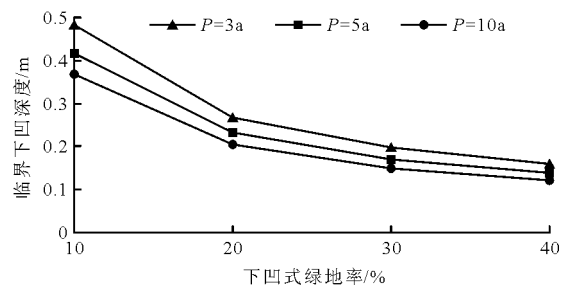


图3 不同设计参数下下凹式绿地的临界下凹深度

深度大于0.2 m的情况。

由图3可知,不同暴雨重现期,当下凹式绿地率为10%时,临界下凹深度均大于0.2 m;当下凹式绿地率为20%、暴雨重现期为10 a时,对应的临界下凹深度为0.27 m,也大于0.2 m,故以上情况不在方案设计考虑范围之内。

3 下凹式绿地的应用

3.1 方案设计

当下凹式绿地渗蓄率较低时不能满足研究区降雨径流调节的要求,而下凹式绿地渗蓄率较高时,虽能满足调节径流的要求,但会造成工程闲置和资源浪费等现象。当下凹式绿地面积比例较大或绿地下凹深度较大时,均会提高对工程实施的要求,增加工程实施难度,同时绿地下凹深度较大时会产生安全隐患,并对植物耐淹性要求较高,均会对下凹式绿地建设造成困难。经过对土壤渗蓄率、临界下凹绿地率和绿地临界下凹深度等的计算及综合分析,排除工程实施难度较大和土壤渗蓄率较低和较高的方案,得出如下 6 个方案(见表 3):

表 3 下凹式绿地改建方案设计表

方案 设计	暴雨重现 期 P/a	绿地下凹 深度 h/m	下凹式绿 地率范围/%	下凹式绿 地率/%
方案 1	3	0.15	20 < f < 40	29.99
方案 2	3	0.20	20 < f < 30	20.58
方案 3	5	0.15	30 < f < 40	35.75
方案 4	5	0.20	20 < f < 30	24.14
方案 5	10	0.15	40 < f < 54	44.60
方案 6	10	0.20	20 < f < 30	29.35

3.2 拦蓄和减峰效果分析

由于绿地类型为下凹式绿地,不透水区域作为下凹式绿地的汇水区,汇集周边建筑屋面、硬化路面及铺装区域等不透水下垫面产生的径流,因此,假设下凹式绿地的雨水总入流过程为降雨过程与周边汇水区雨水入流过程的叠加。汇水区入流过程取决于形状、坡度等地面因素,且集流时间较短,为了简化计算,故假定汇水区的入流量为绿地增加的净雨量,采用径流系数法计算总雨强^[25-26]:

$$S = s[1 + \Psi_c(F_y/F_g)] \quad (10)$$

$$s = A_1 + C \lg P \quad (11)$$

式中: S 为绿地和其他汇水区叠加的总雨强, mm/min; Ψ_c 为不透水下垫面径流系数; F_y 为不透水汇水区面积, m^2 ; F_g 为下凹式绿地面积, m^2 。

雨水汇流速率和暴雨洪峰流量是衡量暴雨的重要参数,为估算设计方案中下凹式绿地的预期效果,本文用绿地拦蓄率和绿地减峰率来衡量下凹式绿地对暴雨径流的调节作用和洪峰的削减效果。

汇水区硬质下垫面汇入下凹式绿地的降雨径流

和绿地上的雨水被下凹式绿地截留,同时产生下渗。为简化计算,采用土壤稳渗率计算下凹式绿地净雨深。计算公式如下:

$$h_c = \frac{St}{(t+b)^n} - Kt \quad (12)$$

式中: h_c 为下凹式绿地净雨深, mm。

$$Z = \frac{10^3 h + \Psi_c t}{h_c + \Psi_c t} \times 100\% \quad (13)$$

式中: Z 为下凹式绿地拦蓄率, %。

汇水区降雨径流的汇流过程和暴雨过程叠加成为下凹式绿地上的雨洪过程,采用瞬时降雨强度的最大值计算绿地雨洪流量峰值,为简化计算,忽略硬质下垫面的降雨径流汇流时间,计算公式如下:

$$Q_m = \alpha S/b^n \quad (14)$$

式中: Q_m 为下凹式绿地雨洪流量峰值, mm/min; α 为修正系数,一般取 0.9。

绿地溢流量计算公式如下:

$$q_m = \frac{Q_m (1 - \frac{(h_1 + h_2)f}{W})}{1 - [\frac{rh_1 f}{(1+r)W}]^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

$$W = S \cdot t \quad (16)$$

式中: r 为雨洪历时系数,一般取 0.36; h_1 为绿地最大蓄水量, mm,采用下凹式绿地雨水口与绿地的高程差; h_2 为调洪量, mm,其最大值采用下凹式绿地雨水口与路面的高程差; W 为雨洪总量, mm。

下凹式绿地减峰率计算公式如下:

$$\eta = \frac{q_m}{Q_m} \times 100\% \quad (17)$$

各下凹式绿地建设方案的拦蓄率和减峰率计算结果见表 4,各方案的拦蓄率均接近 100%,表明各下凹式绿地设计方案都具有明显的拦蓄效果。各方案的减峰率亦约等于 100%,相当可观,表明减峰效果较好。综合分析各下凹式绿地改进方案,都具有较为显著的预期拦蓄效果和减峰效果。

表 4 研究区下凹式绿地设计方案对比

方案 设计	暴雨重 现期 P/a	绿地下凹 深度 h/m	下凹式绿 地率 f/%	拦蓄 效果/%	减峰 效果/%
方案 1	3	0.15	29.99	99.99	101.97
方案 2	3	0.2	20.58	99.99	103.11
方案 3	5	0.15	35.75	100.00	102.35
方案 4	5	0.2	24.14	100.01	103.34
方案 5	10	0.15	44.60	100.00	102.87
方案 6	10	0.2	29.35	99.92	103.62

3.3 设计方案的可行性分析

研究区下凹式绿地的设计以从源头调控地表径流、降低城市雨洪的影响为目的,以可行性为原则,拦蓄率和减峰率为检验参数,根据不同暴雨重现期,不同绿地下凹深度制定6个设计方案,各设计方案的预期拦蓄效果和减峰效果均较为理想,能在原有绿地面积不变的情况下有效调控降雨径流。

方案1、3、5的绿地下凹深度为0.15 m,工程难度相对偏小,对绿地植物耐淹程度要求不高,下凹式绿地率均大于29%,工程量相对偏大;方案2、4、6的绿地下凹深度为0.2 m,对绿地种植植物种类的耐淹性要求较高,下凹式绿地率均小于30%,与前者相比,工程量相对偏少。当暴雨重现期一定时,下凹式绿地面积比例与下凹深度成反比,工程难度与下凹深度成正比,工程量与下凹式绿地面积比例成正比。当绿地下凹深度一定时,下凹式绿地面积比例与暴雨重现期成正比,当暴雨重现期增大时,工程量也随之增大。6种方案的预期拦蓄率和减峰效果均比较理想,当暴雨重现期较小时,可采用下凹深度为0.15 m、下凹式绿地面积比例相对不大的方案;当暴雨重现期较大时,可采用绿地下凹深度为0.2 m、下凹式绿地面积比例相对偏小的方案。同时,在研究区内涝现象相对较为严重的地块,通过增加绿地下凹深度或增大下凹式绿地率可得到更好的内涝缓解效果。

4 结 论

本文通过计算不同暴雨重现期、绿地下凹深度、下凹式绿地面积情景下的下凹式绿地渗蓄率、临界下凹式绿地面积和临界绿地下凹深度,制定6个下凹式绿地应用方案,利用下凹式绿地对地表径流的拦蓄效果和对暴雨的减峰效果来评价各方案对城市暴雨径流的调节作用。

(1) 本文采用雨水渗蓄率来衡量下凹式绿地渗蓄雨水的功能,当下凹式绿地比例一定时,渗蓄率与下凹深度成正比,与暴雨重现期成反比。当暴雨重现期小于等于10 a,绿地下凹深度为0.2 m,下凹式绿地率大于等于30%;暴雨重现期小于等于5 a,绿地下凹深度为0.15 m,下凹式绿地率大于等于40%时,研究区下凹式绿地雨水渗蓄率超过100%。

(2) 根据不同暴雨强度,在研究区实施0.15、0.2 m两种不同下凹深度和20%至45%不同下凹式绿地面积比的下凹式绿地建设方案,其拦蓄效果均能达到99.92%以上,减峰效果均大于100%,可有

效应对暴雨重现期为3、5、10 a的暴雨,下凹式绿地是一种能有效调节城市地表径流的低影响开发建设手段。

(3) 下凹式绿地是城市低影响开发技术的常用手段之一,但其需要与其他低影响开发手段配合应用才能发挥更佳的径流调节作用。城市低影响开发建设还受到技术应用、成本效益和转变观念等因素的影响,在以后的城市洪涝防控研究中需与城市规划建设、土地利用规划以及城市水利建设等相关领域结合^[27],加强对城市低影响开发技术的理论和应用研究。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014,25(4):594-605.
- [2] 刘家宏,王浩,高学睿,等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报,2014,59(36):3581-3590.
- [3] 权全,罗纨,沈冰,等. 城市化土地利用对降雨径流的影响与调控[J]. 水土保持学报,2013,27(1):46-50.
- [4] 李强. 低影响开发理论与方法述评[J]. 城市发展研究,2013,20(6):30-35.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Low impact development (LID): a literature review [M]. Washington DC: Office of Water,2000,1-75.
- [6] POMEROY C A,POSTEL N A,ONEILL P A,et al. Development of storm water management design criteria to maintain geomorphic stability in Kansas City Metropolitan Area Streams[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2015,134(5):562-566.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 2014.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Technical guidance on implementing the stormwater runoff requirements for federal projects under section 438 of the energy independence and security act [M]. Washington DC: Office of Water,2009:1-63.
- [9] JIA Haifeng,LU Yuwen,YU S L,et al. Planning of LID - BMPs for urban runoff control: the case of Beijing olympic village [J]. Separation & Purification Technology, 2012, 84:112-119.
- [10] 王家彪,赵建世,沈子寅,等. 关于海绵城市两种降雨控制模式的讨论[J]. 水利学报,2017,48(12):1490-1498.
- [11] 冯博. 基于水力模型的低影响开发规划研究[J]. 城市规划,2016,40(3):89-94.

(下转第42页)

- 究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 11-17.
- [2] REN Lei, XUE Lianqing, LIU Yuanhong, et al. Study on variations in climatic variables and their influence on runoff in the Manas River Basin, China[J]. Water, 2017, 9(4): 258.
- [3] GUO Danlu, WESTRA S, MAIER H R. Impact of evapotranspiration process representation on runoff projections from conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 2017, 53(1): 435-454.
- [4] JIANG Rengui, XIE Jiancang, HE Hailong, et al. Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951-2012[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2885-2903.
- [5] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于标准化降水指数的锡林郭勒盟干旱特征分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 119-128.
- [6] HAO Xingming, CHEN Yaning, XU Changchun, et al. Impacts of climate change and human activities on the surface runoff in the Tarim River Basin over the last fifty Years[J]. Water Resources Management, 2008, 22(9): 1159-1171.
- [7] 姜丽红, 贾杰. 渭河源区水文气象要素演变趋势及阶段性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 98-104.
- [8] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 近50年陕南地区降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 14-19+25.
- [9] 严栋飞, 解建仓, 姜仁贵, 等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 13-19.
- [10] DONG Wen, CUI Baoshan, LIU Zhihui, et al. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in an arid basin in northwest China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(18): 4854-4864.
- [11] 粟晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-159.
- [12] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58.
- [13] 王雁, 丁永建, 叶柏生, 等. 黄河与长江流域水资源变化原因[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(7): 1207-1219.
- [14] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [15] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51.
- [16] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区1956-2000年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 29-33.
- [17] 师忱, 袁士保, 史常青, 等. 滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 264-269.
- [18] 王娇, 姜仁贵, 解建仓, 等. 泾河流域径流量变化特征研究[J]. 水资源与水工程学院, 2018, 29(6): 88-93.

(上接第36页)

- [12] 常江, 陈映杰. 下凹式绿地溢流口标高及下凹深度参数研究[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2017, 17(1): 20-24.
- [13] 王建龙, 车伍, 易红星. 基于低影响开发的暴雨控制与利用方法[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14): 6-9+16.
- [14] 朱永杰, 毕华兴, 常译方, 等. 北京地区不同设计暴雨强度下凹式绿地的减流效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 121-124.
- [15] 马姗姗, 庄宝玉, 张新波, 等. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3): 101-105.
- [16] 张晓菊, 董文艺. 下凹式绿地径流污染控制与径流量消减影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2): 113-117.
- [17] 裔士刚, 王祥勇, 康威, 等. 改良型下凹绿地对小区雨水径流的调蓄净化效能[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 134-138.
- [18] 王红武, 毛云峰, 高原, 等. 低影响开发(LID)的工程措施及其效果[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 99-103.
- [19] Field R. BMP technology in urban watersheds[M]. American Society of Civil Engineers, 2006, 1-314.
- [20] 李俊奇, 车伍, 池莲, 等. 住区低势绿地设计的关键参数及其影响因素分析[J]. 给水排水, 2004, 30(9): 41-46.
- [21] 潘忠成, 袁溪, 李敏, 等. 下凹式绿地在降雨径流控制中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(10): 59-62.
- [22] 尼玛次仁. 城市绿地系统对雨水径流削减作用的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [23] 杨金玲, 张甘霖, 袁大刚. 南京市城市土壤水分入渗特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 363-368.
- [24] 张炜, 车伍, 李俊奇, 等. 图解法用于雨水渗透下凹式绿地的设计[J]. 中国给水排水, 2008, 24(20): 35-39.
- [25] 叶水根, 刘红, 孟光辉. 设计暴雨条件下下凹式绿地的雨水蓄渗效果[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6): 53-58.
- [26] 解刚, 王向东. 北京市房地产类建设项目下凹式绿地的雨水拦蓄能力及挖深研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 144-146+150.
- [27] 程江, 杨凯, 黄民生, 等. 下凹式绿地对城市降雨径流污染的削减效应[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6): 611-616.