

北京地区不同设计暴雨强度下凹式绿地的减流效果

朱永杰¹, 毕华兴^{1,2}, 常译方¹, 海璇¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 研究不同汇水面积的周边外来雨水径流, 计算绿地产流过程的动态径流系数以及对径流的削减率。[方法] 采用人工模拟的下凹式绿地, 模拟绿地的不同暴雨强度。[结果] (1) 30% 下凹式绿地面积比基本可以拦蓄 3 年, 5 年一遇暴雨, 稳定后径流系数在 0.30 以下; (2) 下凹式绿地面积比为 20% 时, 雨水口高 8 cm 和 5 cm 时对 3 年, 5 年一遇暴雨产生的径流削减率均在 40% 以上, 稳定后的径流系数均在 0.90 以上, 且两种雨水口高度下的削减率差异不明显, 相比之下 5 cm 雨水口高度设计较 8 cm 更为合理; (3) 绿地的产流速率变化过程曲线呈“几”字形, 汇水面积越大、暴雨强度越大, 产流速率稳定时的峰值就越大, 产流历时也越长。[结论] 下凹式绿地对暴雨条件下产生的径流有很好的削减作用, 其所占面积比越大, 削减效果越好。

关键词: 下凹式绿地; 暴雨强度; 径流系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0121-04

中图分类号: S273.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.023

Runoff Reduction Effect of Sunken Lawn Under Different Designed Rainstorm Intensity in Beijing Area

ZHU Yongjie¹, BI Huaxing^{1,2}, CHANG Yifang¹, HAI Xuan¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This paper studied surrounding rainwater runoff of sunken lawn by calculating the dynamic runoff coefficient of runoff process and the runoff reduction rate. [Methods] The sunken lawn was artificial made to simulate their occupied area proportion, and the surrounding rainwater with different intensity was simulated. [Results] (1) 5 cm height designed gullies can intercept 3-year, 5-year recurred storm runoff basically when sunken lawn area ratio was 30%, and the runoff coefficients was 0.30 when it were stable; (2) When the sunken lawn area ratio was 20%, the lawn with 8 cm and 5 cm height gullies could reduce runoff rates of 3-year, 5-year recurrence storm over 40%, and the stabilized runoff coefficient was 0.90. The difference of reduction rate between the two designed gully-height lawns was not significant, and 5 cm height gullies design was more economically reasonable than the one with 8 cm gully; (3) The runoff rate from the lawn was a temporal unimodal curve. The peak flow rate was bigger and runoff duration was longer when the catchment area or the rainstorm intensity was greater. [Conclusion] Runoff reduction of sunken lawn was obvious, which was greater when the area ratio was higher.

Keywords: sunken lawn; rainstorm intensity; runoff coefficient

下凹式绿地是集汇水、净化、景观绿化于一体的一个系统^[1], 设计低于路面的一定下凹深度, 内设高度低于路面但高于绿地的雨水口^[2]。下凹式绿地可以汇集周边一定硬化面积区域产生的雨水径流, 雨水径流进入绿地, 发生入渗, 绿地蓄满后进入雨水口^[3]。

随着日益加速的城市化步伐, 城市排洪与雨水径流污染物的削减问题不断对我们提出新的考验^[4]。下凹式绿地在城市绿化建设中的重大作用逐渐被发现认识, 不少学者对其参数性质和功能作用进行了研究。任树梅等^[5]对北京城不同下凹深度的绿地雨水蓄渗

收稿日期: 2014-10-10

修回日期: 2014-11-22

资助项目: 国家水体污染控制与治理重大专项“城市地表径流减控与面源污染削减技术研究”(2013ZX07304-001)

第一作者: 朱永杰(1990—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为林业生态工程。E-mail: 455710351@qq.com。

通信作者: 毕华兴(1969—), 男(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 教授, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn。

效果进行了分析和计算,结果表明,下凹式绿地是削减径流雨水、减少暴雨洪峰的有效措施。叶水根等^[6]对下凹式绿地在 1 倍汇水面积的情况下,对于 10、50 和 100 年一遇的暴雨的研究表明下凹式绿地的蓄渗、减洪效果极为明显。周丰等^[7]针对北京市不同硬化绿化比例面积对下凹式绿地关于拦蓄雨水径流、补充地下水、滞后汇流的影响进行研究,得出下凹式绿地能有效的拦蓄雨水径流和补充地下水,并使降雨汇流明显滞后的结论。张建林^[8]的研究表明下凹绿地即使得多倍汇水面积下,雨天对路面径流的减峰、拦蓄效果也很好,可以在很大程度上减轻城市的内涝灾害。目前相关研究中,对下凹式绿地的功能作用研究主要集中于不同下凹深度以及不同比例汇水面积对外来雨水径流的汇集和削减作用,而关于不同雨水口高度对下凹式绿地汇集、减少雨水径流影响的相关研究较少。本研究在保持下凹深度一定的前提下,研究下凹式绿地不同雨水口高度在不同设计暴雨强度下的径流系数以及对径流的削减效果,目的在于为北京地区下凹式绿地研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验布设及供试土壤

试验装置为自行设计加工的下凹式绿地,圆柱形塑料桶直径为 100 cm,高 70 cm,下凹深度为 10 cm,雨水口高于下凹式绿地地面,最低端设有一个直径 5 cm 的排水管,试验过程始终保持关闭状态,每次试验完成后通过排水管排出装置内的水,下凹式绿地的产流在本试验中为装置接市政雨水管流出的径流。在该装置内,按照设定比例 5:9(砾石层厚度大于 30 cm)分层填装细土壤层和小砾石,砾石层在下,土壤层在上。试验土壤取自北京市昌平区科技园建设挖方土,土壤类型为砂质壤土,其机械组成详见表 1。填装完成后在土壤表面铺上高羊茅草皮,草种为北方多年生高羊茅,草皮移植生长约半个月后,按照设定的试验条件进行试验,每次试验前对土壤含水率进行测定,以期保证每次试验前土壤含水率是基本一致的。

表 1 供试土壤机械组成

粒径/mm	砂粒(2~0.02 mm)	粉粒(0.02~0.002 mm)	黏粒(<0.002 mm)
质量百分比/%	77.04	22.58	0.38

1.2 试验设计

1.2.1 暴雨强度计算 模拟试验在北京林业大学校园内进行,暴雨强度根据北京市暴雨强度公式^[9]计算得出:

$$q = \frac{2001(1+0.811\lg P)}{(t+8)^{0.711}} \quad (t \leq 120 \text{ min}, P \leq 10 \text{ a})$$

式中: q ——设计暴雨强度(L/(s·hm²)); t ——降雨历时(min); P ——设计重现期(a)。适用范围为: $t \leq 120 \text{ min}, P = 0.25 \sim 100 \text{ a}$ 。

按照北京市城市规划的规定,下凹式绿地率为 20%~30%比较合理^[10]。选取 20%和 30%两个绿化比例,故下凹式绿地收集面积为 3.92 和 2.59 m²的周边区域雨水径流,径流系数取 0.85^[9],由此计算得出重现期为 3 和 5 a 的暴雨水平下对应的进入下凹式绿地的雨水径流量分别为 211 和 239 L,140 和 158 L。在本研究中,采用进水负荷表示下凹式绿地进水总量与进水时间的比值(L/min),20%下凹式绿地比例对应 3 年一遇暴雨进水负荷为 1.76 L/min,对应 5 年一遇暴雨进水负荷为 2.00 L/min,30%下凹式绿地比例对应 3 年一遇暴雨进水负荷为 1.17 L/min,对应 5 年一遇暴雨进水负荷为 1.32 L/min。

1.2.2 径流削减率 径流削减率定义为雨水通过不透水和透水下垫面时的径流相对差值,计算公式为:

$$\Delta q = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \times 100\%$$

式中: Δq ——径流削减率(%); q_1 ——雨水通过不透水下垫面地表径流量(mm); q_2 ——雨水通过透水下垫面的产流量(mm)。

1.2.3 径流系数 某一时段径流量与相应降雨量之比,计算公式为:

$$\varphi = Q/Q_s$$

式中: φ 表示径流系数; Q ——次径流总量(L); Q_s ——次降雨总量(L)。

1.2.4 试验处理 自制下凹式绿地的下凹深度不变,维持在 10 cm。下凹式绿地雨水口采用 5 和 8 cm 两种高度,每种高度设定 2 组场降雨试验(暴雨强度为 3 年一遇和 5 年一遇),每组场降雨试验设定 1 个重复。

1.2.5 测定项目与测定方法 试验前,采用含水率测定仪(POGO 便携式土壤多参数速测仪,美国)测定土壤含水率。试验时,用量筒测量接市政管的排水管的出水量,并用秒表记录相应时间。

2 结果与分析

2.1 各设计暴雨强度在不同雨水口高度下的产流

各设计暴雨强度在不同雨水口高度下的产流数据详见表 2。由表 2 可知,在本试验绿地条件下,不同雨水口高度的下凹式绿地对不同尺度汇水面积在 3 和 5 a 设计暴雨条件下周边外来雨水径流削减率均

可以达到 40% 以上。下凹式绿地所占绿化面积比为 30%，即汇水面积为 2.59 时，8 cm 雨水口高度下凹式绿地对设计重现期为 5 和 3 a 的暴雨可以完全拦蓄，其削减率为 100%；汇水面积不变，雨水口高度减小到 5 cm 时，对设计重现期 3 年一遇的暴雨仍能完全拦蓄，削减率 100%，设计重现期 5 年一遇暴雨在 102 min 产生溢流，产流持续 60 min 结束，场暴雨周边外来雨水削减率为 94.54%，场暴雨径流系数为 0.02。由此可以看出，当下凹式绿地面积比达到 30% 时，5 cm 雨水口高度基本可以拦蓄 3 年和 5 年一遇暴雨。

下凹式绿地面积比为 20%，5 倍汇水区面积时，设计 3 年和 5 年一遇暴雨强度时，下凹式绿地对周边外来雨水径流削减率均达到 40% 以上，最高达到

58.36%；场暴雨径流系数都在 0.10 左右，削减后的径流系数符合北京市公园绿地综合径流系数标准^[9]。此时场暴雨的径流系数在不同雨水口高度下没有明显差异($p=0.289>0.05$)，说明在下凹深度一定时，增加雨水口的高度不能明显增加下凹式绿地对雨水径流的蓄积量，相反，从考虑绿化植物水淹时间角度出发，5 cm 的雨水口高度比 8 cm 雨水口高度更为合适。

雨水口高度分别为 5 和 8 cm 时，设计暴雨强度为 3 年一遇暴雨强度时下凹式绿地的产流量都比 5 年一遇暴雨强度时下凹式绿地的产流量明显要小($p=0.00<0.05$)，说明暴雨强度对下凹式绿地的蓄积效果影响较大。汇水区面积不同，产流量也差异明显，这主要是由于进水负荷不同所导致的。

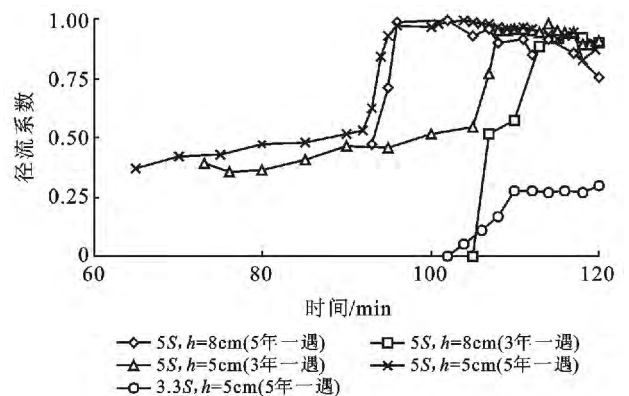
表 2 下凹式绿地在各设计暴雨强度下的产流参数

汇水区面积/m ²	雨水口高度/cm	设计暴雨强度	进水负荷/(L·min ⁻¹)	开始产流时间/min	产流总量/ml	产流时间/min	场暴雨径流削减率/%	场暴雨径流系数
2.59	8	3 年一遇	1.17		0	0	100	0
		5 年一遇	1.32		0	0	100	0
	5	3 年一遇	1.17		0	0	100	0
		5 年一遇	1.32	102	8 630	60	94.54	0.02
3.92	8	3 年一遇	1.76	105	87 855	131	58.36	0.08
		5 年一遇	2.00	90	123 985	132	48.12	0.10
	5	3 年一遇	1.76	72	102 475	114.5	51.43	0.09
		5 年一遇	2.00	64	131 120	119.5	45.14	0.11

2.2 不同雨水口高度在不同暴雨强度下的动态径流系数变化规律

汇水面积分别为 3.92 和 2.59 m² 条件下，雨水口高度分别为 8,5 cm 时的动态径流系数曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看出，汇水面积分别为 3.92 和 2.59 m² 条件下不同雨水口高度 3,5 年一遇暴雨径流系数变化规律基本一致，均呈现出先递增后趋于平稳的趋势。由图 1 可知，3.92 m² 汇水面积，即下凹式绿地比例为 20% 时，当雨水口高度为 8 cm 时，从开始产流到停止进水这段时间内，径流系数先是快速增大，在大于 0.80 时趋于稳定，并且稳定后的最大值均可达到 0.90 以上，说明此时下凹式绿地的蓄水容量接近饱和，对来雨水径流几乎没有削减效果。当雨水口高度减为 5 cm 时，径流系数先是很平缓地增加，然后快速增大到 0.9 以上并趋于稳定。径流系数小于 0.50 时，此时下凹式绿地土壤表面蓄水水位并未超过雨水口，产流来自于绿地表面水分的下渗；一段时间后，绿地表面水蓄满后从雨水口进入，此时下凹式绿地产流量迅速增大，从而导致径流系数急剧增加，

最终稳定下来，稳定后对外来雨水径流削减很小，径流系数也在 0.90 以上。从图 1 还可以看出，2.59 m² 汇水面积条件下，即下凹式绿地所占比例为 30% 时，5 cm 雨水口高度下，5 年一遇设计暴雨产流量较小，从产流开始到 120 min 进水结束径流系数变化也相对较小。径流系数在 0.30 以下。说明此时下凹式绿地削减效果明显。



注：S 为汇水面积；h 为雨水口高度。下同。

图 1 不同雨水口高度对应不同暴雨强度下的动态径流系数

2.3 产流速率变化过程

图 2 为不同汇水面积下两个雨水口高度下凹式绿地收集周边外来雨水径流时的产流速率变化过程曲线。由图 2 可以看出,从开始产流到产流停止,整个过程产流速率变化过程曲线呈“几”字形。汇水面积越大,产流速率稳定时的峰值就越大;3.92 m² 汇水面积产流速率峰值均在 1 500 ml/min 以上,最大超过 2 000 ml/min,2.59 m² 汇水面积产流速率峰值仅为 300 ml/min 左右,相差较大;同一汇水面积条件下,暴雨强度越大,产流速率稳定时的峰值也越大。不同汇水面积产流历时差异较大,汇水面积大,产流历时长;相同汇水面积,产流历时随暴雨强度和雨水口高度的增加而延长。5 种情况下的产流速率变化规律在 120 min 内与它们各自的动态径流系数变化规律是基本一致的。在 120 min 以后,周边外来雨水径流停止进入下凹式绿地,产流速率迅速减小,减小后趋于平缓,此时产生的径流主要来自于下凹式绿地土壤表面的水分下渗,并且下凹式绿地表面的水位是一个不断下降的过程,产流速率也随着不断减小,最终停止产流。

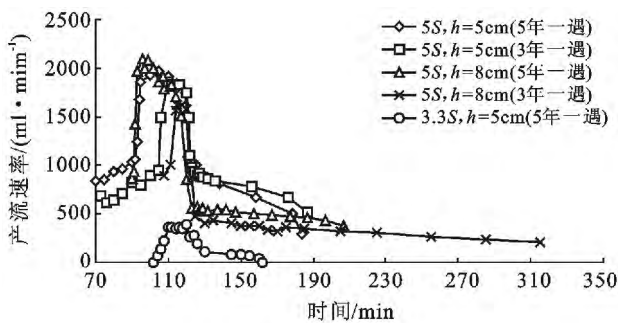


图 2 不同雨水口高度对应不同暴雨强度下的产流速率

3 结论

(1) 下凹式绿地对暴雨条件下产生的径流有很好的削减作用。下凹深度 10 cm,下凹式绿地面积比达到 30%时,5 cm 雨水口高度基本可以拦蓄 3 年和 5 年一遇暴雨;8 cm 雨水口高度下凹式绿地对设计重现期为 5 和 3 a 的暴雨削减率为 100%;雨水口高 5 cm,对设计重现期 3 年一遇的暴雨仍能完全拦蓄,设计重现期 5 a 场暴雨周边外来雨水削减率为 94.54%,场暴雨径流系数为 0.02。雨水口高度分别

为 8 和 5 cm 时,对于 3 年和 5 年一遇暴雨所产生的雨水径流削减率均在 40%以上,且两种雨水口高度下削减作用差异不明显,考虑绿地景观以及植物水淹承受能力,5 cm 雨水口高度设计较 8 cm 要更为合理。

(2) 绿地产流后动态径流系数先呈递增趋势,然后趋于稳定。下凹式绿地比例为 20%时,稳定后的径流系数均在 0.90 以上,此时下凹式绿地对径流的削减作用很小。下凹式绿地所占比例为 30%时,5 cm 雨水口高度 5 年一遇设计暴雨产流量较小,径流系数在 0.30 以下,下凹式绿地削减效果明显。

(3) 下凹式绿地的产流速率变化过程曲线呈“几”字形,径流从雨水口进入后,产流速率迅速增大,在外来雨水径流停止进入绿地后,绿地产流速率突然大幅减小。汇水面积越大,产流速率稳定时的峰值就越大;同一汇水面积条件下,暴雨强度越大,产流速率稳定时的峰值也越大。不同汇水面积产流历时差异较大,汇水面积大,产流历时长;相同汇水面积,产流历时随暴雨强度和雨水口高度的增加而延长。

[参 考 文 献]

- [1] 丁纪闯,杨珏,黄利群,等. 北方城市下凹式绿地植物选择与配置模式[J]. 防汛与抗旱, 2010(17):20-22.
- [2] 程江. 上海中心城区土地利用/土地覆被变化的环境水文效应研究[D]. 上海:华东师范大学, 2007.
- [3] 黄民生,朱勇,谢冰,等. 下凹式绿地调蓄净化城市径流[J]. 水科技, 2010(1):65-67.
- [4] 杨珏,黄利群,李灵军,等. 城市暴雨过程对下凹式绿地设计参数的影响研究[J]. 水文, 2011, 31(2):58-61.
- [5] 任树梅,周纪明,刘红,等. 利用下凹式绿地增加雨水蓄渗效果的分析与计算[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2):50-54.
- [6] 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.
- [7] 周丰,彭小金,李玉来. 下凹式绿地对城市雨水径流和汇流的影响[J]. 东北水利水电, 2007, 25(10):10-11.
- [8] 张建林. 下凹式绿地蓄渗城市路面雨水的试验研究[D]. 云南昆明:昆明理工大学, 2007.
- [9] 北京市城乡规划标准化办公室. DB11T969—2013 城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准[R]. 北京市质量技术监督局, 2013.
- [10] 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):144-150.