

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.013

# 重庆市城市绿地雨水滞蓄能力研究<sup>①</sup>

刘柯伶, 鲍安红, 牛泽南, 饶凯

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

**摘要:** 城市绿地在雨水滞蓄、净化、利用方面发挥着重要作用,可以有效减少城市雨水径流量,缓解洪涝灾害.以重庆市北碚区城市绿地为研究对象,通过试验测试和模拟计算探究绿地原生土壤的雨水滞蓄能力.结果表明:重庆市城市绿地由于受人们活动的影响,土壤容重偏大,压实度偏高,可改良和提升的空间很大;不同类型绿地土壤稳渗率相差不大,入渗性能良好,评级达中等及以上的占 83.6%;绿地渗蓄雨水效果与稳渗率和下凹深度呈正相关;绿地的蓄水能力较弱,对于 1 年一遇 1h 降雨条件下产生的降雨量仅能容纳 52.38%.因此,在进行“海绵城市”建设时,需要充分挖掘土壤作为海绵体的潜力,提升城市绿地土壤的渗蓄能力.

**关键词:** 城市绿地;海绵城市;雨水滞蓄;重庆

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)12-0089-06

## On Rainwater Retention Capacity of Urban Green Space in Chongqing

LIU Keling, BAO Anhong, NIU Zenan, RAO Kai

*College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*

**Abstract:** Urban green space plays an important role in rainwater retention, purification and utilization, which can effectively reduce urban rainwater runoff and alleviate flood disasters. Taking the urban green space in Beibei District of Chongqing as the research object, the rainwater retention capacity of the native soil in the green space was investigated through experiments and simulation calculations. The results show that, due to the influence of human activities, the urban green space in Chongqing had a large soil bulk density and high compaction degree, and there was a lot of room for improvement. The soil stable infiltration rate of different types of green land had little difference, and the infiltration performance was good, 83.6% of which were rated as medium or above. The effect of rainwater infiltration and storage of green land was positively correlated with steady infiltration rate and depth of depression. The water storage capacity of green space was relatively weak, which can only hold 52.38% of the rainfall generated under the condition of rainfall in 1 hour of 1-year. Therefore, in the construction of sponge cities, it is necessary to fully tap the potential of soil as a sponge to improve the infiltration capacity of urban green soil.

**Key words:** urban green space; rainwater retention; sponge city; Chongqing

① 收稿日期: 2020-12-16

作者简介: 刘柯伶, 硕士研究生, 主要从事“海绵城市”建设方面的研究.

通信作者: 鲍安红, 教授, 博士.

近年来,随着城市化的快速发展,城市的不透水面积不断增加,使得城市雨水下渗、排放困难,由此导致的城市内涝频发、水体污染加重以及热岛效应等问题日益凸显.党的十八大报告中明确提出,要把生态文明建设放在突出地位,并提出大力推进建设自然存积、自然渗透、自然净化的“海绵城市”,解决城市生态环境中的雨洪管理问题<sup>[1]</sup>.城市绿地作为天然的海绵体,属于城市生态系统的核心组成部分之一,在雨水滞蓄、净化、利用等方面可以发挥重要的作用,能够有效缓解城市地下管网的排水压力,防止城市内涝的发生,受到世界各国的广泛关注<sup>[2-3]</sup>.

欧美等发达国家在绿地的雨水径流调蓄效应方面进行了大量的研究.美国在上个世纪 70 年代末就开始通过修建滞留池、沉淀池及湿地系统等措施进行雨水径流流量控制和污染物控制<sup>[4]</sup>.到了 90 年代,美国马里兰州首次提出了“低影响开发”的理念,随后,很多国家对其进行了研究,并在城市建设中广泛应用,以解决城市内涝和水环境污染等问题<sup>[5]</sup>.目前,雨水花园、下凹式绿地和生物滞留系统等已成为发达国家常用的雨水处理技术<sup>[6-7]</sup>.相对而言,我国在城市绿地这方面的研究起步较晚,对于绿地应用于雨洪管理方面的研究还停留在探索阶段,在实际应用上仍存在许多问题<sup>[8]</sup>.此外,在“海绵城市”设计、建设和维护等方面也缺乏具体统一的指导标准.

随着我国城市绿地面积不断扩大,有关绿地对雨水滞蓄能力的研究逐渐深入.当前,城市绿地对雨水滞蓄能力的研究方法主要有两种,一种是从宏观入手,通过土壤的渗透系数和径流系数来计算绿地的滞蓄能力;一种是从绿地本身入手,研究绿地内部因素对滞蓄雨水能力的影响<sup>[9]</sup>.对比分析表明,虽然二者都可以对城市绿地的滞蓄能力进行计算,但第一种方法仅通过绿地的渗透性参数计算出滞蓄量来反映雨水滞蓄能力,忽略了绿地容重、孔隙度、含水量等因素的影响,结果具有一定的局限性.而第二种方法在计算滞蓄量的同时,还考虑了各因素的影响,能够更好地反映出绿地滞蓄雨水、削减洪峰的作用.

重庆市降雨量充沛,尤其是夏季降雨频繁,常出现大雨、暴雨,加之受地形影响城市坡度大,沟壑多,且随着城市大面积不透水地面的增加,城市下垫面的雨水滞留效果较差,雨水容易在地势低处汇集,形成局部内涝<sup>[10-11]</sup>.因此,本研究从区域防洪的角度出发,通过选取不同类型的城市绿地,在采土取样、模拟计算等方法的基础上,探究重庆市城市绿地的土壤入渗及蓄水滞洪能力,以期增强对绿地土壤特性的认识,为重庆市“海绵城市”建设提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择重庆市北碚区建成区的绿地为主要研究对象.北碚区地处缙云山麓,属亚热带季风性湿润气候,具有冬暖春早,夏热秋迟,降水多,日照短,湿度大等特点,年平均气温 18.3 °C,极端气温可达 43 °C,年平均降水量为 1 105.4 mm,多集中在 5—9 月,常发生暴雨或特大暴雨,相对湿度为 70%~80%.到 2018 年,北碚建成区面积约 58.66 km<sup>2</sup>,绿地率约 37.64%,绿化覆盖率 40.26%,人均公园绿地面积 27.06 m<sup>2</sup>.

### 1.2 采样与处理

本研究于 2019 年 5—6 月以西南大学为中心选取了 4 类绿地,分别是校园绿地、小区绿地、公园绿地和交通绿地.每种绿地选取 2 个采样区,各采样区选择 3 个区域进行采样,每个区域采用对角线布点法利用环刀取 3 个样品,采样深度为 0~10 cm,测定数据取平均值作为每个样地的测定值.试验绿地基本情况见表 1.

表 1 试验绿地基本情况

绿地类型	植被结构	土壤类型	样地地址
校园绿地	草地+灌木	紫色土	西南大学 33 教绿地,西南大学行署楼绿地
小区绿地	乔木+灌木+草地	紫色土	芦沟桥小区,学苑小区
公园绿地	草地+灌木	紫色土	北碚公园,雨台山公园
交通绿地	草地	紫色土	西南大学道路绿地,天生街道绿地

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 入渗速率的测定

本试验采用环刀法测定绿地土壤的入渗速率.将原状土浸泡在水中 12 h,保持水面与环刀上口齐平;

浸泡结束后, 在其上面套一个空环刀, 并将接口处密封; 用漏斗架将两个环刀固定, 往空环刀内加水并保持环刀内水面比环刀口低 1 mm, 用烧杯收集滴下的水; 从第一滴水滴下开始计时, 每隔 2, 3, 5, 10 min 更换烧杯并记录渗水量, 试验持续到渗水量不变时为止; 计算出稳定入渗速率, 并换算成 10℃ 下的稳定入渗速率, 即:

$$K_{10} = K_t / (0.7 + 0.03t) \quad (1)$$

式中:  $K_t$  代表水温为  $t$  °C 时的入渗速率 (mm/min).

### 1.3.2 绿地渗蓄效果测定

绿地雨水渗蓄率是衡量绿地渗蓄效果的重要指标, 表示降雨过程中绿地下渗和蓄积的雨水量占进入绿地总雨水径流量的比例, 计算公式如下:

$$N = \frac{S + I}{HF_1 C_n + HF_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $N$  为蓄渗率, %;  $S$  为蓄水量,  $m^3$ ;  $I$  为下渗量,  $m^3$ ;  $H$  为降雨量, mm;  $F_1$  为非绿地面积,  $m^2$ ;  $F_2$  为绿地面积,  $m^2$ ;  $C_n$  为非绿地区综合径流系数, 取 0.8.

蓄水量  $S$  和下渗量  $I$  可根据公式(3) 和公式(4) 进行计算:

$$S = F_2 \times \Delta h \quad (3)$$

$$I = K \times J \times F_2 \times T \quad (4)$$

式中,  $\Delta h$  为下凹深度, 即绿地与路面之间的高差, mm;  $K$  为土壤稳定入渗率, mm/min;  $J$  为水力坡度, 垂直下渗时取 1.0;  $T$  为下渗时间, 取 60 min.

### 1.3.3 绿地蓄水能力测定

土壤的蓄水量主要取决于土壤的毛管孔隙度和非毛管孔隙度的大小和性质<sup>[12]</sup>. 因此, 可用土壤饱和储水量、有效储水量和实际蓄水量等来反映和评价绿地土壤的蓄水能力. 采用土壤中的水深表示储水量, 计算公式如下:

$$W = h \times \theta \quad (5)$$

$$W_0 = h \times p_0 \quad (6)$$

$$W_1 = h \times p_1 \quad (7)$$

式中,  $W$  为实际蓄水量, cm;  $h$  为土层厚度, cm;  $\theta = g \times \omega$  为土壤体积含水率, %, 其中  $g$  为土壤容重,  $g/cm^3$ ,  $\omega$  为土壤含水率, %;  $W_0$  为饱和储水量, mm;  $W_1$  为有效储水量, cm;  $p_0$  为土壤总孔隙度, %;  $p_1$  为土壤毛管孔隙度, %.

## 2 结果与分析

### 2.1 绿地土壤的物理性质

绿地土壤的滞蓄能力与土壤的物理性质(含水率、容重、孔隙度等)有关. 一般来说, 土壤的前期含水量越低、容重越小、孔隙度越大, 滞蓄能力就越强, 就能够更好地减少地表径流, 削减洪峰流量. 通过室内测定分析得到的 4 类绿地土壤基本情况如表 2.

表 2 不同绿地类型土壤的物理性质(均值与范围)

绿地类型	含水率/%	容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙度/%		
			总孔隙度	毛管	非毛管
校园绿地	30.99 (28.64~40.72)	1.41 (1.24~1.52)	47.48 (43.79~53.14)	39.86 (35.83~44.67)	6.95 (1.27~13.14)
小区绿地	25.15 (20.75~34.11)	1.44 (1.33~1.53)	46.74 (43.90~50.01)	30.18 (25.05~37.55)	16.56 (11.38~19.72)
公园绿地	32.15 (27.47~48.45)	1.43 (1.30~1.56)	46.84 (42.36~50.94)	36.43 (24.01~45.10)	10.42 (2.88~19.78)
交通绿地	29.36 (22.04~46.41)	1.40 (1.16~1.71)	47.67 (37.58~55.67)	32.72 (19.12~46.41)	14.95 (9.26~18.90)

从表 2 可以看出,土壤的含水率在 20.75%~48.45%之间,这是因为试验是在该地区降水较集中的 5—6 月进行的,4 种绿地中公园绿地含水率最大,校园绿地和交通绿地含水率次之,小区绿地含水率最小。各类绿地土壤容重在 1.16~1.71 g/cm<sup>3</sup> 之间,普遍大于正常土壤容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>,均值从大到小依次为小区绿地(1.44 g/cm<sup>3</sup>)、公园绿地(1.43 g/cm<sup>3</sup>)、校园绿地(1.41 g/cm<sup>3</sup>)、交通绿地(1.40 g/cm<sup>3</sup>);总孔隙度在 37.58%~55.67%之间,其中非毛管孔隙度范围在 1.27%~19.78%,均值从大到小依次为小区绿地(16.56%)、交通绿地(14.95%)、公园绿地(10.42%)、校园绿地(6.95%),这主要是因为公园绿地和校园绿地平时人流量较为集中,行人踩踏频繁,导致土壤压实程度较为严重。

综合土壤的含水率、容重和孔隙度可以看出,城市绿地表层土壤的容重偏大,压实度偏高,孔隙度偏小,不同绿地土壤之间的差异也较大,这在一定程度上影响了土壤的入渗和蓄水的能力,因此,试验区绿地土壤可改良和提升的空间很大。

## 2.2 绿地土壤入渗性能分析

作为“海绵城市”建设的重要内容,绿地土壤的入渗率是衡量绿地雨水入渗能力的重要指标<sup>[13]</sup>,土壤的入渗率通常会在降雨过程中随着土壤含水量的升高而逐渐减小,因此本次试验以土壤稳定入渗率来反映降雨充分时的土壤入渗能力。

由图 1 可以看出,4 类绿地土壤稳定入渗率在 0.3~2.4 mm/min 之间,均值从大到小依次为校园绿地(1.16 mm/min)、公园绿地(1.12 mm/min)、小区绿地(0.70 mm/min)、交通绿地(0.65 mm/min)。其中校园和小区绿地可能由于土壤成分复杂,含有较多石砾、砖瓦颗粒等侵入体,产生的孔隙和裂隙等影响了土壤的水分运动,从而在一定程度上提高了土壤的入渗性能。各采样区土壤稳定入渗率相差不大,且 75%的土壤入渗率不小于 10<sup>-5</sup> m/s,即 0.6 mm/min,表现出良好的渗透性。

对于土壤入渗性能的评价,按照 Kohnke 提出的城市土壤渗透速率的分类标准<sup>[14]</sup>对各绿地的土壤稳渗率进行分类。如表 3 所示,重庆市北碚区绿地的稳渗率变异较大,在较慢、中等、较快、快 4 个级别中均占据一定比例。其中,土壤稳渗率属于中等及以上的占 83.3%,属于较慢的占 16.7%,说明北碚区大部分绿地土壤的渗透性能较好。

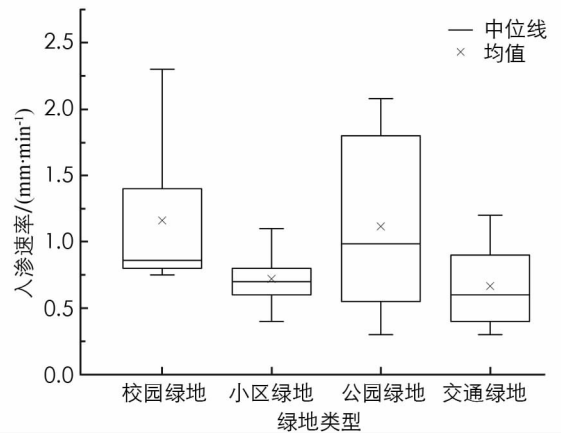


图 1 不同类型城市绿地的土壤稳定入渗速率

表 3 不同类型绿地土壤稳定入渗率频率分布

入渗率等级	稳定入渗率( $v$ )/(mm·min <sup>-1</sup> )	频率/%
极快	$v > 4.236$	0
快	$2.112 < v \leq 4.236$	8.3
较快	$1.05 < v \leq 2.112$	20.8
中等	$0.334 < v \leq 1.05$	54.2
较慢	$0.083 < v \leq 0.334$	16.7
慢	$0.017 < v \leq 0.083$	0
极慢	$v \leq 0.017$	0

## 2.3 绿地渗蓄效果计算与分析

绿地土壤具有渗透、蓄积和利用雨水的能力,在解决城市洪涝问题方面发挥着重要的作用<sup>[15]</sup>。城市绿地的雨水渗蓄效果主要通过土壤入渗率大小和下凹深度来衡量,因此,在了解重庆市北碚区土壤特性的基础上,对绿地的雨水渗蓄能力做进一步分析。

根据重庆市近 50 年降雨资料,采用适用于北碚区的重庆沙坪坝区暴雨强度修订公式对降雨强度进行计算。

$$q = \frac{1\ 132(1 + 0.958\lg P)}{(t + 5.408)^{0.595}} \tag{8}$$

式中,  $q$  为降雨强度,  $L/(s \cdot h_a)$ ;  $t$  为降雨历时,  $\text{min}$ ;  $P$  为降雨重现期,  $a$ .

为了更加直观地反映绿地的渗蓄效果, 模拟计算了重庆市北碚区城市绿地在 1, 3, 5 年一遇暴雨重现期, 即 1 h 降雨量分别为 33.9, 49.4, 56.6 mm 的情况下的蓄渗率, 计算结果见表 4.

表 4 不同设计参数下北碚区城市绿地的雨水渗蓄率 %

绿地类型	土壤稳渗率 /( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	下凹深度 /cm	暴雨重现期( $P$ )/a		
			1	3	5
校园绿地	1.16	0	88.29	60.59	52.88
		5	151.72	104.11	90.87
		10	215.14	147.64	128.86
小区绿地	0.70	0	53.28	36.56	31.91
		5	116.71	80.09	69.90
		10	180.13	123.61	107.89
公园绿地	1.12	0	85.25	58.50	51.06
		5	148.67	102.02	89.05
		10	212.10	145.55	127.03
交通绿地	0.65	0	49.47	33.95	29.63
		5	112.90	77.48	67.62
		10	176.33	121.00	105.61

从表 4 可以看出, 重庆市北碚区不同类型的绿地土壤渗蓄雨水的效果差异较大. 当绿地与地面齐平时, 在 1 年一遇 1 h 的降雨条件下, 校园绿地和公园绿地的渗蓄率可达 85% 以上, 小区绿地和交通绿地的渗蓄率仅为 50% 左右, 并且绿地的雨水渗蓄率随着稳渗率的增大而增大. 当绿地下凹 5 cm 时, 1 年一遇 1 h 降雨条件下的渗蓄率均超过 100%, 即绿地可以吸收所有区域的降雨径流; 对于 3 年一遇条件下的雨水, 校园绿地和公园绿地也能完全消纳吸收. 当绿地下凹 10 cm 时, 对 1 年一遇、3 年一遇和 5 年一遇的雨水都可以完全吸收. 因此, 对于重庆市城市绿地可以通过改良土壤性质来提高绿地的入渗率, 或者适当增加绿地的下凹深度, 以增强绿地渗蓄雨水的能力.

### 2.4 绿地土壤蓄水能力分析

绿地的蓄水能力主要通过土壤的实际蓄水量、最大储水量和有效储水量来评价<sup>[16]</sup>. 最大储水量是毛管孔隙和非毛管孔隙蓄水量之和, 反映了土壤储存和调节水分的潜在能力, 其中, 毛管蓄水量即有效储水量, 反映了可供植物吸收的有效水分, 非毛管蓄水量反映了土壤稳定水位和调节流量的能力.

由图 2 可以看出, 各类绿地表层 10 cm 土壤最大储水量相差不大, 在 46.74~47.67 mm 之间, 均值为 47.18 mm; 实际蓄水量在 36.22~45.97 mm 之间, 其中公园绿地的实际蓄水量最大, 小区绿地的实际蓄水量最小; 有效储水量在 30.18~39.86 mm 之间, 从大到小依次为校园绿地、公园绿地、交通绿地、小区绿地. 小区绿地的最大储水量、实际蓄水量和有效储水量都最低, 这主要由于受人的活动影响, 土壤压实程度高, 孔隙度偏小, 导致蓄水能力降低.

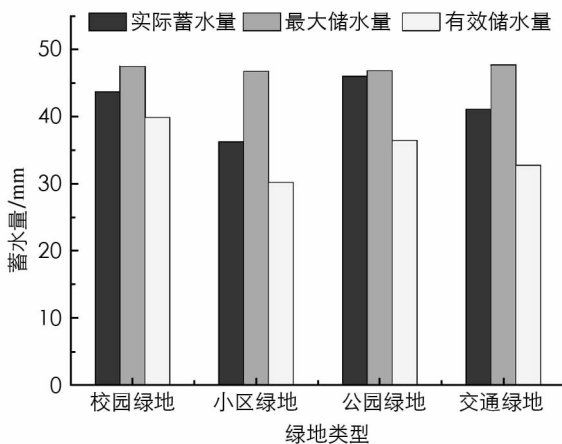


图 2 不同类型绿地表层 10 cm 土壤蓄水量变化情况

根据北碚区建成区绿地面积为 2 207.96 万  $\text{m}^2$ 、非绿地面积为 3 658.04 万  $\text{m}^2$  的情况, 计算可得在平均值的条件下, 绿地表层 10 cm 土壤雨水最大储水量为 104.17 万  $\text{m}^3$ , 仅能储蓄在 1 年一遇 1 h

降雨条件下所产生降雨量的 52.38%。

根据以上分析可知,重庆市城市绿地土壤孔隙度较小,蓄水能力还有较大的提升空间。

### 3 结论与展望

1) 重庆市城市绿地土壤受人的活动影响,物理性质发生了显著变化,土壤容重偏大、压实度偏高、孔隙度偏低,可改良和提升的空间很大。不同类型绿地土壤稳定入渗率相差不大,且评级达到中等及以上的占 83.6%,其中以校园绿地为最好,其后依次是公园绿地、小区绿地和交通绿地。

2) 重庆市不同类型绿地在雨水渗蓄效果方面存在一定的差异,其中校园绿地最好,小区绿地和交通绿地较差,土壤渗蓄率随着土壤入渗率和下凹深度的增大而增大。

3) 重庆市绿地土壤孔隙度偏低,蓄水能力较弱,对于 1 年一遇 1 h 降雨条件下产生的降雨量仅能容纳 52.38%,即绿地土壤的滞蓄能力不足以抵御 1 年一遇降雨强度产生的雨水量。

4) 在进行“海绵城市”建设时,需要充分挖掘土壤作为海绵体的潜力,通过改良土壤性质,加强城市绿地科学管理,或是规划下凹式绿地等方式,提升城市绿地土壤的渗蓄能力。

本文在分析重庆市绿地土壤滞蓄雨水的过程中,没有考虑不同的地形特征、植被种类和土壤质地等因素的影响,这是接下来需要重点研究的问题。尽管本文的研究结论对于认识重庆市城市绿地的滞蓄能力和帮助其他城市开展绿地土壤研究具有一定的指导意义,但还不能完全反映重庆市不同地区绿地滞蓄雨水的情况,因此,对于城市绿地滞雨减洪的研究还有待深入。

#### 参考文献:

- [1] 朱文彬,孙倩莹,李付杰,等. 厦门市城市绿地雨洪减排效应评价 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 74-84.
- [2] 张云路,李雄,邵明,等. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究——以通辽市为例 [J]. 城市发展研究, 2018, 25(1): 97-102.
- [3] 徐 晔,张建国. 基于知识图谱法的城市绿地防灾减灾可视化研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(9): 51-58.
- [4] MOURA N C B, PELLEGRINO P R M, MARTINS J R S. Best Management Practices as An Alternative for Flood and Urban Storm Water Control in a Changing Climate [J]. Journal of Flood Risk Management, 2016, 9(3): 243-254.
- [5] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and Implementation of Low Impact Development-A Review [J]. Science of the Total Environment, 2017(607/608): 413-432.
- [6] 沈 乐,单延功,陈文权,等. 国内外“海绵城市”建设经验及研究成果浅谈 [J]. 人民长江, 2017, 48(15): 21-24.
- [7] 李港妹,张兴奇,孙媛. 下凹式绿地对地表径流的调节作用研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 31-36, 42.
- [8] 朱 梅,何君涛,黎江少,等. 基于 SWMM 模型的不同 LID 设施对雨洪控制效果模拟分析 [J]. 水力发电, 2020, 46(3): 24-27, 79.
- [9] 石铁矛,于 畅. 北方校园绿地滞蓄雨水能力分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 697-704.
- [10] 张晓惠,谢世友,任 伟. 1951 年—2014 年重庆市主城区降水变化特征分析——以沙坪坝区为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 104-109.
- [11] 李媛媛,刘家琳,张建林. 基于不同子汇水区类型的山地公园低影响开发雨水控制体系构建策略——以重庆主城区为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(7): 151-157.
- [12] 陈艺文. 城市绿地的海绵效应研究 [D]. 南京:东南大学, 2017.
- [13] 董 光,周 维,何 兰. 成都市绿地土壤特性及对雨洪削减效应的研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(1): 137-140.
- [14] KOHNKE N. Soil Physics [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [15] 戴子云,隋静轩,许 蕊,等. 北京城市绿地土壤水分入渗性能研究 [J]. 中国园林, 2019, 35(6): 105-108.
- [16] 朱永杰,毕华兴,霍云梅,等. 北京地区下凹式绿地土壤渗透能力及蓄水对土壤物理性质的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 106-110.
- [16] 马建刚,王克勤. 昆明市城市绿地蓄水滞洪效益研究 [J]. 中国水土保持, 2012(2): 34-37, 68.