

城市雨水管理

8 种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究

游 宇¹, 车 伍^{1,2,3}, 张 伟^{1,2,3}, 罗乙兹¹

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘 要: 林冠截留对雨水径流产流过程有直接的作用,然而我国在城市雨洪管理或海绵城市建设相关研究和实践中关注较少。为此,选择8种典型园林乔木,即毛白杨、银杏、圆柏、国槐、龙爪槐、雪松、紫叶李、西府海棠,在北京建筑大学西城校区内进行现场试验研究,分析16场降雨事件中不同树木林冠对雨水的截留效果,并对林冠的雨水截留体积与场地径流总量控制率之间的关系进行计算与分析。结果表明:①相同降雨条件下,两种针叶乔木圆柏、雪松对雨水的截留率较高,随着降雨量的增大,8种乔木林冠的截留率均有所降低;②16场降雨中国槐、雪松及银杏的总林冠截留体积明显大于其他5种树木,截留量与林冠覆盖面积对林冠的雨水截留体积都有显著影响;③林冠截留产生的径流控制率与降雨量呈负相关关系。在研究区域乔木种类构成及林冠覆盖下垫面条件下,16场降雨中林冠截留效应对研究区域径流总量的削减率为4%。综上,合理的林木种类搭配以及林冠覆盖率的增加都能有效减少雨水产流,林冠截留效果应该纳入海绵城市建设的考虑范畴,相关的设计计算也应该考虑林冠所产生的作用。

关键词: 园林乔木; 林冠截留量; 林冠截留体积; 径流控制率; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0121-07

Effect of Rainfall Interception by Eight Species of Garden Arbors

YOU Yu¹, CHE Wu^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3}, LUO Yi-ci¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Centre for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Rainfall interception of tree canopy has a direct effect on runoff generation, but it receives little attention in the practices and studies of sponge city construction or urban stormwater management in China. Eight species of typical garden arbors were selected as test samples, namely *Populus tomentosa*, *Ginkgo biloba*, *Sabina chinensis*, *Sophora japonica*, *Sophora pendula*, *Cedrus deodara*, *Prunus cerasifera* and *Midget crabapple*, and the experiment was carried out in the Xicheng Campus of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, where the effects of different tree canopy on rainwater capture in 16 rainfall events were analyzed, and the relationship between tree canopy interception and runoff volume was calculated and discussed. Results could be concluded as follows: ① under the same

rainfall condition, the rainfall interception rate of two coniferous trees *Sabina chinensis* and *Cedrus deodara* was relatively high, and the interception rates of 8 species of tree canopy declined with the increase of rainfall; ② The total interception volumes of *Sophora japonica*, *Cedrus deodara*, and *Ginkgo biloba* were obviously higher than other five species of trees in 16 rainfall events, and interception volume of a single tree was mainly decided by tree crown area and rainfall; ③ The regional runoff reduction rate was negatively associated with the rainfall. Under the same tree species composition and land surface condition of the research area, the reduction rate of tree canopy interception in 16 rain events was 4% of the total area runoff. According to the research results, runoff volume could be decreased by reasonable tree species collocation and modestly increase of canopy coverage. Rainfall interception of tree canopy should be considered in the construction of sponge city, and the effect of tree canopy should also be considered in the related design calculation.

Key words: garden arbor; canopy interception quantity; canopy interception volume; capture ratio of runoff volume; sponge city

林冠截留是大自然和城市水文循环中重要的一环,大气降水在通过树木林冠层后被分配为林冠截留、树干茎流及穿透降雨三部分,林冠截留通过将部分雨量暂时储存在叶片与枝干表面,一方面直接减少径流量的产生,降低雨水对地面的冲刷侵蚀,另一方面被截留的雨水将通过蒸发的方式返回大气^[1]。

自20世纪起,国内外学者在林冠截留方面就开展了研究,其中大多数试验在郊区开展,城市区域范围内进行的相关研究较少。城市园林植物林冠截留的主要影响因素包括植物自身的特性以及气象因素^[2,3]。基于大量林冠截留规律的基础性研究,部分国外研究者开始进一步分析林冠截留对城市下垫面产流规律的影响。Inkilainen 等在对美国北卡罗来纳州罗利市的案例研究中发现,林冠覆盖能有效减少其下垫面 9.1% ~ 21.4% 的雨水径流体积^[4]。Xiao 等利用林冠截留模型估算圣莫尼卡市林冠覆盖所减少的雨水径流体积,并将林冠截留作用量化为经济效益,每棵树每年通过削减雨水径流体积所创造的经济价值约为 3.6 美元^[5]。美国环保局目前已经将林冠覆盖纳入雨水绿色基础设施,并从规划与工程实践等多方面加强树木对城市雨水径流的控制效果。

笔者选择 8 种典型园林乔木树种作为研究对象,在北京建筑大学西城校区内对不同降雨条件下林冠截留量、截留率、截留体积、覆盖率及场地径流控制率之间的关系进行试验研究和分析,探讨林冠截留与场地雨水控制的关系,旨在为进一步开展深入研究及在海绵城市建设中更好地发挥林冠截留作

用提供参考。

1 研究区域概况

试验区域设在北京建筑大学西城校区,占地为 10.25 hm²,其中建筑、道路与广场、绿地的占地面积分别为 5.95、1.33、2.97 hm²,绿化面积占比约为 29%。该区域多年平均降雨量为 585 mm,汛期(6月—9月)降雨量约占全年降雨量的 77%,年平均风速在 1.3 ~ 3 m/s 之间。校区内现有 21 种乔木树种,以毛白杨、银杏、圆柏等为主,依据叶片特征、树种体型可划分为 3 类:①小型阔叶乔木,指树高在 0 ~ 3 m 之间的阔叶乔木;②大型阔叶乔木,指树高 > 3 m 的阔叶乔木;③针叶乔木。结合林木调查与航拍影像分析结果估算校园内乔木林冠覆盖率约为 25%,其中大型阔叶乔木、针叶乔木和小型阔叶乔木的占比分别为 82%、14%、4%,绿地上的林冠覆盖面积与硬化面上的林冠覆盖面积分别约占总林冠覆盖面积的 88% 和 12%。

2 研究方法

2.1 树种选择与监测布点

依据乔木树种统计结果,选择 8 种典型园林乔木树种(毛白杨、银杏、圆柏、国槐、龙爪槐、雪松、紫叶李、西府海棠)作为研究对象,用卷尺等常规测量工具测定各乔木树种的树高、胸径、冠幅面积等参数。①大型阔叶乔木,包括毛白杨、银杏、国槐,胸径分别为 22、18、27 cm,树高分别为 13、8、12 m,冠幅面积分别为 16.6、40.5、94.9 m²;②小型阔叶乔木,包括龙爪槐、紫叶李、西府海棠,胸径分别为 11、8、13 cm,树高分别为 2、3、3 m,冠幅面积分别为 8.1、

7.1、10.2 m²;③针叶乔木,包括雪松和圆柏,胸径分别为24、14 cm,树高分别为9、6 m,冠幅面积分别为50.2、9.1 m²。

研究区域内共设置8个监测点,对8种不同样本乔木的降雨截留效果进行监测,并按照林下穿透雨量测定方法进行相关试验装置的布置。监测对象应具有代表性,布点位置尽量选择无遮挡开阔地带。

2.2 测定方法

林外降雨量测定:在某实验楼顶设置气象观测点,对林外降雨量进行监测。

林下穿透雨量测定:在各监测布点位置依据乔木冠层的大小布置简易雨量筒2~3个。简易雨量筒装置的上部是口径为20 cm的漏斗,下部是标准塑料雨量杯,可直接在盛雨容器中读取雨量数值。

2.3 计算方法

林冠截留量与截留率:采用水量平衡法计算林冠截留量(I_c , mm),一般是通过对林外降雨量(P_G , mm)、林下透落雨量(P_T , mm)及树干茎流量(F_S , mm)3个变量的监测记录,利用水量平衡公式得出林冠截留量。大量研究表明,乔木树干茎流量仅占林外降雨量的1%~5%^[6],考虑到监测的困难、选取的乔木特征和实际降雨中现场观察情况,本次乔木截留监测试验中树干茎流量忽略不计,林冠截留量 I_c 和截留率 f 的计算方法分别见式(1)、(2)。

$$I_c = P_G - P_T \quad (1)$$

$$f = \frac{I_c}{P_G} \times 100\% \quad (2)$$

林冠截留体积 V_i (m³):指在降雨过程中单株乔木林冠覆盖范围内所截留的雨量体积,计算方法见式(3)。

$$V_i = I_c \times S \quad (3)$$

其中: S 为林冠冠幅面积,m²。

3 结果与分析

3.1 林冠截留监测结果

在2017年6月20日—8月31日期间共观测16场降雨,总降雨量达369.7 mm,约占北京市年均降雨量的63%,其中24 h降雨量最大值为87.8 mm、最小值为0.4 mm、平均值为23.1 mm,24 h降雨量在10 mm以上的降雨事件总降雨量占观测期间总降雨量的94.6%。

表1为试验期间8种乔木的林外降雨总量、林下穿透雨总量等数据。可知,林冠总截留量在39.1

~150.7 mm之间,不同树种间的截留量差异较大,林冠总截留率变化范围为10.6%~40.8%(平均为21.7%),截留效果明显。

表1 林冠截留监测数据统计结果

Tab. 1 Statistical result of rainfall interception monitoring data

项 目	林外降雨 总量/mm	林下穿透 雨总量/mm	总截留量/ mm	总截留 率/%
西府海棠	369.7	330.6	39.1	10.6
紫叶李	369.7	325.4	44.3	12.0
龙爪槐	369.7	318.7	51.0	13.8
国槐	369.7	305.8	63.9	17.3
毛白杨	369.7	297.9	71.8	19.4
银杏	369.7	267.4	102.3	27.7
雪松	369.7	250.5	119.2	32.2
圆柏	369.7	219.0	150.7	40.8

3.2 林冠截留率的影响因素

3.2.1 乔木类型

依据国家气象局降雨量等级划分,以24 h内降雨量的大小对林外降雨进行分级:降雨量<10 mm为小雨,在10~25 mm之间为中雨,在25~50 mm之间为大雨,在50~100 mm之间为暴雨。图1为不同降雨条件下各类型乔木截留率的差异。在不同降雨量条件下,针叶乔木林冠截留率始终高于大型和小型阔叶乔木,这与众多研究者得出的结论一致^[7,8]。从乔木自身的叶片特征、枝叶结构等特性分析,圆柏、雪松等针叶乔木与银杏、国槐等大型阔叶乔木相比,单位土地面积上植物叶片总面积更大^[6]、枝叶结构也更为繁杂。而西府海棠、紫叶李等小型阔叶乔木呈叶片稀疏的冠层形态,其截留量通常为3种乔木类型中的最低者。

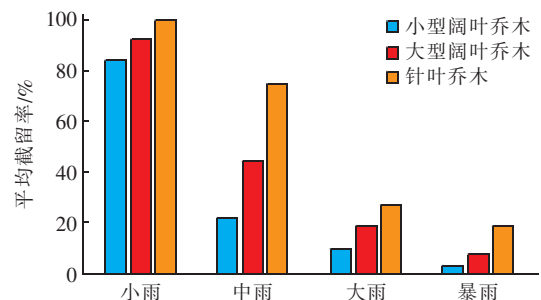


图1 林冠截留率与降雨量及乔木种类之间的关系

Fig. 1 Relationship between precipitation/tree species and canopy interception rate

3.2.2 降雨量

降雨量通常是对林冠截留效果影响最大的气象因素^[9],从图1中可以看出,小雨时3种类型乔木的

平均截留率在84%~100%之间,远大于中雨(22%~75%)、大雨(10%~27%)和暴雨(3%~19%)时的。图2为对8种乔木在16场降雨中的林冠截留量与林外降雨量做对数回归分析后所得到的规律,图3为利用指数函数对林冠截留率与林外降雨量之间的关系进行拟合得到的曲线。图2和图3中回归方程的相关系数范围分别为0.71~0.95和0.77~0.90。分析图2和图3可知,8种乔木的最大截留量在4~17 mm之间,在降雨量较小的情况下,树木的茎干枝叶能充分发挥对雨水的吸收作用,截住绝大部分的雨量,此时林冠截留率较高;随着降雨量的增大,叶片表面逐渐趋于湿润饱和,林冠截留率则明显下降。

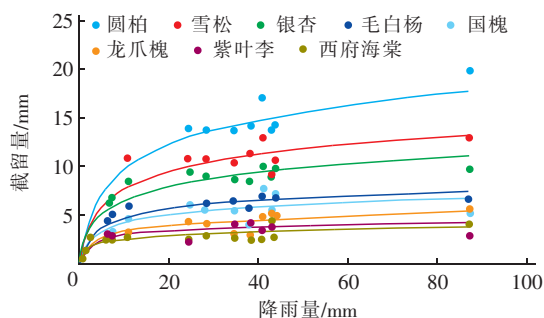


图2 8种乔木林冠截留量与降雨量之间的关系

Fig. 2 Relationship between canopy interception and precipitation

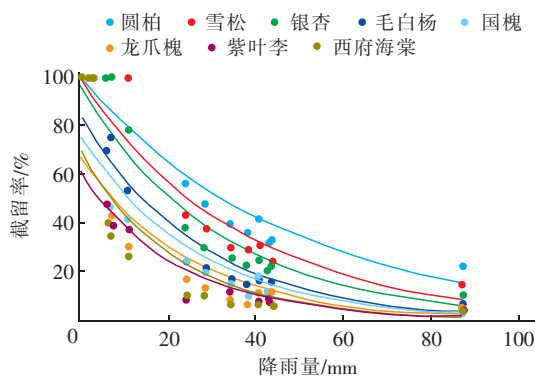


图3 8种乔木林冠截留率与降雨量之间的关系

Fig. 3 Relationship between canopy interception rate and precipitation

3.3 不同乔木树种林冠的雨水截留体积

试验期间,8种乔木在16场降雨中的林冠截留总体积从大到小排序为国槐(6.06 m³)、雪松(5.99 m³)、银杏(4.03 m³)、圆柏(1.37 m³)、毛白杨(1.19 m³)、龙爪槐(0.45 m³)、西府海棠(0.37 m³)、紫叶李(0.32 m³),3种小型阔叶乔木的截留体积最小。

依据式(3),林冠截留体积的影响因素包括林冠覆盖面积和林冠截留量,为此对林冠截留体积与林冠截留量及林冠覆盖面积进行线性分析。考虑到圆柏林冠截留量高而林冠覆盖面积却很小以及国槐林冠截留量低而林冠覆盖面积较大的特征,在讨论单因子对林冠截留体积的影响时,分为含国槐与圆柏的8种乔木与不含国槐与圆柏的6种乔木两种样本组合进行讨论。结果表明,随着林冠截留量的增加,8种乔木的林冠截留体积变化幅度不稳定(与林冠截留量的线性相关系数 R^2 仅为0.15),变化趋势也无明显的规律性;剔除离异数据(圆柏、国槐)后,林冠截留体积随着截留量的增大而有较明显的增长,两者的线性相关系数 R^2 为0.94。另外,随着林冠覆盖面积的增大,林冠截留体积显著增加,其变化规律趋近于线性增长(两者在剔除离异数据前、后的线性相关系数 R^2 分别为0.83、0.99)。可以看出,林冠覆盖面积与林冠截留体积之间的线性相关系数在剔除离异数据前后始终高于林冠截留量与林冠截留体积的线性相关系数,这表明本试验所选取的8种乔木样本中,林冠覆盖面积与林冠截留体积具有更好的相关性。以总截留量最高的圆柏与林冠覆盖面积最大的国槐为例,圆柏的总截留量为150.68 mm,约为国槐的2.4倍,但国槐的总截留体积约为圆柏的4.4倍,其主要原因是国槐的平均林冠覆盖面积为94.9 m²,而圆柏的平均林冠覆盖面积仅为9.1 m²。本试验中乔木种类数量有限,如加入更多的样本数据,则林冠截留体积与林冠截留量及林冠覆盖面积之间的关系需进一步分析研究。

综上可知,林冠截留体积主要由林冠截留量和林冠覆盖率所决定,并受降雨量的明显影响。在对不同类型乔木林冠截留体积研究的基础上,可以进一步评估研究区域内乔木林冠整体截留效果对径流产生量的影响,量化林冠截留经济效益。美国农业局研究报告显示,1株成熟的落叶乔木的雨量截留体积在1.9~7.5 m³/年之间,1株成熟的常绿乔木的雨量截留体积甚至可以达到15 m³/年。

3.4 林冠截留对雨水径流体积的控制效果

3.4.1 林冠截留径流控制率估算方法

鉴于3大类乔木林冠截留能力的显著差异,研究区域内的林冠总截留体积基于这3类乔木平均林冠截留量及相应的林冠面积进行统计计算,林冠截留效应对研究区域径流体积削减百分比的估算则按

以下步骤进行:

① 场地基础资料收集:确定研究区域面积($S \text{ m}^2$)和研究区域内乔木林冠覆盖率($k\%$),其中大型阔叶乔木、针叶乔木和小型阔叶乔木的林冠覆盖面积占比分别为 $a_1\%$ 、 $b_1\%$ 、 $c_1\%$ 。

② 降雨观测数据整理:不同降雨事件中,以银杏、国槐、毛白杨的平均截留量代表研究区域内大型阔叶乔木的平均截留量($a_2 \text{ mm}$),以雪松、圆柏的平均截留量代表研究区域内针叶乔木的平均截留量($b_2 \text{ mm}$),以西府海棠、龙爪槐、紫叶李的平均截留量代表研究区域内小型阔叶乔木的平均截留量($c_2 \text{ mm}$),对数据进行重新整理。

③ 研究区域内的林冠截留体积 $V_i(\text{m}^3)$:

$$V_i = \frac{S \cdot k\% \cdot (a_1\% \cdot a_2 + b_1\% \cdot b_2 + c_1\% \cdot c_2)}{1\,000} \quad (4)$$

④ 林冠截留效应产生的径流削减量:研究区域林冠覆盖类型按下垫面的不同可分为两种,即绿地上与硬化面上的林冠覆盖,两者的林冠覆盖面积分别占总林冠覆盖面积的 $d\%$ 和 $e\%$,以 2014 年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中给出的径流系数作为参考,绿地和硬化面的径流系数分别取 0.2 和 0.9,则林冠截留效应产生的径流削减量 $V_m(\text{m}^3)$ 如式(5)所示。

$$V_m = V_i \cdot (d\% \cdot 0.2 + e\% \cdot 0.9) \quad (5)$$

⑤ 无林冠覆盖情景下研究区域的径流体积估算:无林冠覆盖情景下场地下垫面状况将发生改变,结合现场调查情况与航拍影像图,分析无林冠覆盖情景下研究区域的下垫面,得出其综合径流系数约为 0.69,以此计算降雨量为 $f \text{ mm}$ 时无林冠覆盖情景下研究区域的径流体积 $V_r(\text{m}^3)$,如式(6)所示。

$$V_r = \frac{0.69 \cdot S \cdot f}{1\,000} \quad (6)$$

⑥ 林冠截留效应产生的径流控制率 N :

$$N = \frac{V_m}{V_r} \times 100\% \quad (7)$$

3.4.2 乔木林冠截留对产流量的影响

表 2 为研究区域内 16 场实测降雨的林冠截留体积及其场降雨径流控制率计算结果。可以看出,在降雨量达到 24.2 mm 后,林冠总截留体积的增长便不再明显,而场地径流体积随着降雨量的增加一

直呈线性增长趋势,这也导致了林冠截留部分所贡献的径流控制率显著下降,在降雨总量为 87.2 mm 时,场地径流控制率仅为 2%,与小雨量下的径流控制率相差 8%。Xiao 等人指出,城市森林在小降雨事件中的径流水质控制收益要大于暴雨事件的^[10]。表 2 中的数据显示,在研究区域林冠覆盖率为 25% 的情况下,16 场降雨条件下林冠总截留体积对场地径流体积的控制率为 4%。

表 2 林冠截留效果对研究区域径流体积的影响

Tab. 2 Effect of canopy interception on runoff volume of research area

项目	降雨量/mm	平均截留量/mm			林冠截留体积/ m^3	无林冠覆盖下的径流体积/ m^3	场降雨径流控制率/%
		针叶乔木	大型阔叶乔木	小型阔叶乔木			
1	0.4	0.4	0.4	0.4	10.0	27.6	13
2	0.6	0.6	0.6	0.6	15.0	41.4	13
3	1.2	1.2	1.2	1.2	30.0	82.8	13
4	2.0	2.0	2.0	2.0	50.0	138.0	13
5	2.6	2.6	2.6	2.6	65.0	179.4	13
6	6.2	6.2	4.5	2.8	119.8	427.8	10
7	6.8	6.8	5.0	2.7	132.8	469.2	10
8	10.8	10.8	6.3	3.4	177.6	745.2	9
9	24.2	12.2	7.1	3.1	199.3	1 669.8	5
10	28.3	12.2	6.9	3.6	197.0	1 952.7	4
11	34.4	12.0	6.8	3.4	194.6	2 373.6	3
12	38.0	12.7	6.0	3.3	182.4	2 622.0	3
13	40.8	15.0	8.2	3.6	235.7	2 815.2	2
14	42.9	11.4	6.6	4.4	188.5	2 956.7	2
15	43.6	12.5	7.9	3.5	216.8	3 008.4	2
16	87.2	16.4	7.2	4.2	226.0	6 003.0	2
总计	369.7	134.9	79.3	44.8	2 240.5	25 512.8	4

3.4.3 不同林冠覆盖率下径流控制率的变化

全面分析评估城市林冠对雨水径流的控制效果,城市林冠覆盖率是不可或缺的基础数据,国内外文献资料显示,城市林冠覆盖率通常在 15% ~ 35% 之间^[11],可设定 5 种林冠覆盖率(15%、20%、25%、30%、35%)进行分析讨论。在研究区域林冠覆盖下垫面组成及乔木种类构成不变的条件下,使用林冠截留径流控制率估算方法对不同林冠覆盖率下场降雨径流控制率进行计算,分析降雨量、林冠覆盖率对场降雨径流控制率的影响,结果如图 4 所示。可以看出,各林冠覆盖率下降雨量与径流控制率之间呈良好的对数相关关系($R^2 = 0.91$),相同降雨量下林冠覆盖率每增加 5%,场降雨径流控制率可提升 1% ~ 3%。

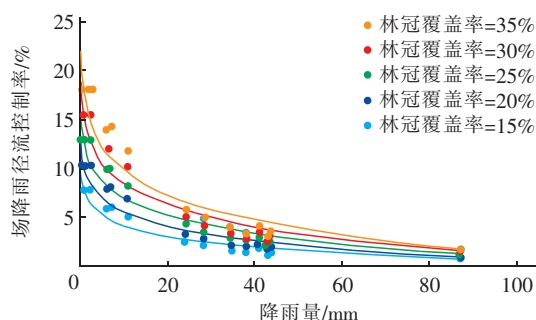


图4 不同林冠覆盖率下降雨量与径流控制率的关系

Fig. 4 Relationship between precipitation and capture ratio of runoff volume in different tree canopy cover rates

3.4.4 不同林冠覆盖下垫面下径流控制率的变化

以林冠截留径流控制率估算方法为基础,在研究区域林冠覆盖率为25%和乔木种类构成的条件下,设定4种林冠覆盖下垫面组成,分析降雨量与场降雨径流控制率之间的关系,结果如图5所示。在相同的林冠截留效果下,下垫面径流系数的不同会导致径流体积削减的差异,因此图5中不同林冠覆盖下垫面组成条件下,林冠截留场降雨径流控制率有显著区别。依据图5中显示的规律,在一定的林冠覆盖条件下,硬化面积比例较高的区域,如市政道路、露天停车场、绿化率较低的老旧城区等,其林冠截留所产生的径流控制率相对较高。由此也可推断,在绿地率严重不足和硬化面很高的老城区,更多地种植树木,发挥林冠的生态和海绵功能,具有十分重要的意义。

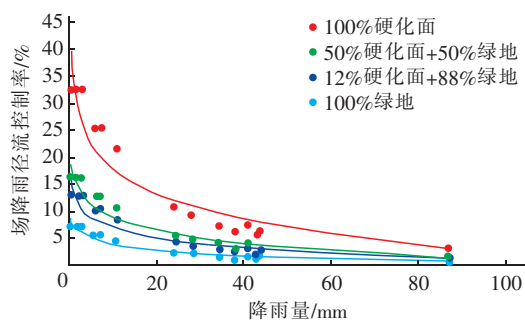


图5 不同林冠覆盖下垫面条件下降雨量与径流控制率的关系

Fig. 5 Relationship between precipitation and capture ratio of runoff volume in different land surface condition underneath tree canopy

3.4.5 降雨条件对林冠截留径流控制率的影响

从图4与图5中可以明显看出,林冠截留产生的场降雨径流控制率与场降雨量之间呈负相关关

系,因此在一定的林冠覆盖条件下,中小降雨事件(降雨量 $<25\text{ mm}$)的雨量占总降雨量的比例越高,则林冠截留径流控制率统计结果将会越大。李俊奇等指出,我国各城市不同降雨量区段的降雨在全年降雨中的分布特征与低影响开发系统设计降雨量存在以下关系:中小降雨的雨量占年总降雨量的比例越小,设计降雨量就越大^[12]。以上述依据可以推断,在一定的林冠覆盖条件下,设计降雨量偏小的地区,其林冠截留径流控制率统计结果会更大,例如,一定的林冠覆盖条件下,在《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中大陆地区年径流总量控制率分区图里,设计降雨量偏小的I区(如拉萨、银川等西北地区城市)内,林冠覆盖产生的径流控制率统计结果将大于设计降雨量偏大的V区(如广州、海口等南方城市)。

4 结论

① 林冠截留率的大小受乔木种类与降雨量影响:在降雨条件相同的情况下,8种园林乔木林冠截留率从大到小排序为圆柏、雪松、银杏、毛白杨、国槐、龙爪槐、紫叶李、西府海棠,其中针叶乔木截留率高于大型阔叶乔木与小型阔叶乔木;降雨量与截留量之间呈良好的对数相关关系,在降雨量增大的过程中,截留量达到最大值后截留率将大幅降低。

② 在相同降雨条件下,8种园林乔木林冠截留体积从大到小排序为国槐、雪松、银杏、圆柏、毛白杨、龙爪槐、西府海棠、紫叶李。林冠截留体积的影响因素包括林冠截留量和林冠覆盖面积,在所研究的8种园林乔木样本中,林冠截留体积与林冠覆盖面积之间具有更强的相关性。

③ 基于现场调查与航拍影像分析所得出的研究区域林冠覆盖情景下,16场降雨中林冠截留效应对研究区域径流总量的控制率为4%。林冠截留产生的场降雨径流控制率与场降雨量之间呈负相关关系,一定林冠覆盖条件下,西北地区城市林冠覆盖径流控制率统计结果将大于南方城市。林冠覆盖下垫面中不透水面积比例的增加、林冠覆盖率的增加以及合理的林木种类搭配都能有效减少雨水产流。

④ 林冠截留对下垫面径流系数与海绵城市低影响开发系统雨量控制容积存在一定的影响,在具体的水文分析及设计计算中,应该考虑这部分影响,但目前国内海绵城市建设中,场地尺度或城市尺度范围内的林冠截留作用尚未得到应有的重视,需进

一步开展有关的量化分析研究,将城市林冠截留效果纳入海绵城市建设的考量之中,更好地发挥城市森林林冠对径流的控制作用及其他综合性的生态功能。

参考文献:

- [1] 余新晓,张志强,陈丽华,等. 森林生态水文[M]. 北京:中国林业出版社,2004.
Yu Xinxiao, Zhang Zhiqiang, Chen Lihua, *et al.* Forest Eco-hydrology[M]. Beijing: China Forestry Press, 2004 (in Chinese).
- [2] 郭胜男,林萍,吴荣,等. 昆明市园林植物树冠截留降雨及其影响因素研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(23): 47-51.
Guo Shengnan, Lin Ping, Wu Rong, *et al.* Study on canopy interception rainfall of garden plant in Kunming and its influencing factors[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(23): 47-51 (in Chinese).
- [3] 尹剑红. 广州市11种园林地被植物冠层截留特征研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院, 2016.
Yin Jianhong. Study on Canopy Interception Characteristics of 11 Landscape Ground Cover Plants in Guangzhou City[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2016 (in Chinese).
- [4] Inkilainen E N M, Mchale M R, Blank G B, *et al.* The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 119(6): 91-103.
- [5] Xiao Q, Mepherson E G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest[J]. Urban Ecosystems, 2002, 6(4): 291-302.
- [6] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrol Process, 2000, 14: 2903-2920.
- [7] 马惠,张洪江,王伟,等. 重庆市四面山不同森林类型林冠的截留作用[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 108-114.
Ma Hui, Zhang Hongjiang, Wang Wei, *et al.* Effects of rainfall interception of different forest communities in the Simian Mountain, Chongqing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(6): 108-114 (in Chinese).
- [8] Thomas S. Differences in Rainfall Interception Losses for Three Tree Species Common to Colorado: *Populus tremuloides*, *Picea engelmannii*, and *Pinus ponderosa* [D]. Colorado: University of Colorado at Colorado Springs, 2016.
- [9] 张焜,张洪江,程金花,等. 重庆四面山暖性针叶林林冠截留及其影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 32-35.
Zhang Kun, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, *et al.* Effect of canopy interception of warm needle-leaved forest in Simian Mountain of Chongqing and its influencing factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10): 32-35 (in Chinese).
- [10] Xiao Q, Mepherson E G, Simpson J R, *et al.* Rainfall interception by Sacramento's urban forest[J]. Journal of Arboriculture, 1998, 24(4): 235-244.
- [11] 贾宝全,王成,邱尔发,等. 城市林木树冠覆盖研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 23-32.
Jia Baoquan, Wang Cheng, Qiu Erfa, *et al.* The status and trend on the urban tree canopy research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 23-32 (in Chinese).
- [12] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 6-12.
Li Junqi, Wang Wenliang, Che Wu, *et al.* Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: regional division for total rainfall runoff volume capture target[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 6-12 (in Chinese).



作者简介:游宇(1994-),男,江西萍乡人,硕士研究生,研究方向为城市雨洪控制与管理。

E-mail: buceayy@163.com

收稿日期: 2017-12-11