

“海绵城市”绿地规划设计三要素研究进展

常青¹ 刘晓文^{1,2} 孙艺^{1,3}

(1. 中国农业大学 园艺学院 观赏园艺与园林系,北京 100193;

2. 天津大学 建筑学院,天津 300072;

3. 北京清华同衡规划设计研究院 风景园林中心,北京 100085)

摘要 为科学指导“海绵城市”绿地规划设计,从城市水文循环问题的起因和雨洪管理技术的需要出发并综述相关文献,提出海绵城市绿地规划设计“植物、土壤和透水铺装”三要素。同时从构建体系的微观方面综述了植物降雨截留的生态作用及影响因素、土壤入渗能力及影响因素和透水铺装结构、透水能力等,进而表明这三要素在城市雨水调蓄、滞渗效应中的潜力和作用。最后从提升雨水调蓄能力角度,分别针对三要素提出今后应用和基础研究应注重的方向。

关键词 雨洪管理;水文循环;植物截留;土壤入渗;透水铺装

中图分类号 TU984

文章编号 1007-4333(2017)01-0139-12

文献标志码 A

Research progress on the three key elements of “Sponge City” green space planning and design

CHANG Qing¹, LIU Xiaowen^{1,2}, SUN Yi^{1,3}

(1. Department of Ornamental Horticulture and Landscape, College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. Research Center for Landscape Architecture Planning, Beijing Tsinghua Tongheng Planning Design and Research Co. Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract To provide references to guide planning and design of “Sponge City” scientifically, and from the prospectives of urban hydrologic cycle and stormwater managements and technology, three key elements (plant interception, soil infiltration and permeable pavement infiltration) were put forward. And the ecological function and influence factors of plant interception, influence factors of soil water infiltration, and the structure and infiltration ability of permeable pavement on the aspect of Sponge City construction in small scale were reviewed. The potential and function of stormwater retention and management of the three elements were then described. Finally, attention and research direction of future applications of the three elements were proposed respectively for promoting stormwater management capacity.

Keywords stormwater management; hydrological cycle; canopy interception; soil infiltration; permeable pavement

城市内涝在近年来引起学术界和社会的广泛关注。据不完全统计,在2008—2010年我国城市约有64.3%发生过3次以上内涝,74.6%积水深度超过500 mm,79%积水时间超过30 min^[1],还有部分内涝造成严重的人员伤亡和经济损失。为此,我国在现代雨洪管理理念的影响下提出了“海绵城市”这一概念,并从2014年《海绵城市建设技术指南》的颁布

后不断推出建设“海绵城市”的政策,反映了雨洪管理的迫切性和研究“海绵城市”建设方法的重要意义。

城市雨洪问题是由于流域水文循环发生改变所产生的问题之一。除气候变化外,城市水文循环更多的受到人类活动的影响,主要反映在城市化过程中降水、蒸发和径流的改变^[2-3]。有研究表明^[4],暴

收稿日期:2016-01-27

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41001112)

第一作者:常青,副教授,主要从事景观生态规划与绿地效能评估研究,E-mail:changqing@cau.edu.cn

雨在城市发展后期比前期可增加 12%~14%。除太阳辐射、饱和差风速的影响,蒸发量受下垫面和植被状况的影响也很大^[2],而城市化过程中,土地利用发生了巨大变化,森林、农田、水体以及植被大量减少,从而减少了蒸发介质的供水量,阻碍了雨水下渗、补给和植物冠层的降雨截留,取而代之的是建筑物、道路等不透水设施等;加之传统的排水系统存在诸多问题,不能及时排走雨水,最终加重了地表径流、提前了洪峰时间。有数据表明,当森林等可透水地表面积由 90%减少到 25%以下时,雨水地表入渗量从 42%减少到 15%,地表植被与土壤蒸散量由 38%减少到 30%,地表径流则由 20%增加到 55%^[5]。也就是说,人类活动对透水下垫面、不透水下垫面和植被的改变是改变城市水文循环、导致径流和内涝发生的重要因素。

在建设“海绵城市”解决雨水径流过程中,有学者指出^[1]:“海绵城市”的构建需要从宏观(水生态安全格局分析)、中观(城、镇、村和区规划)、微观尺度(“海绵体”集水单元建设)3个方面进行,还有提出要从区域、城市、社区和建筑4个方面进行构建^[6],二者都说明“海绵城市”的构建需要在多个尺度上进行。而土壤(透水表面)、不透水表面和植被无论在大小尺度上都具有重要的存在形式和意义。其中微观和社区尺度是“海绵城市”的落实基础^[1],城市径流控制目标的实现也需要具体的“海绵体”设施^[7],它包括一系列 LID(Low impact development,低影响开发)和生态修复技术等,往往通过调整土壤和硬质表面的位置关系、调整面积比例、调整植被种植方式和树种选择,以及改善、改变硬质表面自身结构来实现雨洪管理的目的。

综上,植被、透水表面、不透水表面既是雨洪问题产生的原因,也是雨洪管理措施实施的内容,因此,这三者是“海绵城市”设计的3个重要要素,它是区域水文循环的载体,是中观规划的要点,更是落实“海绵城市”的关键。目前有关“海绵城市”设计要素的基础研究报道较少,本研究通过就“海绵城市”微观层面的基础研究包括植被、土壤、透水铺装的降雨调蓄能力和影响因素等方面进行阐述,旨在为“海绵城市”绿地规划提供依据。

1 植被降雨截留

1.1 植被冠层截留能力

植物降雨截留是指树冠、树干及其凋落物的雨

水截留^[8]。降雨过程中,树冠能够吸收、滞留枝叶表面的雨水,随后逐渐蒸散到大气中。树干茎流一般低于 5%^[9],且只有在达到一定降雨量时才会发生^[10],一般忽略不计。植被的凋落物主要起减少降雨对土地侵蚀的作用^[8]。植被的降雨截留能够直接削减降落到地表的雨量和降雨强度,可延迟产流和削减洪峰。树冠、草冠不仅能直接滞留雨水,还能通过蒸腾作用间接截留,因为蒸腾可促进植被从土壤中吸收大量水分,间接促进了土壤吸收降雨。蒸腾作与截留共同的耗水量可占到降雨量的 40%~80%^[11]。

但是相比于森林生态系统,城市生态系统的植被降雨截留的研究还相对较少。根据森林林冠截留的相关研究,针叶树截留率约 20%~40%,阔叶树截留率约 10%~20%^[12],我国茂密森林林冠截留量为 10~20 mm/年,占年降雨量的 15%~45%^[13]。并且群落结构越复杂,截留能力越强^[14]。城市植物冠层降雨截留更倾向于其径流削减作用的研究,如墨尔本部分居住区行道树每年可减少街道降雨量 13%^[10],美国 Santa Monica 的 29 299 棵行道树和公园乔木可以削减雨量 193.168 m³^[15],加拿大 Hamilton 的行道树可截留和蒸发 7 年总降雨的 6.5%~27%^[16]。可见,城市植物在减少总降雨、削减径流方面具有重要价值,表 1 为部分植物截留能力。另外,不同植物配置的截留效果也不同,如昆明园林植物“鹅掌楸+鹅掌柴”的组合就比“大叶滇朴+尖叶木樨榄”等组合截留率更高^[17]。

城市植物的降雨截留研究有常见园林植物、行道树、庭院树以及草坪植物等的截留效果、影响因素、截留机制和模型等研究。城市环境与森林有很大不同,许多森林林冠截留测量方法、结论和规律不能直接运用到城市树冠^[29]。城市植物常暴露在四周环境中,易受风、场地、人等干扰,其截留研究通常以单株树或者较小的植物群落为对象。树冠降雨截留的测量方法较森林林冠研究更为多样,如在单株树冠下增加雨量桶数量^[30-31]、用 PVC 管收集沿树冠半径方向的降雨^[32],或塑料板覆盖整个树冠垂直投影区域后再收集到雨量桶中^[29,33],以减少空间异质导致的误差和干扰。还有使用降雨发生器模拟自然降雨,研究在特定雨型下小规格植物、植物枝叶的截留规律或进行建模^[37],但因室内模拟受湿度等影响,雨型相对单一,故该法误差较大。

表1 森林、人工林及城市植物树冠截留率

Table 1 Vegetation canopy interception rate of forest, plantations and urban plant

类型 Type	名称 Name	截留率/% Interception rate
森林、人工林植物	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> ^[18-19]	18.90~35.80
	常绿针叶 侧柏 <i>Platyclusus orientalis</i> ^[18-19]	13.30~25.90
	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i> ^[20-21]	25.70~37.50
常绿阔叶	川滇高山栎 <i>Quercus aquifolioides</i> ^[22-23]	16.50~35.80
	毛竹 <i>Phyllostachys pubescens</i> ^[24-25]	7.40~25.30
	桉树 <i>Eucalyptus</i> ^[26]	8.60~10.70
落叶阔叶	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> ^[27]	11.30~34.10
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> ^[19,28]	17.50~30.20
乔木	豆梨 <i>Pyrus calleryana</i> ^[29] (美国戴维斯 Davis, America)	15.00
	银杏 <i>Gingko biloba</i> ^[30] (美国奥克兰 Oakland, America)	25.20
	枫香 <i>Liquidambar styraciflua</i> ^[30] (美国奥克兰 Oakland, America)	14.30
	柠檬 <i>Citrus limon</i> ^[30] (美国奥克兰 Oakland, America)	27.00
	橄榄 <i>Canarium album</i> ^[31] (西班牙科尔多瓦 Cordova, Spain)	34.90
	花旗松 <i>Pseudotsuga menziesi</i> ^[32] (加拿大大不列颠哥伦比亚 British Columbia, Canada)	49.10
	垂叶榕 <i>Ficus benjamina</i> ^[33] (墨西哥克雷塔罗市 Quere'taro, Mexico)	59.50
灌木	茶梅 <i>Camelia sasanqua</i> ^[17] (中国昆明 Kunming, China)	32.00
	红花檵木 <i>Loropetalum chinense var.</i> ^[17] (中国昆明 Kunming, China)	36.50~55.10
草本	结缕草 <i>Zoysia japonica</i> cv. Lanyin Mo. 3 ^[34]	14.63~21.28
	草地早熟禾 <i>poa. Pretense</i> cv, Rugby II ^[34]	16.48~17.18
	高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i> cv. Pixie ^[34]	15.19~21.20
	偃麦草 <i>Elytrigr Elytrigria repens</i> ^[35]	35.00~57.00
	狗牙根 <i>Cynodondactylon</i> ^[36]	40.60
	紫穗狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> ^[36]	45.35

注:括号内为植物生长所在地区。

Note:City name in brackets is the place where the tree located in.

植物冠层截留降雨的多少关系到地表径流量,冠层截留能力越强,被截留的雨水量越多,降落到地面可形成径流的雨量也就越少,尤其是在树冠垂直投影范围,可以减少与其截留率相当的径流。因此在城市中,应注重植物冠层截留降雨作用,发挥植物削减径流乃至涵养水源、促进城市水文循环等生态功能。

1.2 植物冠层截留影响因素

大量森林林冠截留研究表明,林冠截留影响因素较多,包括降雨条件、气象因素和植物本身特征(表2)。其中降雨量是影响树冠截留量的最大因素^[38],气象因素是通过水分蒸发影响树冠持水和截留能力。植物自身的特征是导致截留能力差异的重

要因素,但有些特征较难量化,其截留影响尚不十分明确,如马惠等^[14]认为针叶容水间隙与空气接触面较小,水分蒸发速率较慢,而陈引珍^[38]认为针叶叶面积较大增加了蒸发速率。郁闭度、群落垂直结构及叶面积指数对穿透降雨有重要影响^[14],其中郁闭度与树冠截留的相关性最高^[10,12],能够

更好的预测树冠下穿透降雨规律。城市植物还受到城市环境和人为干扰的重要影响,如修剪^[15]、嫁接等养护管理会影响枝叶量;被修剪成矩形和圆球形的红花檵木,其截留率分别为 36.38% 和 55.05%^[17]。另外,健康状况较好的树冠一般截留能力更强^[32]。

表 2 植物截留量影响因素

Table 2 Influence factors of plant canopy interception quantity

影响因素 Influential factor	灰色关联度 Grey correlation degree	截留量与其关系 Relationship of the influence factor and interception rate
降雨	降雨量	0.86 正相关。随降雨量增大先增加后趋稳 ^[14] 。
	降雨强度	0.79 负相关 ^[14] 。数量关系需要进一步探究。
	降雨间隔	— 间隔短,截留量少 ^[14] 。影响树冠干燥程度,间隔越长越干燥,持水、截留能力越强。
气象	温度	0.65 决定湿润林冠蒸发速率 ^[39] ,温度越高,蒸发越快,截留越大。
	湿度	0.55 湿度越大,穿透降雨越大 ^[9] 。湿度较大会减弱蒸发阻碍截留。
	风速	0.73 增加蒸发速率 ^[9] 促进截留,也会震落枝叶上的雨水 ^[33] 阻碍截留。风速较小时影响效果不明显。
植物特征	枝叶量	— 正相关。一般反映在郁闭度(相关性最高 ^[10,12])、叶面积指数、单位面积枝叶质量等。
	树龄和规格	— 一般植物树高等规格随着树龄增加,枝叶量也增加。截留量与树龄呈一定的正相关 ^[40-41] 。
	树形	— 树冠较厚的锥形、柱形针叶树截留能力强于阔叶树 ^[42]
	叶片	— 叶形:针叶树叶间空隙持水较好,截留能力强,而阔叶更易形成较大水滴而滴落 ^[33] 。质地:截留量软质叶片大于硬质叶片 ^[42] 。小薄、平展或下垂的叶片易受震动导致雨水滴落 ^[43] 。

注:“—”表示无关联。下表同。

Note:“—” means none relationship. The same as following tables.

2 土壤入渗与调蓄

绿地有林地、农田、公园、雨水花园和生物滞留池等多种尺度形式,其削减和管理径流基本是依靠土壤入渗功能。绿地土壤可以通过吸收其上方雨水以及周围硬质表面的径流来削减径流和补充土壤水、地下水,同时也可减少排水管网压力和用于绿地灌溉。

不同质地的土壤水分蓄渗能力不同,其中砂土、砂质壤土等入渗性能好的土壤(表 3)在降雨过程中能够更快的渗透雨水和削减径流。影响土壤入渗的

因素有降雨量、植被覆盖、孔隙度、有机质含量、坡度、含砂量和压实程度等理化性能,其中孔隙度尤其是非毛管孔隙度与土壤入渗能力密切关系^[44]。其他影响因素通过直接或间接影响孔隙度来影响土壤入渗能力。

2.1 有机质及添加物对土壤入渗的影响

有机质通过影响土壤孔隙大小、分布和土壤团粒数量及其稳定性影响土壤渗透性,二者呈显著正相关^[45],如上海辰山植物园月季园施用了大量有机质后,土壤入渗率达 103.8 mm/h(园内裸地仅为

0.09 mm/h)^[46]。人为添加土壤改良剂、秸秆、陶粒等也可提高土壤入渗性能。使用麦秆(10 g/kg)和2%的聚丙烯酰胺(PAM)对土壤土培 60 d 左右可

使土壤稳渗率提高到之前的 4.97 倍,玉米和水稻秸秆效果也较好^[47],还田后与肥料或粉煤灰结合施用可提高原土壤稳渗率 1.29~1.99 倍^[48]。

表3 部分类型土壤渗透性能

Table 3 Permeability of some types of soil

土壤类型 Soil types	稳渗率范围/(mm/h) Permeability range	平均稳渗率/(mm/h) Average steady infiltration rate	
砂土	砂土	744.0	
	壤质砂土	60.0~154.2	64.2
壤土	砂质壤土	15.0~117.6	56.4
	砂质粘壤土	14.4~109.2	42.6
	粘质壤土	1.7~102.0	41.4
	粉砂壤土	13.2~66.0	31.2
粘土	壤质粘土	4.2~43.2	17.4

因此,施用有机质、添加改良剂以及秸秆、陶粒等可以作为入渗绿地建设前期快速提高土壤入渗率的有效方法,但土壤结构的标准如上海绿地非毛管孔隙度要求达到5%以上^[49],以及土壤稳渗率的快速测量方法仍需进一步研究,以便量化改良物质用量和长期观测土壤入渗性能。

2.2 植物对土壤理化性质、入渗的影响

植物能够提高土壤入渗性能。一方面植物通过蒸腾作用促进根系吸收土壤水分,不同地区的森林其蒸腾量可达110~400 mm/年^[50],土壤在水分发生亏损后吸水能力增强^[51]。另一方面植物根系通过穿插、分割等方式长期作用于土壤,能够改善土壤非毛管孔隙度、土壤团聚体等组成和结构^[52],增加土壤非毛管孔隙度 1.48%~155.43%,增加有机质 13.33%~111.11%,降低容重 1.7%~15.5%,使稳渗率达到 8.4~976.2 mm/h,提高 27.4%~476.8%。乔木增加土壤非毛管孔隙度的作用优于草本,而草本提高土壤有机质能力优于乔木^[53],因此结构复杂的群落^[52]改善土壤作用更加明显。根系径级在 0.5~5.0 mm^[54]尤其是小于 2.0 mm 的植物^[55]提高土壤渗透性较为明显,如香根草等可使土壤入渗率达到 58.8~60.0 mm/h,而<0.5 mm 或>5.0 mm 的根系入渗率小于 42.0 mm/h^[54]。

植物改善土壤入渗能力需要较长时间,但对于添加改良物质而言,适度提高植物群落结构的复杂程度以及选择根系小于 2.0 mm 的植物种类,则是

提高土壤入渗能力较为长远的生物措施,是使绿地长期保持较好入渗功能的方法。

2.3 压实与践踏对土壤入渗的影响

压实和践踏会使土壤大孔隙变成小孔隙,增加土壤容重^[56],降低土壤入渗能力。当土壤受到的机械压实从 1 051 kPa 增加到 1 487 kPa 时,0~40 cm 的表层土壤紧实度会增加 29.3%,10~20 cm 的土壤容重由 1.34 g/cm³ 增加到 1.44 g/cm³,3 h 入渗量可从 275.2 mm 降低到 143.0 mm,减少 75.7%^[57]。城市地面受到建筑、车辆等机械压实程度较大,如上海和南京土壤容重一般超过 1.3 g/cm³,其中交通道路、商业区等人流、车流量较大的区域和新建绿地压实最严重,土壤容重达到 1.45 g/cm³ 以上、土壤入渗速率一般<18 mm/h;学校、居住区和部分公园绿地入渗速率相对较高^[56,58]。我国学者认为建设下渗绿地的土壤入渗率应当大于 0.36~36 mm/h^[59],因为土壤入渗不佳时不仅不能削减径流,还会造成积水并影响植物生长。因此,“海绵城市”需要全面了解城市土壤入渗性能并合理选址,同时增加防护措施(卵石、树池盖板等)减少绿地土壤的踩踏,保持土壤较好的入渗性能。

2.4 绿地坡度及下凹深度

绿地设计参数,如坡度与下凹深度会影响土壤入渗能力。坡度会影响径流的流向,生物滞留池、植草沟等都是利用一定坡度汇集径流。绿地坡度也会影响坡面土壤稳渗率,并直接关系到坡面产流时间。

目前坡度影响土壤稳渗率的结论尚不统一,如在土壤容重与初始含水率一致的条件下,坡度在 $5\sim 15^\circ$ 时随坡度增大土壤稳渗率减小、产流时间减少^[60],坡度为 10° 左右时土壤稳渗率达到最大值^[61],而野外不同坡度、不同位置上土壤稳渗率随坡度增加而增加^[62],或与坡度无关^[63]。这些结论的不一致可能是由于实验室研究假定了坡度不同位置的含水率和土壤容重相同,与野外实际坡面情况有差异;而采集野外坡面不同位置土壤进行室内含水率、容重测定则没有考虑坡面水分流动和入渗的过程。因此需进一步研究坡度对土壤入渗能力的影响,以揭示利于坡面土壤入渗的坡度参数,指导“海绵城市”绿地地形设计。

下凹深度是影响绿地蓄渗水量的重要因素,下凹或低势绿地可像容器一样容纳周边径流,带来巨大的径流削减效益。下凹绿地的设计主要受到暴雨重现期、土壤稳渗率、绿地率的综合影响,并需考虑植物耐淹程度、安全等因素^[59,64]。目前已有下凹深度的设计方法,且认为下凹绿地土壤稳渗率的范围为 $0.36\sim 36\text{ mm/h}$ ^[59],下凹深度范围宜控制在 $5\sim 25\text{ cm}$ ^[59],下渗时间不宜超过 24 h 。

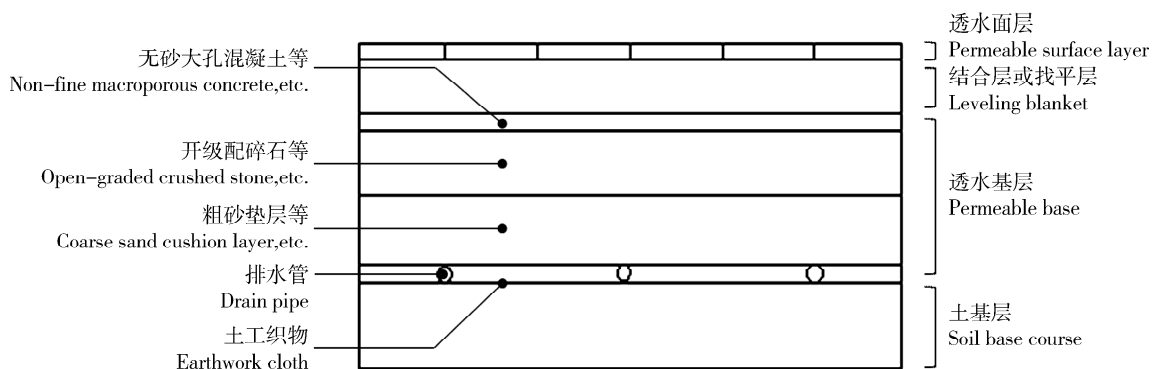


图1 透水铺装结构示意图

Fig. 1 Structure of permeable pavement

面层对铺装透水性起决定性作用^[68],其中钢渣、陶瓷等材料制备的透水砖透水性能较好(表4)。

透水基层对铺装整体最终渗透效果影响最大^[69],其渗透性和蓄水能力受到基层厚度和材料的影响。降雨过程中,铺装基础 $0\sim 25\text{ cm}$ 的土层水分增加最为明显,降雨结束后, $0\sim 25\text{ cm}$ 处的水分会下降趋势,水分逐渐向下入渗, $40\sim 55\text{ cm}$ 的水分有增加趋势^[70]。这表明,要使透水铺装降雨过程中迅速渗透雨水,最关键的透水基层厚度应不小于 25 cm ,为使降雨结束后透水基层迅速排水,再次恢复较强渗透能力,整个铺装基础结构不宜小于 55 cm 。

3 透水铺装

3.1 透水铺装与入渗能力

透水铺装是BMPs(Best management practices,最佳管理措施)、LID、GSI(Green stormwater infrastructure)等的重要手段,与不透水铺装相比,它能够削减地表径流 $30\%\sim 80\%$ 。例如,由上而下为 6 cm 透水砖+ 6 cm 无砂混凝土+ 15 cm 天然级配砾石结构的透水铺装在使用2年后,仍可在30年一遇的 1 h 降雨不产生径流^[65]。

根据实际施工方法和文献^[66]总结,透水铺装结构是影响整个铺装体系入渗性能的内因,一般分为面层、找平层、透水基层(垫层)和土基层(图1)^[66]。面层有透水水泥混凝土及透水沥青混合料现浇面层,和预制自透水、缝隙透水路路面砖面层两类,前者可承受轻型交通设施,后者主要用于人行步道和广场。面层和透水基层间需设找平层^[67],面层边缘还需有约束^[68]。各层均通过自身的多孔结构实现其透水性,且透水能力下层不应小于上层^[68]。

铺装各基层材料孔隙率越大越通透,在重力和土壤吸力的作用下,透水基层的透水性就越好^[71]。相关试验还证明,砾石、砂粒级配碎石、石子、中砂、无砂混凝土等大孔隙材料是较好的透水基层材料^[70-71]。

透水铺装基础有时还需增加辅助设施。土工织物可提高土基层承载力,可根据是否需要防止地下水污染选择在土基层之上铺设非透水或透水土工织物^[67]。渗透性不佳的路面还需设置溢流管。另外,植草砖是一种透水效果明显的铺装类型,相较笔者所述利用砖体本身透水的铺装类型,其原理主要是通过植草砖空隙间的土壤渗透雨水。

表4 透水铺装面层类型及透水性能

Table 4 Type and permeable performance of permeable pavement surface

透水铺装类型 Permeable pavement type	透水系数/(mm/s) Permeable coefficient	抗压强度/MPa Compressive strength	应用范围 Scope of application	
陶瓷透水砖	0.20~0.74	28.1~48.9	人行道、广场、非机动车道、轻型车道	
泥砂透水砖	0.10~0.29	30.3~39.3		
预制路面砖	钢渣透水砖	2.83~18.84		28.7~35.8
	矿渣、粉煤灰透水砖	0.11~0.62		25.8~65.2
	混凝土透水砖类	0.20~17.62		21.0~58.3
现浇路面	水泥混凝土	0.65~10.00	15.3~102.8	停车场、机动车道、非机动车道
	沥青混合料	0.03~0.97	—	

注:透水砖透水系数标准为 >0.1 mm/s。

Note: Permeable coefficient standard of permeable pavements is >0.1 mm/s.

3.2 透水铺装设计与养护

有学者根据相关规定对透水砖透水系数、各层有效孔隙度和压实度等技术性指标提出了要求^[68],并需满足路面应有的承载力。张书函等^[68]给出了透水系数、基层厚度的设计方法,根据设计暴雨重现期(一般采用1、2、5、10、20和50年)依次确定铺装渗透系数、设计厚度及透水铺装径流系数,最后进行调整。还有学者提出了透水铺装构件的设计和施工原则以提高渗透能力。随着使用年限的增加,透水铺装面层渗透能力会因孔隙堵塞而降低,面砖可使用2~5 mm卵石填补接缝或定期清扫,现浇透水路面则需要使用吸尘器或喷射水枪等方式进行清理^[69]。由于透水铺装透水性与抗压强度成反比,因此交通量大、对路面力学性能要求较高的道路上不宜大量使用透水铺装。

4 结论与讨论

“海绵城市”的构建离不开植物截留、土壤入渗、透水铺装这3个关键要素,它们是“海绵城市”构建微观方面和具体实施中的重点(图2)。根据现有植物截留、土壤入渗和透水铺装相关研究进展,笔者认为在改善城市水文循环、规划建设具良好雨水调蓄能力的“海绵城市”中必须深入研究和完善这三要素的雨水调蓄机制,具体可从以下几方面入手:

1) 发挥植被降雨截留作用。降雨和气象因素不人为所控,但通过保留、建设城市森林和中小型绿地,建立新的郁闭度、叶面积指数等标准,丰富植物

群落结构,进一步研究和结合植物自身特征和最佳配置方式;完善植物修剪等养护管理标准,减少修剪带来的降雨截留作用的削弱;筛选能够提升土壤入渗能力的植物,从而充分发挥植物这一海绵体截水、吸水和释水的生态作用。另外,还可进一步研究城市树冠和森林林冠截留的转换关系模型,将森林林冠截留成果运用到城市树冠。

2) 利用绿地土壤调蓄雨水。充分获得土壤渗透能力分布情况以为“海绵城市”规划提供合理的选址参考;针对不同类型土壤提出持久有效的土壤改良措施,使土壤能够长效发挥雨水渗透能力;进一步研究绿地坡度与渗透能力的关系,和入渗绿地与不透水面积比率;进一步加强蓄渗绿地土壤入渗能力的检测和维护工作,充分发挥土壤“吸水”的海绵作用。

3) 透水铺装的应用。透水铺装冲破了硬质地面完全不透水的状况,是“软化”地表增加雨水蓄渗的重要途径。需进一步完善透水铺装的材料、结构、施工方法等以提高其透水性能和必要的强度;进一步普及透水铺装人行道、停车场等地的使用,降低硬质地面“硬度”,形成新一类的“海绵”,并加强透水铺装和不透水面与绿地的空间联系,在降雨过程中减少径流。

此外,由于城市径流的产生源于城市水文循环变化,因此还需进一步了解整个城市水文循环机制以及植被、土壤、铺装等在水文循环中起到的作用及其相互关系,通过这3个要素的综合运用,更好的完善土地利用和海绵在城市中的分布与形式,为“海绵

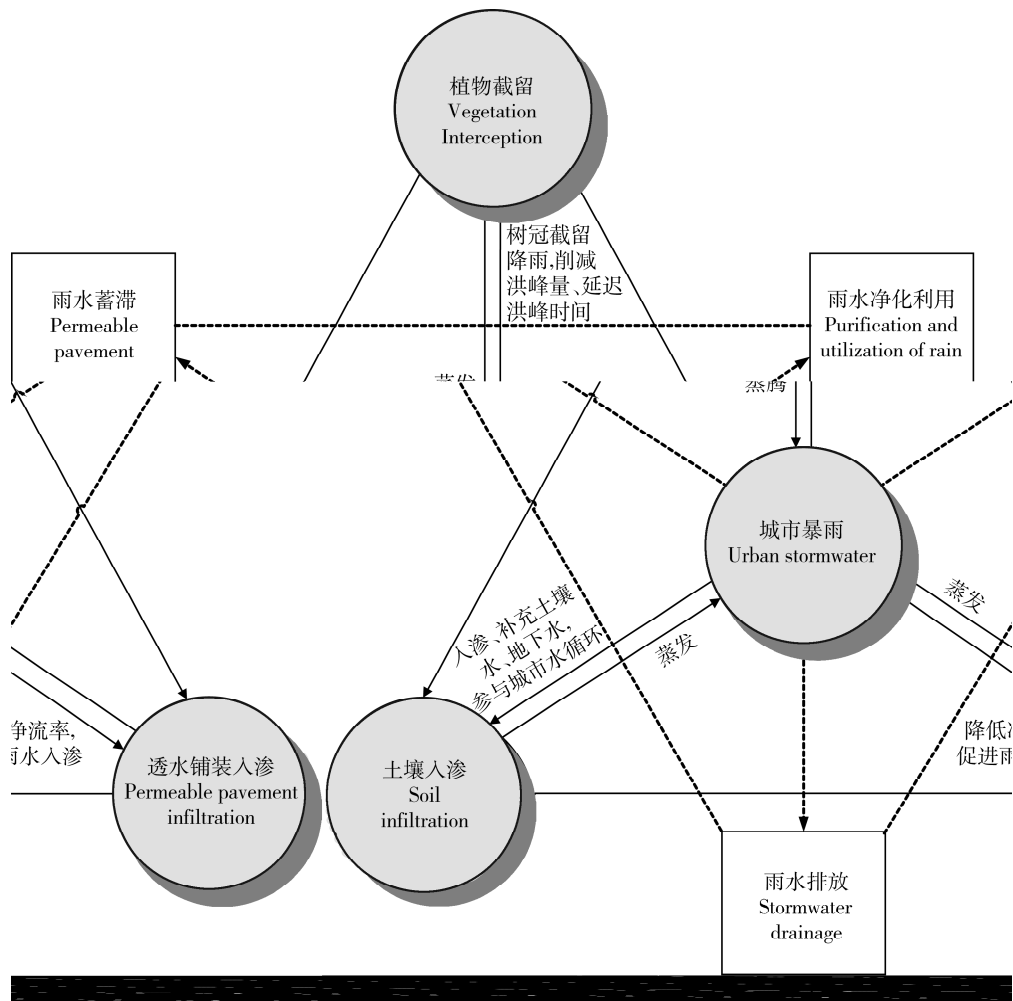


图2 构建“海绵城市”体系的三要素

Fig. 2 Three elements of “Sponge City” system construction

城市”的实施提供依据。

参考文献 References

[1] 俞孔坚,李迪华,袁弘,傅微,乔青,王思思.“海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划,2015,39(6):26-36
 Yu K J, Li D H, Yuan H, Fu W, Qiao Q, Wang S S. “Sponge City”: Theory and practice[J]. *City Planning*, 2015, 39(6): 26-36 (in Chinese)

[2] 宋晓猛,张建云,占车生,刘春蓁. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790
 Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, Liu C Z. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790 (in Chinese)

[3] 姜昉,张升堂. 城市化对水文循环的影响及应对措施[J]. 水科学与工程技术,2010(6):30-32
 Jiang Y, Zhang S T. Influence of urbanization on hydrologic cycle and countermeasures[J]. *Water Sciences and Engineering*

Technology, 2010(6): 30-32 (in Chinese)

[4] Shepherd J M. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(4): 607-628

[5] Matlock M D, Morgan R A. *Ecological Engineering Design: Restoring and Conserving Ecosystem Services* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2011

[6] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 建设科技, 2015(1):11-18
 Qiu B X. Contention, approach and expectation of sponge city (LID)[J]. *Construction Science and Technology*, 2015(1): 11-18 (in Chinese)

[7] 李俊奇,王文亮,车伍,刘超,赵杨. 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 J Q, Wang W L, Che W, Liu C, Zhao Y. 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)
- [8] 郭明春, 王彦辉, 于澎涛. 森林水文学研究述评[J]. 世界林业研究, 2005, 18(3): 6-11
Guo M C, Wang Y H, Yu P T. A review of forest hydrology studies[J]. *World Forestry Research*, 2005, 18(3): 6-11 (in Chinese)
- [9] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 侯琳, 李荣华, 张硕新. 降雨特征及小气候对秦岭油松林降雨再分配的影响[J]. 水科学进展, 2013, 4(4): 513-521
Chen S J, Chen C G, Cao T J, Hou L, Li R H, Zhang S X. Effects of rainfall characteristics and micrometeorology on rainfall redistribution within Chinese red pine forest [J]. *Advances Water Science*, 2013, 4(4): 513-521 (in Chinese)
- [10] Livesley S J, Baudinette B, Glover D. Rainfall interception and stemflow by eucalypt street trees: The impacts of canopy density and bark type[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 192-197
- [11] 刘世荣, 温远光, 王兵, 周光益. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996
Liu S R, Wen Y G, Wang B, Zhou G Y. *Forest Ecosystem Hydrological Ecological Laws in China* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996 (in Chinese)
- [12] Inkiläinen E N M, McHale M R, Blank G B, James A L, Nikinmaa E. The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 199: 91-103
- [13] 范世香, 高雁, 程银才, 白清俊. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 200-204
Fan S X, Gao Y, Cheng Y C, Bai Q J. Rainfall-interception capability of forest canopy[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 200-204 (in Chinese)
- [14] 马惠, 张洪江, 王伟, 杜仕才, 李根平. 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 H, Zhang H J, Wang W, Du S C, Li G P. 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)
- [15] Xiao Q F, McHerson E G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest[J]. *Urban Ecosystems*, 2002, 6(4): 291-302
- [16] Kirnbauer M C, Baetz B W, Kenney W A. Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and underutilized urban land parcels[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(2013): 401-407
- [17] 郭胜男, 林萍, 吴荣, 马建武. 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 S N, Lin P, Wu R, Ma J W. 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)
- [18] 钱金平, 王仁德, 白洁, 张广英. 太行山区不同人工林林冠截留降水的比较研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 164-167
Qian J P, Wang R D, Bai J, Zhang G Y. Canopy rainfall interception of different planted forests in Taihang Mountainous Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(4): 164-167 (in Chinese)
- [19] 陈丽华, 张艺, 余新晓, 史宇, 黄枝英. 北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 423-431
Chen L H, Zhang Y, Yu X X, Shi Y, Huang Z Y. Characteristics and simulation on canopy interception of typical forest vegetation in Beijing west mountain area[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(3): 423-431 (in Chinese)
- [20] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 60-64
Dang H Z, Zhou Z F, Zhao Y S. Study on forest interception of *Picea crassifolia* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 60-64 (in Chinese)
- [21] 常学向, 赵爱芬, 王金叶, 常宗强, 金博文. 祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 274-280
Chang X X, Zhao A F, Wang J Y, Chang Z Q, Jin B W. Precipitation characteristic and interception of forest in Qilian Mountain[J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(3): 274-280 (in Chinese)
- [22] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 应用修正的Gash解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1125-1132
He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Application of revised Gash analytical model to simulate subalpine *Quercus aquifolioides* forest canopy interception in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1125-1132 (in Chinese)
- [23] 薛建辉, 郝奇林, 吴永波, 刘兴良. 3种亚高山森林群落林冠截留量及穿透雨量与降雨量的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 9-13
Xue J H, Hao Q L, Wu Y B, Liu X L. Relationship among canopy interception, throughfall and precipitation in three types of subalpine forest communities [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2008, 32(3): 9-13 (in Chinese)
- [24] 王冬云, 张卓文, 苏开君, 王光, 雷云飞, 林明磊, 张培, 钟庸. 广州流溪河流域毛竹林的水文生态效应[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(1): 37-41
Wang D Y, Zhang Z W, Su K J, Wang G, Lei Y F, Lin Ming L, Zhang P, Zhong Y. Hydrology of *Phyllostachys pubescens* in Liuxihe, Guangdong Province [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(1): 37-41 (in Chinese)
- [25] 王艳红, 宋维峰, 李财金. 不同森林类型林冠截留效应研究[J].

- 亚热带水土保持, 2008, 20(3): 5-10
- Wang Y H, Song W F, Li C J. Study on crown interception effect of different forest canopies [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2008, 20(3): 5-10 (in Chinese)
- [26] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939
- Shi Z J, Zhang NN, He C Q, Qiu Z J, Xu D P, Gao J X, Hu Z S. Eco-hydrological effect of the canopy, litter and soil of a eucalyptus plantation in South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1932-1939 (in Chinese)
- [27] 吴文强, 李萍, 孙向阳, 于鑫. 北京西山油松、栓皮栎及其混交林降雨分配特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(9): 26-29
- Wu W Q, Li P, Sun X Y, Yu X. Distribution traits of precipitation of *Pinus tabulaeformis*, *Quercus variabilis* and mixed forest of West Mountains in Beijing [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(9): 26-29 (in Chinese)
- [28] 张金池, 卢义山, 康立新. 苏北海堤防护林冠层截留降水特性研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1996, 20(1): 17-21
- Zhang J C, Lu Y S, Kang L X. Study on the interceptional characteristic of main shelter forest canopies on seawall in Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 1996, 20(1): 17-21 (in Chinese)
- [29] Xiao Q F, McPherson E G, Ustin S L, Grismer M E, Simpson J R. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(14): 763-784
- [30] Xiao Q F, McPherson E G. Rainfall interception of three trees in Oakland, California [J]. *Urban Ecosystems*, 2011, 14(4): 755-769
- [31] Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, Fereres E. Rainfall concentration under olive trees [J]. *Agriculture Water Management*, 2002, 55(1): 53-70
- [32] Asadian Y, Weiler M, Marsalek J, Schreier H. A new approach in measuring rainfall interception by urban trees in coastal British Columbia [J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2009, 44(1): 16-25
- [33] Escobar A G, Sosa E G, Chávez C V, Ramos E V, Salinas M R. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2/3/4): 532-541
- [34] 于璐. 草坪草降雨截留的生态水文效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
- Yu L. Eco-hydrological effects of rainfall interception for three turfgrasses [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013 (in Chinese)
- [35] 张莹, 毛小青, 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 陈桂琛, 彭杨伟. 草本与灌木植物茎叶降水截留作用研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(7): 95-96
- Zhang Y, Mao X Q, Hu X S, Li G R, Zhu H L, Chen G C, Peng Y W. Research on stem and leaf rainfall interception action of herb and shrub plants [J]. *Yellow River*, 2010, 32(7): 95-96 (in Chinese)
- [36] 代会平, 向佐湘, 郭君, 杜浩, 曾凡湘. 紫穗狼尾草和狗牙根茎叶水文生态效应比较[J]. 草业科学, 2009, 26(2): 107-113
- Dai H P, Xiang Z X, Guo J, Du H, Zeng F X. Comparative study on hydrological and ecological effects of stems and leave of wild *Pennisetum alopecuroides* and *Cynodon dactylon* [J]. *Practical Science*, 2009, 26(2): 107-113 (in Chinese)
- [37] 王安志, 刘建梅, 裴铁播, 金昌杰. 云杉截留降雨实验与模型[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 38-42
- Wang A Z, Liu J M, Pei T P, Jin C J. An experiment and model construction of rainfall interception by *Picea koraiensis* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 38-42 (in Chinese)
- [38] 陈引珍, 何凡, 张洪江, 温熙胜. 缙云山区影响林冠截留量因素的初步分析[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 69-72
- Chen Y Z, He F, Zhang H J, Wen X S. Preliminary analysis on factors influencing canopy interception in Jinyun Mountain [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3): 69-72 (in Chinese)
- [39] 徐小牛, 王勤, 平田永二. 亚热带常绿阔叶林的水文生态特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1570-1574
- Xu X N, Wang Q, Ping T Y E. Eco-hydrological characteristics of a subtropical evergreen broadleaved forest in Japan [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1570-1574 (in Chinese)
- [40] 郭雨华, 韩煜, 李嘉, 孙保平, 李永良. 大通退耕地植物群落植冠层截留性能和枯落物容水性性能研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 50-53
- Guo Y H, Han Y, Li J, Sun B P, Li Y L. Rainfall interception capability of canopy layer and water holding capability of litter of the plant community in returning farmland to forest project in Datong County [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 50-53 (in Chinese)
- [41] 胡建忠, 李文忠, 郑佳丽, 张春霞, 李雪萍. 祁连山南麓退耕地主要植物群落植冠层的截留性能[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 492-501
- Hu J Z, Li W Z, Zheng J L, Zhang C X, Li X P. Rainfall interception capability of canopy layer of main plant community in rehabilitation lands at southern foot of Qilian Mountain [J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(4): 492-501 (in Chinese)
- [42] 魏晓华, 周晓峰. 三种阔叶次生林的茎流研究[J]. 生态学报, 1989, 9(4): 325-329
- Wei X H, Zhou X F. A study on stemflow of three types of natural secondary forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(4): 325-329 (in Chinese)
- [43] Calder I R. Canopy processes: Implications for transpiration,

- interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J]. *Plant Ecology*, 2001, 153(1): 203-214
- [44] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 227-231
Wang G L, Liu G B. Effect of *Stipa bungeana* communities on soil infiltration in soil profile in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 227-231 (in Chinese)
- [45] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 188-190
Li X Z, Fan G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(3): 188-190 (in Chinese)
- [46] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 梁晶, 胡永红, 蔡云鹏, 郝冠军. 典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 85-90
Wu H B, Fang H L, Peng H L, Liang J, Hu Y H, Cai Y P, Hao G J. Soil physical properties analysis of the typical newly-established green belt of Chenshan Botanical Garden Shanghai [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 85-90 (in Chinese)
- [47] 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对砂质土壤饱和导水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 89-93
Sun R G, Wei W S, Wang D Y. Effect of straw-bentonite-PAM improved material on saturated hydraulic conductivity of sandy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 89-93 (in Chinese)
- [48] 魏俊岭, 金友前, 郜红建, 常江, 章力干. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014(8): 965-971
Wei J L, Jin Y Q, Gao H J, Chang J, Zhang L G. Effects of fertilization practices on infiltration in Shajiang black soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014(8): 965-971 (in Chinese)
- [49] CJ/T340—2011. 绿化种植土壤[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
CJ/T340—2011. Planting soil for greening[S]. Beijing: China Standards Press, 2002 (in Chinese)
- [50] Köstner B. Evaporation and transpiration from forests in central Europe—relevance of patch-level studies for spatial scaling[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2001, 76(1): 69-82
- [51] 曹云, 欧阳志云, 郑华, 黄志刚, 邢芳芳. 森林生态系统的水文调节功能及生态学机制研究进展[J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1360-1365
Cao Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Huang Z G, Xing F F. Hydrological adjusting function of forest ecosystems and ecological mechanism: A review [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1360-1365 (in Chinese)
- [52] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 邢先双, 赵玫. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1-5
Liu X, Zhang G C, Li X L, Xing X S, Zhao M. Characteristics of soil infiltration and water-holding of forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 1-5 (in Chinese)
- [53] 陈奇伯, 王克勤, 李艳梅, 王建英, 王平里, 达琼. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 67-70
Chen Q B, Wang K Q, Li Y M, Wang J Y, Wang L P, Da Q. Effect of different vegetation types on soil amelioration in dry-hot valley of Jinshajiang River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 67-70 (in Chinese)
- [54] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 35(5): 1535-1544
Li J X, He B H, Chen Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 35(5): 1535-1544 (in Chinese)
- [55] 林代杰, 郑子成, 张锡渊, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33-36
Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, Li Ting X, He S Q, Wen Y, Yu C B. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 33-36 (in Chinese)
- [56] 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(2): 363-368
Yang J L, Zhang G L, Yuan D G. Characteristics of water infiltration in urban soil of Nanjing City[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(2): 363-368 (in Chinese)
- [57] 陈浩, 杨亚莉. 轮胎压实对土壤水分入渗性能的影响[J]. *农机化研究*, 2012, 34(2): 153-156
Chen H, Yang Y L. Effect of wheel traffic induced soil compaction on soil water infiltration [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(2): 153-156 (in Chinese)
- [58] 聂发辉, 李田, 姚海峰. 上海市城市绿地土壤特性及对雨洪削减效应的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008(2): 49-52
Nie F H, Li T, Yao H F. Characteristics of soil samples of live Shanghai urban green areas and their effects on reduction of storm water runoff[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008(2): 49-52 (in Chinese)
- [59] 李俊奇, 车伍, 池莲, 刘松. 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
Li J Q, Che W, Chi L, Liu S. Critical parameters and influencing factors analysis on low elevation greenbelt in residential area[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30(9): 41-46 (in Chinese)

- [60] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,李娜,陆永玲.坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(4):114-116
Wei X G, Yan C R, Wei Y X, Li N, Lu Y L. Influence of slope gradient and rainfall intensity on infiltration in sloping farmland [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(4): 114-116 (in Chinese)
- [61] 黄俊,吴普特,赵西宁.坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J].农业工程学报,2010,26(10):29-37
Huang J, Wu P T, Zhao X N. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):29-37 (in Chinese)
- [62] 马浩,尹忠东,许智超.川中丘陵紫色土区土壤水分入渗性能研究[J].西北林学院学报,2011,26(3):68-72
Ma H, Yin Z D, Xu Z C. Capability of soil water infiltration of purple soil in hilly area of central Sichuan [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(3): 68-72 (in Chinese)
- [63] 郝春红,潘英华,陈曦,崔素芳.坡度、雨强对壤土入渗特征的影响研究[J].土壤通报,2011,42(5):1040-1044
Hao C H, Pan Y H, Chen X, Cui S F. Influence of slope and rainfall intensity on infiltration characteristics of loess soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1040-1044 (in Chinese)
- [64] 任树梅,周纪明,刘红,孟光辉.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
Ren S M, Zhou J M, Liu H, Meng G H. Analyses and calculation of increasing infiltration of rainfall in the soil by using hollow grassland [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(2): 50-54 (in Chinese)
- [65] 张文静,丁跃元,张书函.混凝土透水砖透水持久性的研究[J].新型建筑材料,2006(6):22-24
Zhang W J, Ding Y Y, Zhang S H. Research on persistence of permeable concrete permeable [J]. *New Building Materials*, 2006(6):22-24 (in Chinese)
- [66] 王哲,谢杰,谢强,赖立,吴德意.透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(S2):138-143
Wang Z, Xie J, Xie W, Lai L, Wu D Y. Advances on the research of the detention and purification of urban stormwater runoff by permeable paving [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(S2):138-143 (in Chinese)
- [67] 张巨松,张添华,赵雅静,黄维东,张国华.透水路面设计的几个问题[J].北方交通,2007(1):1-4
Zhang J S, Zhang T H, Zhao Y J, Huang W D, Zhang G H. Some problems about pervious pavement design [J]. *Northern Communications*, 2007(1):1-4 (in Chinese)
- [68] 张书函,陈建刚,赵飞,龚建安.透水砖铺装地面的技术指标和设计方法分析[J].中国给水排水,2011(22):15-17
Zhang S H, Chen J G, Zhao F, Gong Y A. Analysis on technical indexes and design methods of permeable brick pavement [J]. *China Water & Wastewater*, 2011(22):15-17 (in Chinese)
- [69] 王波,王焱,高建明.透水性铺装的透水体系[J].建筑技术,2004,35(7):531-532
Wang B, Wang Y, Gao J M. Water penetration system for porous pavement [J]. *Architecture Technology*, 2004, 35(7): 531-532 (in Chinese)
- [70] 侯立柱,冯绍元,韩志文,张书函,丁跃元.透水砖铺装地面垫层结构对城市雨水入渗过程的影响[J].中国农业大学学报,2006,11(4):83-88
Hou L Z, Feng S Y, Han Z W, Zhang S H, Ding Y Y. Experimental study on impacts of infiltration treated with porous pavement [J]. *Journal of China Agriculture University*, 2006, 11(4): 83-88 (in Chinese)
- [71] 朱春阳,李芳,李树华.园林道路不同铺装结构对雨水入渗过程的影响[J].中国园林,2009(3):91-97
Zhu C Y, Li F, Li S H. Research on the influence of different pavement structures in landscape path on rainfall infiltration process [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2009(3): 91-97 (in Chinese)

责任编辑:苏燕