

城市雨水管理

过滤层填料对南方地区生物滞留设施建设的影响

李 澄, 谭晓莲

(江苏龙腾工程设计股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘 要: 通过对土壤渗透性差、地下水位高的南方典型地区已建生物滞留设施的现场观测及数据模拟, 探讨生物滞留设施过滤层填料对年径流总量控制率、滞留层利用率、植物生长、周边景观衔接等的影响。结果表明, 在年径流总量控制率为 85% 的条件下, “砂拌合” 填料和“高沙土” 填料生物滞留设施所需建设面积分别占汇水面积的 3.6%、5.3%; 用于年径流总量控制率计算的 20 cm 深度滞留层, 在全年 123 场降雨中, 两种填料分别仅产生 3 次和 15 次滞留, 溢流量仅占全年降雨量的 0.006% 和 1.7%, 滞留层利用率极低; 此外, 两种填料的有机质含量分别为 1% ~ 3%、0.75% ~ 1.05%, 但“砂拌合” 填料的植物成活率仅为 30% ~ 40%, 而“高沙土” 填料的植物成活率高、长势较好。因此, 填料选择与滞留层深度设计相关, 但更应考虑实际利用率及景观衔接效果, 建议滞留层深度调整至 5 ~ 10 cm; 填料选择除关注渗透速率、有机质含量外, 还应考虑保水性和保肥性。

关键词: 海绵城市; 生物滞留设施; 过滤层; 填料; 滞留层

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0128-06

Influence of Filter Media on Construction of Bioretention Facilities in Typical Regions of Southern China

LI Cheng, TAN Xiao-lian

(Jiangsu Long-leaping Engineering Design Co. Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Through the field observation and data simulation of the built-up bioretention facilities in typical regions of southern China with poor soil penetration and high groundwater level, the effects of filter media on volume capture ratio of annual rainfall, retention layer utilization rate, plants growth and surrounding landscape connection were discussed. The results showed that the construction area of bioretention facilities with sand mixing media and sandy soil media accounted for 3.6% and 5.3% of the catchment area respectively when the volume capture ratio of annual rainfall was 85%. However, the utilization rate of retention layer was extremely low when these two filter media used the retention layer depth of 20 cm to calculate the volume capture ratio of annual rainfall. They generated only 3 times and 15 times and overflowed 0.006% and 1.7% of annual rainfall respectively in the 123 rainfall events of one year. Additionally, organic contents of the two filler media were 1% - 3% and 0.75% - 1.05% respectively. However, the plants survival rate of the sand mixing media was only 30% - 40%, while the plants survival rate and growth of the sandy soil media were higher. Therefore, the selection of the filter media was related to the design of the retention layer depth, and the actual utilization rate and landscape connection effect should also be considered. It was recommended to adjust the depth of the retention layer to 5 - 10 cm. During the selection of filter media, it should be paid attention to not only the permeation

rate and organic content, but also the water retention and fertilizer retention.

Key words: sponge city; bioretention facility; filter layer; media; retention layer

生物滞留设施由于其高效的雨水自然净化与处理特性,已成为应用最广泛的低影响开发技术之一^[1],其通过植物、土壤、填料和微生物等的物理、化学和生物综合作用,模拟自然水文过程,阻断或减缓地表径流流动,净化雨水水质,并使雨水成为设施景观的一部分^[2-3]。生物滞留设施中的过滤层(换填土层)填料尤为重要,其是植物生长的重要载体,更是雨水径流控制、污染物削减效率的关键要素,填料的渗透速率、持水性等物化性能直接关系到生物滞留设施的表现特征,如积水时间、植物生长效果等,最终影响生物滞留设施的径流控制、污染物去除等效能。目前,国内外学者对生物滞留设施填料已有一些研究,国外学者主要针对填料的去污、渗透、蓄水等功能进行相关改良研究^[4],国内学者则主要进行筛选及改良去污填料的相关研究^[5-6];但目前大部分研究处于试验阶段,对于实际建设、运行过程中填料发挥的效用研究尚处于起步阶段。

昆山市是典型的土壤渗透性差、地下水位高的南方地区,在江苏省海绵城市建设试点工作的推动下,要求全市域推进海绵城市建设。生物滞留设施作为海绵城市建设中重要的源头绿色技术措施,广泛运用于昆山市各类型用地的新建、改建、扩建项目。由于该地区的土壤和地下水特性,生物滞留设

施在建设过程中均需进行原土换填,但由于填料选择不当,出现了景观效果欠佳、径流控制不畅等诸多问题。因此,笔者在实践的基础上,通过对年径流总量控制率、滞留层利用率、植物生长、周边景观衔接等相关因素的研究,对生物滞留设施的填料性能进行了探讨。

1 本底条件对生物滞留设施建设的影响

昆山市位于太湖平原水网地区,表层土壤含水层岩性以粉质黏土和淤泥质粉质黏土为主,垂直和横向渗透系数均小于 1×10^{-7} m/s,小时渗透系数小于0.36 mm/h,因此,可以通过原生土壤渗透的雨水极少。根据昆山市潜水含水层和微承压含水层分析,浅层地下水埋深为0.5~1.5 m,地下水埋深总体较浅,雨水基本没有下渗空间。

生物滞留设施以雨水入渗、过滤、滞留为主要功能,直接利用原生土壤作为过滤层,会因渗透速率低而导致表面积水时间过长,不利于对年径流总量的控制,影响植物生长,因此过滤层土壤(种植土)需要进行换填。另外,由于地下水位高,为了防止地下水侵入,需要设置防渗层;并且,高地下水位导致下渗空间不足,建设生物滞留设施时均需要设置透水盲管。针对昆山市的本底条件,生物滞留设施的结构如图1所示。

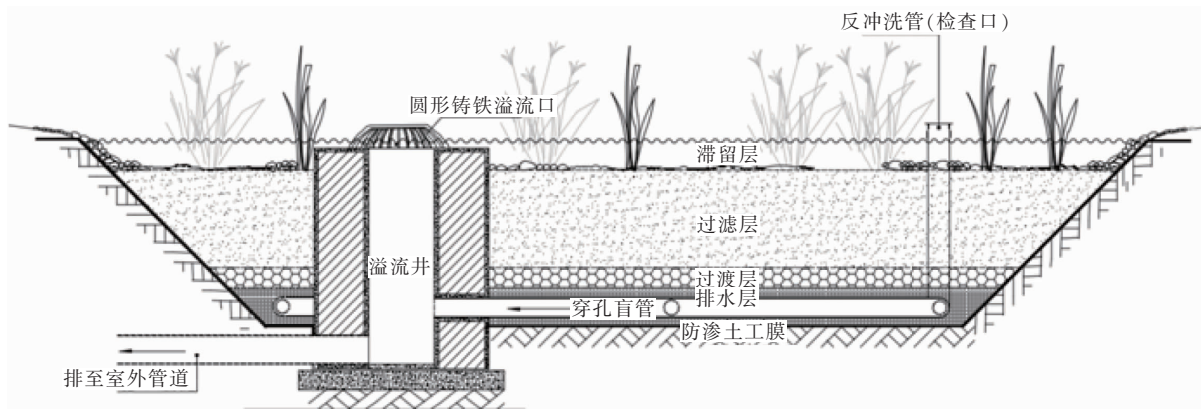


图1 在土壤渗透性差、地下水位高的地区生物滞留设施的结构

Fig.1 Structure of bioretention system in the area with poor soil penetration and high groundwater level

2 现有填料的基本情况

在江苏省海绵试点开展前,昆山与澳大利亚已经建立了水敏性城市的相关合作,在少量项目中进

行了建设生物滞留设施的尝试,但填料以现场拌合填料为主;试点开展后,项目数量激增,需要规范填料配比、施工,因此在澳大利亚填料配比的基础上进

行了本土化尝试,研制了以多种砂石进行配比的“砂拌合”填料,以满足渗透系数以及长期运行不板结为主,但由于植物长势差、市场接受度低,部分项目就近取材,利用附近城市的“高沙土”作为填料。

现场拌合填料配比为原土:粗砂:中砂 $\approx 1:1.5:6.95$,细木屑掺杂比例为1%(质量分数),有机质含量 $>3\%$,渗透系数为 $100\sim 200\text{ mm/h}$,其优势在于取材方便、初始渗透系数高,但存在现场拌合比例难以控制,后期易出现填料分层、土壤板结等问题;“砂拌合”填料以细、中、粗砂为主并掺和少量营养土,有机质含量为 $1\%\sim 3\%$,渗透系数也在 $100\sim 200\text{ mm/h}$ 之间,其优势在于渗透系数高、统一的填料生产易进行施工控制,但是也存在植物存活率不高、夏季温度高、景观效果差等问题;“高沙土”填料采用周边城市土壤,有机质含量为 $0.75\%\sim 1.05\%$,渗透系数为 $30\sim 80\text{ mm/h}$,其优势在于植物生长优良、渗透性良好且层级控制好,但是存在原材料需要从外地获取的问题。

3 填料对年径流总量控制率计算的影响

3.1 单位面积控制容积

生物滞留设施属于渗透功能设施,其规模计算采用《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中的方法:

$$V = V_s + W_p \quad (1)$$

式中: V 为渗透设施进水量(单位面积控制容积), m^3 ; V_s 为渗透设施的有效调蓄容积, m^3 ; W_p 为渗透量, m^3 。

① 有效调蓄容积 V_s

有效调蓄容积包括设施顶部和结构内部蓄水空间的容积,昆山市生物滞留设施常规的滞留层深度为 20 cm ,过滤层填料厚度正常为 50 cm ,过渡层采用 $0.6\sim 2.36\text{ mm}$ 的中粗砂、厚度为 10 cm ,排水层采用粒径为 $31.5\sim 50\text{ mm}$ 的砾石、厚度为 $20\sim 25\text{ cm}$,其内部蓄水空间可按照各层介质给水度(即孔隙率-持水率)计算,“砂拌合”填料和“高沙土”填料的给水度分别为 23% 和 13% ^[6],因此调蓄容积分别为 0.39 、 $0.34\text{ m}^3/\text{m}^2$,但由于不能保障每次下雨前重力水均能排空,有效调蓄容积按照 75% 折减,折减后的调蓄容积分别为 0.29 、 $0.25\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

② 渗透量 W_p

渗透量为每场降雨 2 h 内对应的人渗量,即:

$$W_p = KJA_s t_s \quad (2)$$

式中: K 为土壤(原土)渗透系数; J 为水力坡降,一般可取 $J=1$; A_s 为有效渗透面积; t_s 为渗透时间,指降雨过程中设施的渗透历时,一般可取 2 h 。

由于渗透系数及布置盲管、防渗设施等原因, K 为过滤层渗透系数, A_s 仅考虑生物滞留设施平面所对应的渗透面积,不考虑侧向渗透量,该计算方法已在《海绵城市建设典型案例》^[7]中得到认可。因此,根据计算,“砂拌合”填料、“高沙土”填料所对应的渗透量分别为 0.2 、 $0.06\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。通过上述计算目前主要使用的两种换填介质的单位面积控制容积,分别为 0.49 、 $0.31\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

3.2 生物滞留设施与场地对应的面积比

假设单一生物滞留设施对应的汇水面积 A 为 $1\,000\text{ m}^2$,径流系数为 0.65 ,年径流总量控制率为 85% ,对应的设计降雨强度 H 为 27.5 mm ,则生物滞留设施的面积 $S = (A \times \Psi \times H) / 1\,000V$,据此计算得到“砂拌合”填料、“高沙土”填料生物滞留设施的面积分别为 36 、 53 m^2 ,分别占汇水面积的比例为 3.6% 、 5.3% ,因此提高过滤层含砂量有助于提高过滤层的给水度及渗透系数,从而降低生物滞留设施在场地中的占比,减少对绿化的影响及工程投资。但一味追求渗透系数的提高而增加填料的含砂量,会导致生物滞留设施的植物长势差、景观效果欠佳。

4 渗透性对滞留层设计深度的影响

从3.2节的分析可以看出,滞留层深度是生物滞留设施单位面积调蓄容积的主要贡献值之一,滞留层深度越大,单位面积调蓄容积就越大,对应的年径流总量控制率就越高。但在实际建设和运行过程中,计算年径流总量控制率时采用的 20 cm 常规滞留层深度,在实际降雨过程中却鲜有产生,因此,滞留层深度虽然参与了计算,但其实际产生和利用情况与理想的计算方法并不匹配。

4.1 滞留层对设计降雨量的作用

以2017年5月21日的降雨(27.6 mm)为例分析滞留层(以饱和渗透系数计)的产生情况,按照昆山市的设计降雨量与年径流总量控制率对应曲线, 27.6 mm 的日降雨量相当于 80% 的年径流总量控制率,因此以2017年5月21日的降雨量以及降雨均匀性基本可表征 80% 年径流总量控制率对应的设计降雨数据。如图2所示,“砂拌合”填料并未产生任何滞留层,“高沙土”填料由于渗透系数较低仅产生不足 3 cm 的滞留深度。因此,用于年径流总量

控制率计算的滞留层深度,在实际降雨过程中并不能完全发挥作用,将滞留层对应的单位面积控制容积作为有效调蓄容积有待商榷。

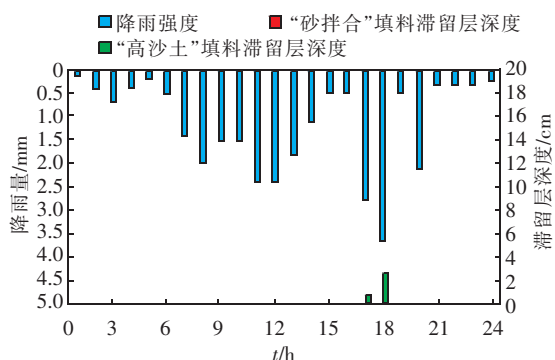


图2 在27.6 mm实际降雨条件下两种填料的滞留层产生情况

Fig. 2 Occurrence of retention depth for two different filter media during a rainfall event with 27.6 mm

4.2 滞留层对设计降雨的作用

按照昆山市暴雨强度公式,在1年一遇2 h设计降雨条件(52.4 mm)下,在未达到降雨峰值时两种填料均产生了溢流(见图3),此时生物滞留设施的出流量等于渗透排出量+溢流量,基本等于降雨汇流量,生物滞留设施不具备削峰作用。因此,对于1年一遇甚至更高重现期下的降雨,生物滞留设施并不能缓解下游雨水管道的压力。

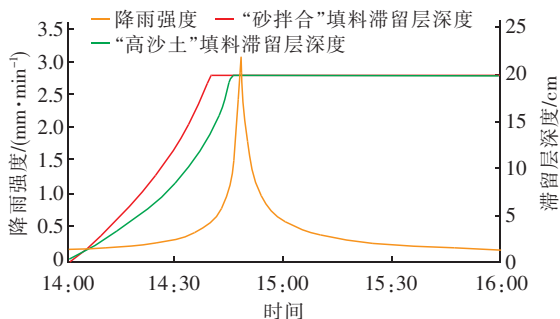


图3 1年一遇设计暴雨强度下滞留层产生情况

Fig. 3 Occurrence of retention depth under one-year design storm intensity

常规采用的20 cm滞留层对设计降雨强度下的径流没有峰值削减作用,且年径流总量控制率所对应的中小雨量并不能产生滞留层,因此,土壤渗透性差、地下水位高的地区的生物滞留设施应以控制径流污染物为目标。但随着降雨量的累积,产生溢流时的后期降雨并无显著的污染特性,并不需要对后期的降雨进行控制。

通过进一步推算,生物滞留设施在饱和状态下,

对于20 cm的滞留层深度,渗透系数为100 mm/h的“砂拌合”填料,产生滞留层时降雨强度必须达到6.2 mm/h,溢流量为16.2 mm/h;渗透系数为30 mm/h的“高沙土”填料,产生滞留层时降雨强度必须达到2.3 mm/h,溢流量为17.3 mm/h;两种填料的生物滞留设施产生20 cm滞留层时,均已经远超过了初期雨水污染所对应的4~8 mm降雨量。

4.3 产生滞留层并溢流的实际降雨分析

由于目前昆山采用的自动流量监测设备检出限基本高于生物滞留设施出流量,因此多通过雨季进行人工观测测量、取样的方式,对实际产生滞留层并溢流的降雨通过现有数据结合现场观察进行分析。

2017年9月23日20点至25日20点的48 h内实际降雨量达139.7 mm,单日降雨量均达到了暴雨等级(见图4),在现场观测中生物滞留设施出现滞留层并产生了溢流。因此,以其作为降雨基础数据分析滞留设施内部蓄水空间、滞留层厚度、渗透系数变化,模拟降雨过程中降雨量、径流量、渗透系数、滞留层、溢流量之间的关系,这不仅具有代表性,更可以与实际观测情况相对应,具体见图5~8。

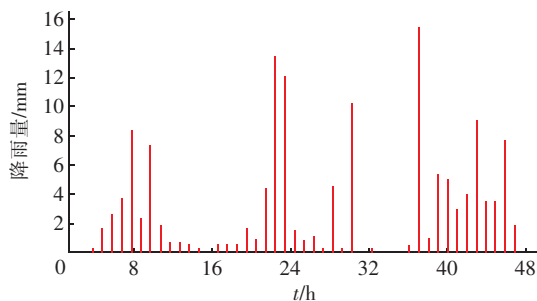


图4 48 h的降雨量分布

Fig. 4 48 h rainfall distribution

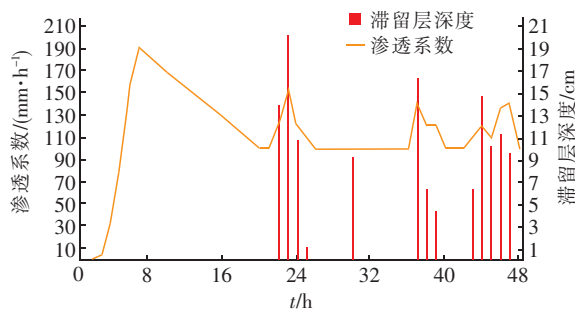


图5 “砂拌合”填料生物滞留设施的渗透系数和滞留层深度变化

Fig. 5 Variation of hydraulic conductivity and retention depth in the bioretention system filled with sand mixing media

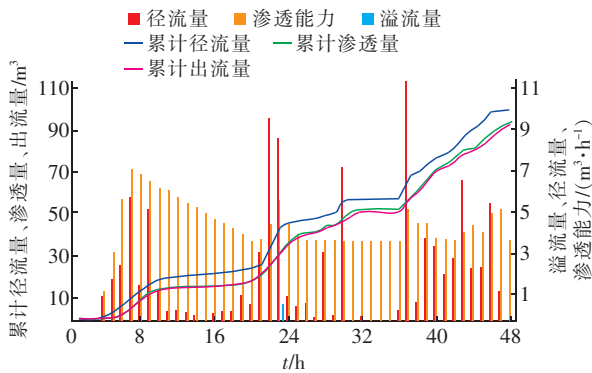


图6 “砂拌合”填料生物滞留设施径流量、渗透量、溢流量的关系

Fig. 6 Relationship among runoff volume, infiltration volume and overflow volume in the bioretention systems filled with sand mixing media

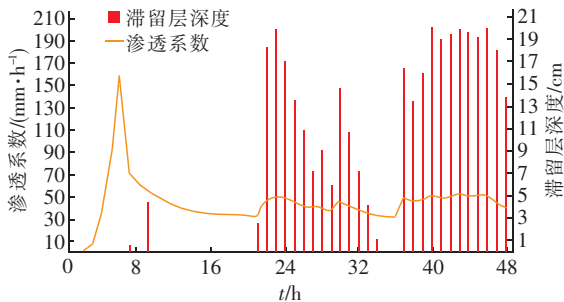


图7 “高沙土”填料生物滞留设施的渗透系数和滞留层深度变化

Fig. 7 Variation of hydraulic conductivity and retention depth in the bioretention system filled with sandy soil media

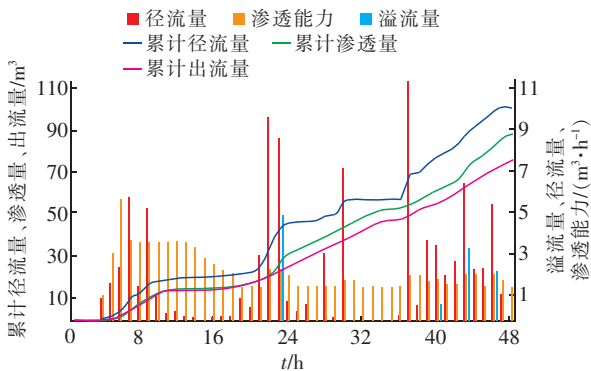


图8 “高沙土”填料生物滞留设施径流量、渗透量、溢流量的关系

Fig. 8 Relationship among runoff volume, infiltration volume and overflow volume in the bioretention systems filled with sandy soil media

对比图5、6与图7、8可以看出,“砂拌合”填料仅在连续2 h降雨量大于10 mm的情况下产生1次

溢流,而“高沙土”填料除了上述时段外在降雨集中的后段也产生了溢流,共溢流4次,溢流的产生与设施内部孔隙是否饱和、渗透系数、降雨强度、滞留层深度等均有很高的相关度,渗透速率较低时溢流频次更高。在这次降雨中,虽然出现了雨水溢流,但由于后期的雨水径流污染负荷较低,通过增加滞留层深度控制径流量的方式并不能显著提高整场降雨的污染物去除效率。

分析2017年昆山市的降雨数据,全年降雨场次共123场,降雨量达到1 026.6 mm,利用“砂拌合”填料能产生滞留层的仅3场,场次占比为2.4%,滞留层利用率极低,产生溢流的仅2场,溢流量占全年降雨量的0.006%;利用“高沙土”填料能产生滞留层的有15场,场次占比为12.2%,产生溢流的仅8场,溢流量占全年降雨量的1.7%。

4.4 滞留层设置方式

通过上述分析可知,生物滞留设施的滞留层虽然作为年径流总量控制率计算的重要因素,但在大部分降雨中并不能有效发挥作用,并且在一定设计降雨重现期下生物滞留设施也不能有效发挥错峰功能。因此,在土壤渗透性差、地下水位高的地区,生物滞留设施应以控制污染物为主要目标,增加滞留层深度对削减径流污染并没有显著作用,并且增加滞留层深度会造成生物滞留设施过深而与周边景观衔接困难。由于地表径流初期雨水污染仅集中在前4~8 mm,可以根据径流污染物去除的需要设置一定的滞留层深度,甚至可以不设置滞留层,但考虑到雨水的汇入及均匀布置,建议滞留层深度可以削减至5~10 cm。

5 填料性能对植物生长的影响

5.1 有机质含量

对比“砂拌合”填料(有机物含量为1%~3%)与“高沙土”填料(有机物含量为0.75%~1.05%),高沙土的有机质含量更低,但实际的植物长势更好。通过分析,填料的有机质含量仅仅是影响植物生长的因素之一,而填料的保水性能和保肥性能对植物的生长起着更为关键的作用。

5.2 耐旱性

在2017年7月23日中午(气温为39℃)对昆山市海绵城市建设示范区典型下垫面的温度进行测量,沥青路面、石材铺装、裸土、略枯草皮、翠绿草皮、“砂拌合”填料、“高沙土”填料的表层温度分别为

65.3、57.1、50.8、41.9、40.4、60.6、47.6℃。可见,“砂拌合”填料由于以砂为主,比热容较大,并没有起到“缓解热岛效应”的作用,反而成为重要的反射源,并且由于高温对植物的成活率有极大影响,经过高温天气之后,植物成活率仅为30%~40%。

5.3 耐淹性

根据4.3节的分析,生物滞留设施的滞留层产生频次极低,即便产生滞留层,“砂拌合”填料和“高沙土”填料分别会在2~3h和8~12h内排空,因此绝大部分植物并不需要考虑耐淹性能。

6 结论

① 在土壤渗透性差、地下水位高的南方典型地区,若以生物滞留设施作为海绵城市建设的主要技术措施,应当重新审视生物滞留设施的滞留层深度对年径流总量控制率贡献的计算方法,更多地从控制径流污染物的角度出发优化设施面积的确定方法,滞留层深度应以削减径流污染物为控制要素,可以减少至5~10cm。

② 过滤层填料的选择应该建立在渗透系数、保水性能、保肥性能、植物生长试验的基础上,且不应该局限在实验室小试,应当与现场实际情况紧密结合。在找到可靠、规范的填料之前,可以利用城市内或周边渗透性能较好的种植土,如沙壤土,稍加改良作为过滤层填料。

③ 在植物的选择上,对于种植土改良填料,如“高沙土”填料,由于保水性和保肥性较好,并不需要选择特别的植物类型,并不需要与普通的绿化景观种植有太大区别;但是对于以砂基为主的填料,如“砂拌合”填料,由于砂含量高,因此应选择生命力强、耐干旱植物,同时考虑到景观效果应选择常绿、高大的植物,种植时应避免露土,以防止夏季阳光直射造成填料温度过高而对植物成活率产生影响。

参考文献:

- [1] 车伍,赵杨,李俊奇,等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水,2015,31(8):1-5.
Che Wu, Zhao Yang, Li Junqi, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: basic concepts and comprehensive goals [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1-5 (in Chinese).
- [2] 刘家琳,张建林. 雨水径流控制的景观设计途径及在

公园绿地中的应用分析[J]. 西南大学学报:自然科学版,2015,37(11):183-189.

Liu Jialin, Zhang Jianlin. Landscape design approach to stormwater runoff control and a case study of urban park [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2015, 37(11): 183-189 (in Chinese).

- [3] 李平,王晟. 生物滞留技术控制城市面源污染的作用与机理[J]. 环境工程,2014,32(3):75-79.

Li Ping, Wang Sheng. Effect and mechanism of bioretention technology for urban non-point source pollutions control [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 75-79 (in Chinese).

- [4] Carpenter D D, Hallam L. Influence of planting soil mix characteristics on bioretention cell design and performance [J]. J Hydrol Eng, 2010, 15(6): 404-416.

- [5] 胡爱兵,李子富,张书函,等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流[J]. 中国给水排水,2012,28(13):75-79.

Hu Aibing, Li Zifu, Zhang Shuhan, et al. Simulated bioretention pond for improving quality of stormwater runoff on urban traffic road [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 75-79 (in Chinese).

- [6] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

Huang Changyong. Soil Science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).

- [7] 章林伟. 海绵城市建设典型案例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

Zhang Linwei. Sponge City Case Studies [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).



作者简介:李澄(1986-),男,江苏南通人,硕士,高级工程师,主要从事市政工程专业规划设计、海绵城市建设等方面的工作。

E-mail: lichengseu@126.com

收稿日期:2019-01-13