【专题：海绵城市 / Sponge City】

·特邀专题策划：刘建，任心欣·

基于实地监测的新型粒状海绵介质土的性能研究

蔡业钊¹, 刘东煊¹, 刘建², 佘年^{1,2}, 龚小强²

1) 珠海深圳清华大学研究院创新中心智慧海绵城市建设规划研究所, 广东珠海 519080;

2) 深圳大学建设工程生态技术研究所, 广东深圳 518060

摘要: 海绵城市设施种植层的介质土对径流调控、污染物去除和植物生长有重要影响. 在实际降雨情形下, 对新型粒状海绵城市介质土进行径流控制与污染物去除效果进行实地监测分析. 结果表明: 新型粒状海绵城市介质土的平均渗透率最低为 500 mm/h, 且污染物去除效果良好, 固体悬浮物去除率均达 80% 以上, 主要出水水质指标(总磷、总氮、氨氮和化学需氧量)符合地表水环境质量Ⅲ类水标准. 常绿灌木、落叶灌木和宿根地被等中国华南地区本土植物在新型介质土中均生长良好. 新型粒状海绵城市介质土的经济成本核算需因地制宜, 总体成本是传统介质土的 1/3 ~ 3/4. 与传统海绵介质土相比, 新型粒状海绵城市介质土成本低廉, 具有更好的渗透性和污染物去除效果, 且后期运行维护便利, 可广泛应用于没有重金属污染的地区, 有望在一定程度上取代传统海绵城市介质土.

关键词: 海绵城市; 生态城市; 低影响开发; 径流; 渗透率; 生物滞留设施; 高位花坛; 介质土

中图分类号: TV512

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.01045

Performance of innovative granular sponge city growing media based on field monitoring

CAI Yezhao¹, LIU Dongxuan¹, LIU Jian², SHE Nian^{1,2}, and GONG Xiaoqiang²

1) Institute of Smart Sponge City Construction and Planning, Tsinghua Innovation Center in Zhuhai,

Zhuhai 519080, Guangdong Province, P. R. China

2) Ecological Technology Institute of Construction Engineering, Shenzhen University,

Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: The growing media in the planting layer of sponge city facilities has an important influence on stormwater runoff control, pollutant removal and plant growth. This study consists of field tests that include the continuous monitoring to evaluate the performance of runoff control and pollutant removal of the innovative granular sponge city growing media during wet season. The results show that the lowest average permeability of innovative granular sponge city growing media is 500 mm·h⁻¹, and the pollutant removal effect is good, the removal rate of solid suspended solids is more than 80%, and the main effluent quality indexes (total nitrogen, TN; total phosphorus, TP; ammonia, NH₃-N; chemical oxygen demand, COD) sampled from the outflow of the testing bioretention cells show that the water quality of discharged runoff meets the Class-Ⅲ indices of the Environmental quality standards for surface water (GB 3838—2002). Combination of local landscape plants such as evergreen shrubs, deciduous

Received: 2020-09-02; Accepted: 2020-12-01

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFB2100901)

Corresponding author: Professor LIU Jian. E-mail: liujian@szu.edu.cn

Citation: CAI Yezhao, LIU Dongxuan, LIU Jian, et al. Performance of innovative granular sponge city growing media based on field monitoring [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 45-53. (in Chinese)

shrubs, perennial ground cover and other native plants in South China all grow well during the field tests. The overall life-cycle cost of this new type of growing media also needs to be further verified by different projects in different climate regions, generally it is 1/3-3/4 of that of traditional media. In summary, compared with the traditional sponge city media, the innovative granular sponge city growing media has better permeability and pollutant removal effect, low cost, and convenient operation and maintenance in the later stage. It can be widely applied in areas without heavy metal pollution, and is expected to replace the traditional media to a certain extent.

Key words: sponge city; sustainable city; low impact development; runoff; infiltration rate; bioretention cell; bioretention parterre; growing media

生物滞留设施指在地势相对较低的区域,通过植物、土壤和微生物系统可蓄渗、净化径流雨水的设施,是海绵城市建设中最典型的“细胞体”,因其兼具良好的水量控制、水质处理和景观功能,在海绵城市建设中得到广泛的应用.海绵城市介质土应用于生物滞留设施的种植层,是生物滞留设施诸多功能的核心.目前,中国对这类生物滞留设施的种植层生长基质还缺乏深入研究,相关的技术标准和规程多是参考西方发达国家的,缺乏适应当地气候条件特征的标准和规程,使得海绵城市介质土的造价太高,难以推广,或由于设计施工缺乏标准流程,导致竣工后设施的渗透性远低于预期,成为蚊蝇的滋生地.因此,有必要研发出一种适用于大多数地域气候条件的生物滞留设施介质土,深化中国关于生物滞留设施海绵城市介质土的研究,为海绵城市设计和施工提供稳定可靠的基础资料.

生物滞留系统是否具有长期稳定的渗透性和污染净化能力,是评价其设施有效性的最重要因素.另外,生长介质的生产、运行和维护成本也是重要的考虑因素.一般来说,传统海绵介质土渗透性约为 50 ~ 150 mm/h,一般由 50% ~ 60% (体积分数)的砂和 40% ~ 50% (体积分数)的壤土/壤质砂土/砂质壤土组成^[1],介质中黏土体积分数应最小化,最好在 5% ~ 8% 以内^[2].但上述介质土配比由于缺乏有机质,很难满足景观设计的要求.考虑到植物生长的需要,美国华盛顿州的生物滞留介质由 60% (体积分数)砂和 40% (体积分数)的腐植土混合而成,介质土中的黏粒小于 5% (体积分数)^[3].然而,2012 年,美国荷瑞然环境咨询公司在华盛顿州雷蒙德市的 6 个生物滞留设施监测中,发现该类生长介质释放出总磷(total phosphorus, TP)、铜(Cu)和锌(Zn),对受纳水体中的三文鱼造成威胁^[4].以腐植土为机质的生长介质出现营养物质浸出现象,特别是在植物进入生长稳定期之前,已有多个研究团队发现存在 TP 和重金属的浸出问题^[5-6].防止营养物

从介质中浸出的方法之一是替换腐植土.比较典型的研究是由华盛顿州低影响研发中心和西雅图大学共同开发的生长介质,其中效果最佳、且性价比合适的介质是由砂、椰糠、生物炭和种植土组成的^[7].另外,以铝化合物为基础的介质 TP 去除效果也较好^[8-10].

目前,由于国内对海绵城市介质土的研究处于刚刚起步阶段,远跟不上我国海绵城市建设的速度,造成介质土的使用几乎都是参照国外的成果.因此,本研究探索一种能最大程度上克服传统海绵介质土缺点,且成本低廉的新型粒状海绵介质土.相对基于砂和腐植土混合而成的传统介质土,新型粒状海绵介质土呈颗粒状,没有额外添加砂或腐植土,具有较大的孔隙率和较好的渗透性,经过多次改良,调整粒径比例及附加填充物,优化了对污染物的去除效果.该新型粒状海绵介质土可通过持续的优化改良,根据实际建设需求不断进行性能调整,有望大幅度降低海绵城市建设过程中海绵介质土的成本,并形成生产标准,使之能够进一步地推广应用.

1 主要指标及研究手段

1.1 渗透性

根据生物滞留设施的施工要求,对于渗透性较差的土壤,应该以介质土换填,以改良土壤的渗透性.实践中,生物滞留设施介质土的渗透性需要统一的考核指标和方式.介质土的厚度不但影响雨水的下渗速度和存积厚度,而且也影响水压分布.另外,生物滞留设施的出水口高度、环境温度、水饱和程度及压实程度等在一定程度上也影响下渗速度,因此,对介质土的渗透性研究,应排除上述影响因素,以直接研究不同配方本身的透水性能为目的.① 根据相关渗透性研究,设置土柱实验,通过测定在固定柱管水流的速度测定介质土的渗透速

度. 为排除干扰因素, 实验前通常需要设定统一的柱管口径、介质土厚度、加水深度及管柱内介质土的饱和程度等, 从而得出基于统一实验条件的渗透率. ② 通过土壤渗透检测仪进行实地测试, 这也是本研究集中探讨的方式. 由于土壤渗透检测仪是根据达西定律设计的, 所以在实验过程中, 不需要统一实验条件, 即可实际检测一种介质土的相关渗透数据, 代入达西定律公式, 即可获得排除干扰因素基于介质本身的渗透性指标.

1.2 污染物去除

化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、总悬浮固体 (suspended solids, SS)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮 (total nitrogen, TN)、TP 和酸碱度 (pH 值) 是衡量水质的重要指标. 根据生物滞留设施的设计要求, 污染的雨水在通过介质土层处理后, 能够实现上述指标的削减和优化就是介质土的作用所在. 其中, 在进水污染指标为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》定义的 V 类水或接近 V 类水的情况下, 如果出水能够达到 III 类水指标, 说明介质土的净化作用良好. 在进水污染物浓度较高的情况下, 通过比较出水污染物浓度消减量与进水污染物浓度的比值来描述介质土对水质的净化作用, 比值越大, 消污能力越强. 其中, 因为磷的含量是藻华最重要的限制因子, TP 质量浓度是一个非常重要的指标; 其次是悬浮物, 因为大量的污染物会附着在悬浮物上. 悬浮物分为 SS 和总悬浮固体 (total suspended solids, TSS). 其中, TSS 包含溶解的盐类, SS 不包括溶解的盐类. 本研究所采用的数据和测定方式都不包括盐类的 SS, 而 SS 中是否包括可沉降悬浮物, 本研究不做具体区分.

采用紫外可见多参数水质测定仪 (LH-CNP4) 测定水质样品的污染物浓度, 采用全玻璃微孔滤膜真空过滤装置测量计算 TSS 质量浓度, 均在具有计量资质认证的实验室进行. 检测标准分别遵循 GB/T 11893—1989《水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法》、HJ 636—2012《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》、HJ 535—2009《水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》、HJ 828—2017《水质化学需氧量的测定 重铬酸盐法》和 GB/T 11901—1989《水质悬浮物重量法》.

1.3 植物生长适性

由于新型粒状海绵介质土的物理性状及部分化学性质的改变, 观测研究选定本土植物的生长情况, 初步确定适于新型粒状介质土上的本土植物,

为后续新型粒状介质土的应用奠定理论基础. 本研究的介质土植物生长观测点位于珠海市, 濒临南海, 位于 $21^{\circ}48'N$ — $22^{\circ}27'N$ 与 $113^{\circ}03'E$ — $114^{\circ}19'E$ 之间, 地处低纬度亚热带季风区, 属于南亚热带与热带过渡型海洋性气候, 全年平均气温 22.4°C , 相对湿度 79%, 年均日照时数为 1 991.8 h, 历史最高日照时数 2 545 h, 年太阳辐射总量为 $4\,651.6\text{ MJ/m}^2$, 是广东南亚热带地区热量最丰富的地区之一. 全年冬夏季风交替, 降雨充沛, 为多雨地区, 降雨量大, 降雨期集中, 台风暴雨偶发, 年平均降雨量为 1 700 ~ 2 300 mm. 5 月至 9 月为集中降雨期. 域内土壤主要分布有赤红壤、潜育型水稻土、盐渍型水稻土和滨海盐渍土 4 种类型, 渗透性整体偏低, 不利于雨水下渗. 对植物健康生长的观测目标是在满足了海绵介质土具有较高的长期渗透率, 能有效固氮除磷, 促进污染物吸收的前提下, 筛选出一批适合介质土健康生长的植物.

2 材料与方

2.1 实地监测设计

本研究选择位于珠海市香洲区的前山水质净化厂作为实地监测点. 前山水质净化厂是珠海市第 1 座全地埋式污水处理厂, 其中地面部分全部按照海绵城市要求进行建设, 通过实景和模型等向珠海市民展示海绵城市原理和效果. 图 1 为实地监测场地的区位和监测点的位置分布.

(a) 监测基地区位

(b) 监测基地布置

① 为雨水花园流量监测点; ② 为透水铺装流量监测点;
③ 为高位花坛流量监测点; ④ 为雨量计

图 1 实地监测选址区位

Fig. 1 (Color online) Location of field monitoring

实地监测主要包括对高位花坛、雨水花园等生物滞留设施进行流量和土壤湿度监测, 并进行水质采样分析和植物生长观察. 本研究的监测基地包括透水铺装, 但由于透水铺装不涉及新型海绵介质土

的应用, 本研究不对其监测结果进行分析. 由于雨水花园的出流位置不适宜进行水质取样, 本研究只对高位花坛的进流和出流进行水质采样. 水质采样采用轻便型自动水质采样机, 并通过手机远程控制激活采样机对高位花坛设施的进出水口, 进行定时等量混合的自动水质采样. 土壤湿度的测定包括使用土壤湿度监测仪进行土壤含水率的连续监测, 并通过记录仪进行数据的时间序列式存储, 同时通过土壤渗透性测定仪对土壤的渗透率进行定期人工测定. 另外, 场地内设置了独立的多功能自动气象站, 对区域内的降雨量进行连续监测, 同时也对风力、风速、风向、温度和湿度进行记录.

本研究高位花坛长 9.3 m, 宽 1.0 m, 其监测

设备具体布置如图 2. 监测主要通过雨水立管收集旁边建筑屋面的径流以及自身面积内的降雨, 对雨水立管进行改装把屋面雨水径流引入到特制水箱中, 然后通过水箱的排水孔溢流堰和高精度的连续液位监测把径流液位数据转换成流量数据, 径流在通过高位花坛结构层滞蓄和净化后, 监测溢流管的出流量. 水质取样点分别布置在花坛的进出流的特制水箱内, 并根据气象站的降雨数据手机远程激活进行取样. 雨水花园长 5.0 m, 宽 2.5 m, 其监测设备的具体布置如图 3. 监测过程与高位花坛类似, 径流在通过雨水花园结构层滞蓄净化后, 监测溢流井和相连接的排水槽的水位变化, 并计算转化成出流流量数据.

图 2 高位雨水花坛监测设备布置

Fig. 2 (Color online) Setup of field monitoring for elevated bioretention parterre

图 3 雨水花园监测设备布置

Fig. 3 (Color online) Setup of field monitoring for rain garden

3 结果与讨论

3.1 流量与渗透性监测阶段性结果

为验证新型粒状海绵介质土对实际雨水径流和污染物的控制效果, 本研究在珠海前山水质净化厂内的高位花坛、雨水花园和透水铺装分别设置了监测工作站. 其中, 高位花坛和雨水花园的种植层都

填充了新型粒状海绵介质土, 厚约 600 mm, 作为对雨水径流的滞蓄净化层. 当实际有效降雨发生后, 持续监测雨水入流与设施的溢流管流量, 并进行水质取样以检验设施对目标污染物的去除效果, 最终把流量、水质和降雨数据进行耦合分析.

本研究共监测到 9 场有效的实际降雨, 其流量数据见表 1 和表 2. 监测期间, 研究区域降雨总量为 689.3 mm, 其中, 有效降雨总量为 544.5 mm,

约占 79%。此外, 9 场降雨种降雨量最大为 121.5 mm, 最小为 15.5 mm; 5 min 降雨强度峰值平均为 109.6 mm/h, 最小为 62.4 mm/h, 最大为 192 mm/h。

表 1 实地降雨监测结果
Table 1 Results of rainfall monitoring

降雨日期	降雨总量/mm	降雨时长/h	雨前干旱时间/d	5 min 降雨强度峰值/(mm·h ⁻¹)
2020-05-10	36.5	0.70	19	132.0
2020-05-11	15.5	1.77	1	78.0
2020-05-18	27.0	7.17	7	62.4
2020-05-20	100.0	3.82	2	132.0
2020-05-25	60.0	2.65	5	120.0
2020-05-26	121.5	5.00	1	192.0
2020-05-30	88.5	10.75	4	78.0
2020-06-02	24.5	1.53	3	84.0
2020-06-06	71.0	18.00	4	108.0

表 2 实地降雨监测结果统计
Table 2 Statistical summary of rainfall monitoring

类别	降雨总量/mm	降雨时长/h	雨前干旱时间/d	5 min 降雨强度峰值/(mm·h ⁻¹)
最大值	121.5	18.04	19	192.0
最小值	15.5	0.72	1	62.4
平均值	60.5	5.74	5	109.6
标准差	37.4	5.66	5	40.0

在 9 场实际降雨中, 填充了新型粒状介质土的高位花坛和雨水花园均表现出优异的低影响开发 (low impact development, LID) 效果, 其径流总量控制和径流峰值削减比例如图 4 和表 3, 其平均径流总量控制率分别达到了 85.1% 和 67.0%, 最大径流控制率分别为 94.1% 和 100%。在 2020-05-26 的降雨中, 降雨总量达 121.5 mm, 降雨峰值为 192.0 mm/h, 但高位花坛和雨水花园的径流总量控制率仍分别为 82.2% 和 37.3%; 高位花坛和雨水花园对 9 场降雨的径流总量控制率的变异系数 (coefficient of variation, COV) 分别为 0.09 和 0.32, 证明新型粒状海绵介质土内部有充足的孔隙率能支持对小型降雨的完全滞蓄, 并充分净化下渗而不产生溢流出流。

径流峰值削减如图 4 和表 3 所示。由图表可见, 高位花坛的降雨峰值削减比最大为 70.5%, 最

图 4 实地降雨 LID 流量总量与峰值监测结果

Fig. 4 (Color online) Results of flow monitoring during actual storm events for LID facilities

表 3 实地降雨 LID 流量总量与峰值统计结果

Table 3 Statistical summary of flow monitoring during actual storm events for LID facilities

类别	高位花坛						雨水花园					
	进流总量/ m^3	出流总量/ m^3	削减比/%	$10^3 \times$ 进流峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$10^3 \times$ 设施出流峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	削峰比/%	进流总量/ m^3	出流总量/ m^3	削减比/%	$10^3 \times$ 进流峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$10^3 \times$ 出流峰值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	削峰比/%
总量	280.6	42.9					99.4	36.2				
最大值	53.4	9.6	94.1	6.49	3.83	70.5	21.2	9.3	100.0	1.96	0.51	100.0
最小值	10.1	0.6	71.8	2.40	0.93	30.4	4.5	0.0	37.0	1.04	0.00	51.0
平均值	31.2	4.8	85.1	4.33	1.96	53.7	11.0	4.0	67.0	1.33	0.45	65.3
标准差	15.5	3.1	10.0	1.62	0.90	16.0	5.9	3.2	20.0	0.33	0.17	16.0

小为 30.4%，而雨水花园降雨峰值削减比最大为 100%，最小为 51.0%，其中，峰值完全消减发生在 2020-05-11 的 15.5 mm 降雨事件中。此外，高位花坛和雨水花园对 9 场降雨的峰值削减比的变异系数分别为 0.29 和 0.24，证明了设施内的新型介质土在应对总量及强度各异的有效降雨时有着相对稳定的径流峰值削减能力。

图 5 为高位花坛和雨水花园的土壤含水率的时间序列监测结果，其涵盖本研究目前时间跨度内在监测区域内的所有降雨场次。由图 5 可见，在雨量大小各异的降雨情况下，介质土的最大含水率（体积分）始终在 40% ~ 45% 间浮动，验证了其孔隙率约为 40% 的物理特性。在降雨期间，土壤含水率迅速下降并在相当长的一段雨前干旱时间里（几天至几十天）缓慢下降，说明了介质土在拥有充足的孔隙率能滞蓄径流峰值并及时排出的同时，也能保持适中的水分涵养能力（最低含水率约 20%）供给干旱时期植物生长的需要，这得益于经过研究改良的新型粒状海绵介质土的土壤材质和粒径级配。另外，本研究于 2020-03-18、2020-05-12 和 2020-07-05 利用土壤渗透率测定仪测得新型粒状海绵介质土的平均饱和渗透率分别为 914、760 和 835 mm/h，远大于传统海绵介质土的饱和渗透率（50 ~ 150 mm/h）。

为探索该新型粒状海绵介质土的性状和效能，尽可能排除在介质土中加入其他混合添加物造成的干扰，因此，没有在介质土表面加入海绵城市建设中常用的有机覆盖物。根据现场的观察记录得知，裸露的介质土表面会随着时间的和多次降雨的冲刷逐渐形成一层松散的、较多裂缝的表层板结，板结的下层仍然保持土壤的颗粒状。结合目前含水率监测和渗透率测定仪的结果，以及设施内植物生长情况

来看，该层板结并无显著影响介质土的渗透性，反而有利于保护下层土壤的含水率和土壤颗粒的完整性，避免在阳光直射的情况下或在蒸发率高的区域和时段，如园林维护不及时或雨前干旱时间过长时，造成土壤中的水分蒸发损失过大，保证了植物生长所需要的水分，也间接增强了海绵设施中景观绿化存活的韧性。在实际应用中，仍然推荐在新型粒状海绵介质土的表土铺盖一层轻质、保水、无毒性、自然降解周期长的有机覆盖物，如树皮、果壳和碎木等，进一步加强介质土的水分保持、温度调节和表面抗冲刷能力。

3.2 污染物去除统计结果

对雨水径流典型污染物的去除效果是评价海绵介质土有效性和适用性另一个非常重要的指标。本研究选择监测周期内的 4 场有效降雨（总降雨量满足设施出流条件），分别是 2020-05-10、2020-05-20、2020-05-26 和 2020-06-06，通过手机远程控制激活现场的自动采样机对高位花坛的进出流位置进行定时等量混合的水质采样，并把样品及时送检，每项指标设 3 个平行样本，4 场降雨的水质结果如图 6。从图 6 可见，填充了新型粒状海绵介质土的高位花坛对 4 种典型水质指标和总悬浮固体均有显著的去除效果且出流的指标浓度较为稳定，初步达到了地表水环境Ⅲ类水标准。另外，进流的水质分析结果也反映了汇水区的污染物累积浓度基本与雨前干旱时间长度有关，2020-05-10 的雨前干旱时间约为 16 d，其进流的各项指标浓度均较高，其他 3 次的雨前干旱时间则小于 1 周，其各指标浓度则相对较低。因此，初步判断新型粒状海绵介质土能较好地应对降雨径流中浓度变化较大的各典型污染物，保证 LID 设施的水质净化能力，未来将持续监测，以进行更深入的数据整理和统计分析。

图 5 填充新型粒状海绵介质土的高位花坛和雨水花园的土壤含水率(体积分数)监测结果

Fig. 5 (Color online) Monitoring of soil moisture for bioretention parterre and rain garden with innovative granular growing media

3.3 植物生长实验观测结果

基于前述关于观测点珠海市的气候和土壤条件特征, 结合新型粒状介质土的理化特性, 本研究对实验的植物筛选要求制定了以下标准: ① 抗性强, 要求植物耐水性高, 耐强风, 耐强光照, 病虫害少; ② 是珠海市较为常见的草本或灌木, 或是已成功引种驯化不会引起新物种入侵等灾害的植物; ③ 地面覆盖能力强, 根系发达; ④ 成本低, 生长快, 观赏效果好; ⑤ 低养护成本, 除极端暴雨及强台风情况外, 少维护或无须维护; ⑥ 海绵城市

建设常选植物. 因此, 初步选择了 44 种价格适宜且方便采购的植物进行观察实验, 主要包含以下 4 个类别: ① 桃叶珊瑚和金叶大花六道木等常绿灌木 19 种; ② 金叶女贞和花叶杞柳等落叶灌木 12 种; ③ 鸢尾、细叶芒等宿根地被 7 种; ④ 细叶芒等观赏草 6 种. 分别在试验田和试验盆中填入足量的新型粒状介质土, 移栽植物前进行不定量浇水处理使土壤保持不同的湿润程度, 每种植物种植 3 株, 对比观测另外使用普通原状土壤种植 1 株进行比较. 对各个植物在新型粒状介质土中的生长情况

图 6 高位花坛进出流水质检测对比结果

Fig. 6 Water quality test results of inflow and outflow of bioretention parterre

跟踪观察 1 年, 根据每种植物 3 个平行对比样的平均生长势进行判断。

1 年的培育试验, 观测基地现场的植物生长情况如图 7。结果发现, 存活的植物达 41 种, 大部分植物均具有良好的长势。常绿灌木、落叶灌木和宿根地被等珠三角本土植物均可良好地生长于新型粒状海绵介质土, 部分观赏草的选择则需仔细斟酌使

用, 同时可推断出新型介质土将适宜大部分华南本土植物及海绵城市建设常用选植的生长。在实际项目应用中, 可多选择本研究中正常存活的常绿灌木、落叶灌木、宿根地被及部分观赏草进行混合种植搭配, 即可保证海绵设施正常运行和植物正常生长, 也具有良好的景观效果。

本研究主要研究新型粒状介质土的功能性, 研

图 7 新型粒状海绵介质土对比普通种植土的植物生长情况

Fig. 7 (Color online) Observation of landscape healthiness for innovative granular growing media vs. ordinary normal planting soil

究过程中仅通过观察植物长势做出判断,暂不做深入的机理分析。

结 语

本研究研发了一种成本低廉和性质稳定的新型海绵介质土,制作过程中通过添加一定配比的辅助添加剂,以达到定向改良新型粒状海绵介质土的渗透性和优化对某些特定污染物的去除效果,具体参数已申请专利(待批)。根据当前国内外海绵城市建设的相关标准,以中粗砂、壤土和腐殖质为主的传统海绵介质土渗透性约50~150 mm/h,SS去除率约80%,通过对市场平均物价的调研确认,成本约为人民币350元/m³。实地应用结果表明,相比目前国内外普遍应用的传统海绵介质土,新型粒状海绵介质土具有渗透性和污染物去除效果,成本低廉且后期运行维护便利等。基于腐殖质和添加椰糠等材料的传统海绵介质土,虽然满足渗透率、污染物去除率和适宜植物生长等指标要求,但由于材料来源不稳定且成本高昂,其推广空间有限;新型粒状海绵介质土则不添加腐殖质,通过生物酶直接将原土加工为性质稳定的级配颗粒,通过土壤本身物理结构的吸附能力及生物酶的作用,拥有比传统海绵介质土的更高的渗透率及更好的污染物去除效果。但考虑到新型粒状海绵介质土是一种全新的介质土材料,实验数据相对较少,实际场地项目的应用时间较短,建议部分示范性的生物滞留设施采用新型粒状海绵介质土,并进行长期的密切观察和监测取样以验证该介质土的长期可靠性和稳定性。

新型粒状海绵介质土仍需要进一步改良其性状,包括颗粒的硬度、污染物吸附能力和颗粒物配比经过等。由于部分地区存在地下水水位较高情况,海绵介质土经过长期被浸泡可能发生软化现象,导致颗粒的黏聚力下降从而降低土壤的孔隙率。另外,该新型介质土不适宜在雨水期间施工,因为在土壤湿润的时候被踩踏会导致颗粒被破坏,因此其暂不适合于高强度场景应用,如透水铺装或其他表面载荷较大的区域或道路。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2100901)

作者简介:蔡业钊(1987—),珠海深圳清华大学研究院高级工程师。研究方向:海绵城市、水环境治理和水资源工程。E-mail: caiyehao@126.com

通讯作者:刘建(1965—),深圳大学教授。研究方向:海绵城市、固体废弃物资源化、水环境治理。E-mail: liujian@szu.edu.cn

引文:蔡业钊,刘东煊,刘建,等.基于实地监测的新型粒状海绵介质土的性能研究[J].深圳大学学报理工版,2021,38(1):45-53.

参考文献 / References:

- [1] LIU Jia, SAMPLE D J, CAMERON B, et al. Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater [J]. Journal of Water, 2014, 6(4): 1069-1099.
- [2] O'NEILL S W, DAVIS A P, STRUCK S, et al. Analysis of bioretention media specifications and relationships to overall performance [C]// World Environmental and Water Resources Congress 2009. Kansas City, USA: [s. n.], 2009: 840-848.
- [3] RUNOFF V, BMPS T. Stormwater management manual for western washington: volume III: hydrologic analysis and flow control design/BMPs [R]. Washington State Department of Ecology. 2005.
- [4] Herrera Environmental Consultant Inc. Final report: 185th avenue NE bioretention stormwater treatment system performance monitoring [R]. Washington, USA: [s. n.], 2012.
- [5] LOGSDON S D, SAUER P A. Nutrient leaching when compost is part of plant growth media [J]. Compost Science & Utilization, Taylor & Francis, 2016, 24(4): 238-245.
- [6] BARRETT M E, LIMOUZIN M, LAWLER D F. Effect of media and plant selection on biofiltration performance [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139: 462-470.
- [7] WRA Environmental Consultants. Biotreatment soil media and specification: current research on trees and water quality treatment [R]. San Francisco, USA: [s. n.], 2016.
- [8] LIU Jiayu, DAVIS A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced Phosphorus removal bioretention [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 607-614.
- [9] IPPOLITO J A, BARBARICK K A, ELLIOTT H. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(1): 1-12.
- [10] IPPOLITO J A. Aluminum-based water treatment residual use in a constructed wetland for capturing urban runoff Phosphorus: column study [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(10): 334.

【中文责编:晨兮;英文责编:之隼】