

海绵城市建设中基于红壤地质的功能介质土性能研究

石立国¹, 马 竞², 刘龙志², 杜 焱¹, 杨召波¹, 张永洪¹

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

摘 要: 在海绵城市建设和水环境综合治理中,多种低影响开发设施和水体修复技术均需要用到不同类别的功能介质土。为了研究不同配合比介质土对海绵城市建设过程中雨水径流滞留及净化性能的影响,以玉溪市海绵城市建设项目为依托进行了研究。首先根据实测数据对城市径流雨水污染物进行了特征分析,然后通过介质污染物渗透及净化实验探究了不同配合比和不同增强层的功能介质土去除径流污染物能力和渗透性,最终给出了高性能、低造价的功能介质土最佳配合比,为红壤地质条件下海绵城市建设中的功能介质土选用提供了可靠的参考。

关键词: 海绵城市; 功能介质土; 污染物净化; 配合比; 渗透性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)12-0033-06

Study on the Properties of Functional Medium Soil with Geological Properties of Red Soil in Sponge City Construction

SHI Li-guo¹, MA Jing², LIU Long-zhi², DU Yao¹, YANG Zhao-bo¹, ZHANG Yong-hong¹

(1. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: Various low-impact development facilities and water restoration technologies required various types of functional media soil in the process of the sponge city construction and water environment comprehensive management. Based on the construction project of sponge city of Yuxi City, the effect of function medium soil with different mixing ratios on retention and purification performance during sponge city construction was investigated. Firstly, the characteristics of the pollutants of urban runoff rainwater were analyzed according to the measured data. Then the ability to remove runoff pollutants and permeability of the functional medium soil in different proportion and different enhancement layers were explored by the experiment of medium pollutants infiltration and purification. This paper summarized the optimal mixture ratio of functional medium soil with high performance and low cost, which provided a reliable reference for the selection of functional medium soil in the construction of sponge city in the geological condition of red soil.

Key words: sponge city; functional medium soil; purification of pollutants; mixture ratio; permeability

目前,美国、澳大利亚等国家在雨洪控制利用项目中建设低影响开发(LID)设施应用了功能介质土渗水、保水和处理径流污染物。在美国西雅图、芝加哥等州市的雨水管理手册中,对功能介质土的材料

成分和配比均有明确的要求,主流采用由椰糠、砂子、原土及保水介质按照不同的混合比配制成的介质土,可以有效滞留雨水,保证植物正常生长的同时还可以去除雨水径流污染物^[1-2]。但我国现阶段关

于功能介质土的研究并不多,北京建筑大学雨水团队车伍、李俊奇等开展了雨水径流污染物去除研究及换填介质土的技术研究,澳大利亚的种植介质土配方在我国昆山和宁波等地均有应用^[3-4]。西安理工大学李家科也较早开展了介质土的研究,在校园内的生物滞留设施中进行了实验研究和监测评估,并在西咸新区海绵城市试点区进行了工程应用^[5-7]。

我国地域广,各地气候、水文、土壤条件差异大、植被种类繁多,在海绵城市建设中应用的功能介质土存在以下主要问题^[8]:介质土成本高,寿命短、容易堵塞、对径流污染物的去除率不高,质地疏松,渗透率低不利于雨水的下渗、保水性差、透气性一般,不能有效促进植物生长。目前介质土的生产工艺、施工方法没有标准化,不利于海绵城市建设中大面积推广应用。因此,以玉溪市海绵城市建设项目为依托,探究不同配合比和不同增强层的功能介质土去除径流污染物能力和渗透性,以为红壤地质条件下功能介质土选用提供可靠的参考。

1 地质条件

为研究玉溪市海绵城市老城片区土壤情况,在图1所示区域布置了4个取样点进行取样。



图1 取样点位置

Fig.1 Arrangement of sampling points

原土试样分析结果如表1所示。玉溪市老城片区土壤主要成分为红壤、黏土、粉质黏土,为典型红壤地质,其保水性和渗透性都较差。4个取样点的地下水深度分别为2.30~2.80、2.40~2.70、2.20~2.60、2.40~2.70 m。取样片区地下水稳定

水位在地表下2.20~2.80 m,地下水来源主要靠大气降雨及地表水补给,属潜水型地下水。因此对功能介质土的净化能力有较高要求,防止地下水污染。

表1 取样点土质分析

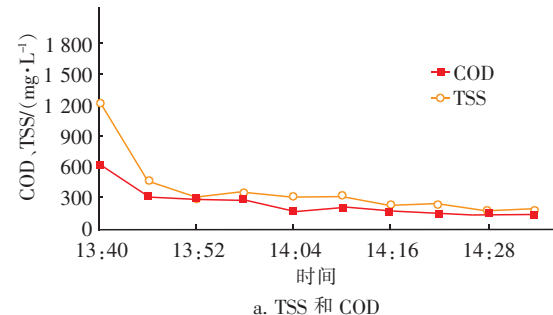
Tab.1 Soil property analysis of sampling points

项目	土壤类型	地表以下深度/m	渗透系数/ ($10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
取样点1	杂填土	0~2.8	17
	黏土	2.8~6.1	1.2
	粉质黏土	>6.1	6.9
取样点2	杂填土	0~2.1	22
	粉质黏土	2.1~4.7	6.2
	含卵石粉质黏土	4.7~6.7	11
	黏土	>6.7	1.3
取样点3	杂填土	0~1.3	20
	粉质黏土	1.3~2.9	2.3
	含卵石粉质黏土	2.9~8.4	12
	黏土	>8.4	5.8
取样点4	杂填土	0~2.5	19
	黏土	2.5~5.7	6.5
	粉质黏土	>5.7	1.5

2 城市径流雨水污染物特征分析

为了对改造区域的城市径流雨水污染物特征进行分析,选取玉溪市红塔区的诸葛小区地表采样点进行采样,地面类型为混凝土路面,路面平均径流系数为0.9。样本为2017年6月26日与8月1日两场典型降雨,每隔6 min取样一次至降雨结束,水样用聚乙烯瓶采集后立即分析。城市地表径流污染物组成复杂,本研究分析项目包括了TSS、COD、TP和氨氮四项。水质指标均采用标准分析方法进行测定,用重量法对TSS进行测定,用重铬酸盐法对COD进行测定,用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法对TN进行测定,用纳氏试剂分光光度法对氨氮进行测定,用钼锑抗分光光度法对TP进行测定。

2017年6月26日和8月1日样本地表径流水质变化分析结果如图2和图3所示。



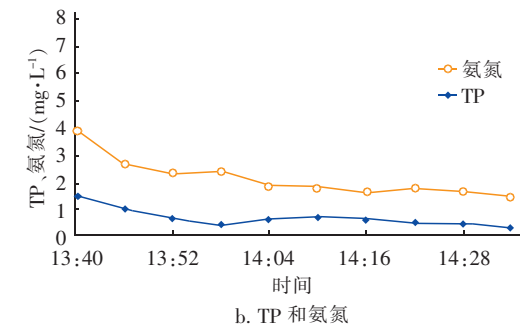
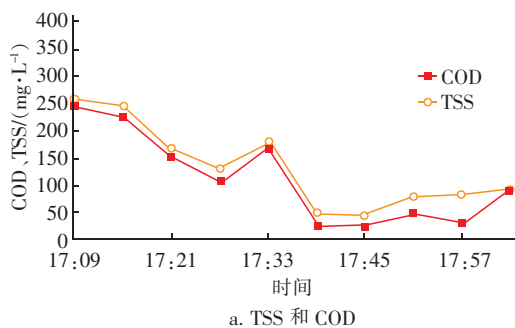
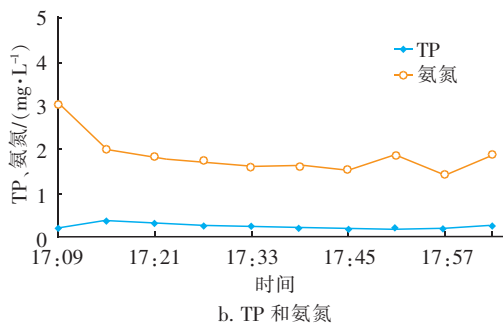


图2 2017年6月26日降雨地表径流水质变化

Fig. 2 Changes of runoff water quality in the process of rainfall on June 26th, 2017



a. TSS 和 COD



b. TP 和氨氮

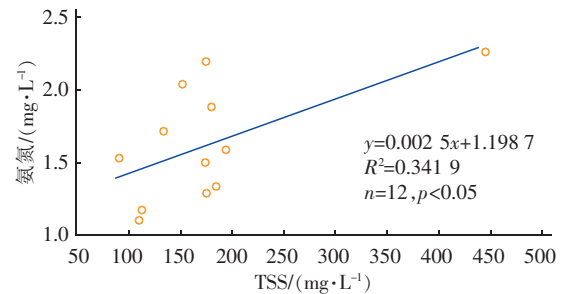
图3 2017年8月1日降雨地表径流水质变化

Fig. 3 Changes of runoff water quality in the process of rainfall on August 1st, 2017

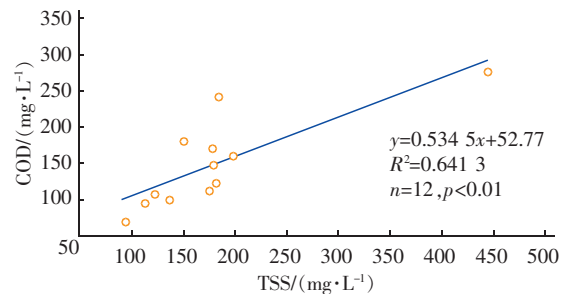
2017年6月26日与8月1日两场典型降雨的降雨量分别为18.9 mm和31.0 mm。根据图2和图3可知,污染物浓度在降雨径流初期相对较高,中后期浓度快速下降,并逐渐趋于稳定。降雨初期,溶解冲刷作用占主导地位,从而污染物的浓度相对较高。随着时间变化,地表径流污染物减少,稀释作用占主导地位,从而浓度逐渐降低。径流中污染物的浓度和达到稳定浓度的时间主要取决于不透水地表污染物的累积程度和降雨特征。

为了得到地表径流水质指标的相关性,对各污染物之间的皮尔逊相关性进行了分析,其中城市地

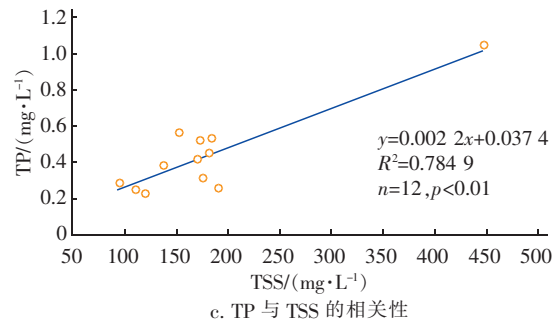
表径流中COD、氨氮、TP与TSS之间的相关性如图4所示。



a. 氨氮与TSS的相关性



b. COD与TSS的相关性



c. TP与TSS的相关性

图4 COD、氨氮、TP与TSS的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of COD, TN, TP and TSS

由图4可知,城市降雨径流中污染物之间存在着不同程度的相关性。COD与TSS间、TP与TSS间 p 均小于0.01,存在极显著正相关,TN与TSS间 p 小于0.05,存在极显著正相关。TSS是城市降雨径流污染过程的主要污染物,同时也是其他污染物的载体。氨氮、COD、TP与TSS的相关性较好,说明大部分污染物质以颗粒吸附态存在,来源为地表。加强地表清扫管理,在改造地区的功能介质土中增强其吸附和过滤性能,可以从根源上有效控制城市地表径流污染物总量,也可以有效减轻城市地表径流对水环境的负面影响。

3 土质渗透性分析

功能介质土主要由椰糠、砂子、原土及保水介质

按照不同的混合比配制而成,为探究造价低、去除径流污染物能力强、渗透性好的功能介质土,首先选取了海绵城市改造项目所在区域的原土、河砂、椰糠、改性陶粒、钢渣、沸石(如图 5 所示),对其渗透速率及除污效果进行了实验分析。

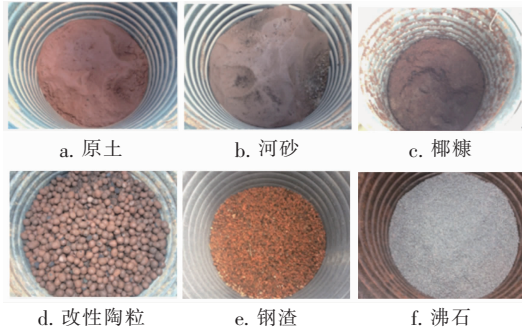


图 5 功能介质土原材料

Fig. 5 Raw materials of the functional medium soil

各填料在填柱前均用水反复清洗以及去除浮尘,填料的部分理化参数如表 2 所示。

表 2 实验填料的部分理化参数

Tab. 2 Part of physical and chemical parameters of medium

项目	河砂	钢渣	绿沸石	陶粒
pH 值	7.62	8.22	8.19	7.80
堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 752	2 821	1 250	1 000
粒径/mm	< 1	5 ~ 8	5 ~ 10	5 ~ 8
孔隙率/%	4.6	33.5	36.5	35.5
持水率/%	25	20	22	11

实验在室外进行,原材料分别装进半径为 0.50 m、高为 1.50 m 的渗滤桶,每个桶外边缘设有溢流口,桶底部是渗透孔板并设有出水口。在桶体内壁采取划痕处理以防止壁流发生。渗透测试时,在土层上部加 50.0 mm 深的水层,待底部出水口出水时开始计时,每隔 5、10、15、20、30 min 更换集水量筒(间隔时间长短视渗透速度快慢而定),记录下渗出的水量,每次更换量筒时,要迅速将土层上的水层加至 50.0 mm 深度,保持一定的压力梯度,并记录水温。

土壤净化实验将模拟降雨水质,考虑到实际径流中颗粒态污染物的去除较容易,因此测定土壤对溶解态污染物的去除效果能更直观地显示其净化能力。配制不同浓度的污染物,以一定降雨强度对土层进行喷淋,降雨历时为 30 min。在降雨开始后的 5、10、15、30 min 分别测定土层的出水量,并进行取样,降雨结束后对取样水质进行检测,从而研究不同

污染物负荷下改良剂对土壤净化能力的影响。为研究不同材料对污染物去除效果影响,设置了厚度为 30.0 cm 的钢渣增强层、改性陶粒增强层、绿沸石增强层,测定装置如图 6 所示。



图 6 土样渗透测试桶

Fig. 6 Test buckets for soil samples permeability

土壤净化实验中根据实际雨水径流污染物浓度,通过化学药品及自来水配制成实验用径流雨水。径流污染物配制来源及浓度见表 3。

表 3 径流污染物配制来源及浓度

Tab. 3 Preparation of runoff pollutants

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
项 目	来源	浓度
COD	CH_3COONa	300
TN	丙氨酸	5
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	NH_4Cl	2
SS	通沟污泥	400
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	KH_2PO_4	1

经测定椰糠的渗透速率为 574.67 mm/h,细砂的渗透速率为 578.69 mm/h,原土的渗透速率为 183 mm/h。不同介质土对径流污染物的去除效果如表 4 所示。

表 4 不同介质土对径流污染物的去除效果

Tab. 4 Removal effect of runoff pollutant by different media

%			
项目	原土去除率	椰糠去除率	河砂去除率
COD	60.15	极小	54.75
TN	29.95	19.96	19.96
TP	90.00	析出磷	49.44
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	74.08	14.49	78.19
SS	77.00	椰糠浮渣渗出	63.53

由表 4 可知,原土对 COD、TP 和 SS 的去除效果最好,分别能够达到 60.15%、90.0% 和 77.0%。三种介质土对 TN 的去除率均一般。河砂对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

的去除率最好,为 78.19%。由测试结果可知,原土的土壤微生物降解硝化反应较好,但反硝化反应和渗透性差;椰糠的保水持水性能好,硝化反应和反硝化反应较差,渗透性好;河砂的微生物降解硝化反应较好,渗透性好,但反硝化反应较差。原土对径流污染物的去除效果比较理想,但是椰糠具有较强的保水持水性,可以增强整体介质土的含水持水性,河砂对径流污染物的整体去除有较好的效果,氨氮的去除效果达到预定目标。

4 功能介质土配合比分析

为得到透水性好、去污染能力好的功能介质土配合比,进行了对比实验,研究工况如表 5 所示,不同配合比下对径流污染物的去除效果如表 6 所示。

表 5 功能介质土配合比

Tab. 5 Mix proportion of functional medium soil %

项目	原土	河砂	椰糠
M1	70	10	20
M2	60	20	20
M3	50	30	20
M4	40	40	20
M5	30	50	20

表 6 不同配合比介质土对径流污染物的去除率

Tab. 6 Removal rate of runoff pollutant by medium soil with different mix proportion %

项目	M1	M2	M3	M4	M5
COD	68.52	67.34	67.15	64.33	63.22
TN	35.88	35.79	32.35	28.12	26.51
TP	96.78	96.41	97.35	81.46	79.63
NH ₄ ⁺ - N	33.45	31.26	30.66	21.00	18.59
SS	85.89	84.21	83.38	81.99	77.24

经测定,M1 ~ M5 五种配合比功能介质土的渗透速率分别为 280.74、307.54、364.78、558.40、711.74 mm/h。功能介质土的渗透性能随着河砂配合比的增大而增加。

由表 6 可以看出,随着原土配合比的增大,介质土对 SS 的去除率升高,SS 主要通过土壤介质的过滤吸附去除。总磷通过过滤、沉淀和吸附作用去除,因此其去除率总体上随着原土配合比的增加而增大。氨氮由土壤介质微生物降解、硝化反应和带负电荷离子吸附作用而被去除,反硝化反应条件较难满足,反硝化反应较差,淋洗有机氮造成整体总氮的去除率低。功能介质土不仅要求有较高的径流污染物去除能力,还要兼顾较好的透水性,因此工程中选择工况 M3 为功能介质土的配合比,即原土 50% +

河砂 30% + 椰糠 20%。

为提高功能介质土的净化效果,选用配合比为原土 50% + 河砂 30% + 椰糠 20% 的功能介质土(500 mm) + 300 mm 增强层,研究不同种类增强层对径流污染物去除的影响。增强层分别为钢渣、改性陶粒及绿沸石,试验结果如表 7 所示。

表 7 不同增强层下对径流污染物的去除率

Tab. 7 Removal rate of runoff pollutant by different additional layers %

项目	无增强层	钢渣增强层	改性陶粒增强层	绿沸石增强层
COD	67.15	82.17	78.12	77.98
TN	32.35	78.30	8.66	22.35
TP	97.35	98.00	97.51	98.51
NH ₄ ⁺ - N	30.66	93.00	100.00	100.00
SS	83.38	98.00	98.12	97.42

由表 7 可知,有增强层的工况下功能介质土的除污效果整体性增强。其中,钢渣增强层在去除 COD 和 TN 方面比另外两种增强层的除污效果更为突出。钢渣增强层去除 TP 和 SS 的能力与改性陶粒增强层和绿沸石增强层基本持平,对 TP 和 SS 的去除率均在 98% 左右。在去除 NH₄⁺ - N 方面,钢渣增强层的能力稍弱,其 NH₄⁺ - N 去除率为 93%,改性陶粒增强层和绿沸石增强层的去除率均为 100%。根据改造区实际情况,改性陶粒成本约为 1 000 元/t,绿沸石成本约为 2 800 元/t,钢渣成本约为 20 元/t,钢渣作为介质土的增强层被大量使用时,更具有价格优势。

5 结论

以玉溪市海绵城市建设项目为依托,对改造区城市径流雨水污染物进行了特征分析,通过介质污染物净化实验探究了不同配合比和不同增强层的功能介质土的渗透性及去除径流污染物的能力,得到了以下结论:

① 改造区大部分污染物质以颗粒吸附态存在,其来源为地表,在改造地区的功能介质土中增强其吸附和过滤性能,可以从根源上有效控制城市地表径流污染物总量,也可以有效减轻城市地表径流对水环境的负面影响。

② 改造区原土对径流污染物的去除效果比较理想,椰糠具有较强的保水持水性,可以增强整体介质土的含水持水性,河砂对径流污染物的整体去除有较好的效果。

③ 功能介质土的合理配合比为原土 50% + 河砂 30% + 椰糠 20%, 此时不仅有较高的径流污染物去除能力, 还有较好的透水性。与改性陶粒增强层和绿沸石增强层相比, 钢渣作为介质土的增强层在价格和性能上更有优势。

参考文献:

- [1] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, *et al.* Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China[J]. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60 (4): 652 – 658.
- [2] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(3): 312 – 316.
Li Liqing, Yin Chengqing, He Qingci, *et al.* Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang, Wuhan City on the receiving water[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27 (3): 312 – 316 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 王文亮, 李俊奇, 车伍, 等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. *给水排水*, 2016, 42 (10): 61 – 69.
Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, *et al.* Discussion on some problems in the determination and realization of total rainfall runoff flow rate control[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(10): 61 – 69 (in Chinese).
- [5] Li J, Zheng L, Gao Z. Experiment and simulation of the purification effects of multi-level series constructed wetlands on urban surface runoff[J]. *Ecol Eng*, 2016, 74 – 84, 91.
- [6] Li J, Li Y, Li Y J. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas[J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75: 17 – 30.
- [7] Li J, Li H, Shen B, *et al.* Effect of non-point source pollution on water quality of Weihe River[J]. *Int J Sediment Res*, 2011, 26(1): 50 – 61.
- [8] Wang Y, Sun M, Song B. Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2017, 122: 11 – 20.



作者简介: 石立国(1971 –), 男, 河北丰润人, 硕士, 教授级高级工程师, 中建二局西南分公司总工程师, 从事建筑工程施工技术管理工作。

E-mail: 1048971099@qq.com

收稿日期: 2018 – 10 – 22

节约用水利在当代, 造福人类功盖千秋