



引用格式:陈 韬,夏蒙蒙,赵大维,等.城市土壤特征对降雨径流控制的影响[J].科学技术与工程,2020,20(19):7852-7857

Chen Tao, Xia Mengmeng, Zhao Dawei, et al. Influence of urban soil characteristics on stormwater runoff control[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7852-7857

城市土壤特征对降雨径流控制的影响

陈 韬¹, 夏蒙蒙¹, 赵大维¹, 车爱伟²

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730000)

摘 要 城市范围土壤受到人为扰动而出现生态功能退化,总结了城市土壤的物理化学和水文生态特征,分析了城市土壤对降雨径流量和水质的影响,探讨了低影响开发(LID)工程土的要求,以期改善 LID 措施控制降雨径流效果提供理论依据和参考。研究表明:以下渗为主的 LID 措施,土壤饱和导水率是重要参数;以去除污染负荷为主的 LID 措施,土壤质地、容重是重要参数,pH 及本底养分、重金属含量也是影响因素;应以此为基础设计改良工程土配方;施工过程中,应避免场地土壤的机械人为压实;定期清理设施区域的垃圾,防止阻塞土壤表层;在污染严重区域,定期检测土壤污染物浓度,若超过土壤负载需更换土壤。

关键词 城市土壤特征;土壤功能;降雨径流量;降雨径流水质;LID 工程土

中图分类号 TU992; **文献标志码** B

Influence of Urban Soil Characteristics on Stormwater Runoff Control

CHEN Tao¹, XIA Meng-meng¹, ZHAO Da-wei¹, CHE Ai-wei²

(1. Urban Stormwater System and Water Environment Key Laboratory, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

[Abstract] The characteristics and ecological functions of urban soil are degraded by human activities. The influence of urban soil characteristics on stormwater runoff quantity and quality was analyzed, and the requirements of LID engineering soil were discussed, so as to provide theoretical basis and reference for improving stormwater runoff control effect of LID measures. The results show that the saturated water conductivity of soil is an important parameter for LID measures mainly based on infiltration. For LID measures mainly aimed at removing pollution load, soil texture and bulk density are important parameters, and pH value, substrate nutrients and heavy metal content are also influencing factors. Based on this, the improved engineering soil formula should be designed. During construction, mechanical compaction of soil should be avoided. The garbage in LID facility area should be cleaned regularly to prevent soil surface from being blocked. In heavily polluted areas, soil pollutants should be periodically checked, and replaced if they exceed the soil load.

[Key words] urban soil characteristics; soil functions; stormwater runoff quantity; stormwater runoff quality; low impact development engineering soil

随着人类经济社会发展和城市化进程的加快,自然主导的土地覆被变化(森林、草地、湿地等)向人类主导的土地利用(农用地、城市建设用地等)快速转变,不仅带来了地表结构的巨大变化,而且极大地影响了区域的气候、水文水资源、土壤以及生物多样性和生物地球化学循环^[1]。当前在中国突出表现为城市洪涝灾害频发、水环境污染和水资源短缺等问题。

中国的海绵城市、美国的雨水低影响开发实践(LID)、英国的可持续排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏感城市建设(WSUD)等雨洪管理实践,已获证实可有效缓解城市洪涝问题和改善径流水质状

况。生物滞留、透水铺装、绿色屋顶、渗沟、岸边缓冲带、人工湿地等是中国海绵城市建设 LID 系统常用的调蓄渗滤措施,可以通过土壤界面反应、生物同化作用、微生物降解等物理和生化过程削减降雨径流,去除污染物,从而有效控制雨水径流污染。

土壤基质是 LID 调蓄渗滤措施实现入渗、滞留、缓释雨水径流的水文调节和吸附、过滤、降解径流污染物的重要场所。城市范围土壤受到人为扰动而出现生态功能退化,LID 工程能否使用开挖原土回填、如何改良城市土壤成为亟待解决的问题。因此,本文总结城市土壤的物理化学和水文生态特征,分析城市土壤对降雨径流量和水质的影响,探

收稿日期:2020-01-12; 修订日期:2020-02-25

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX07103-002)

第一作者:陈 韬(1977—),女,汉族,辽宁开原人,博士,教授。研究方向:城市节水和雨水低影响开发。E-mail:chentao@bucea.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

讨 LID 工程土的要求和城市土壤改良措施,以期为改善 LID 措施控制降雨径流效果提供理论依据和参考。

1 城市土壤主要特征

在中国快速城镇化的发展阶段,大量土壤运移、既有植被清理和建筑施工等人类活动将自然土壤逐渐转变为城市土壤,直接或间接地影响了土壤的物理化学、水文生态特征,如表 1 所示。挖掘、混合、人造材料的结合、覆盖、施肥、灌溉等直接的人为扰动,或大气沉积、热岛效应等间接的环境条件变化,导致城市土壤结构呈现高度空间异质性,小范围内镶嵌现象严重^[24],大范围内不同土地利用类型和城乡间的土壤性质也存在较大差异^[5]。

表 1 典型城市土壤特征
Table 1 Typical urban soil characteristics

物理化学参数	特征(成因)	水文生态参数	特征(与物化参数关系)
①粒径分布	↑(粗骨质)	饱和导水率	↓(①+②-③+)
②容重	↑(压实)	持水特性	↓(①-②+③-)
③孔隙度	↓(压实)	土壤无脊椎动物	↓(不同种类影响各异)
④pH	↑(呈碱性)	植物	↓(②-③-⑤+)
⑤氮磷营养物	↑(人类废弃物富集)	微生物	↓(②-③-⑥-)
⑥重金属	↑(人类废弃物富集)	酶	↓(不同种类影响各异)

注:↑表示城市土壤该参数值普遍大于自然土壤;↓表示城市土壤该参数值普遍小于自然土壤;+表示该物化参数与此项水文生态参数正相关;-表示该物化参数与此项水文生态参数负相关。

1.1 物理化学特征

城市区域内大部分土壤由于压实板结,相较自然土壤都存在容重增加、孔隙度降低的现象,尤其是在道路附近等易受压实的区域^[6]。在田间试验中,压实土壤容重增加 8%,大孔隙的数量和相对面积分别减少 69% 和 64%,在表层 10 cm 土样中孔隙度变化最为明显^[7]。

城市土壤人为改造和人工材料的痕迹明显,散落大量粒径>2 mm 的粗骨质,如砖、混凝土、水泥、瓦砾、玻璃、煤、炉渣等建筑材料和生活垃圾^[8]。有些粗骨质对 LID 系统有益,例如土壤中的砖具有较高的内部孔隙度和持水能力,植物根系可以进入其孔隙空间生长^[9],进而加强系统去除污染物的整体能力。

城市土壤 pH 较自然土壤偏高,多呈碱性。调查发现,华北平原表层土壤为 pH = 7.85 ~ 8.31,平均值为 8.2,北京市房山和大兴区等高达 8.57 以上^[10]。香港地区自然山地土壤呈酸性(pH = 4 ~ 5),而路边土样平均 pH = 8.7,超过一半的土样为强碱性(pH = 8.5 ~ 9.0)和极强碱性(pH = 9.0 ~

9.5)^[11]。

养分富集是城市土壤的重要特征,最常见的是磷素富集。南京地区城市土壤总磷含量是当地自然土壤的 2 ~ 10 倍^[12]。虽然硝酸盐在土壤中的停留时间相对较短,然而持续施用或添加有机肥或废弃物,使氮素也在城郊土壤中积累^[13]。重金属富集现象普遍,中国 21 个城市的 2 362 个土壤样本中 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 中值均高于全球土壤和地壳的中值^[14]。城市土壤因土地利用类型和区域变化也呈现富集不均的现象。城市道路附近和居民区土壤中养分和重金属含量高于其他地区,城市核心区土壤中有有机碳(SOC)、有效磷、有效钾、TN、SOC:TN 比值、Pb、Cu 含量远高于郊区^[5, 15]。

1.2 水文生态特征

城市土壤压实现象普遍,容重大时,植物根系生长受到阻碍,如表 2 所示^[16],减少了由根部产生入渗的通道,导水性能和持水性能减弱^[17]。深圳市布吉河流域由于城市化发展 2005 年的土壤含水量比 1980 年平均减少 28.1 mm (25.49%)^[18]。土壤颗粒与水之间的分子力、物理化学作用力,以及地表附近的蒸发和蒸腾作用使土壤具有吸力^[19]。土壤容重越大,黏粒含量越高,大孔隙越少,土壤萎蔫点含水量越高^[20]。

表 2 不同质地土壤容重对根系生长的限制
Table 2 Bulk density limits of different soil texture on root growth

土壤质地	土壤的容积密度/(g·cm ⁻³)		
	理想值	影响根系生长的临界值	限制根系生长的范围
砂土、壤砂土	<1.60	1.69	>1.80
砂壤土、壤土	<1.40	1.63	>1.80
砂黏壤土、壤土、黏壤土	<1.40	1.60	>1.75
粉壤土、粉黏土	<1.30	1.60	>1.75
壤土	<1.10	1.55	>1.65
砂黏土、粉黏土、黏壤土(含 35% ~ 45% 黏土)	<1.10	1.49	>1.58
黏土(含 >45% 黏土)	<1.10	1.39	>1.47

土壤的生态功能包括作为动植物栖息地,微生物群落和功能基因库载体,缓冲过滤净化降雨径流和水分养分循环^[21]。虽然城市土壤受人类活动破坏,但外来物种的聚集使城市土壤仍具有较高的生物活性和物种丰富度^[22-23]。土壤生物对不同的城市土壤理化性质响应各异。一方面压实阻碍植物根系生长,另一方面粗骨质和养分富集有利于植物生长,尤其在较贫瘠、非富营养化的城市土壤中,粗骨质砖块可以作为 K、Mg、Ca 和 S 的有效来源^[24]。物理扰动、土壤水分、金属污染等人类活动及其产

生的土壤特征会抑制土壤无脊椎动物的数量和多样性^[25-27],但不同种类的动物受影响程度各异,甚至个别出现积极影响^[28-29]。

由于大多数微生物活性(69% ~ 85%)集中在表土 10 cm 的矿物层中,而这部分土壤易受压实和污染,从而破坏微生物群落的生存环境^[30]。然而,与污染物去除相关的微生物菌群明显增长^[31]。土壤酶主要来源于土壤微生物活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶,其活性可以反映土壤生化过程的相对强度,是土壤功能的一种体现^[32]。pH 变化影响细菌群落组成、相对丰度、多样性以及酶功能^[33-34];土壤水分的减少,限制了土壤微生物的代谢产酶能力;城市土壤氮磷水平对土壤中酶活性也有很大影响^[35]。在波兰部分城市的研究表明,市中心花园的土壤酶活性比在郊区的花园土壤中的低几倍^[36]。

2 城市土壤对降雨径流的影响

2.1 对降雨径流量的影响

土壤对降雨径流量的控制主要体现在渗、滞功能。一方面,压实处理的土壤入渗率与自然土壤相比可降低 70% ~ 99%^[37]。南京住宅区、公园区、道路绿地和校园土样的入渗率从 <1 ~ 679 mm/h 不等,大部分为 5 ~ 63 mm/h,其中 17% 的严重压实土样测位点 <5 mm/h^[38]。土壤吸力在降雨后迅速显著下降^[39],但负压孔隙水(雨前吸上的水)仍能存在于正压孔隙水(雨后下渗的水)之间^[19],即雨水下渗通道变少。土壤持水性能的减弱,导致降雨时径流峰值提前;而未降雨时,因土壤含水量不足,萎蔫点高,不利于植物生长发育。城市土壤特征所带来的整体入渗率降低会增大下垫面径流系数,从而导致同等降雨情况下地表径流的增加,加上城市不透水表面的溢流,增加了发生洪水的可能性^[40]。南京地区严重压实土壤的地表产流频率为 8%,对于极度压实的土壤,产流频率约为 40%^[38]。另一方面,土壤中粗骨质使径流以优势流的方式下渗,又会增大入渗率。实验发现,当土壤中含有超过 50% 粗骨质时,大颗粒之间产生的孔隙不能被土壤细粒完全填充,可显著增加饱和导水率^[41]。

2.2 对降雨径流水质的影响

城市降雨淋洗冲刷道路、屋面等裹挟了各类污染物,主要是 TSS、COD、N、P、重金属等。实验表明,土壤可以不同程度地吸附、过滤和净化降雨径流中的污染物^[42-43]。

2.2.1 土壤自身作用

土壤是一种固、液、气三相组成的疏松多孔体,

其本身的孔隙及颗粒具有吸附过滤截留等功能。降雨入渗时,土壤充当“筛子”进行机械吸附,阻挡较大的颗粒,且土壤的曲折孔隙路径增强了这种特性,可以去除沉积物甚至是细菌^[44]。土壤黏粒(粒径 <1 000 nm)具有胶体的特性,能进行物理化学吸附。土壤细粒部分巨大的表面张力会吸附表面张力小的物质,如有机化合物分子、气体 NH₃ 等。土壤溶液中阴离子与高价阳离子发生反应沉淀于土壤中。土壤胶体表面吸附溶液中的离子,解吸后可供植物根系吸收。土壤中铁、铝氧化物表面的 OH⁻、OH₂、OH₃⁺ 等基团,可与无机和有机离子交换和配位,是营养盐与污染物的有效吸附剂^[45]。压实土壤孔隙减小,粗骨质增多导致黏粒占比减小,使得土壤吸附过滤功能变弱,比如对 TP 去除效果明显变差^[46]。

2.2.2 土壤负载

当城市土壤极度压实时,表层板结堵塞失去入渗能力;当城市土壤所承受的污染负荷超过其容量极限时,大量沉浸其中的污染物释放出来,土壤有可能成为污染源。例如在为期 9 月的雨水生物滤池实验中,出现水力失效现象,大量 TSS 使滤池上部形成堵塞层和污染物累积^[47]。在降雨时,土壤中积累的氮、磷、重金属和细菌等可能通过淋溶,转移到地下水和附近的水体中^[48-49],氮大部分以可溶性的 NO₂⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 形式进行转移^[50]。观察到土壤中有效磷含量高于 25 mg/kg 时,从土壤迅速释放到水体中,对环境形成潜在危害^[51]。南京地区土壤有效磷平均含量约为 64 mg/kg^[52],形成地表水和地下水富营养化风险。

2.2.3 提供生物栖息地

土壤除了自身作用,还是植物的生长基、微生物的载体、各类反应的场所。由于土壤团粒、孔隙等结构的存在,形成非均质的载体,有利于不同类型微生物的生存,甚至是具有完全相反特性的微生物,比如可以同时硝化、反硝化反应等^[53]。在去除雨水径流 COD、N、P 等过程中伴随各种生物化学反应,植物可以通过根系吸收土壤中的水分、污染物以及反应产物,不同类型的微生物和功能酶则参与氨化、硝化、反硝化、富集磷等过程中^[54]。城市土壤的物理化学特征为生物提供的栖息地性质各异,直接影响植物发育、动物微生物丰度以及土壤酶活性,间接影响污染物去除效果。

3 LID 措施的工程土要求

海绵城市建设中以土壤为基底的 LID 措施有人渗设施、滞蓄设施、净化设施,如生物滞留池、雨水

湿地、绿色屋顶、生态草沟、人工湿地等。不同的LID措施对土壤要求各异,入渗设施以土壤的导水性为主要指标,净化设施要考虑土壤与植物结合的净化能力,滞蓄设施需要利用地形结构、在入参与持水之间找到最优的土壤配比,达到雨水处理效益最大化。

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》中指出,结合气候、土壤及土地利用等条件,确定降雨径流控制目标、合理选择适用设施,土壤不满足LID设施要求时,可以进行改良、换土等,但未提出土壤渗透系数、容积密度、配比等具体指标要求,仅提出生物滞留设施的换土层介质类型及深度应符合植物种植及园林绿化养护管理技术要求。《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)规定,粒径 $\geq 2\text{ mm}$ 的石砾不得超过20%,压实土壤密度 $< 1.35\text{ mg/m}^3$,非毛管孔隙度5%~25%,一般绿化种植表层土壤入渗率 $\geq 5\text{ mm/h}$,用于雨水调蓄或净化的绿地土壤入渗率应介于10~360 mm/h。美国的《城市雨水控制设计手册》及各州编制的LID实践指南普遍对土壤指标和工程土推荐配比做出明确的要求。

土壤渗透系数过高,保水能力差,对绿植的养护成本和频次将提高,渗透系数太小,长时间积水滋生蝇虫,雨水径流削减效果差。实际工程研究认为,入渗系数 $> 1.0\text{ m/d}$ 的砂土、壤土适用于LID入渗设施,而入渗系数 $< 0.1\text{ m/d}$ 的黏土不宜建设入渗设施^[55];LID绿化带土壤饱和渗透系数宜为0.3~0.85 m/d^[56];通常居住小区、工业区和城中村等土壤渗透能力较强,农林用地稍差一些,公共设施用地最弱^[57]。早期生物滞留池在设计时通常选用高渗透率的自然土壤^[58]。单一的砂土渗透能力强,但是吸附和微生物降解能力差;单一的黏土可以吸附和有效降解污染物,但是难以下渗,因此LID往往需要掺配工程土。在生物滞留系统中,溶解磷主要通过传输过程中吸附沉淀到土壤介质上去除^[59]。在人工湿地中,磷通过吸附、沉淀和固定等形式存在于土壤颗粒中^[60]。

4 结论

综上所述,城市土壤特征从不同程度上影响其对降雨径流的传输和处理,降雨径流量控制与土壤质地、容重、孔隙度相关,质地粗、容重小、孔隙度大、植物生根容易,则入渗率大,水量控制效果好。径流水质控制更为复杂,细质地占比多、适宜动植物微生物生存的pH、养分重金属少富集的土壤水质控制效果更好,但具体指标范围有待进一步研究,

对待时空差异的环境状况更需要因地制宜。

因此,在建设LID设施前,须明确设施功能需求,对场地土壤进行详细分析,以判断能否直接使用。若以下渗为主要作用,土壤需要具有很好的导水性能,同时充分发挥根系渗水通道作用,土壤的饱和导水率是重要参数;若以去除污染负荷为主要作用,土壤就要具有一定持水性能,土壤质地、容重是重要参数,pH及本底养分、重金属含量也是影响因素。如果土壤不能直接使用,则应以此为基础设计改良土壤配方,确保能发挥好土壤的自身及生物栖息地作用。具体的技术指标应在海绵城市建设技术的相关标准和技术手册中明确。

另外,施工过程和后期维护也不容忽视。施工过程中,应避免场地土壤的机械人为压实。设施竣工后的土壤熟化、植物生长、微生物繁殖需要一定时间,后期积极的维护管理可以提高动植物物种的丰富度^[61]。在人流量较大区域,树立相应的标语牌避免人为压实土壤。定期清理设施区域的垃圾,防止阻塞土壤表层。在污染严重区域,定期检测土壤污染物浓度,若超过土壤负载需更换土壤。

目前研究较多的是LID设施中土壤填料优化改良等,对城市原始状态的土壤研究以及土壤-植物-微生物系统研究较少,不同理化性质的土壤中动植物、微生物群落、酶基因的状态,这些因素直接或间接影响降雨径流入渗和污染物去除的程度、相关性如何等,仍需要深入研究。

参 考 文 献

- 1 Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.
- 2 Greinert A. The heterogeneity of urban soils in the light of their properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(8): 1725-1737.
- 3 Pouyat R V, Szlavecz K, Yesilonis I D, et al. Chemical, physical and biological characteristics of urban soils. *urban ecosystem ecology* [M]. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2010: 119-152.
- 4 Jenerette G D, Wu J, Grimm N B, et al. Points, patches and regions: scaling soil biogeochemical patterns in an urbanized arid ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(8): 1532-1544.
- 5 Mao Q, Huang G, Buyantuev A, et al. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China[J]. *Ecological Processes*, 2014, 3(1): 23-34.
- 6 张甘霖. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护[J]. *科技导报*, 2005, 23(3): 16-19.
Zhang Ganlin. Ecological services of urban soils in relation to urban ecosystem and environmental quality[J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(3): 16-19.
- 7 Kim H, Anderson S H, Motavalli P P, et al. Compaction effects on

- soil macropore geometry and related parameters for an arable field [J]. *Geoderma*, 2010, 160(2): 244-251.
- 8 Huot H, Joyner J, Córdoba A, et al. Characterizing urban soils in New York City: profile properties and bacterial communities [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(2): 393-407.
- 9 Séré G, Schwartz C, Ouvrard S, et al. Soil construction: a step for ecological reclamation of derelict lands [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(2): 130-136.
- 10 中国地质调查局. 华北平原土壤环境酸碱度 (pH) 地球化学图 [EB/OL]. (2015-07-13) [2019-05-10]. http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/stdzhj_4883/201507/t20150713_405748.html.
- China Geological Survey. Geoenvironmental map of soil pH in North China Plain [EB/OL]. (2015-07-13) [2019-05-10]. http://www.cigem.cgs.gov.cn/sghdzcg/stdzhj_4883/201507/t20150713_405748.html.
- 11 Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong [J]. *Landscape & Urban Planning*, 1998, 40(4): 235-249.
- 12 Zhang G L, Burghardt W, Lu Y, et al. Phosphorus-enriched soils of urban and suburban Nanjing and their effect on groundwater phosphorus [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164(3): 295-301.
- 13 Zhang G L. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils—a review [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2015, 61(S1): 30-46.
- 14 Luo X S, Yu S, Zhu Y G, et al. Trace metal contamination in urban soils of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422(3): 17-30.
- 15 Park S J, Cheng Z, Yang H, et al. Differences in soil chemical properties with distance to roads and age of development in urban areas [J]. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(4): 483-497.
- 16 Hanks D, Lewandowski A. Protecting urban soil quality: examples for landscape codes and specifications [M]. Washington, DC: USDA-NRCS, 2003.
- 17 Kays B L, McLaughlin R, Heitman J, et al. Amending soils for enhanced infiltration of stormwater [C]//The Proceedings of International Low Impact Development Conference 2015. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015: 123-132.
- 18 郑 璟, 方伟华, 史培军, 等. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究——以深圳市布吉河流域为例 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1560-1572.
- Zheng Jing, Fang Weihua, Shi Peijun, et al. Simulation study on the impact of land use change on hydrological processes in watersheds in rapidly urbanized areas: a case study of Buji River Basin, Shenzhen [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1560-1572.
- 19 Ridley A M. Soil suction—what it is and how to successfully measure it [C]//Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Sydney: Australian Centre for Geomechanics, 2015: 27-46.
- 20 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 33-38.
- Yang Jinling, Zhang Ganlin, Zhao Yuguo, et al. Effects of urban soil compaction on soil water characteristics: a case study of Nanjing city [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 33-38.
- 21 Blum W E H. Functions of soil for society and the environment [J]. *Reviews in Environmental Science & Bio/technology*, 2005, 4(3): 75-79.
- 22 Williams N S G, Schwartz M W, Vesk P A, et al. A conceptual framework for predicting the effects of urban environments on floras [J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 4-9.
- 23 McIntyre N E, Rango J, Fagan W F, et al. Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2001, 52(4): 257-274.
- 24 Nehls T, Rokia S, Mekiffer B, et al. Contribution of bricks to urban soil properties [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(3): 575-584.
- 25 Santorufu L, Van Gestel C A M, Rocco A, et al. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 57-63.
- 26 Rumble H, Gange A C. Soil microarthropod community dynamics in extensive green roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 197-204.
- 27 Pavao-Zuckerman M A. The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities [J]. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4): 642-649.
- 28 Joimel S, Schwartz C, Hedde M, et al. Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physico-chemical quality [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 584: 614-621.
- 29 Byrne L B, Bruns M A, Kim K C. Ecosystem properties of urban land covers at the aboveground-belowground interface [J]. *Ecosystems*, 2008, 11(7): 1065-1077.
- 30 Ivashchenko K V, Ananyeva N D, Vasenev V I, et al. Biomass and respiration activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (Moscow region) [J]. *Eurasian Soil Science*, 2014, 47(9): 892-903.
- 31 陈 韬, 韩滕紫, 李剑洋. 嵌草铺装系统微生物群落变化研究 [J]. *给水排水*, 2018, 54(10): 48-52.
- Chen Tao, Han Mengzi, Li Jianfeng. Study on the changes of microbial community in the grassed paving system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(10): 48-52.
- 32 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展 [J]. *土壤*, 2016, 48(1): 12-21.
- Wang Lide, Wang Fanglin, Guo Chunxiu, et al. Research progress in soil enzymology [J]. *Chinese Journal of Soil*, 2016, 48(1): 12-21.
- 33 Shaaban M, Wu Y, Khalid M S, et al. Reduction in soil N₂O emissions by pH manipulation and enhanced nosZ gene transcription under different water regimes [J]. *Environ Pollut*, 2018, 235: 625-631.
- 34 Rousk J, Bååth E, Brookes P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *ISME Journal*, 2010, 4(10): 1340-1351.
- 35 Cusack D F. Soil nitrogen levels are linked to decomposition enzyme activities along an urban-remote tropical forest gradient [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 192-203.
- 36 Bielińska E J, Kołodziej B, Sugier D. Relationship between organic carbon content and the activity of selected enzymes in urban soils under different anthropogenic influence [J]. *Journal of Geochemical*

Exploration, 2013, 129: 52-56.

37 Gregory J H, Dukes M D, Jones P H, et al. Effect of urban soil compaction on infiltration rate[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2006, 61(3): 117-124.

38 Yang J L, Zhang G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(5): 751-761.

39 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 珠三角滨海小流域土壤水分吸力及特征曲线研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 507-513.

Fu Congsheng, Chen Jianyao, Zeng Songqing, et al. Soil water content, suction and characteristic curves in the coastal watersheds of the Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 507-513.

40 Scalenghe R, Marsan F A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas[J]. Landscape & Urban Planning, 2009, 90(1): 1-10.

41 Rahardjo H, Indrawan I G B, Leong E C, et al. Effects of coarse-grained material on hydraulic properties and shear strength of top soil [J]. Engineering Geology, 2008, 101(3-4): 165-173.

42 Bratieres K, Fletcher T D, Deletic A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: a large-scale design optimisation study[J]. Water Research, 2008, 42(14): 3930-3940.

43 Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3-4): 310-321.

44 Pierzynski G M. Soil: earth's largest natural filter[M]. Lincolnshire, IL: Water Quality Products, 2015: 20-21.

45 谭文峰, 周素珍, 刘 凡, 等. 土壤中铁铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(5): 726-730.

Tan Wenfeng, Zhou Suzhen, Liu Fan, et al. Advancement in the study on interactions between iron-aluminum (hydro-) oxides and clay minerals in soil[J]. Soils, 2007, 39(5): 726-730.

46 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. Purification of rainwater runoff from urban motor vehicle roads using simulated biological detention ponds[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 75-79.

47 Hatt B E, Fletcher T D, Ana D. Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(7): 2535-2541.

48 李小平, 刘献宇, 徐长林, 等. 河谷型城市土壤有害金属有机酸与细菌淋溶特性[J]. 环境科学学报, 2016, 36(11): 4153-4163.

Li Xiaoping, Liu Xianyu, Xu Changlin, et al. Leaching characteristic of toxic metals in urban soil from valley city by organic acid and soil bacterial[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(11): 4153-4163.

49 仓恒瑾, 许炼峰, 李志安, 等. 雷州半岛旱地红壤非点源氮、磷淋溶损失模拟研究[J]. 生态环境, 2005, 14(5): 715-718.

Cang Hengjin, Xu Lianfeng, Li Zhian, et al. The leaching of non-point source N and P from latosol in dry land of Leizhou peninsula [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(5): 715-718.

50 王 森, 朱昌雄, 耿 兵. 土壤氮磷流失途径的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 22-25.

Wang Sen, Zhu Changxiong, Geng Bing. Research advancement in loss pathways of nitrogen and phosphorus in soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(33): 22-25.

51 Zhang G L, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils[J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 72-77.

52 Zhang G L, Burghardt W, Ying L, et al. Phosphorus-enriched soils of urban and suburban Nanjing and their effect on groundwater phosphorus[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 164(3): 295-301.

53 Dobrovolskii G V. Ecological functions of soils in the biosphere and in human life [J]. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2013, 83(6): 472-475.

54 Chen T, Liu Y, Zhang B, et al. Plant rhizosphere, soil microenvironment, and functional genes in the nitrogen removal process of bioretention [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2019, 21(12): 2070-2079.

55 黄敬军, 武 鑫, 姜 素, 等. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价——以徐州为例[J]. 地质论评, 2018, 64(6): 1472-1480.

Huang Jingjun, Wu Xin, Jiang Su, et al. Geological impact and suitability evaluation of sponge city construction: a case study of Xuzhou[J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1472-1480.

56 朱木兰, 廖 杰, 陈国元, 等. 针对 LID 型道路绿化带土壤渗透性能的改良[J]. 水资源保护, 2013, 29(3): 25-28, 33.

Zhu Mulan, Liao Jie, Chen Guoyuan, et al. Improvement of soil permeability of LID road green belts[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(3): 25-28, 33.

57 师晓阳, 刘淑坡, 李 飞, 等. 海绵城市不同用地类型土壤渗透能力——以厦门市海沧马銮湾试点区为例[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 836-841.

Shi Xiaoyang, Liu Shupo, Li Fei, et al. Soil permeability of different land use types in sponge cities: a case study from the Mayan Bay Pilot Area in Haicang, Xiamen City[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 836-841.

58 Prince George's County. Design manual for use of bioretention in stormwater management [M]. Prince George's County: Prince George's County Government, Watershed Protection Branch, 1993: 15-70.

59 Lucas W C, Greenway M. Phosphorus retention by bioretention mesocosms using media formulated for phosphorus sorption: response to accelerated loads[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(3): 144-153.

60 Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393-399.

61 Home R, Lewis O, Bauer N, et al. Effects of garden management practices, by different types of gardeners, on human wellbeing and ecological and soil sustainability in Swiss cities[J]. Urban Ecosystems, 2018, 22(1): 189-199.