中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2017)09-0106-07
DOI：10.14085/j.fjyl.2017.09.0106.07
收稿日期：2017-05-05
修回日期：2017-08-09

土壤在中国海绵城市建设中的作用研究进展综述

The Review of Soil's Impact on the Sponge City Construction in China

黄俊达
HUANG Jun-da

摘要：为解决日益严重的城市雨洪问题，中国提出了“海绵城市”建设理念。土壤作为“海绵体”中至关重要的元素之一，在海绵城市建设中被广泛研究，然而对土壤的系统性研究尚少。通过对海绵城市建设中关于土壤保护利用的文献综述进行研究，分别分析了土壤组成及土壤理化性质与水分调节的相关性，进而阐明土壤对海绵城市建设的影响，提出相应的土壤保护和利用对策，为今后海绵城市在土壤方面的规划和土壤保护提供借鉴。
关键词：风景园林；海绵城市；综述；土壤属性；保护

Abstract: To solve the increasingly serious urban waterlogging problems, our country put forward to build "sponge city" goal. Soil is widely studied in sponge city constructions, as one of the crucial elements of the "sponge" system . However, the systemic research of soil is limited. Based on the literature review of urban soil protection in the construction of sponge city, respectively analyzing the contribution of the soil composition and soil physical and chemical properties to rain flood regulation in the sponge city. And putting forward the corresponding soil protection and utilization counter measures for the future sponge city planning, utilization and protection in soil.
Keywords: landscape architecture; sponge city; review; soil properties; protection

多年来，随着城市化进程持续推进，中国城市化率已由2001年的36.2%提高至2015年的56.1%[1]，在2050年将达70%[2]。伴随城市化进程的加速，自然坑塘、湿地、水体大量消失，使土壤渗透、植物调蓄能力降低，城市内涝、径流污染等问题日益凸显。为解决国内日益严重的城市水问题，2014年住建部发布了《海绵城市建设技术指南》（以下简称《指南》），开展以“人水和谐”为目标的生态城市建设[3]，强调城市作为“海绵体”的重要性，使城市开发建设后的水文特征接近原始状态，有效缓解城市内涝、削减径流污染、改善水环境，实现城市的自然循环和生态发展。

土壤作为“海绵体”中至关重要的元素之一，在海绵城市建设中被广泛研究。城市化过程中，草地、林地等面积逐渐减少，各类不透水下垫面面积不断增大。同时，土地利用和覆被变化（LUCC）是影响水环境的要素之一，通过改变植被的截留量、土壤水分的入渗和滞留等，影响了区域的水文环境，增加了洪涝发生的频率和强度[4]。因此，为解决城市化带来的诸多水问题，国内积极开展各个层级的应用研究，从城市绿地系统到绩效评价的概念模型，再到城市雨水径流污染的负荷计算、初期弃流控制等具体实践，涵盖“渗、滞、蓄、

黄俊达 /1991 年生 / 男 / 浙江人 / 硕士 / 上海市园林工程有限公司助理工程师 / 研究方向为景观设计（上海 200083）
HUANG Jun-da, who was born in 1991 in Zhejiang province, holding master degree, is an assistant engineer in Shanghai Landscape Engineering Co., Ltd. His research focuses on landscape design(Shanghai 200083).

净、用、排”，但其中对于土壤的系统性研究尚少，并没有在生态水系统规划中予以重视，误导了诸多规划建设[5]。本文在有关海绵城市建设中对土壤的保护利用研究的文献综述基础上，系统性地提出相应对策，为今后海绵城市在土壤方面的规划、利用和保护提供借鉴。

1 研究方法

本文以国内海绵城市建设的相关研究为主要数据源，对其中涉及土壤的文献进行归纳整理。在中国知网——中国学术期刊网络出版总库、中国博士学位论文全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库，以“雨洪”、“海绵城市”和“土壤”为主题词进行初步检索，共有研究文献 269 篇，其中期刊论文 209 篇，学位论文 38 篇，会议论文 22 篇。对于检索结果，进一步核查每篇文献的标题及摘要，对满足以下标准的文献进行全文下载，反之则排除：1）发表时间在 1990—2017 年；2）在文献中同时涉及土壤和海绵城市，或雨洪管理相关方面；3）可以进行全文阅读 / 下载。最终选定 51 篇，其中案例研究 38 篇，综合数据分析 13 篇。在这 51 篇文献中，有关海绵城市的文章以具体实践案例研究为主，缺乏对土壤的系统性研究。通过相关性分析，此 51 篇文献依据土壤属性归类为 2 大类、6 小类，每类研究方向都包含城市建设中不同的水文影响和研究方法（表 1）。尽管单一数据库并不能完全反映中国海绵城市建设在土壤方面的研究程度，但在系统调查缺失的情况下，相关文献亦能反映行业前沿的动态趋势。

2 土壤组成对其理化性质的影响

2.1 土壤有机质对水分入渗的影响

土壤有机质是指一系列存在于土壤中，组成和结构不均一，主要成分为碳、氮的有

表 1 关于土壤属性与海绵城市相关性研究的发表刊物分布信息表

Tab. 1 The distributed information of the studies on correlation between soil properties and Sponge City

研究方向		城市建设的水文影响	研究类型	研究方法	篇数
土壤组成	土壤有机物	径流冲刷导致有机质流失，植被活力下降；污染源增多，破坏土壤生态系统	综合数据分析	生态系统的养分循环；数字图像分析法	3
			案例研究	定位研究法；双环法；不同有机质含量的土壤入渗试验	5
	土壤微生物	绿化中客土的进入，与原生态系统产生不可预期的矛盾；长期积水阻碍土壤的物质、能量流通	综合数据分析	多元回归和 HASM 模型结合分析法	1
			案例研究	常规测定因子评估生态效益法；社会调查法	6
	土壤矿物质	不透水面积增加，径流污染加剧； 土壤夯实，下渗力减弱，地表径流增多	综合数据分析	室内模拟试验；野外调查法	2
			案例研究	城市生态模型检测法；适宜性评价层次结构模型；指标分析法	3
土壤特性	水分入渗能力	地表雨水径流的入渗	综合数据分析	水量平衡法	2
			案例研究	采样统计法；Gardner 经验方程；选择实验法；人为干扰分析法	7
	持水能力	土壤水的储蓄、循环	综合数据分析	数学建模	3
			案例研究	土壤成分替代法；不同尺度城市雨洪模型构建；隐形蓄水系统；绿地滞洪功能量化法	8
	自净能力	污染物吸附与净化；雨水再利用	综合数据分析	多因素影响雨水净化能力	2
			案例研究	土壤—植物生态净化系统；不同土地利用方式的土壤特性；城市绿色环境生态系统目标体系；城市雨洪产汇流计算法；生态经济指标评价法	8

机化合物，是形成土壤的基本结构单元——团聚体的重要基础[6]。而团聚体又通过改善土壤结构、增加土壤孔隙度等土壤理化性质来调节土壤持水能力和水分的入渗[7]。雷志栋等对土壤水动力学的研究指出，水分入渗作为地表水转化成土壤水的唯一途径[8]，是降水再分配过程的重要环节，决定着土壤对雨水的入渗和储存利用的效率。单秀枝等指出，当有机质含量 <15.0g/kg 时，饱和导水率随有机质含量的增加而增加；当有机质含量 >15.0g/kg 时,饱和导水率随有机质含量增加而减小[9]。李雪转[10]、乔照华[11]、万松华[12]则指出土壤有机质对土壤入渗能力和入渗模型参数的影响都比较明显，且拟合曲线符合对数关系，即有机质含量越高，土壤孔隙间的渗透通道越稳定，水分入渗率也就越高[13]。因此，土壤有机质含量深刻影响着绿地土壤的物理结构，并通过改变饱和导水率、入渗率等影响着城市雨水的径流量。

2.2 土壤微生物的水分储存、降解能力

土壤微生物作为土壤的重要组成部分之一，承担着土壤母质分解和有机质固定转化的功能，是土壤速效矿物质、有效养分的储备库[14]。例如，在红树林和草原生态系统中，微生物能加快凋落物与枯木等的分解，将其转化为腐殖质供系统内其他生物使用[15]。同时，土壤微生物也能将生物代谢物和残骸分解为无机物，吸收、固定并释放养分，加速有机碳的循环与转化[16]。李明翰等将微生物、植被根系和暗渠系统组成土壤内部的微生物蓄水层，与无此蓄水层的土壤进行径流渗透的对比测试，指出加设微生物蓄水（IWS）层能有效减少洪峰流量、延长径流滞留时间，减轻干旱对植物的胁迫，并显著提高对悬浮固体以及氮、磷的去除效果[17]。杨清海等采用模拟绿地和降雨的装置，得出在雨后的 5~8d 内微生物对有机污染物的吸附作用最强，且 2 周后总氮含量会恢复到降雨前[18]。因此，土壤中的微生物物质(Microbialbiomass)[19]不仅可以通过调节土壤有机质含量，间接地影响该地区土壤的储水能力[20]，还能对进入土壤的部分污染物进行降解。

2.3 土壤矿物质的吸附能力

大小不一的矿物质颗粒构成了土壤的基础骨架，占其固体重量的 95% 以上，是土壤理化性质的主要影响因素，也是植物养分的重要来源[21]。其中黏土矿物[22]具有表面积大、孔隙多以及极性强的特点，具有较强的吸附性、复水性能以及离子交换性能[23]。例如，熊毅等人对比以高岭石和蒙脱石为主的土壤，前者质地较轻、保肥保水能力差，后者质地粘重、持水力、保肥力强，养分不易流失[24]。戴树桂等则针对土壤多介质污染的现状，指出有机质和各种黏土矿物的保水力和对有机污染物的吸附能力依次为：有机胶体 > 烟石 > 蒙脱石 > 高岭土[25]。因此，土壤中黏土矿物的比例很大程度上决定了该土壤对水分的持留和有机污染物的吸附能力[26]，在城市峰流削减、径流污染处理中有广阔的应用前景。

3 土壤理化性质对海绵城市建设的影响

3.1 土壤的水分入渗能力

土壤作为城市降雨的重要载体，其物理结构将关系到地表径流的下渗、土壤水的补给等[27]，而这种土壤自身具备的导水性即为入渗特性[28]，吸持水分的特性为贮水性，两者共同对降雨进行调蓄[29]。在城市等宏观尺度，解文艳等基于对山西省潇河灌区土壤取样的试验，得出土壤结构由疏松变密实、土壤入渗能力递减的结论，提出土壤中孔隙结构对水分入渗能力起重要作用[30]。刘迪以重庆两江新区为例，通过分析土地利用变化与湿地景观格局的变迁，构建适宜性评价层次结构模型，得到研究区的适宜性分布格局，与现状湿地叠加耦合，指出其中应被保护的湿地土壤资源范围[31]。在街区等中观尺度，王志芳等以美国伍德兰兹社区为例，通过分析其以土壤物理特征为基础、雨洪管理为目标的生态规划方法，为海绵城市建设提供了一个科学的逻辑框架，使场地分析系统化和规范化[32]。王彬彬等针对城市行道树土壤结构退化等问题，提出“破、扩、改、增”，改良种植区土壤、增加水分的入渗率，构建“透蓄型”行道树地下结构[33]。在住宅区等微观尺度，杨珊以龙湖湾别墅区为例，从海绵型居住绿地出发，基于现状条件构建住宅绿地的水循环体系[34]。常青等提出土壤、植物和透水铺装为“海绵城市”三要素，综述土壤结构对植物截留及土壤入渗力等的影响，提出未来雨水调蓄应用和研究的侧重方向[35]。

3.2 土壤的持水能力

土壤持水能力是反映土壤“滞、蓄”水分和供给植物生长的重要指标，影响着土壤中养分的溶解、转移[36]，受土壤理化性质和地下生物量的间接影响[37]。例如，谢亚军等将洞庭湖湿地 3 种主要植被栽植地的土壤持水能力和地下生物量进行对比分析，指出上层土壤的容重、有机质和 1~5mm 径级地下生物量是影响持水能力的主要因素，而中层和下层土壤对持水能力的影响很小[38]。在研究土壤持水能力与海绵城市建设的联系中，刘义存对城市绿地土壤的持水性与海绵城市建设中雨水的渗透、滞留的相关性进行系统分析，并简述其现状及存在问题，提出海绵城市对雨水滞、蓄的改良思路[39]。康殿旭等从城市绿地土壤的孔隙度、质地和饱和导水率 3 个方面，提出针对雨水渗透和滞留能力的土壤物

理改良思路[40]。苏杨等总结了3种土壤持水能力的分析法，并探讨了改善土壤持水能力的主要方法，指出黏土矿物在雨洪调蓄中的良好前景[41]。邹明珠则发表不同看法，认为除城市绿地外，城市周边的农业土壤对于调蓄雨洪也发挥着重要作用[42]。因此，海绵城市的建设需依据土壤物理性质的转变，从弹性设施角度出发，确保土壤的持水能力。

而植物作为土壤和雨水之间的媒介，同样参与到土壤对水环境的一系列作用过程中，如削减城市径流[43]、缓解城市内涝、保护和改善城市生态环境[44]。一方面，植物通过蒸腾作用促进根系吸收土壤水，加速水分循环[45]；另一方面，植物根系通过穿插、分割，改善土壤的非毛管孔隙度、土壤团聚体等物理结构，且乔木的功能优于草本[46]。

3.3 土壤的自净能力

城市中不断增加的建筑、道路，以及频繁的人类活动，使大量污染物在干期沉积，在随后的降雨中被冲刷、携带[47]。这些污水一部分通过雨水口进入城市雨污管网，但是存在部分溢出的地表径流，不足以将污染物稀释至收纳水体的自净范围内[48]，若直接进入水体会造成严重破坏[49]。同时，由于初期冲刷现象与污染物控制率的不确定性，对径流污染的控制需要通过控制总径流量来实现[50]。因此，《指南》中将年径流总量控制率作为重要指标，通过设置雨水截流、净化设施进行初次净化，达到土壤自净范围后回补绿地，最终达到污染物控制及土壤净化并举的目标[51]。郝学凯等通过对城市3大垫层径流，即屋面径流雨水、道路径流雨水、绿地径流雨水进行分类研究，提出从源头削减、中途控制、终端处理的土壤净化控制措施[52]。而对于部分溢流雨水以及绿地径流，由于污染浓度较低，则通过下渗由绿地土壤直接净化。

仇付国等在雨水生物滞留系统的研究中指出，土壤对污染物的净化主要依靠植物根系的吸附、过滤和截流作用[53]。刘梦云等对灌木林地、农地、天然草地和人工草地的4种土壤进行分析，探讨土地利用方式对土壤净化的影响，指出天然草地和灌木林地为最佳利用方式[54]。赵丰通过植物净化城市黑臭河水的试验，实证了在不同植物种类、不同季节和不同曝光强度条件下，植物生理特性的变化规律及其对植物净水效果的影响机制[55]。孟建林等通过土柱模拟试验，研究不同植物根系对有机污染物的净化效果，结果表明根系的净化能力受限于各类理化条件，且与具体的植物品种和土壤类型密切相关[56]。因此，在海绵城市建设中土壤自净的前提是保护本土植物的健康生长，适地适树地发挥生态功能，增加土壤截留、净化雨水的海绵效益。

4 海绵城市建设中土壤的保护利用

海绵城市建设的核心是水的治理问题，而土壤的理化性质是短期内水文变化的主要驱动因素之一。但目前已有的研究大多集中于土壤的改良方面，缺乏土壤属性对海绵城市建设的影响等较为系统的研究和探讨。因此，需要进一步地完善、发展相关的土壤保护策略，具体表现在以下3个方面。

4.1 对既有土壤和水文环境的保护

由于原始场地与土壤长时间在各因素干预下，已形成适应当地的良好水文环境，但伴随城市发展对土地的开发利用，土壤的扰乱翻动及人工绿化等都可能对水文环境造成不可逆的破坏。因此，《指南》中明确将保护性开发、水文干预最小化作为规划原则，在规划之初便将对既有土壤的保护纳入考量。在具体的专项规划或方案实施中，充分考虑我国各地区自然地理和社会经济情况的多样性和复杂性，在现有控规指标的基础上，依据所在区域的土壤特性、竖向和排水管网划分汇水分区，评估建设活动对场地周边所产生的各类影响，着重保护和改善土壤、水文环境恶化严重的区块。再以汇水分区为单元确定雨水控制目标和具体指标，如透水铺装率、调蓄容积、下沉式绿地率等，并与具体土壤保护措施相互对应，实现城市地块的土壤保护和雨水控制目标的有机结合。最终通过观测、检验土壤的长期变化，开展绩效评估，形成因地制宜的长效海绵城市。

4.2 重建土壤有机质以促进植物根系的蓄、净功能

由于城市土壤受到长期的降雨冲刷，以及为了绿化景观效果和防火，往往需要清除枯枝败叶等有机覆盖物，将其移至土壤系统外，这便导致城市土壤有机质含量逐渐贫瘠，植物生根缓慢。因此，通过对场地土壤有机质含量、植被情况等分析评价，构建模型评估开发前后地表径流的情况，选择适宜的空间布局。并对于植物长势欠佳、有机质贫乏的土地进行适当改良：以当地土壤为参照土壤，构建微生物的配体模型，还原有机物的性质与比例，重建以微生物为主导的土壤生化反应。例如，施加有机肥料以增加土壤肥力；配比土壤改良配方以改善土壤质地；将枯枝、落叶收集加工成有机肥归还土壤。保存土壤有机质不仅能够重建土壤养分链循环机制，同时也为植物根系生长提供良好的物质基础。土壤中的有机质形成良性循环机制，根系对养分的吸收、悬浮物的附着、平衡土壤酸碱度等方面均得以提高，充分发挥“蓄、净”的功能。

4.3 优化土壤结构以增加入渗率

良好的土壤结构能有效地控制地表径流量，利用渗透原理回灌雨水、涵养水源，改善整个

城市的生态环境。《指南》中规定 80 %~85 % 的径流控制指标“不外排”，即不允许排入收纳水体，只通过土壤入渗、蒸发、集蓄利用等进行消化。同时在雨季，局部地区土壤的含水量在雨后达到饱和，下一场雨来临之前无法及时下渗、蒸发，导致污染物的扩散。因此，可通过改良土壤结构，增大孔隙率，减小土壤容重，从源头分流雨水。对老城地区而言，绿地率偏低，难以提供足够空间，因此将“绿—灰基础设施”、“多层蓄—排系统”结合，充分利用土壤结构特性提高雨水入渗率；对新建、待建区则预先构建优质结构的土壤，如预留可灵活建设的公共绿地。在具体施工中，考虑将硬质场地作为重型器械工作区域，避免对土壤的压实。过度夯实的棕土地区，可采用表层施肥、种植深根性植被等自然方式逐渐改良土壤的物理结构；或借助器械碾碎深层土块，加入有机质、膨胀页岩等材料以增加土壤孔隙。

5 结语

本研究在既有文献所涉及土壤属性对“海绵城市”水环境作用的研究基础上，分析并概括了不同土壤属性对海绵城市建设的作用，发现土壤结构中孔隙越大，对径流的入渗能力越强，持水能力越弱；土壤有机质等越丰富，持水能力和对污染物的净化能力越强，并通过影响植物根系进一步作用于城市绿地。目前，我国相关的研究对象主要集中于单一的土壤属性对径流的作用，或对水文条件、土壤属性、地形地势等某一区域特性进行分析研究。但土壤作为一个复杂的生态系统，在未来应关注多个属性对城市雨洪影响的对比研究，同时探讨不同地域中土壤类型的差异性、联动性。现有的研究方法中对定量、定性均有涉及，但其中仅少数文献采用因子分析方法（FA）、使用后评价法（POE）、结构方程模型（SEM）等研究方法，缺乏对建成项目的后期数据收集及分析。而海绵城市中的土壤保护、利用是一个持续过程，应实现前中后期的研究并重。在我国城市化速度持续偏高，城市雨洪问题不断困扰人们生活的背景之下，本研究希望在现有海绵城市建设的基础上，结合土壤、地质理论为城市规划提供一个新的角度，建设自然渗透、多层贮蓄、循环净化的“海绵城市”。

注释：

表 1 由作者自绘。

参考文献 (References)：

[1] 王桂新．我国城市化发展的几点思考 [J]．人口研究，2012（2）：37-44.

Wang Guixin. Reflections on urbanization development in China[J]. Population Research, 2012(2): 37-44.

[2] 张妍，黄志龙．中国城市化水平和速度的再考察 [J]．城市发展研究，2010，17（11）：1-6.

Zhang Yan, Huang Zhilong. China urbanization and speed review[J]. Urban Development Research, 2010, 17(11): 1-6.

[3] 汪恕诚．人与自然和谐相处——中国水资源问题及对策 [J]．北京师范大学学报：自然科学版，2009（5）：441-445.

Wang Shucheng. Harmony between man and nature—China's water problems and countermeasures[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009(5): 441-445.

[4] 邓慧平，李秀彬，陈军锋，等．流域土地覆被变化水文效应的模拟——以长江上游源头区梭磨河为例 [J]．地理学报，2003，58（1）：53-62.

Deng Huiping, Li Xiubin, Cheng Junfeng, et al. The river basin is simulated by the hydrological effect of the river basin, which is used as an example[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 53-62.

[5] 张志雄．土壤 水系统中被忽视的向度 [J]．景观设计学，2013，1（4）：70-77.

Zhang Zhixiong. Soil: the neglected orientation of the water system[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2013, 1(4): 70-77.

[6] 彭新华，张斌，赵其国．红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响 [J]．生态学报，2003（10）：2176-2183.

Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetativerestoration on severely eroded red soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003(10): 2176-2183.

[7] 赵世伟，周印东，吴金水．子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究 [J]．水土保持学报，2002（4）：119-122，94.

Zhao Shiwei, Zhou Yindong, Wu Jinshui. Soil moisture characteristics of different vegetations in northern of Ziwuling[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002(4): 119-122, 94.

[8] 雷志栋，杨诗秀，谢森传，等．土壤水动力学 [M]．北京：清华大学出版社，1988：21-33，77-81，103-107.

Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan,et al. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Qinghua University Press, 1988: 21-33, 77-81, 103-107.

[9] 单秀枝，魏由庆，严慧峻，等．土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响 [J]．土壤学报，1998，35（1）：1-9.

Shan Xiuzhi, Wei Youqing, Yan Huijun, et al. Influence of organic matter content on soil hydrodynamic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica,1998, 35(1): 1-9.

[10] 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 Xuezhuan, Fan Guisheng. Soil organic matter content has been studied in the study of soil infiltration capacity and parameter impact[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 188-190.

[11] 乔照华．土壤有机质含量与土壤物理性能参数的相关性分析 [J]．中国农村水利水电，2008（2）：3-4.

Qiao Zhaohua. The correlation analysis of soil organic matter content and soil physical performance parameters[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 3-4.

[12] 万松华，胡厚军，邓桂芹．浅析土壤有机质含量与土壤物理性能参数的相关性 [J]．农业与技术，2013，33(8)：8.

Wan Songhua, Hu Houjun, Deng guiqing. The correlation between soil organic matter content and soil physical performance parameters was analyzed[J]. Agriculture and Technology, 2013, 33(8): 8.

[13] 关卓今．海绵城市建设中的生态选择研究 [J]．中国水利，2016（4）：4-8.

Guan Zhuojin. Ecological selection in the construction of sponge city [J]. China Water Resources, 2016(4): 4-8.

[14] 刘银银，李峰，孙庆业，等．湿地生态系统土壤微生物研究进展 [J]．应用与环境生物学报，2013（3）：547-552.

Liu Yinyin, Li Feng, Sun Qingye, et al. Review on the study of soil microorganisms in wetland ecosystems[J].Chinese

Journal of Applied and Environmental Biology, 2013(3): 547-552.
[15] 曹启民，郑康振，陈耿，等 . 红树林生态系统微生物学研究进展 [J]. 生态环境，2008（2）：839-845.
Cao Qimin, Zheng Kangzhen, Chen Geng, et al. A review of studies on microbiology of mangrove ecosystems[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008(2): 839-845.
[16] 宋长青，吴金水，陆雅海，等 . 中国土壤微生物学研究 10 年回顾 [J]. 地球科学进展，2013（10）：1087-1105.
Song Changqing, Wu Jinshui, Lu Yahai, et al. Advances of soil microbiology in the last decade in China[J]. Advances in Earth Science, 2013(10):1087-1105.
[17] 李明翰，朱宫慧，成赞镛，等 . 生物滞留系统对城市公路径流的治理作用有无内部蓄水层设计的对比研究 [J]. 风景园林，2001（1）：140-147.
Li Minghan, Zhu Gonghui, Cheng Zanyong, et al. The comparison study of the design of the internal aquifer of the urban highway runoff is compared with the biological retention system[J]. Landscape Architecture, 2001(1): 140-147.
[18] 杨清海，吕淑华，李秀艳，等 . 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用 [J]. 华东师范大学学报：自然科学版，2008（2）：41-47.
Yang Qinghai, Lv Shuhua, Li Xiuyan, et al. The effect of urban green space on water runoff pollutant[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2008(2): 41-47.
[19] 李阜棣 . 当代土壤微生物学的活跃研究领域 [J]. 土壤学报，1993（3）：229-236.
Li Fudi. Prosperous areas of current soil microbiology[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993(3): 229-236.
[20] 梁强，李传荣，张锋，等 . 泰安市不同绿地土壤微生物群落结构分析 [J]. 山东农业科学，2017（2）：99-104.
Liang Qiang, Li Chuanrong, Zhang Feng, et al. Tai'an city different green soil microbial community structure analysis[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017(2): 99-104.
[21] 魏开基 . 土壤矿物质 [J]. 北方水稻，1979（3）：38-39.
Wei Kaiji. Soil minerals[J]. North Rice, 1979(3): 38-39.
[22] 孙庆峰，陈发虎，Christophe Colin，等 . 粘土矿物在气候环境变化研究中的应用进展 [J]. 矿物学报，2011（1）：146-152.
Sun Qingfeng, Chen Fahu, Colin Christophe, et al. Application progress of clay minerals in the researches of climate and environment[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011(1): 146-152.
[23] 赵常青，孙影 . 土壤矿物的环境研究意义 [J]. 黑龙江科技信息，2011（1）：78.
Zhao Changqing, Sun Ying. Environmental research significance of soil mineral[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(1): 78.
[24] 汤艳杰，贾建业，谢先德 . 粘土矿物的环境意义 [J]. 地学前缘，2002，9（2）：338-344.
Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 338-344.
[25] 戴树桂，刘广良，钱芸，等 . 土壤多介质环境污染研究进展 [J]. 生态环境学报，2001（1）：1-5.
Dai Shugui, Liu Guangliang, Qian Yun, et al. Progress in the research on environmental pollution of soil multimedia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2001(1): 1-5.
[26] 陈明珠，阎长虹，王玉英，等 . 粘土矿物的环境意义 [J]. 地质论评，2010（6）：899-904.
Chen Mingzhu, Yan Changhong, Wang Yuying, et al. The environmental significance of clay minerals[J]. Geological Review, 2010(6): 899-904.
[27] 章林伟 . 海绵城市建设概论 [J]. 给水排水，2015(6): 1-7.
Zhang Linwei. Introduction to the construction of sponge cities[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015(6): 1-7.
[28] 吕刚，吴祥云 . 土壤入渗特性影响因素研究综述 [J]. 中国农学通报，2008（7）：494-499.
Lv Gang, Wu Xiangyun. A review of influencing factors on soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008 (7): 494-499.
[29] 杨俊玲 . 几种典型杉木人工林凋落物及土壤持水能力研究 [D]. 北京：北京林业大学，2013.
Yang Junling. Water holding capacity of litter and soil in several typical Chinese fir plantations[D]. Beijing : Beijing Forestry University, 2013.
[30] 解文艳，樊贵盛 . 土壤结构对土壤入渗能力的影响 [J]. 太原理工大学学报，2004（4）：381-384.
Xie Wenyan, Fan Guisheng. Influence of soil structure on soil infiltration capacity[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004(4): 381-384.
[31] 刘迪 . 基于雨洪调蓄的城市新区湿地适宜性评价及保护区划定 [J]. 中国园林，2016（4）：85-90.
Liu di. Suitability evaluation and protection area delineation of urban wetland based on precipitation and flood regulation[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016(4): 85-90.
[32] 王志芳，任仲申，张敏 . 以土壤因素为主导的生态规划——美国得克萨斯州伍德兰兹社区规划过程及评价 [J]. 国际城市规划，2015（4）：88-94.
Wang Zhifang, Ren Zhongshen, Zhang Min. Ecological planning based on soil factors—the planning and evaluation of the community planning process of in Texas, USA [J]. Urban Planning International, 2015(4): 88-94.
[33] 王彬彬，范美军，董慧，等 ."透蓄型"法桐行道树系统构建的尝试与探讨 [J]. 山东林业科技，2016（3）：73-76，102.
Wang Binbin, Fan Meijun, Dong Hui, et al. The exploratory of building osmotic and conservative ability of oriental plane roadside trees system[J]. Journal of Shan Dong Forestry Science and Technology, 2016(3): 73-76,102.
[34] 杨珊 . 海绵型住宅绿地中水元素的设计研究——以山西龙湖湾为例 [D]. 杨凌：西北农林科技大学，2016：45-78.
Yang shan. Study on the design of water element in the sponge type residential green space—Illustrated by case of Longhu bay in Shaanxi province[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2016:45-78.
[35] 常青，刘晓文，孙艺 ."海绵城市"绿地规划设计三要素研究进展 [J]. 中国农业大学学报，2017（1）：139-150.
Chang Qing, Liu Xiaowen, Sun Yi. Research progress on the three elements of the planning and design of green space in the sponge city [J]. Journal of China Agricultural University, 2017(1): 139-150.
[36] 任利东，黄明斌，樊军 . 不同类型层状土壤持水能力的研究 [J]. 农业工程学报，2015（19）：105-111.
Ren Lidong, Huang Mingbin, Fan Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(19): 105-111.
[37] 胡灿伟 ."海绵城市"重构城市水生态 [J]. 生态经济，2015（7）：10-13.
Hu Canwei. "Sponge city" reconstructs urban water ecology[J]. Ecological Economy, 2015(7): 10-13.
[38] 谢亚军，谢永宏，陈心胜，等 . 洞庭湖湿地土壤持水能力及其影响因素研究 [J]. 长江流域资源与环境，2014(8): 1153-1160.
Xie Yajun, Xie Yonghong, Chen Xinsheng, et al. Study on soil water holding capacity and its impact factors in the Dongting lake wetlands[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014(8): 1153-1160.
[39] 刘义存 . 绿地土壤物理性质在海绵城市规划建设中的影响 [J]. 农村经济与科技，2016（12）：21-22.
Liu Yicun. Green city planning and construction of soil physical properties in a sponge[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2016(12): 21-22.
[40] 康殿旭，苗伟 . 绿地土壤物理性质在海绵城市规划建设中的影响 [J]. 中国新技术新产品，2017（3）：111-112.
Kang Dianxu, Miao Wei. Effects of soil physical properties on the planning and construction of sponge city [J]. New Technology & New Products of China, 2017 (3): 111-112.
[41] 苏杨，朱健，王平，等 . 土壤持水能力研究进展 [J]. 中国农学通报，2013（14）： 140-145.
Su Yang, Zhu Jian, Wang Ping, et al. Research progress on soil water holding capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013(14): 140-145.
[42] 邹明珠 . 北京市园林绿化种植土壤质量标准的编制研究 [D]. 北京：北京林业大学，2012.
Zou Mingzhu. Study on the quality standard of landscape planting soil in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[43] 张静茹，秦华．试论园林植物景观在海绵城市建设中的担当 [J]. 现代园艺，2016（21）：84-85.
Zhang Jingru, Qin Hua. The discussion talk about garden plant landscape in urban construction in the sponge[J]. Xiandai Horticulture, 2016(21): 84-85.
[44] 高菲．海绵城市建设——低影响开发绿色雨水设施的植物运用 [J]. 中外建筑，2016（7）：115-117.
Gao Fei. Sponge City construction — the application of plants with low impact on the development of green rain facilities[J]. Chinese and Overseas Architecture, 2016(7): 115-117.
[45] 曹云，欧阳志云，郑华，等．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 Yun, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Hydrological adjusting function of forest ecosystems and ecological mechanism: A review[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1360-1365.
[46] 陈奇伯，王克勤，李艳梅，等．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 Qibo, Wang Keqin, Li Yanmei, et al. Effect of different vegetation types on soil amelioration in dryhot valley of Jinshajiang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 60-70.
[47] 张波，史正军，张朝，等．深圳城市绿地土壤空隙状况与水分特征研究 [J]. 中国农学通报，2012（4）：299-304.
Zhang Bo, Shi Zhengjun, Zhang Chao, et al. Study on the soil gap and water characteristics of urban green space in Shenzhen[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012(4): 299-304.
[48] 冯伟，王建龙，车伍．不同地表雨水径流冲刷特性分析 [J]. 环境工程学报，2012（3）：817-822.
Feng Wei, Wang Jianlong, Che Wu. Analysis of runoff erosion characteristics of different surface runoff[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012(3): 817-822.
[49] 邱巧玲．"下沉式绿地"的概念、理念与实事求是原则 [J]. 中国园林，2014（6）：51-54.
Qiu Qiaoling. About concept, idea and practice of "subsided green space"[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014(6): 51-54.
[50] 申丽勤，车伍，李海燕．我国城市道路雨水径流污染状况及控制措施 [J]. 中国给水排水，2009（4）：23-28.
Shen Liqin, Che Wu, Li Haiyan. Urban road rainwater runoff pollution and its control measures in China[J]. China Water & Wastewater, 2009(4): 23-28.
[51] 张乔松．海绵城市与绿地树木 [J]. 园林，2016（10）：34-38.
Zhang Qiaosong. Sponge city and green trees[J]. Garden, 2016(10): 34-38.
[52] 郝学凯，耿立馨．城市径流污染控制与治理的探讨 [J]. 环境工程，2016（S1）：112-113，199.
Hao Xuekai, Geng Lixin. To explore the city runoff pollution control and management of the city[J]. Environmental Engineering, 2016(S1): 112-113, 199.
[53] 仇付国，陈丽霞．雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展 [J]. 环境工程学报，2016（4）：1593-1602.
Qiu Fuguo, Chen Lixia. Research progress on contaminants removal from stormwater runoff by bioretention[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016(4): 1593-1602.
[54] 刘梦云，安韶山，常庆瑞，等．不同土地利用方式下土壤化学性质特征研究 [J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2005（1）：39-42.
Liu Mengyun, An Shaoshan, Chang Qingrui, et al. Study on soil chemical properties under different land use patterns[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2005(1): 39-42.
[55] 赵丰．水培植物净化城市黑臭河水的效果、机理分析及示范工程 [D]. 上海：华东师范大学，2013.
Zhao Feng. The effect, mechanism analysis and demonstration project of water purification plants for the purification of urban malodorous river water[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
[56] 孟建林，王齐，师春娟，等．不同绿地植物根层土壤对中水水质的净化效应研究 [J]. 节水灌溉，2013（3）：42-44，49.
Meng Jianlin, Wang Qi, Shi Chunjuan, et al. Study on the purification effect of root zone soil on water quality in different green land plants[J]. Water Saving Irrigation, 2013(3): 42-44,49.

（编辑 / 张雯娟）