DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.06

海绵城市 LID 设施运行效能衰减机理及寿命分析研究综述

郭 超[1,2,3], 王璐瑶[1,2,3], 谢 潇[1,2,3], 牛 岩[1,2,3], 王益权[4]

(1. 陕西省土地工程建设集团 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075; 2. 陕西省土地工程建设集团 陕西省土地整治工程技术研究中心,陕西 西安 710075; 3. 陕西省土地工程建设集团 自然资源部土地工程技术创新中心, 陕西 西安 710075; 4. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了研究海绵城市 LID 设施长期受纳降雨径流后填料理化性质的演变规律,揭示设施运行效率的衰减过程及机理,探索设施合理的使用寿命,以海绵城市 LID 设施为研究对象,从设施填料理化性质与水分入渗和污染净化能力的关系、入渗性能改变及污染物吸附饱和、LID 设施运行效能衰减及运行寿命几个方面,通过文献资料综合评述国内外研究的进展与不足。结果表明:现有研究大多围绕 LID 设施结构、效果与影响机制展开,对其填料理化性质的演变规律、入渗性能改变及污染物吸附饱和等缺乏系统研究,对设施运行效率的阶段性、动态化衰减过程研究鲜见报道,制约设施运行寿命的机理不明确,影响其合理使用。建议今后从以下 3 个方面开展进一步研究:(1)明确 LID 设施填料在运行期间理化性质的动态演变过程,发展基于 LID 设施水量调控和污染物净化效果的新方法;(2)揭示填料入渗性能和污染物吸附量随运行时间尺度的变化规律,从径流水质、材料两个方面探索海绵城市集中入渗条件下,LID 设施不同填料发生堵塞和污染物吸附饱和的内在机理及驱动因子;(3)阐明 LID 设施运行效能衰减机制,建立 LID 设施运行效能衰减评价方法,进一步研究并确定 LID 设施合理的使用寿命。

关键词: 海绵城市; LID 设施; 理化性质; 水分入渗; 污染物净化; 衰减机理; 寿命分析

中图分类号:TU998.4; TV212.5+3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2022)05-0045-08

Research progress on the decay mechanism of operational performance and life analysis of sponge city LID facilities

GUO Chao[1,2,3], WANG Luyao[1,2,3], XIE Xiao[1,2,3], NIU Yan[1,2,3], WANG Yiquan[4]

(1. *Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an* 710075, *China*; 2. *Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an* 710075, *China*; 3. *Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an* 710075, *China*; 4. *Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: Taking the LID facilities of sponge city as the research object, the evolution of physical and chemical properties of fillers used in the LID facilities after long-term exposure to rainfall runoff is studied, the decay process and mechanism of facility operation efficiency is revealed, and the reasonable service life is discussed. This study reviews the progress and deficiencies of related research at home and abroad from aspects of the influence of filler physical and chemical properties on water infiltration and pollutant purification capability, infiltration performance changes and pollutant adsorption saturation, decay process of facility operation efficiency and its service life. The results show that the existing researches mostly focus on the structure, effect and influence mechanism of such measures. There is a lack of systematic research of filler physical and chemical properties, infiltration performance changes and pollutant adsorption saturation. Also, there are few reports on the phased and dynamic decay process of facility

收稿日期:2021-10-29; **修回日期**:2022-04-28

基金项目:陕西省重点产业创新链项目(2022ZDLSF06-04);陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2022-26、DJNY2021-23)

作者简介:郭 超(1985-),女,陕西府谷人,博士,高级工程师,从事水污染与土壤污染研究工作。

operation efficiency, and the mechanism that restricts the service life of such facilities is unclear, which affects the reasonable use of these concentrated infiltration measures. We suggest that future studies should focus on the following three aspects: firstly, to clarify the dynamic evolution of filler physical and chemical properties during the concentrated infiltration of rainfall runoff in sponge cities, and to explore new methods of water volume reduction and pollutant purification by the LID facilities; secondly, to reveal the changes of the infiltration performance and pollutant adsorption capacity of fillers with the running time, and to explore the intrinsic mechanism and driving factors of clogging and adsorption saturation of different fillers from the aspects of water quality and materials of the rainfall runoff; finally, to clarify the operation efficiency decay mechanism of LID facilities, and to establish a method for evaluating the efficiency decay process, so as to analyze and determine the reasonable service life of the LID facilities.

Key words: sponge city; LID facility; physical and chemical property; water infiltration; pollutant purification; decay mechanism; life analysis

1 研究背景

城市化进程加快,地面硬化带来的城市内涝、水环境污染、地下水补给匮乏、诱发城市地质灾害和建筑物安全等严峻的世界性难题,已经得到世界各国的重视。面对城市化存在的此类问题,国内外提出了许多应对之策,如美国的低影响开发(low impact development, LID)、英国的可持续城市排水系统(sustainable urban drainage systems, SUDS)、澳大利亚的水敏感城市设计(water sensitive urban design, WSUD)等[1],我国提出了建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”,均取得了良好效果。

在我国海绵城市建设过程中,对雨水花园、生物滞留设施、植草沟等 LID 设施的应用较多。这类设施也称为海绵设施、海绵体或雨水径流集中入渗设施,是人为设计的用于处理降雨径流的绿色基础设施[2-3],具有导水[4]、渗水[5-6]、去污[7-8]、蓄水[9-10]等综合功能。LID 设施结构简单,在一定纵向深度范围内(小于 1 m)填充天然填料或人工合成填料,利用填料的导水性能、可渗透性能、污染物净化性能以及蓄积水量的性能,将降雨径流导入地下或蓄积起来,并且将径流携带的污染物经填料吸附、过滤、离子交换、微生物降解等物理、化学、生物作用使其得以自然净化。LID 设施的应用如同给硬化地面打开了一扇扇“窗户”,增加了可透水区域的面积,可有效缓减城市内涝、净化水质和涵养地下水资源[11-12],是目前城市雨水处理较为有效的工程技术措施。由于城市雨水径流存在严重的面源污染,并且 LID 设施集中入渗有别于大规模城市化以前的面源入渗[13],其入渗水量和污染负荷强度大,入渗水量通常为自身面积的 5 ~ 20 倍[14]。因此,LID 设施长期受纳降雨径流集中入渗时,其填料的机械组成、孔隙度、团聚体状态和饱和导水率等理化性质会发生改变[15-16],造成填料堵塞、污染物吸附饱和等众多难题,降低设施削减水量和去除污染物的运行效率,缩短其使用寿命等,这些科学与技术难题已引起了众多专家的极大关注。目前,国内外主要针对 LID 设施结构设计与优化、不同填料对水量和污染物削减效果、影响机制、关键技术与模型模拟等开展了大量研究[17-19],而对 LID 设施填料理化性质的演变规律、入渗性能改变及污染物吸附饱和等问题缺乏系统研究,对海绵城市 LID 设施运行效率的阶段性、动态化衰减过程研究鲜见报道,严重影响了这类技术的合理使用和海绵城市的纵深发展。而海绵城市建设既存在共性,也存在特殊性和复杂性,需对不同城市进行规划和设计[20]。对于我国分布广泛的黄土有其特殊性——质地均一、结构疏松、孔隙发育、下渗能力强,富含 SiO_2、Al_2O_3 和 CaO 等矿物,对调控雨洪和净化污染物起着重要作用。因此,对于资源型和水质型缺水、地下水补给不足的黄土地区,海绵城市 LID 设施具有良好的适用性。但黄土遇水具有湿陷性,且黄土地区径流雨水中含有大量泥沙、黏土颗粒等,理化性状易改变[21]。此外,黄土地区的水中富含游离的可溶性重质碳酸钙,降雨径流经过 LID 设施不同填料界面时,一般情况流速会发生改变,引起重质碳酸钙中的 CO_2 溢出,形成碳酸钙沉淀,从而沉积在设施的不同填料界面,引起填料堵塞。故开展黄土地区海绵城市 LID 设施填料理化性质演变规律、入渗堵塞及污染物吸附饱和等方面的研究具有重要意义,以满足黄土地区海绵城市建设实践的迫切需要。

本文主要通过文献总结和分析目前国内外雨水径流集中入渗对 LID 设施填料影响的研究成果,分别从 LID 设施填料理化性质的变化规律,集中入渗

对填料入渗性能及污染物吸附性能的影响研究,集中入渗条件下 LID 设施运行效能衰减机理及其运行寿命等方面,总结国内外研究进展,对我国现有海绵城市建设过程中理论研究存在的问题与不足进行探索,提出未来海绵城市建设模式下雨水径流集中入渗的发展方向。为城市雨水径流集中入渗工程技术的合理配置与推广应用提供科学依据,为我国海绵城市健康发展助一臂之力。

2　LID 设施填料理化性质研究现状

填料的理化性状是维系“海绵体”各项功能的重要指标,在 LID 设施中填料的物理结构左右着地表径流的下渗、土壤水的补给以及污染物净化等。填料物理性质退化主要表现在饱和导水率、容重、孔隙、质地等方面的变异[22],这些物理指标都与海绵城市建设体系中雨水滞留、渗透、蓄积等有着密切的相关性。已有研究表明,通过土壤结构性改善、孔隙结构调整等措施可以优化土壤的理化性质,调节土壤水分的入渗能力,提高土壤持水、保水性能[23]。土壤容重是指示 LID 设施填料物理性质的重要指标,对土壤水分入渗能力有较大影响,土壤入渗能力随容重增大而递减[24]。城市绿地土壤的持水性能和雨水的渗透、滞留之间的相关性是海绵城市建设成效的关键,土壤结构、容重在海绵城市雨水渗透和滞留方面起着重要作用[25]。一些绿地土壤结构性差,土体紧实,容重较大,孔隙较少,水分难以入渗,持水力差[26]。土壤容重还对土壤饱和导水率起着很大的影响[27]。土壤有机碳对团聚体的形成和稳定具有重要作用[14]。万松华等[28]指出,土壤中有机质含量与团聚体呈正相关关系,有机质通过调节土壤孔隙的大小以及分布情况来影响水分在土体内的传导能力。因此,有机质含量对土壤的物理结构有很大的影响,并且通过改变土壤入渗率、饱和导水率等理化指标影响着城市雨水的径流量。

海绵城市 LID 设施中通常添加粉煤灰、沸石、高炉渣等吸附性能强的材料,研究表明添加粉煤灰后,沙土的持水和保水能力提高了近 10%,并且显著提高了风沙土粉粒和粘粒含量,增加了沙土的稳定性,减小了孔隙结构空间尺度变异性[29]。海绵城市 LID 设施长期处于干湿交替状态,大量研究表明,干湿交替影响土壤团聚体与颗粒有机物和微生物群落之间的关系[30],改变土壤碳、氮、磷等养分循环[31]。土壤黏土矿物比表面积巨大、富电荷,具有较强的吸附性、复水性及离子交换性能[32]。黄土区土壤粘土颗粒含量较高,占 10% ~25% 的土壤组成,土壤粘土矿物富含硅铝酸盐矿物,具有硅氧四面体和铝氧八面体相互叠加的层状结构,广泛存在于各类地质体中,具有较强的吸附性、脱水、复水性能和膨胀、收缩性能等[33]。唐双成[34]研究表明,雨水花园运行 4 年后,土壤颗粒中粘粒含量变化不明显,而提高了砂粒含量的比例,研究区雨水径流特性对雨水花园填料颗粒组分具有重要影响。LID 设施填料中黏土矿物的比例影响水分的持留和有机污染物的吸附,对削减洪峰流量、净化径流污染极为重要[35]。孟凡旭等[36]指出,土体结构变密实,水分入渗能力就会下降,土壤的孔隙结构也是水分入渗能力的重要指示。“植物、土壤和透水铺装”是海绵城市规划设计的三要素,植物可截留降雨,土壤对水分起传导作用,透水铺装结构及透水能力是水分持留、渗透的重要载体[37]。土壤“滞、蓄”水分主要依靠土壤的持水能力,并且土壤持留的水分为植物生长提供水源,也为土壤中养分的溶解和转移提供天然的溶剂[38]。

显然,国内外研究大多集中在土壤的某一属性对径流的作用强度,或对水文条件、土壤属性等某一区域特性进行分析研究,对海绵城市 LID 设施填料理化性质的演变规律研究较少。LID 设施填料是一个复杂的生态系统,需就多个属性对城市雨洪和径流污染影响进行对比研究,将填料理化性质研究由定态向动态演变规律研究转变。

3　LID 设施水分入渗性能及污染物净化能力研究进展

3.1　LID 设施水分入渗性能研究进展

在海绵城市建设模式下,对于 LID 设施的应用较多,雨水径流主要以点状集中入渗。一般情况下 LID 设施的汇流比为 5∶1 ~20∶1,这说明 LID 设施要汇集其自身面积 5 ~20 倍的径流总量,入渗的水量明显增加[13],并且城市雨水径流面源污染严重。因此,LID 设施集中入渗的水量负荷与污染负荷强度均很大,长期集中入渗将改变 LID 设施填料的机械组成、孔隙度、团聚体、饱和导水率等理化性质,造成填料堵塞、污染物吸附饱和等。不同填料的表面电场不同,而土壤颗粒的表面电场对团聚体稳定性具有很大的影响,从而会改变土壤孔隙通道,影响水分入渗过程[39-40]。

通过国内外文献分析发现,农业领域水分入渗试验与实践研究较多,如王艳阳等[41]依据农田试验,通过施加不同量的生物炭,研究了土壤水分入渗

及其分布特性,结果表明生物炭添加能够改善黑土区土壤持水能力和水分入渗特性。曹崇文等[42]基于大田土壤水分入渗试验与相关参数研究,探讨了耕作层土壤水分入渗能力的衰减过程,揭示了耕作层土壤水分入渗能力衰减机理,发现在农业生产周期内,耕作层土壤水分入渗能力变化较大。吴丹[43]研究表明随着灌溉水中的悬浮固体浓度的增大,受灌土壤的入渗性能就会降低,而土壤容重增加、孔隙率降低,优先流的非均匀特征就会明显增大。冯锦萍[44]研究表明影响大田土壤水分入渗特性的直接影响因素有土壤结构、质地、含水率、表土结皮和板结等,农业耕作措施和土壤水的相变等间接影响水分入渗性能。Wang 等[45]根据美国伍德兰兹社区土壤的水分入渗特征,提出了以雨洪管理为目标的生态规划方法,为我国海绵城市建设提供了依据。通过调节土壤粉粒、黏粒比例,可提高水分入渗率,构建“渗透型”土壤结构[46]。杨珊[47]基于海绵型生态绿地建设理念,以陕西省龙湖湾别墅区为例,提出对于住宅绿地,应构建基于现状条件的水循环体系。

综上所述,国内外对 LID 设施或海绵城市入渗性能的研究还是初步的,缺乏系统研究,迫切需要加强分析 LID 设施入渗性能改变的内在机理及驱动因子。有关常规土壤入渗性能研究较多,常规土壤入渗堵塞成因及机理分析将为 LID 设施水分入渗研究提供借鉴。

3.2 LID 设施污染物净化性能研究进展

LID 设施对降雨径流污染物起净化作用,当 LID 设施长期受纳降雨径流时,将会由污染物受纳型变为污染物输出型[48]。降雨径流中大部分颗粒态污染物通过设施表层植被和填料拦截、过滤,降低了出水中的污染物浓度[49]。在降雨期间,设施去除溶解态污染物以填料吸附、离子交换为主,不同填料类型对溶解态污染物的吸附能力不同[50]。对于溶解态污染物,主要通过填料吸附、植物吸收、微生物降解以及生化反应将其转化为难溶的形态而得到有效去除[51]。一般来讲,降雨期间,LID 设施对污染负荷量的去除主要受填料官能团、表面电荷、孔隙结构等因素的影响[52-54],植物吸收、微生物降解占比较少[55]。Gurung 等[56]研究得出雨水花园对重金属有较好的去除效果。Li 等[57]和 Liu 等[49]研究表明生物滞留设施对总氮(TN)负荷去除率大于 41%,对总磷(TP)负荷去除率达 90% 以上。因此,为了提高设施对污染物的去除效果,许多专家对 LID 设施中的填料进行了改良,砂基质填料的生物滞留剂对总悬浮固体(TSS)和 TP 的去除效果较好,去除率均在 95% 以上。由于受多种材料交叉吸附能力的影响,若填料中添加无机组分,对 TSS 的去除将明显提高[34]。改性生物滞留设施对总氮(TN)、氨氮(NH_3—N)和硝态氮(NO_3—N)的平均去除率分别达到 59.45 %、80.27 % 和 41.48 % [58]。也有研究表明 LID 设施对降雨径流中硝酸盐氮(NO_3^-—N)和溶解态磷(DP)的净化效果不理想[59]。

可见,海绵城市模式下 LID 设施对污染物净化能力分析也是初步的,缺乏系统研究,LID 设施人工合成填料或天然填料对污染物的净化效果不是一成不变的,还需进一步进行深入研究,明确 LID 设施填料净化能力的动态演变过程。

4 LID 设施运行效能衰减过程研究现状

海绵城市基于 LID 开发理念,服务于缓解城市内涝、减轻面源污染、保护城市生态系统、恢复和修复生态功能等人居环境的目标。目前,国内外主要工作是针对 LID 或源头措施的本身结构设计、效果、影响机制与模型模拟展开,较深入地研究了不同海绵设施对径流水量、水质的调控效果。伍静[60]基于雨水花园基本构造和工作原理提出了基于水量平衡分析的设计方法,并探讨了其关键设计参数及影响因素。唐双成等[61]通过监测 14 场降雨事件,研究了雨水花园对暴雨径流削减效果,发现分层填料雨水花园对水量的削减范围为 12.0% ~85.9%,平均为 44.3%;对洪峰流量的削减范围为 11.2% ~93.3%,平均为55.8%;均质黄土填料雨水花园对水量削减范围为 9.8% ~79.8%,平均为 39.2%;对洪峰流量削减范围为 20.3% ~ 89.8%,平均为 50.5%,并且随着运行时间其水量削减效果有下降的趋势。Hunt 等[62]研究了季节性变化对生物滞留设施水文效应的影响,结果表明夏天土壤入渗和蒸发蒸腾作用较强,不同地点的生物滞留设施出流量与入流量之比从冬天的 0.54 降低到夏天的 0.07。

目前,国内外学者初步开展了有关 LID 设施污染物累积和对污染物净化能力衰减等方面的研究。张兆鑫[63]研究了生物滞留系统中污染物的累积特征,结果表明,雨水花园中碳氮磷含量不稳定,而重金属含量均呈现增加趋势,受纳道路雨水的植生滞留槽均存在一定程度的多环芳烃(PAHs)累积,并且非汛期 PAHs 含量明显高于汛期,LID 设施长期运行存在一定程度效能衰减的风险。Guo 等[64]指出雨水花园土壤表层下 0 ~ 50 cm 范围内,NH_3—N、

NO_2—N + TON 和 TN 含量较高,而土壤可溶性硝酸盐和磷酸盐随水分入渗发生了明显的迁移,对于重金属,大多集中在表层下 30 cm 范围内,具有显著的表层富集现象。Jiang 等[65]通过研究改良型生物滞留设施对径流中溶解性污染物的修复与累积特征,发现设施中污染含量呈现上层 > 中层 > 下层的趋势。Knappenberger 等[66]通过建立贝叶斯模型,预测了生物滞留设施污染物累积效果,结果表明随着运行时间的增长,磷和氮的去除效果会受到极大影响,填料中污染物滞留量逐渐增加,净化效果具有衰减的风险。Xiong 等[67]提出在低温环境下木屑填料的硝酸盐氮去除率由秋季的 70% ~90% 下降到冬季的 -23% ~35%,总氮去除率由秋季的 75% ~90% 下降到冬季的 20% ~50%。Guo 等[68]通过监测的 54 场降雨事件发现雨水花园对 NH_4^+—N 和 TP 的年均浓度去除率相对较好,但总体上随着监测时间的延长呈下降趋势。

可见,目前国内外有关海绵设施运行效能衰减过程的研究还是初步的,对海绵城市 LID 设施运行效率的阶段性、动态化衰减过程研究鲜见报道,需加强对海绵设施入渗性能衰减及污染物吸附饱和等方面的深入研究,明确 LID 设施入渗堵塞和填料吸附饱和的内在机理及驱动因子,使海绵城市由定态评价向阶段性的、动态化的过程评价转变。

5　LID 设施运行寿命研究现状

LID 设施的运行寿命与填料的入渗性能密切相关。设施填料容重小、孔隙结构性好,其导水能力相对较好,入渗率较大,对降雨径流的疏导作用明显。降雨径流通过填料入渗补给地下水,涵养地下水资源,对降雨径流削减率也越大。若 LID 设施长期受纳降雨径流,过流水量大,污染负荷高,径流携带的颗粒态污染物以及泥沙在填料中得到累积,在填料表层逐渐形成淤积层,造成填料堵塞,影响其使用寿命[69]。Casas - Mulet 等[70]研究表明填料拦截的固体颗粒和植物表面的生物膜由有机、无机的多聚物、腐殖质组成,可形成低密度的凝胶结构,具有很高的堵塞潜能,会加剧设施内填料孔隙堵塞,导致其导水能力逐渐减弱,入渗率减小,对降雨径流的削减逐渐降低,LID 设施的运行寿命逐渐缩短。有关研究表明,人工湿地堵塞后,其出水流量将逐渐减小,对于小试试验系统,水力停留时间由堵塞前21.3 h 延长至 32.5 h,对于中试试验系统,堵塞前水力停留时间为 19.4 h,堵塞后延长至 26.8 h[71]。Casas - Mulet 等[70]指出对于砾石床人工湿地,由于凝胶体的累积使得前 1/4 段床体填料的孔隙率减少了约 50%,且 80% 累积的固体颗粒为无机物。Li 等[72]通过滤柱模拟和场地实验研究 LID 设施的过滤机制发现,当颗粒物质被 LID 设施截留后,填料内部会出现分层现象,细小土粒聚集在填料上层,而较大颗粒会滞留在基质下层,导致填料堵塞,渗透性降低,这不仅影响系统的水质净化效果,同时也会缩短填料的使用寿命。张瑞斌等[73]研究表明铝污泥与沸石配比为 4∶1 的生物滞留系统其渗透性较强,且随着运行周期的增长,其渗透性下降较为缓慢。

制约 LID 设施运行寿命的另一因素是填料吸附饱和,有关 LID 设施填料吸附饱和寿命分析研究较少。不同填料对污染物的吸附能力不同,吴建[74]根据 Langmuir 模型,拟合得出煤质活性炭对 COD 的最大吸附量为 62.86 mg/g。张彬鸿[75]通过动态吸附实验发现在传统 LID 设施填料中添加 10% 的粉煤灰、绿沸石或麦饭石,在进水量约相当于 5 a 总降雨量时,设施对磷的吸附达到了饱和,吸附量约为 22 ~30 mg/kg;对于纯种植土壤,在进水量约为 11 a 总降雨量时,设施对磷的吸附达到了饱和,吸附量为 59.44 mg/kg;而土壤中添加 10% 的给水厂污泥进行填料改良后,在进水量相当于 15 a 降雨量时,设施对磷的吸附仍未达到饱和,吸附量为 94.29 mg/kg。仇付国等[76]明确了给水厂污泥对重金属 Cr 的吸附量随污泥粒径的减小而增加,35 ℃时饱和吸附量达到 45.59 mg/g。砾石地下流人工湿地在没有外部碳源的情况下,对重金属金属(Fe 和 Cr 除外)的吸附迅速达到饱和[77]。绍兴华[78]通过人工合成的铁水合物,研究其对磷的吸附性能,结果表明人工合成的铁水合物对磷具有非常大的吸附潜力,磷的最大吸附容量为 45 045 μg/g。Guo 等[68]通过分析雨水花园运行寿命,提出了雨水花园“三阶段净化能力”的概念,包括净化增长期、净化稳定期和净化衰弱期,初步预测雨水花园运行 10 ~15 a 后填料的吸附位将会处于饱和状态。国内外对人工湿地中填料使用寿命的研究较多。运行 1 ~2 a 后的砾石床人工湿地,对磷的净化效果逐渐下降[79];美国某人工湿地运行 4 ~5 a 后,基质中磷的积累量较大,对磷的净化效果逐渐丧失[80];通过探索填料类型和植物类型对人工湿地使用寿命的影响,表明种植芦苇的人工湿地使用寿命为 22.423 a;而种植黄花鸢尾的人工湿地使用寿命为 22.424 a [81];以给水厂污泥为填料的人工湿地,处理普通生活污水时,

其使用寿命约为 4 ~ 17 a[82]。而世界水协会(International Water Association,IWA)建议人工湿地参考使用寿命为 15 a [83]。LID 设施有别于人工湿地,常年处于干湿交替状态,降雨过程及雨后一段时间,设施填料处于饱和状态,污染物净化机理与人工湿地较为相似。在下一场雨来临之前处于干燥状态,其污染物净化机理类似于常规土壤系统。因此,亟待进一步加强研究,明确 LID 设施在干湿交替状态下对污染物净化能力的动态变化过程,确定其合理的使用寿命。

6 结论与展望

6.1 结 论

目前,国内外主要针对 LID 设施结构设计与优化、设施削减水量和污染物效果及其影响机制、关键技术与模型模拟等方面开展了大量的研究。对雨水径流集中入渗条件下,LID 设施填料容重、孔隙、质地、饱和导水率等理化性质的演变规律研究较少。对 LID 设施不同填料的水分入渗能力和持水能力做了初步探索,针对某一土壤属性对降雨径流的作用强度进行了探索性研究。初步分析了海绵城市模式下 LID 设施不同填料对污染物净化能力,有关填料对污染物吸附饱和的研究较为单一,主要针对特定填料对某种污染物吸附容量进行了定量化研究,缺乏 LID 设施对污染物净化能力的系统性研究。初步开展了有关 LID 设施污染物累积效应和对污染物净化能力衰减等方面的研究,定性分析并预测了 LID 设施的运行寿命,缺乏对 LID 设施阶段性、动态化衰减过程的研究,对 LID 设施合理的使用寿命有待进一步明确,而国内外对人工湿地使用寿命的研究较多,结论较为明确,具有可借鉴价值。

6.2 展 望

为保障海绵城市 LID 设施的合理应用与纵深发展,探明其运行效能衰减机理及合理使用寿命,建议对以下问题加大研究力度:

(1)LID 设施填料理化性质及演变过程。针对 LID 设施土壤理化性质的研究,国内外大多集中在某一土壤属性对径流的作用,对海绵城市 LID 设施土壤理化性质的演变规律研究较少。LID 是一个复杂的生态系统,需针对多个属性对城市雨洪和径流污染影响进行对比研究,明确 LID 设施在雨水径流集中入渗过程中填料理化性质随运行时间的变化过程,揭示不同填料理化性质的动态演变规律;研究雨水径流长期集中入渗对不同填料理化性质的作用强度;建立填料理化性质与水量和污染物削减效果之间的关系,将土壤理化性质研究由定态向动态演变规律研究转变具有极其重要的意义。

(2)LID 设施填料入渗性能及污染物吸附容量。目前国内外对 LID 设施入渗性能的研究还是初步的,而对常规土壤入渗性能研究较多,常规土壤入渗堵塞成因及机理分析将为集中入渗提供借鉴。后期需进一步加强 LID 设施填料入渗性能和污染物吸附性能方面的研究,揭示填料入渗性能和污染物吸附容量随运行时间尺度的变化规律;从径流水质、材料两个方面明确探索海绵城市集中入渗条件下,LID 设施填料入渗堵塞成因及机理;探索不同填料发生堵塞和污染物吸附饱和的内在机理及驱动因子。

(3)LID 设施运行效能衰减及寿命分析。目前,有关海绵城市 LID 设施运行效率的阶段性、动态化衰减过程研究鲜见报道,后期可通过定量分析海绵设施不同填料入渗性能和污染物吸附容量随运行时间、进水水量和水质之间的关系,发展基于海绵城市水量调控和污染物去除效果的新方法。以填料堵塞、污染物吸附饱和、水量削减、水质净化等为参数,建立海绵设施运行效能衰减评价机制;用数值计算模型建立一套海绵设施运行效能衰减过程评价方法,实现黄土地区海绵设施入渗性能和水质净化过程由定态评价向阶段性的、动态化的过程评价转变。进一步分析并确定 LID 设施合理的使用寿命。

在长期运行条件下,LID 设施存在堵塞、通量下降等问题,探明海绵城市建设模式下 LID 设施运行效能衰减过程及合理使用寿命,能够确保海绵设施长期运行可靠,提高工程效益,破解我国城市内涝、控制城市面源污染、提高雨水贮存蓄积等面临的重要难题。

参考文献:

[1] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage[J]. Urban Water Journal, 2015, 12(7): 525 - 542.

[2] 段小龙,李家科,蒋春博. 雨水生物滞留系统关键设计参数研究进展[J]. 安全与环境工程,2022,29(2):111 - 119.

[3] MENG Yike, WANG Yuan, WANG Chuanyue, et al. Nutrients adsorption characteristics and water retention capacity of polyurethane - biochar crosslinked material modified filler soil in stormwater treatment[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102347.

[4] KAYKHOSRAVI S, KHAN U T, JADIDI M A. A simpli-

fied geospatial model to rank LID solutions for urban runoff management[J]. Science of the Total Environment, 2022, 831: 154937.

[5] 欧阳友,潘兴瑶,张书函,等. 典型海绵设施水循环过程综合实验场构建[J]. 中国给水排水,2022,38(2):132 - 138.

[6] 樊金璐,徐 红,陆益忠,等. 基于 LID 组合措施的张家港中心城区雨洪控制效果模拟研究[J]. 水电能源科学,2022,40(3):75 - 78.

[7] ZHANG Zhaoxin, LI Jiake, JIANG Chunbo, et al. Impact of nutrient removal on microbial community in bioretention facilities with different underlying types/built times at field scale[J]. Ecological Engineering, 2022, 176: 106542.

[8] WANG Shumin, LIN Xiuyong, YU Hui, et al. Nitrogen removal from urban stormwater runoff by stepped bioretention systems[J]. Ecological Engineering, 2017, 106(Part A): 340 - 348.

[9] 徐宗学,李 鹏,程 涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局——以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技,2022,20(3):552 - 562.

[10] YANG Dongdong, ZHAO Xin, ANDERSON B C. Integrating sponge city requirements into the management of urban development land: An improved methodology for sponge city implementation[J]. Water, 2022, 14(7): 1156.

[11] 纪亚星,同 玉,侯精明,等. 西咸新区海绵城市建设对沣河洪水特性影响模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):50 - 57.

[12] 徐宗学,李 鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):7 - 17.

[13] 李怀恩,贾斌凯,成 波,等. 海绵城市雨水径流集中入渗对土壤和地下水影响研究进展[J]. 水科学进展,2019,30(4):589 - 600.

[14] 蒋春博,李家科,李怀恩. 生物滞留系统处理径流营养物研究进展[J]. 水力发电学报,2017,36(8):65 - 77.

[15] 许目瑶. 雨水花园集中入渗补给地下水受土壤非饱和区影响的试验研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.

[16] 肖恒婧. 西安地区雨水花园土壤中污染物的时空分布研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.

[17] JIA Zhonghua, TANG Shuangcheng, LUO Wan, et al. Small scale green infrastructure design to meet different urban hydrological criteria[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 117: 92 - 100.

[18] 郭效琛,杜鹏飞,李 萌,等. 基于监测与模拟的海绵城市典型项目效果评估[J]. 中国给水排水,2019,35(11):130 - 134.

[19] 李家科,张兆鑫,蒋春博,等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(1):1 - 8 + 17.

[20] 北京建筑大学. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[21] 吕新波. 湿陷性黄土地区市政道路植草沟雨水入渗与路基沉降研究[D]. 西安:长安大学,2020.

[22] 张毅川. 海绵城市导向下绿地典型下垫面的雨水特征及优化——以新乡市为例[D]. 武汉:武汉大学,2017.

[23] 孙层层. 土壤改良剂对土壤孔隙结构及其水分过程影响的定位研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[24] PAN Limin, CHEN Yingyi, XU Yan, et al. A model for soil moisture content prediction based on the change in ultrasonic velocity and bulk density of tillage soil under alternating drying and wetting conditions[J]. Measurement, 2022, 189: 110504.

[25] 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,2016,27 (12):21 - 22.

[26] 刘澄静,角媛梅,高 璇,等. 哈尼梯田水源区不同景观类型土壤水分的入渗特性及影响因子[J]. 水土保持通报,2018,38(3):99 - 105 + 111.

[27] 刘家宏,王 东,李泽锦,等. 厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J]. 水资源保护,2019,35(6):9 - 13 + 36.

[28] 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):20 - 28.

[29] 朱世雷. 晋陕蒙能源区新构土体孔隙结构及土壤水分入渗特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[30] 包丽君,贾仲君. 模拟干湿交替对水稻土古菌群落结构的影响[J]. 土壤学报,2017,54(1):191 - 203.

[31] 赵金花,张丛志,张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. 中国农学通报,2015,31(35):152 - 157.

[32] ARIF M, LIU Guijian, YOUSAF B, et al. Synthesis, characteristics and mechanistic insight into the clays and clay minerals - biochar surface interactions for contaminants removal—A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127548.

[33] ZHU Ruiliang, CHEN Qingze, ZHOU Qing, et al. Adsorbents based on montmorillonite for contaminant removal from water: A review[J]. Applied Clay Science, 2016, 123: 239 - 258.

[34] 唐双成. 海绵城市建设中小型绿色基础设施对雨水径流的调控作用研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.

[35] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. 给水排水,2015,51(6):1 - 7.

[36] 孟凡旭,王树森,马迎梅,等. 不同果农复合种植模式土壤入渗能力及其影响因素[J]. 干旱区研究,2020,37(6):1469 - 1477.

[37] 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,2017,22(1):139 - 150.

[38] 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,2013,29(19):105 - 111.
[39] 李 喆,胡斐南,杨志花,等. 土粒表面电场对典型黑土团聚体稳定性及水分入渗特性的影响[J]. 水土保持研究,2021,28(5):61 - 66 + 75.
[40] 杨志花. 土壤内力作用对黄土母质发育土壤水力学性质的影响及模拟[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
[41] 王艳阳,魏永霞,孙继鹏,等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报,2016,32(8):113 - 119.
[42] 曹崇文,樊贵盛. 耕作土壤入渗能力衰减机理[J]. 太原理工大学学报,2007,38(2):116 - 118 + 129.
[43] 吴 丹. 灌溉水中悬浮固体对土壤结构性质和水流运动特征的影响研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
[44] 冯锦萍. 用常规土壤物理参数确定入渗参数的方法研究[D]. 太原:太原理工大学,2003.
[45] 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.
[46] 刘增超,李家科,蒋春博,等. 4 种生物滞留填料对径流污染净化效果对比[J]. 水资源保护,2018,34(4):71 - 79.
[47] 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.
[48] MEHRING A S, HATT B E, KRAIKITTIKUN D, et al. Soil invertebrates in Australian rain gardens and their potential roles in storage and processing of nitrogen[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 138 - 143.
[49] LIU Jiayu, DAVIS A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48: 607 - 614.
[50] 赵亚乾,杨永哲,AKINTUNDE B,等. 以给水厂铝污泥为基质的人工湿地研发概述[J]. 中国给水排水,2015,31(11):124 - 130.
[51] 王 鑫,刘雅慧,宁梓洁,等. 海绵城市下垫面基质优化及其对模拟雨水处理效果[J]. 环境工程学报,2018,12(7):1951 - 1958.
[52] 陈 全. 改性纤维素对典型污染物的吸附性能和作用机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
[53] 廖 云. 多孔纳米复合吸附剂的制备及其对铀(Ⅵ)离子吸附性能研究[D]. 上海:东华大学,2020.
[54] 林丽丹. 沸石/水合金属氧化物的表面电荷特征以及吸附性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.
[55] LI Jiake, DAVIS A P. A unified look at phosphorus treatment using bioretention[J]. Water Research, 2016, 90: 141 - 155.
[56] GURUNG S B, GERONIMO F K, HONG J, et al. Application of indices to evaluate LID facilities for sediment and heavy metal removal[J]. Chemosphere, 2018, 206: 693 - 700.
[57] LI Liqing, DAVIS A P. Urban storm-water runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. Environment Science & Technology, 2015, 48(6): 3403 - 3410.
[58] CHENG Junrui, BI Junpeng, GONG Yuemin, et al. Processes of nitrogen removal from rainwater runoff in bioretention filters modified with ceramsite and activated carbon[J/OL]. Environmental Technology, 2022, 5: 1 - 14 [2022 - 05 - 31]. https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2057236. DOI:1080/09593330.2022.2057236
[59] GUO Chao, LI Jiake, LI huaien, et al. Seven-year running effect evaluation and fate analysis of rain gardens in Xi'an, Northwest China[J]. Water, 2018, 10(7): 944 - 959.
[60] 伍 静. 基于海绵城市视域下居住社区雨水花园生态设计的研究进展[J]. 给水排水,2019,55(S1):105 - 107.
[61] 唐双成,罗 纨,贾忠华,等. 填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):73 - 78 + 102.
[62] HUNT W F, JARRETT A R, SMITH J T, et al. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 600 - 608.
[63] 张兆鑫. 生物滞留系统污染物累积特征及对微生态系统的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
[64] GUO Chao, LI Jiake, LI Huaien, et al. Influences of stormwater concentration infiltration on soil nitrogen, phosphorus, TOC and their relations with enzyme activity in rain garden [J]. Chemosphere, 2019, 233: 207 - 215.
[65] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien, et al. Remediation and accumulation characteristics of dissolved pollutants for stormwater in improved bioretention basins[J]. Science of the Total Environment, 2019, 685: 763 - 771.
[66] KNAPPENBERGER T, JAYAKARAN A D, STARK J D. A Bayesian modeling framework to predict stormwater pollutant reduction in bioretention media[J]. Ecological Engineering, 2022, 178: 106582.
[67] XIONG Jiaqing, ZHU Junguo, LI Guohao, et al. Purification effect of bioretention with improved filler on runoff pollution under low temperature conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113065.
[68] GUO Chao, LI Jiake, LI huaien, et al. Influences of stormwater concentration infiltration in rain garden on soil heavy metals at field scale[J]. Water Science & Technology, 2020, 81(5): 1039 - 1051.
[69] 郭 超,李家科,马 越,等. 雨水花园运行寿命分析与价值估算[J]. 环境科学学报,2018,38(11):4391 - 4399.

(下转第 61 页)

(1): 1107 – 1124.
[17] 岳 琼,郭 萍,唐毅宽,等. 灌区广义水资源不确定性多目标优化配置[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(4): 168 – 174 + 183.
[18] 武鹏飞. 邯郸东部地区多水源优化配置研究[J]. 水利科技与经济, 2017,23(2):58 – 63.
[19] 于风存,方国华,王文杰,等. 基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(3):78 – 85.
[20] 张桂林,马 亮,唐晓宇,等. 新疆白杨河流域水资源的优化配置[J]. 水土保持通报,2021,41(3):173 – 180.
[21] 任高珊,李援农,吴冠宇,等. 多目标遗传算法优化配置水资源研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):58 – 61.
[22] LI Xiaona, WANG Xiaosheng, GUO Haiying, et al. Multi-water resources optimal allocation based on multi-objective uncertain chance-constrained programming model[J]. Water Resources Management, 2020, 34(15): 4881 – 4899.
[23] 王锋利. 矿井不同生产时期涌水量计算方法优选研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(12):177 – 183.
[24] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
[25] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护,2020, 36(4):47 – 51.
[26] 白 晓,白峰青. 基于生态理念的峰峰矿区水资源规划研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2019.
[27] 陈义忠,卢宏玮,李 晶,等. 基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J]. 环境科学学报,2016,36(6):2252 – 2261.
[28] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty[J]. Agricultural Systems, 2020, 178: 102685.
[29] 叶 健,刘洪波,闫静静. 不确定性模糊多目标模型在生态城市水资源配置中的应用[J]. 环境科学学报,2012, 32(4): 1001 – 1007.

(上接第 52 页)

[70] CASAS – MULET R, ALFREDSEN K T, MCCLUSKEY A H, et al. Key hydraulic drivers and patterns of fine sediment accumulation in gravel streambeds: A conceptual framework illustrated with a case study from the Kiewa River, Australia [J]. Geomorphology, 2017, 299: 152 – 164.
[71] 詹德昊,吴振斌,张 晟,等. 堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响[J]. 中国给水排水,2003,19(2):1 – 4.
[72] LI H, DAVIS A P. Urban particle capture in bioretention media. I: Laboratory and field studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, 134(6): 409 – 418.
[73] 张瑞斌,潘卓兮,奚道国,等. 铝污泥填料改良生物滞留池对径流污染的削减效果[J]. 环境工程技术学报, 2021,11(4):756 – 762.
[74] 吴 建. 道路下沉式绿地截污功能层净化路面污染径流的性能与设计研究[D]. 南京:东南大学,2018.
[75] 张彬鸿. 生物滞留系统填料改良及对磷素的净化性能试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
[76] 仇付国,童诗雨,吕华东. 给水厂污泥对 Cr(VI)的吸附特性研究[J]. 水处理技术,2022,48(5):59 – 64.
[77] CHEN Jinquan, LI Xuan, JIA Wei, et al. Promotion of bioremediation performance in constructed wetland microcosms for acid mine drainage treatment by using organic substrates and supplementing domestic wastewater and plant litter broth [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404(Part A): 124125.
[78] 绍兴华. 水稻土淹水过程铁氧化物转化对磷饱和度和磷、氮释放的影响[D]. 浙江:浙江大学,2005.
[79] MANN R A. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of constructed wetland gravels and steelworks by – products[J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(2): 375 – 384.
[80] KADLEC R H, KNIGHT R L. Treatment Wetlands[M]. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1996.
[81] 徐德福,李映雪,方 华,等. 4 种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响[J]. 农业环境科学学报,2013, 28(3):587 – 591.
[82] 赵晓红,赵亚乾,王文科,等. 人工湿地系统以铝污泥为基质的几个关键问题[J]. 中国给水排水,2015,35(11):131 – 136.
[83] KADLEC R H, KNIGHT R L, VYMAZAL J, et al. IWA scientific and technical report[M]. London: IWA Publishing, 2000.