

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.001

海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展

李家科¹, 张兆鑫¹, 蒋春博¹, 王书敏²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 重庆文理学院环境材料与修复技术重庆市重点实验室, 重庆 402160)

摘要:海绵城市生物滞留设施是适用于分散式雨水处理与利用的代表性生态技术,但目前仍旧存在一些问题制约其运行效率及寿命。综述了海绵城市建设中生物滞留设施关键技术及国内外研究进展,指出高效净化能力填料的研制、污染物迁移转化模型的建立及设计参数的优化、有机微污染物累积风险评价及修复技术的构建等将成为海绵城市生物滞留设施未来的研究热点。

关键词:面源污染;海绵城市;生物滞留;填料;模型模拟;有机微污染物

中图分类号:TV2134;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)01-0001-08

Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction // LI Jiako¹, ZHANG Zhaoxin¹, JIANG Chunbo¹, WANG Shumin² (1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Environmental Material and Restoration Technology, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: The bioretention facility for sponge city construction is a typical ecological technology suitable for decentralized rainwater treatment and utilization. However, at present, there are still some problems restricting its operational efficiency and service life. The key technologies and research progresses of bioretention facilities in sponge city construction are reviewed. It is pointed out that the development of high efficiency purifying filler, the establishment of pollutant migration and transformation model, the optimization of design parameters, the risk assessment of organic micro-pollutants accumulation and the construction of remediation technology will become the hot spot in the future research of bioretention facilities for sponge city construction.

Key words: non-point source pollution; sponge city; bioretention; filler; model simulation; organic micro-pollutants

我国城市化进程加快,导致城市内涝、水资源短缺、水环境恶化以及生态退化等问题日益凸显。加强城市雨水径流的控制和利用,可以有效缓解这些问题^[1]。城市雨水径流中含有大量的污染物^[2-3],必须重视对雨水径流污染物的控制,这与合理利用雨水资源、生态环境建设与可持续发展直接相关^[4-5]。如何应用雨水管理设施回用雨水资源,是当前雨水调控应用研究中的热点问题^[6]。海绵城市生物滞留设施是适用于分散式雨水处理与利用的代表性生态设施^[7-9],但目前仍旧存在一些问题制约其运行效率及寿命,国内外学者针对这些问题开展了相关研究。本文从填料改良、工艺参数设计、填料污染修复等方面进行总结并就其发展方向进行展望。

1 生物滞留设施填料改良研究进展

生物滞留设施中填料对地表径流量削减和水质净化起到关键作用,是发挥生物滞留设施功能的关键因素。为提高生物滞留设施运行效果的填料改良,已成为国内外研究的热点问题。现有的生物滞留设施填料主要分为分层填料和混合填料两类。国外在填料的选取方面已开展了大量研究,且大多采用混合填料的方式设计建造生物滞留设施^[10],国内大多数填料的设计则都是基于国外的研究经验。在生物滞留设施填料改良中,需综合考虑填料对雨水径流量削减和水质净化的能力。

1.1 生物滞留设施填料改良对水量削减作用

生物滞留设施可通过土壤蓄滞以及截留作用使

基金项目:国家自然科学基金(51879215);陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-347);陕西省重点研发计划重点项目(2017ZDXM-SF-073)

作者简介:李家科(1975—),男,教授,博士,主要从事水资源保护及城市雨洪管理与利用等研究。E-mail: xaut_ljk@163.com

城市降雨径流的流速降低,削减洪峰流量,从而使进入城市雨水管网的水量减少,起到保护老旧城市雨水管网、缓解下游管网压力和城市内涝的作用^[11]。近年来,国内外对改良填料生物滞留设施的水量控制研究主要集中在填料的渗透性、持水能力和成本等方面。Jay等^[12]选取60%~80%砂质土壤、5%~10%有机质及小于5%黏土作为生物滞留设施的填料,研究表明该填料具有较好的渗透性能,且成本较低。Coustumer等^[13]通过试验发现,随着水力负荷的增加,土壤/填料的渗透率存在快速降低—稳定—快速降低3个阶段,同时由于水力压实和沉积物等的联合作用而出现堵塞现象,最终土壤渗透系数减小。高晓丽^[14]研究了添加不同改良剂对生物滞留设施填料持水性的影响,结果表明,蛭石、草炭土及珍珠岩等改良剂的添加能有效提升填料的持水性,同时,填料的持水性直接影响填料储水量及植物生长状况。Jiang等^[15]对中试规模的生物滞留设施进行研究,发现50%粉煤灰+50%砂具有相对稳定的水量和峰值流量削减率,可作为生物滞留设施改良填料用于降雨径流量削减。可见,生物滞留设施中填料对水量的削减起到关键作用,在生物滞留设施的提效关键技术研究,必须考虑填料改良对水量削减的效果。

1.2 生物滞留设施填料改良对水质净化作用

生物滞留设施中,填料对水体中悬浮物、油脂类有机物、重金属、营养物(氮、磷)和其他特殊性污染物(病原微生物、有机微污染物)的去除起到关键作用^[16]。传统生物滞留填料BSM(bioretention soil media)配比为30%~60%沙、20%~30%表层土以及20%~40%的有机物质,净化效果不太理想。传统生物滞留设施填料的水质净化效果并不稳定,国外已开展大量改良填料的研究,即通过改良剂的投加来提升设施的水质净化效果。改良剂的筛选应遵循易于获取、成本适中、本地适用性等原则,且能够增加生物滞留填料的通透性、比表面积、吸附能力,其中,目前应用较广的改良剂有给水厂污泥WTR(water treatment residuals)、蒙脱石MMT(montmorillonite)、海绵铁、草炭土等^[17-19]。

从目前来看,在悬浮物、油脂类有机物和重金属的去除上,生物滞留设施表现出较为稳定的运行效率。降雨径流中的总悬浮固体TSS主要通过填料的过滤、沉淀和吸附等作用被滞留,Jiang等^[20]对生物滞留设施进行现场监测,结果发现植生滞留槽、雨水花园对径流中的TSS负荷削减率均不小于90%,且保持稳定。生物滞留设施对可生物降解的油脂类有机物也有很好的去除效果,Hong等^[21]发现有机碳

在生物滞留设施中可被有效去除,去除率达到83%~97%,有机碳在被填料吸附后3~10d可被生物降解。生物滞留设施对重金属的净化研究一般选择Cu、Zn、Cd、Pb作为代表。Li等^[22]研究不同改良填料的生物滞留柱,发现BSM+10%WTR、BSM+10%绿沸石和BSM+10%麦饭石对Cu和Zn的平均负荷削减率大于80%。

相较而言,传统的生物滞留设施对营养物如N和P的去除效果不稳定^[3,23-24]。为了提高生物滞留设施对N的去除效率,添加外部碳源如硬木屑、草秆、落叶堆肥等,可以提升填料对N的吸附及去除效果。Zinger等^[25]研究发现,添加氮源并设置内部蓄水,能够有效提升生物滞留设施对NH₃-N及TN的去除率;Jiang等^[26]开展了不同改良填料(BSM、BSM+5%WTR、BSM+5%绿沸石、BSM+5%粉煤灰等)对N的去除研究,通过对进水/出水中的N的负荷量进行监测,结果表明,添加改良剂的填料总氮负荷削减率比传统BSM高10%。生物滞留设施对P的去除效果波动性较大,许萍等^[27]通过对生物滞留设施的长期监测,在运行结果中发现,P的去除率极不稳定(-240%~60%),甚至会出现出流浓度大于入流浓度的情况。这种现象很大程度上归因于传统填料中有机物含量较高造成营养物本底值较高,P存在淋溶现象^[28]。因此,通过混掺或分层填充改良剂,可以取得较好的P去除效果。Erickson等^[29]添加可以增大吸附面积的改良剂,发现当添加2%的钢丝绒时,生物滞留设施对TP的去除率可稳定在80%。作为给水厂净水工艺的副产物,WTR富含Fe或Al的氧化物或氢氧化物,可以有效地改善填料对PO₄³⁻的吸附能力^[30-31]。虽然国内外在填料改良去除N、P等污染物方面开展了一些研究,但关于改良剂添加的适宜比例和其对污染物的作用机制还需深入研究。

同时,还必须考虑其他特殊性污染物,如病原微生物及有机微污染物。生物滞留设施能够有效地降低雨水中病原微生物的数量^[32]。Lau等^[33]采用生物炭作为改良剂,对生物滞留设施填料进行改良,结果表明在进水大肠杆菌浓度为 $0.3 \times 10^6 \sim 3.2 \times 10^6$ CFU/mL(CFU为菌落形成单位)时,去除率达到了98%以上;Chandrasena等^[34]研究发现生物滞留设施对大肠杆菌的去除率可达到90%以上。但根据目前报道,生物滞留设施对病原微生物的去除效果具有不一致性,需要进一步对填料进行改良以满足雨水径流的病原体去除标准^[35]。降雨径流中有机微污染物(organic micro-pollutants)主要包括持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs),

如多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)^[36]、多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs)^[37]、有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs)等。目前,对生物滞留设施填料与有机微污染物的去除已开展了一定研究。Boving^[38]通过现场试验研究了不同设计条件下生物滤沟对 10 种 PAHs 的去除效果,结果表明,溶解相 PAHs 的平均去除率可达 67%,与滤料量呈正相关关系;LeFevre 等^[39]的研究结果表明,生物滞留设施中填料的吸附对萘的去除贡献可达总去除率的一半以上。这也就意味着在生物滞留设施提效研究中,必须重视填料改良,提高生物滞留设施对上述两类特殊性污染物的去除效果。

综上所述,在填料改良方面,国外研究起步较早,相关设计规范也较为完善,而国内对于填料的选择标准都基于国外的经验^[13]。但是,由于国内外存在地理差异,国内外土壤类型、水文气象、交通条件等不同,径流特征也大不相同,国外的填料选择标准在国内难以直接应用。结合目前关于生物滞留设施水量削减、水质净化的研究来看,对于填料及其改良研究还存在很大空间,国内外大多数研究多偏向于生物滞留设施对常规污染物的净化效果,对特殊性污染物(病原微生物及有机微污染物)去除的研究鲜见;大多数研究只是偏向于各类污染物的短期净化效果,缺乏对改良填料生物滞留设施长期水质净化效果的研究。深化这方面的研究,可为该技术更好地应用于城市面源污染控制提供参考。

2 生物滞留设施工艺参数设计研究进展

在海绵城市建设中,各地所处地理环境不同及对雨水控制效果的要求不同,建立生物滞留设施水量和水质模拟模型,可得到最佳设计参数^[40]。

2.1 生物滞留设施污染物迁移转化机理

明确生物滞留设施中径流污染物的迁移转化机理是建立模拟模型的基础。目前,对于 N 和 P 在生物滞留设施中的迁移转化过程,国内外已开展了一定的研究。Li 等^[3]研究了生物滞留设施对 TN、颗粒态有机氮 (PON)、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 DON 的去除机理,结果表明 PON 通过生物滞留设施的沉降/过滤去除, NH_4^+ -N 通过离子交换/吸附去除, NO_2^- -N 通过氧化去除,DON 和 NO_3^- -N 发生了淋溶现象;Liu 等^[31]对生物滞留设施中 P 的去除开展了研究,发现 WTR 改良后的生物滞留系统可以增强对溶解性活性磷 (SRP)和溶解性有机磷 (DOP)的去除,这样也可以有效防止径流中和填料中颗粒态磷 (PP)的淋溶现象;Jiang 等^[41]研究了 N 和 P 在生

物滞留设施中的累积情况,发现填料中污染物浓度的变化受系统污染物背景和入流污染物负荷的影响,在系统运行初期,部分污染物的淋溶量大于其累积量,系统运行稳定后,污染物累积量大于浸出量;Fan 等^[42]采用同位素示踪法,以 $^{15}\text{NH}_4^+$ -N 为示踪剂,追踪了 $^{15}\text{NH}_4^+$ -N 在土壤层中的迁移转化过程,发现在降雨结束后 60 h,进入生物滞留系统的 $^{15}\text{NH}_4^+$ -N 在土壤中主要以 $^{15}\text{NH}_4^+$ -N、 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N、TON- ^{15}N 的形式存在,入流中 $^{15}\text{NH}_4^+$ -N 的 41.46% 被植物吸收或反硝化。目前,关于生物滞留设施污染物 (N、P 典型重金属及有机微污染物) 的迁移转化机制尚不完全明晰,通过引入同位素示踪法等方法,可以进一步揭示污染物的迁移转化及归趋机理。

2.2 生物滞留设施模型模拟

目前较为典型的低影响开发 (LID) 单项设施模拟模型有 RECARGA、DRAINMOD 和 HYDRUS 等,国内外基于这些模型开展了一定的研究。孙艳伟等^[43]利用 RECARGA 模型,模拟了生物滞留设施的水文特性,发现径流削减幅度、地下水补给幅度和积水时间受生物滞留池面积的影响最为显著。Brown 等^[44]应用 DRAINMOD 模型对美国两地的生物滞留设施进行模拟,结果表明,两处生物滞留池排水和蒸发模拟效果良好。唐双成等^[45]利用 DRAINMOD 模型,建立了雨水花园蓄水层深度与其长期运行效果之间的关联,发现蓄水层深度与雨水花园的水量削减和水质净化呈正相关关系。Li 等^[46]通过生物滞留设施中试和 HYDRUS-1D 软件,构建了不同填料生物滞留池中水分运移及溶质迁移转化模型,明确了不同情景下生物滞留池对水量和水质的调控效果。殷瑞雪等^[47]应用 HYDRUS 模型模拟了水分、污染物在生物滞留设施中的运移特征以及生物滞留池的产流过程。但是,这些现有模型均存在一定的局限性,如 RECARGA 模型是专门用于生物滞留设施水力模拟的模型,不能对溶质的运移情况进行模拟;DRAINMOD 模型只能模拟氮素和盐分的运移情况,不能模拟重金属等其他污染物在土壤/填料中的运移情况;HYDRUS 模型是一种物理模型,对生物滞留设施中化学反应和生化反应的模拟能力存在不足。

同时,相关学者也提出了一些模型。Li 等^[48]对生物滞留设施中磷素的吸附机理进行了研究,发现磷素的吸附作用主要分为两步:快速吸附及慢速吸附,前者主要集中发生在磷素进入设施后通过高度可逆的静电离子交换反应进行吸附;后者是基质内部慢速不可逆的单/双配位体吸附反应,快速吸附的污染物逐渐转移到内部的慢速吸附位上。在降雨径流入流期间,快速吸附起主导作用,而在非降雨期

间,慢速吸附起主导作用。在此基础上,Li 等^[46]建立了基于填料平衡浓度 C_{eq} 假设的出水磷浓度预测模型,但在具体实践中,仍旧需要对该模型进行进一步检验。Bäckström^[49]虽然根据生物滞留设施水力停留时间和颗粒沉降速度之间的关联性提出了经验性公式,但该公式必须遵循较为严苛的使用条件。Deng 等^[50]基于可变的停留时间模型,建立了 VART-DN(variable residence time)模型,该模型在设施处理初期雨水反硝化过程方面具有较好的模拟效果。可见,在水质模拟方面,现有的生物滞留设施水质模型大多只能对有限的污染物运移过程进行模拟,针对污染物迁移转化及归趋的模型相对较少,并且多使用基于监测数据分析的经验公式。因此,亟须通过模型深度开发模拟生物滞留设施中污染物的迁移转化过程。

总之,从目前的相关研究来看,在明确生物滞留设施污染物迁移转化机理的基础上,建立精度高、灵敏度强、使用范围广、适用于多种污染物水质水量耦合机理的模型是今后研究的重点。

2.3 生物滞留设施设计参数优化

生物滞留设施现有设计方法主要包括:基于达西定律的渗滤法、蓄水层有效容积法、基于汇水面积的比例估算法、基于水量平衡分析的设计方法、基于单场次降雨分析的生物滞留设施规模设计方法和基于长系列降雨统计的生物滞留设施规模设计方法^[51]等。总体而言,这些方法都存在一定的局限性,在选择使用时要分析生物滞留设施的结构特点、功能侧重、设计标准和所在地的土壤特性等因素,同时,要考虑设计优化。因此,优化生物滞留设施内外部因素如重现期、汇流比、进水浓度、蓄水层厚度、种植土层厚度、人工填料厚度、淹没区高度等,提升对径流污染物的去除效果,是提升生物滞留设施运行效率的关键技术。目前,国内外对生物滞留设施设计参数优化开展了一定研究。Jiang 等^[52]研究表明重现期及汇流比的设计对污染物负荷削减至关重要,当重现期从 0.5 a 增加为 3 a 时,TN 的负荷削减率降低 15%,当汇流比从 10:1 增加至 20:1 时,TN 负荷削减率降低 12%。蒋春博等^[9]通过大量模拟降雨试验并结合数值模拟与理论分析方法,研究了内外部因素对生物滞留设施水质水量调控效果的影响,建立了水质、水量调控效果与填料组合方式、填料厚度、淹没区深度及植物条件等各因素之间的多元偏最小二乘回归模型。王书敏等^[53]针对山地城市暴雨径流污染特性和山地城市地形特点,提出一种山地城市道路径流阶梯式脱氮装置,研究表明植物类型、外加碳源、系统流态 3 个因子对系统运行的

效能均有一定影响。蒋春博等^[9]研究表明,生态滤沟在 150 mm 淹没区高度条件下的综合去除率(各污染物去除率的平均值)优于没有淹没区条件和淹没区高度为 350 mm 下的去除率。但是,在生物滞留设施中,由于影响其去除效率的因素较多,针对目前的研究而言,这些实际的试验结果存在许多不确定性。因此,在利用数学模型对水分和溶质的运移进行数值模拟基础上,通过模型和试验相结合的方法来研究生物滞留设施的填料类型、填料层厚度、降水量大小、污染物浓度等对净化效果的影响,探讨适宜的运行条件,优化设计参数,可为生物滞留设施的提效提供依据。

3 生物滞留设施填料污染修复研究进展

目前,国内外研究人员已经针对生物滞留设施去除 TSS、TN、TP、COD 等常规污染物的效果开展研究,但对有机微污染物特别是持久性有机污染物在生物滞留设施中去除过程、生态毒性及修复方面的研究较为鲜见。

3.1 生物滞留设施有机微污染物去除过程

城市建设开发后,雨水径流中的污染物由开发前的面上整体消纳,逐渐转变为开发后的点上集中入渗,进而被生物滞留设施去除^[54]。由于雨水径流中的有机微污染物都具有生物蓄积性、持久性、长距离迁移性等特征,对生物滞留设施去除有机微污染物的过程需要进行深入研究。研究表明,生物滞留系统主要通过填料吸附、植物吸收、微生物降解和挥发等作用去除径流中有机微污染物^[55-56]。但是,关于生物滞留系统去除雨水径流中典型有机微污染物的具体过程及机制的研究并不多见,或只局限于小型试验研究,如 LeFevre 等^[39]就在实验室模拟生物滞留系统进行研究,明确了不同途径对 PAHs 的去除贡献率,生物滞留系统对 PAHs 的去除率可达到 80% 左右,其中填料吸附贡献率为 56% ~ 73%,生物降解的贡献率为 12% ~ 18%,植物吸收贡献率为 2% ~ 23%,而挥发几乎不起作用(贡献率低于 1%)。Dibiasi 等^[55]通过对雨水花园的长期监测,发现雨水花园对降雨径流中的 PAHs 有很好的去除效果,年平均负荷削减率可达 87%。刘梁^[57]对生物滞留池中累积的 PAHs 进行了监测,结果表明,接纳道路雨水径流的生物滞留池土壤中有 12 种 PAHs 超标,最高超标倍数更是达到了 979.4 倍,且 PAHs 浓度在设施入流口处的土壤中最高。目前,生物滞留系统去除有机微污染物的研究仅针对 PAHs(如萘、芘等),对其他有机微污染物 PCBs、OCPs 等的研究较少,对于降雨径流中新型污染物(emerging

contaminants, ECs)的研究更少。同时,相关研究也多局限于小型试验研究,对于生物滞留设施去除有机微污染物的实际运行效果研究鲜见。因此,针对以上问题,需对生物滞留设施去除有机微污染物开展系统性研究,提升其对有机微污染物的生物降解效率,防止有机微污染物在土壤累积并进入地下水,造成进一步污染。

3.2 生物滞留设施有机微污染物生态毒性

虽然雨水径流中有机微污染物能够有效被生物滞留设施去除,但大多数是被土壤/填料所吸附截留。有机微污染物的累积不仅存在污染风险,也威胁生物滞留设施的使用寿命。有关有机微污染物累积对生物滞留设施土壤生态系统影响的研究还较为少见,因此,开展生物滞留设施有机微污染物累积的生态毒性方面的研究很有必要。目前,主要采用土壤生物特性诊断法来评价土壤污染的生态毒性,主要包括土壤生物量、土壤呼吸、酶活性、硝化势、群落结构和多样性等指标^[58-59]。其中,土壤酶活性能反映土壤生物化学反应程度, Maliszewska-Kordybach 等^[60]比较了土壤中 PAHs 对脱氢酶、脲酶和微生物生物量等生理指标的影响,发现敏感性最高的是脱氢酶。土壤微生物群落结构和多样性是评价土壤健康的重要指标,通过对土壤中微生物活性、多样性及群落结构进行分析,可以揭示土壤中微生物对土壤中污染物累积的响应关系。Hong 等^[61]研究了雨水花园中微生物群落结构的变化,结果表明,进水水质特征、设施生物稳定性、植被类型是影响雨水花园中微生物生长的重要因素。同时,生态毒理基因组学是探索化学物质毒性作用分子机制的有效工具,为研究生物体对污染物的耐受性提供了新的视角^[62]。在生态毒理基因组学研究领域中,群落和种群基因组学可以为研究不同地区物种组成以及与环境污染的潜在关系提供新思路^[63]。

通过对有机微污染物累积严重的生物滞留系统中土壤进行生态毒性诊断,分析土壤中的酶活性、微生物群落结构及多样性,并对其基因毒性进行评估,进而建立生物滞留系统有机微污染物累积的污染风险评价方法,加强生物滞留系统中有机微污染物累积的污染风险管控是很有必要的。

3.3 生物滞留设施生物强化修复技术

随着运行时间的增加,很多因素导致生物滞留设施性能的降低/衰减,这些因素主要包括沉淀累积、管道堵塞、植物入侵、堤岸侵蚀及土壤流失等^[64]。其中,降雨径流中大量污染物累积(特别是有机微污染物的累积,包括 PAHs、PCBs、OCPs 等)造成的土壤板结或堵塞是影响生物滞留设施性能的

最直接、最主要因素。在对生物滞留系统中有机微污染物累积的风险进行管控的同时,可以考虑采用提升有机微污染物的生物降解效率的方法对已被污染的土壤进行修复。采用外部修复方法,研究高效的土壤有机污染生物修复技术是当前重点。在土壤生物修复中,国内外采用的主要技术包括微生物修复、植物修复和一些联合修复技术^[65]。其中,生物修复技术主要是通过添加具有特定功能微生物的方法来提高原始处理系统的处理效果,促进难降解有机物的去除^[66]。目前,关于城市地表径流中有机微污染物降解的研究主要针对单类有机污染物降解菌的构建,其中已筛选分离出许多高效有机微污染物降解菌,如假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、寡养单胞菌属(*Stenotrophomonas*)、弧菌属(*Vibrio*)和解环菌属(*Cycloclasticus*)等^[57,67-68]。对于降雨径流中复杂的有机微污染物,若采用单一的有机微污染物降解菌进行强化,由于降解菌与土壤中原土著微生物产生竞争,往往不能高效地进行新陈代谢,从而无法达到预想的生物强化效果。混合菌群中的不同菌株可以利用不同的底物来增加底物的利用范围和降解速率^[69]。联合修复技术作为一种新兴的土壤污染修复技术,不仅能有效修复单一污染物,还能实现土壤复合污染的修复,是近年来国内外的研究热点。其中,微生物-植物联合修复是较为常用的一种技术,如根瘤菌和菌根真菌双接种能强化紫花苜蓿对多氯联苯的修复作用^[70],植物的根系分泌物可以影响细菌菌群数量,达到提高多环芳烃降解效果的目的^[71]。

明确有机微污染物的累积对生物滞留设施中土壤/填料微生物群落产生的影响及污染风险,科学制定管控措施,规避有机微污染物累积所存在的风险,应用土壤修复技术,提升生物滞留设施对有机微污染物的降解效率,在非降雨期内对吸附的有机微污染物进行生物降解,可延长生物滞留设施的使用寿命。

4 展望

a. 改良填料能够很大程度地提升生物滞留设施运行效果,但国内外对于生物滞留系统中的填料及其改良研究还存在很大不足和研究空间,仍未形成一套成熟、系统的设计标准。同时,更应注重研制符合我国实际情况的代表性改良填料,并开展生物滞留设施长期水量水质调控效果的研究。

b. 现有研究大部分只针对生物滞留设施的水量水质调控效果,对于污染物迁移转化机制及相关模型缺乏系统研究,运用模型对生物滞留系统设计

参数优化的研究也不足,且理论研究成果缺乏实际工程的验证。通过引入同位素示踪法等,可以进一步研究污染物的迁移转化机制,建立相关数学模型并开展基于区域水文地质条件的设施参数优化研究。

c. 生物滞留设施在有机微污染物去除方面仍存在不足,未来研究可结合分子生物学技术,系统性研究有机微污染物在生物滞留设施累积情况及对填料中微生物的抑制和毒性。同时,还应深入研究土壤有机污染修复技术及其机制,在非降雨期间提高生物滞留设施吸附有机微污染物的降解效率,并延长生物滞留设施的使用寿命。

参考文献:

[1] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. 水资源保护,2018,34(5):13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection,2018,34(5):13-19. (in Chinese))

[2] 沈金星,王沛芳. 高速公路雨水径流污染浓度的系统动力学模拟 [J]. 水资源保护,2018,34(4):1-7. (SHEN Jinxing, WANG Peifang. System dynamics simulation of pollution concentration of rainwater runoff on expressway [J]. Water Resources Protection,2018,34(4):1-7. (in Chinese))

[3] LI L Q, DAVIS A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. Environmental Science & Technology,2014,48(6):3403-3410.

[4] 顾莉,张苏艳,华祖林,等. 生物滞留池中多环芳烃去除研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):106-114. (GU Li,ZHANG Suyan,HUA Zulin, et al. Advance on the removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons in bioretention cells [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(2):106-114. (in Chinese))

[5] 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,2016,10(4):1594-1602. (QIU Fuguo, CHEN Lixia. Research progress on contaminants removal from stormwater runoff by bioretention [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(4):1594-1602. (in Chinese))

[6] 车伍,鲍仁强,赵杨,等. 中美海绵城市建设中的树木管理比较 [J]. 水资源保护,2019,35(3):7-13. (CHE Wu, BAO Renqiang, ZHAO Yang, et al. Comparison of tree management in sponge city construction between China and America [J]. Water Resources Protection,2019,35(3):7-13. (in Chinese))

[7] 宋奔奔,高成,寇传和,等. 基于 SWMM 的生物滞留池布置水文时空效应 [J]. 水资源保护,2017,33(3):25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM [J]. Water Resources Protection,2017,33(3):25-30. (in Chinese))

[8] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估 [J]. 水资源保护,2019,35(2):32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection,2019,35(2):32-36. (in Chinese))

[9] 蒋春博,李家科,李怀恩. 生物滞留系统处理径流营养物质研究进展 [J]. 水力发电学报,2017,36(8):65-77. (JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien. Advances in studies on bioretention systems for purifying runoff nutrients [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(8):65-77. (in Chinese))

[10] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 城市雨水径流净化与利用 LID 技术研究:以西安市为例 [M]. 北京:科学出版社,2016.

[11] 杨秋侠,晁昕逸. 基于复杂网络方法的既有雨水管段脆弱性判定 [J]. 水资源保护,2018,34(5):27-33. (YANG Qiuxia, CHAO Xinyi. Vulnerability assessment of existing storm sewer sections based on complex network method [J]. Water Resources Protection,2018,34(5):27-33. (in Chinese))

[12] JAY J G, BROWN S L, KURTZ K, et al. Predictors of phosphorus leaching from bioretention soil media [J]. Journal of Environment Quality,2017,46(5):1098-1105.

[13] COUSTOMER S L, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: a large-scale column study [J]. Water Research,2012,46(20):6743-6752.

[14] 高晓丽. 道路雨水生物滞留系统内填料的研究 [D]. 太原:太原理工大学,2014.

[15] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien, et al. Experiment and simulation of layered bioretention system for hydrological performance [J]. Journal of Water Reuse and Desalination,2019,9(3):319-329.

[16] BARBOSA A E, FERNANDES J N, DAVID L M. Key issues for sustainable urban stormwater management [J]. Water Research,2012,46(20):6787-6798.

[17] 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. (LIU Zengchao, LI Jiake, JIANG Chunbo, et al. Comparison of purification effects of 4 kinds of bioretention fillers on runoff pollutants [J]. Water Resources Protection,2018,34(4):71-79. (in Chinese))

[18] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien, et al. An improved

- approach to design bioretention system media [J]. Ecological Engineering, 2019, 136: 125-133.
- [19] TIAN J, MILLER V, CHIU P C, et al. Nutrient release and ammonium sorption by poultry litter and wood biochars in stormwater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 596-606.
- [20] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaian, et al. Field performance of bioretention systems for runoff quantity regulation and pollutant removal [J]. Water Air and Soil Pollution, 2017, 228(12): 468.
- [21] HONG E, SEAGREN E A, DAVIS A P. Sustainable oil and grease removal from synthetic stormwater runoff using bench-scale bioretention studies [J]. Water Environment Research, 2006, 78(2): 141-155.
- [22] LI Yajiao, WEN Meng, LI Jiake, et al. Reduction and accumulative characteristics of dissolved heavy metals in modified bioretention media [J]. Water, 2018, 10(10): 1488.
- [23] LI J K, JIANG C B, LEI T T, et al. Experimental study and simulation of water quality purification of urban surface runoff using non-vegetated bioswale [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 706-713.
- [24] 王晓璐, 左剑恶, 干里里, 等. 复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2518-2524. (WANG Xiaolu, ZUO Jiame, GAN Lili, et al. Treatment of urban runoff pollutants by a multilayer biofiltration system [J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2518-2524. (in Chinese))
- [25] ZINGER Y, BLECKEN G T, FLETCHER T D, et al. Optimizing nitrogen removal in existing stormwater biofilters: benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone [J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 75-82.
- [26] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaian, et al. Nitrogen retention and purification efficiency from rainfall runoff via retrofitted bioretention cells [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 220: 25-32.
- [27] 许萍, 何俊超, 张建强, 等. 生物滞留强化脱氮除磷技术研究进展 [J]. 环境工程, 2015(11): 21-30. (XU Ping, HE Junchao, ZHANG Jianqiang, et al. Overview of bioretention for improving removal of nitrogen and phosphorus technologies [J]. Environmental Engineering, 2015(11): 21-30. (in Chinese))
- [28] CHAHA M K, SHI Z Q, FLURY M. Nutrient leaching and copper speciation in compost-amended bioretention systems [J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 302-309.
- [29] ERICKSON A J, GULLIVER J S, WEISS P T. Capturing phosphates with iron enhanced sand filtration [J]. Water Research, 2012, 46(9): 3032-3042.
- [30] O'NEILL S W, DAVIS A P. Water treatment residual as a bioretention amendment for phosphorus: long-term column studies [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(3): 328-336.
- [31] LIU J Y, DAVIS A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 607-614.
- [32] PRICE W D, BURCHELL M R, HUNT W F, et al. Long-term study of dune infiltration systems to treat coastal stormwater runoff for fecal bacteria [J]. Ecological Engineering, 2013, 52(2): 1-11.
- [33] LAU A Y, TSANG D C, GRAHAM N J, et al. Surface-modified biochar in a bioretention system for escherichia coli removal from stormwater [J]. Chemosphere, 2017, 169: 89-98.
- [34] CHANDRASENA G I, DELETIC A, MCCARTHY D T. Biofiltration for stormwater harvesting: comparison of *Campylobacter spp.* and *escherichia coli* removal under normal and challenging operational conditions [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 248-259.
- [35] 刘建伟, 何岩, 刘越, 等. 生物滞留系统去除地表径流中病原微生物的研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10): 118-126. (LIU Jianwei, HE Yan, LIU Yue, et al. Research process in removing pathogenic microorganism from urban overland runoff by bioretention system [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(10): 118-126. (in Chinese))
- [36] 戴菡萱, 刘颖, 丁珊珊, 等. 光催化降解水环境中多环芳烃的研究进展 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 63-68. (DAI Yuxuan, LIU Ying, DING Shanshan, et al. Research progress on photocatalytic degradation of PAHs in water environment [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 63-68. (in Chinese))
- [37] 赵颖, 王飞, 葛宜虎. 汾河流域沉积物中多氯联苯的分布及生态风险评估 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 81-87. (ZHAO Ying, WANG Fei, GE Yihu. Distribution of polychlorinated biphenyl in sediments of Fenhe River Basin and its ecological risk assessment [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 81-87. (in Chinese))
- [38] BOVING T B. Attenuation of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban stormwater runoff by wood filters [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1-2): 43-57.
- [39] LEFEVRE G H, HOZALSKI R M, NOVAK P J. The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils [J]. Water Research, 2012, 46(20): 6753-6762.
- [40] 马效芳, 陶权, 姚景, 等. 生物滞留池用于城市雨水径流控制研究现状和展望 [J]. 环境工程, 2015, 33(6): 6-9. (MA Xiaofang, TAO Quan, YAO Jing, et al. Review of situations and prospects of bioretention for the control of urban stormwater runoff [J]. Environmental Engineering,

- 2015,33(6):6-9. (in Chinese))
- [41] JIANG Chunbo, LI Jiak, 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.
- [42] FAN Gongduan, LI Zhongsheng, WANG Shumin, et al. Migration and transformation of nitrogen in bioretention system during rainfall runoff [J]. Chemosphere, 2019, 232:54-62.
- [43] 孙艳伟,魏晓妹.生物滞留池的水文效应分析[J].灌溉排水学报,2011,30(2):98-103. (SUN Yanwei, WEI Xiaomei. Research on hydrological effect of bioretention cells[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(2):98-103. (in Chinese))
- [44] BROWN R A, SKAGGS R W, HUNT W F. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2013, 486:430-442.
- [45] 唐双成,罗纨,许青,等.基于 DRAINMOD 模型的雨水花园运行效果影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):407-414. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, XU Qing, et al. Factors affecting rain garden operation based on DRAINMOD simulations [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3):407-414. (in Chinese))
- [46] LI J K, ZHAO R S, LI Y J. Modeling the effects of parameter optimization on three bioretention tanks using the HYDRUS-1D model [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217:38-46.
- [47] 殷瑞雪,孟莹莹,张书函,等.生物滞留池的产流规律模拟研究[J].水文,2015,35(2):28-32. (YIN Ruixue, MENG Yingying, ZHANG Shuhan, et al. Study on runoff of bioretention by model simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2):28-32. (in Chinese))
- [48] LI J K, DAVIS A P. A unified look at phosphorus treatment using bioretention [J]. Water Research, 2016, 90, 141-155.
- [49] BÄCKSTRÖM M. Sediment transport in grassed swales during simulated runoff events [J]. Water Science & Technology, 2002, 45(7):41-49.
- [50] DENG Z Q, SUN S W, GANG D D. Modeling nitrate-nitrogen removal process in first-flush reactor for stormwater treatment [J]. Bioprocess Biosystem Engineering, 2012, 35:865-874.
- [51] 汤鹏,王玮,张展,等.海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):015-20. (TANG Peng, WANG Wei, ZHANG Zhan, et al. Quantitative research on rain-flood patterns of urban area in the construction of "Sponge Cities" [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(01):015-20. (in Chinese))
- [52] JIANG Chunbo, LI Jiak, ZHANG Binhong, et al. Design parameters and treatment efficiency of a retrofit bioretention system on runoff nitrogen removal [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (33):33298-33308.
- [53] 王书敏,宋力,孙磊,等.防渗 U 型生物滞留系统水文效应研究[J].中国给水排水,2017,33(23):120-124. (WANG Shumin, SONG Li, SUN Lei, et al. Hydrological effect of impermeable U-shape bioretention system [J]. China Water and Wastewater, 2017, 33(23):120-124. (in Chinese))
- [54] 孟莹莹,王会肖,张书函.生物滞留设施规模设计方法研究[J].水文,2018,38(3):7-12. (MENG Yingying, WANG Huixiao, ZHANG Shuhan. A scale design method for bioretention facilities [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(3):7-12. (in Chinese))
- [55] DIBLASI C J, LI H, DAVIS A P, et al. Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons pollutants in an urban stormwater bioretention facility [J]. Environment Science Technology, 2009, 43, 494-502.
- [56] DAVIS A P, HUNT W F, TRAVER R G, et al. Bioretention technology: overview of current practice and future needs [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3):109-117.
- [57] 刘梁.构建基因工程菌降解生物滞留池中多环芳烃的研究[D].北京:清华大学,2018.
- [58] 周子尧,吴永波,余昱莹,等.河岸杨树人工林缓冲带对径流中磷素截留效果的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):100-106. (ZHOU Ziyao, WU Yongbo, YU Yuying, et al. Effects of riparian poplar plantation buffer strips on phosphorus removal in runoff water [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 43(2):100-106. (in Chinese))
- [59] LEFEVRE G H, NOVAK P J, HOZALSKI R M. Fate of naphthalene in laboratory-scale bioretention cells: implications for sustainable stormwater management [J]. Environment Science Technology, 2012, 46(2), 995-1002.
- [60] MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMRE CZAK B. Habitat function of agricultural soils as affected by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination [J]. Environment International, 2003, 28:719-728.
- [61] HONG J, GERONIMO F K, CHOI H, et al. Impacts of nonpoint source pollutants on microbial community in rain gardens [J]. Chemosphere, 2018, 209:20-27.
- [62] 谢晓梅,廖敏,杨静.黑麦草根分泌物剂量对污染土壤芘降解和土壤微生物的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2718-2724. (XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing. Effects of ryegrass (*Lolium perenne*) root exudates dose on pyrene degradation and soil microbes in pyrene-contaminated soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10):2718-2724. (in Chinese))

- [25] 邹晴晴,王勇,李广斌. 基于 SNA 的新型集中社区公共空间网络结构优化[J]. 地理科学进展,2016,35(7): 829-838. (ZOU Qingqing, WANG Yong, LI Guangbin. Network structure optimization of public space in new concentrated communities based on SNA[J]. Progress in Geography,35(7):829-838. (in Chinese))
- [26] 付琼鸽,刘大均,胡静,等. 湖北省旅游流网络结构的特征与优化[J]. 经济地理,2015,35(3): 191-196. (FU Qiongg, LIU Dajun, HU Jing, et al. Network structure and optimization research on the Hubei Province tourist flow [J]. Economic Geography, 2015, 35 (3): 191-196. (in Chinese))
- [27] 叶强,张丽璇,彭鹏,等. 基于百度迁徙数据的长江中游城市群网络特征研究[J]. 经济地理,2017,37(8):53-59. (YE Qiang, ZHANG Lixuan, PENG Peng, et al. The network characteristics of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River based on Baidu migration data [J]. Economic Geography, 2017, 37 (8): 53-59. (in Chinese))
- [28] 张德钢,陆远权. 中国碳排放的空间关联及其解释:基于社会网络分析法[J]. 软科学,2017,31(4):15-18. (ZHANG Degang, LU Yuanquan. Study on the spatial correlation and explanation of carbon emission in China: based on social network analysis[J]. Soft Science, 2017, 31(4):15-18. (in Chinese))
- [29] 王金莹,吴晋峰,唐澜,等. 亚洲入境旅游流地理分布及网络结构特征分析[J]. 资源科学,2013,35(8):1701-1709. (WANG Jinying, WU Jinfen, TANG Lan, et al. Distribution of Asian inbound tourist flows and structural characteristics [J]. Resources Science, 2013, 35 (8): 1701-1709. (in Chinese))
- [30] 马丽君,肖洋. 典型城市居民国内旅游流网络结构特征[J]. 经济地理,2018,38(2):197-205. (MA Lijun, XIAO Yang. The structure characteristics of domestic tourist flow network in typical urban dweller [J]. Economic Geography, 2018, 38(2):197-205. (in Chinese))
- [31] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 29-36. (in Chinese))

(收稿日期:2019-04-26 编辑:熊水斌)

(上接第 8 页)

- [63] FAJARDO C, ORTÍZ L T, RODRÍGUEZ-MEMBIBRE M L, et al. Assessing the impact of zero-valent iron (ZVI) nano technology on soil microbial structure and functionality: a molecular approach [J]. Chemosphere, 2012, 86:802-808.
- [64] GOU N, YUAN S H, LAN J Q. A quantitative toxicogenomics assay reveals the evolution and nature of toxicity during the transformation of environmental pollutants [J]. Environment Science Technology, 2014, 48:8855-8863.
- [65] 滕应,骆永明,高军,等. 多氯联苯污染土壤菌根真菌-紫花苜蓿-根瘤菌联合修复效应[J]. 环境科学,2008, 29(10):2925-2930. (TENG Ying, LUO Yongming, GAO Jun, et al. Combined remediation effects of arbuscular mycorrhizal fungi-legumes-rhizobium symbiosis on PCBS contaminated soils [J]. Environmental Science, 2008, 29 (10):2925-2930. (in Chinese))
- [66] 杨静. PAHs 污染土壤植物修复的根际效应及机制 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [67] 薛南冬,李发生. 持久性有机污染物 (POPs) 污染场地风险控制与环境修复[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [68] 范小欢. 老化多氯联苯的生物可利用性及其在土壤体系中的厌氧修复[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [69] LIU S H, ZENG G M, NIU Q Y, et al. Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: a mini review [J]. Bioresource Technology, 2017, 224:25-33.
- [70] 单稼琪. 多环芳烃对生物滞留系统的影响及微生物的生态效应研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [71] 王东琦,单稼琪,李怀恩,等. 生物滞留系统去除城市地表径流中多环芳烃的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):1-8. (WANG Dongqi, SHAN Jiaqi, LI Huaen, et al. Advance on removal of polycyclic aromatic hydrocarbon by bioretention system in urban surface runoff [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(5):1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-29 编辑:彭桃英)

