

## 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望

李定强<sup>2,3</sup>, 刘嘉华<sup>1,2,3</sup>, 袁再健<sup>2,3\*</sup>, 梁晨<sup>2,3</sup>, 聂小东<sup>2,3</sup>, 马东方<sup>1,2,3</sup>

1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东省生态环境技术研究所/广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650;

3. 广东省面源污染防治技术工程中心, 广东 广州 510650

**摘要:** 城市面源污染是指通过降水淋洗大气和冲刷地表而形成携带多种污染物的地表径流, 以地表污染物溶解、扩散的形式污染城市受纳水体。近年来, 随着中国城市化进程加快, 城市面源污染逐渐成为中国城市水体水质的重要影响因素, 是城市水环境治理的一大难题。优化并推广城市低影响开发(LID)面源污染治理措施是当前缓解城市面源污染问题的有效途径, 因此本文综述了城市 LID 治理措施相关研究进展。在高流量城市区域, 机动车排放等人类活动和大气沉降是氮磷污染物、有机物污染物、重金属污染物、生物性污染物等几种城市面源污染物的主要来源。城市主要通过工程措施与非工程措施相结合的方式治理城市面源污染, 而工程措施分别从源头、迁移与终端 3 个过程控制面源污染, 以生物滞留系统、绿色覆盖、透水铺装以及人工湿地系统 4 主要的 LID 工程治理措施为例。文章综述了这 4 种 LID 工程治理措施的基础结构、对几种污染物的去除效果以及采用改进方式后去污效果。治理措施的治理效果常因填料基质堵塞、温度变化、植物腐烂与设施材料耐受性下降等问题而受到影响, 因此文章同时讨论了这些工程措施存在的问题。最后, 文章针对治理措施存在的问题提出了几点改进展望, 如选择吸收能力稳定的植物与搭配方式、采用简易的辅助性措施缓解填料基质堵塞以及探索新的促渗能力与耐受性强的材料等。

**关键词:** 城市面源污染; 低影响开发; 治理措施; 研究进展; 展望

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.10.023

**中图分类号:** X52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2019) 10-2110-09

**引用格式:** 李定强, 刘嘉华, 袁再健, 梁晨, 聂小东, 马东方, 2019. 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 28(10): 2110-2118.

LI Dingqiang, LIU Jiahua, YUAN Zaijian, LIANG Chen, NIE Xiaodong, MA Dongfang, 2019. Research advance and prospects on low impact development control measures for urban non-point source pollution [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(10): 2110-2118.

近年来由于中国城市化进程加快, 部分城市水体污染退化的主要原因逐渐由点源污染转变为面源污染(倪艳芳, 2008), 部分城市的雨水径流污染负荷已达到生活污水的 1.7 倍之多(Tian et al., 2009; ), 由雨水径流与地表污染物引起的城市面源污染问题得到越来越多的关注。相比城市点源污染, 城市面源污染随机性强、污染范围广泛而难以控制, 其污染程度随晴天地表污染物的积累和城市不透水面积比例增加而严重。城市面源污染发生机理为地表积累的污染物与大气沉降物在降雨的淋洗和冲刷作用下, 以溶解、扩散的形式进入城市受纳水体, 引起城市大面积的水体热污染、富营养化、

重金属污染等环境问题(李小静等, 2013)。

目前为止, 人们主要依靠分散的、小规模 LID 措施来调节雨水径流量、削减污染物、解决大概率小降雨引起的城市面源污染问题(唐克旺, 2016; 王虹等, 2015)。虽然在上海、北京、广州、苏州、西安、深圳等大中城市采取了一些工程措施治理当地面源污染, 但 LID 治理措施的应用区域面积较小、对污染物针对性较差, 且受环境、材料堵塞、植物耐受性不足等因素影响部分措施并未得到推广。因此, 本文就目前城市面源污染中常见污染物的来源进行评述, 分别对几种 LID 措施(生物滞留、透水铺装、绿色覆盖以及人工湿地等)从基质与植物优

**基金项目:** 广东省科学院引进高层次领军人才专项资金项目(2016GDASRC-0103); 广东省省级科技计划项目(2018B030324001); 广东省科学院国家级科技创新平台培育专项(2019GDASYL-0401003); 广东省科学院对接国家重点实验室; 国家工程技术研究中心平台专项(2019GDASYL-0502004); 广州市科技计划项目(201707010408)

**作者简介:** 李定强(1963年生), 男, 研究员, 博士, 主要从事水土保持与面源污染方面的研究。

\*通信作者: 袁再健(1976年生), 男, 研究员, 博士, 主要从事水土保持领域中水、沙、碳、污染物通量方面的研究。E-mail:

zjyuan@soil.gd.cn

**收稿日期:** 2019-06-27

选、添加剂选用、与其他措施联用以及改进前后治理效果对比等方面进行详细总结,分析各种 LID 措施在实际应用中存在的问题,并提城市 LID 面源污染治理措施的改进展望。

## 1 城市面源污染物的来源

据美国环保署调查,城市雨水径流中出现重点污染物超过 60 种 (Gromaire-Mertz et al., 1999; Davis et al., 2010), 这些污染物来源广泛、类型多样、成分复杂,可分为氮磷污染物、重金属污染物、有机污染物、生物性污染物及悬浮物等 (陆松柳等, 2018)。

氮磷污染物的来源与土地利用密切相关,工业区与交通要道径流中的含氮污染物往往处于较高水平 (蒋海燕等, 2002; 王吉莘等, 2009)。城市水生态氮和磷的主要来源为城市活动 (Carpenter et al., 1998), 而街道地表径流中的硝态氮污染物的来源依次为大气沉降、化学氮肥、土壤和有机氮, 占比分别为 35%—64%、1%—39%与 7%—33% (Yang et al., 2017)。土壤也是氮磷污染物的重要来源 (Wang et al., 2012), 原因是城市绿地土壤在长期的灌溉与施肥下累积大量的氮磷污染物, 并在暴雨的淋洗和径流的冲刷下释放污染物使得绿地径流污染程度加剧。径流中氮磷污染物浓度过高时, 容易引起其受纳水体富营养化, 水体沉积物释放有毒物质, 造成鱼类死亡, 形成黑臭水体 (王淑芳, 2005)。

在过去几十年的研究中发现, 全球雨水径流重金属浓度升高 (Göbel et al., 2007; Helmreich et al., 2010)。人类活动和大气沉降仍然是重金属污染物的 2 个主要来源, 其中大气沉积是径流中镉、铜、铅的重要来源, 而车辆制动、轮胎磨损分别是铜和锌污染物的重要来源 (Davis et al., 2001), 且道路重金属污染物中的锌所占比例最高 (Liu et al., 2018)。尽管城市除道路径流外, 其他下垫面的雨水径流中重金属污染浓度普遍不高, 但是仍然具有较高的污染总量, 能够污染城市周边的水体。并且人体一旦摄入过多不可降解的重金属污染物, 能直接损害人体的细胞和器官, 危害人体健康。

水体中有机污染物包括脂肪、蛋白质等常见有机污染物与微量有机污染物。径流中多环芳烃 (PAHs)、双酚基丙烷 (BPA) 等有机污染物来源途径有腐殖质、农药、人类活动及大气沉降等, 而最主要的来源人类活动机动车排放与化石燃料的不完全燃烧 (李立青等, 2006)。1984 年世界卫生组织解释了有机污染物 PAHs 有 2 个主要来源, 分别为道路来源 (街道上的沥青和汽车轮胎和磨损) 和燃烧来源 (自然燃烧和集中加热) (Krein et al.,

2000)。在人类活动与交通频繁的地段, 有机微污染物的含量高且分布特征明显 (陈丽旋等, 2005; 于振亚等, 2018), 其中大气沉降对 PAHs、BPA 的贡献约为 10%—38% (Gasperi et al., 2014); 化石燃料的不完全燃烧与机动车排放对北京、温州等地区的道路径流有机微污染贡献率约 54%—60% (韩景超等, 2012; 张巍等, 2008)。径流中的有机物占比不大, 但一旦进入城市水体后, 会快速消耗溶解氧, 产生难闻气体及有毒物质, 影响水体鱼类的生产, 间接威胁到人类健康。

此外, 雨水径流中的微生物含量往往超过公众对健康水的要求, 细菌尤为突出 (Sánchez et al., 2015)。细菌的主要来源为城市动物的粪便 (陈玉成等, 2004)。中国城市径流的总大肠杆菌群等微生物污染较为严重, 部分城市径流的总大肠杆菌群最高值超过了报道的最大值, 如上海的屋面径流 (王建军等, 2014; 蒋敏杰等, 2010)。

## 2 城市面源污染主要治理措施

人是一切治理措施的实施者和受益者, 治理措施实施最大的障碍是人们意识、成本和接受度, 但是大多数人们对城市面源污染缺乏了解 (Cote et al., 2014)。政府和专业人员在约束污染行为方面发挥重要作用, 但在部分城市对面源污染治理缺乏严格的法律法规要求, 比如美国华盛顿和马里兰州 (Roy et al., 2008)。因此在人们将低影响开发城市治理措施概括为非工程措施和工程措施 2 个部分。非工程措施, 包括 3 个方面: (1) 提高政府管理, 制定法规; (2) 提高群众的水环境保护意识: 如开展环保宣传教育; (3) 改善与修正已发生的污染问题: 如定期清扫街道路 (王和意等, 2003)。

工程措施主要为 LID 措施, 分为: 源头控制、迁移控制和末端治理措施。源头控制措施指在各污染发生地拦截净化地表径流污染物的一系列措施, 如生物滞留系统、绿色覆盖措施等; 迁移控制措施指在城市径流产生后到受纳水体间的过程中加以控制, 如透水铺装措施等; 末端控制措施指在地表径流与受纳水体在水陆交错带相遇处进行控制和净化治理, 如人工湿地措施等 (曹仲宏等, 2012)。以下是 4 种主要 LID 治理措施去污效果整理表 (表 1) 与研究进展的整理。

### 2.1 生物滞留系统

生物滞留系统一般结构为植被层、种植土层、填料层和砾石层。生物滞留系统依靠植物同化与吸收作用、底泥微生物修复作用、填料层物理过滤作用、吸附、离子交换以及砾石的固体沉淀作用等净化雨水中的污染物质。在去除污染物方面, 该措施对 TP、TN 去除率范围在 20%—100%与 70%—100%

表 1 4 种 LID 治理措施对径流污染物的去除率  
Table 1 Removal rate of runoff pollutants by 4 LID control measures

LID 措施 LID control measures	城市 Citys	污染物去除率 The removal rate of pollutants	文献参考 References
生物滞留 Biodetention measures	-	Nitrates: 1%–43%; ammonium: 2%–49%; Pb: 98%; Oil>96%;	Hsieh et al., 2005
生物滞留 Biodetention measures	汉中市 Hanzhoung	Zn: 95.2%; Cu: 91.2%; Cd: 66.3%; Pb: 94.4%; COD: 80.4%; SS: 85.1%	付恒阳等, 2017 (Fu et al., 2017)
生物滞留 Biodetention measures	-	Perfringens: >3 log; F-RNA coliphages: >3 log	Li et al., 2012
绿色覆盖 Green Coverage Measures	密苏里州 Missouri	TN: >65%; TP: >65%; COD: >65%	Harper et al., 2015
绿色覆盖 Green Coverage	-	TN: 66.64%; TP: 75.83%; COD: 78.93%; SS: 94.5%	Hou et al., 2014
绿色覆盖 (混合基质) Green Coverage (Mixed matrix)	成都市 Chengdu	TN: 84.2%; TP: 19.0%; COD: 61.4%	郑美芳等, 2013 (Zheng et al., 2013)
绿色覆盖 Green Coverage	北京市 Beijing	PAHs: Close to 50%	沈庆然等, 2016 (Shen et al., 2016)
透水铺装 Permeable pavement	汉中市 Hanzhoung	Zn: 69.5%; Cu: 58.1%; Cd: 52.2%; Pb: 68.5%; COD: 48.3%; SS: 83.3%	付恒阳等, 2017 (Fu et al., 2017)
透水铺装 (沥青) Permeable pavement (Asphalt)	西安市 Xi'an	TP: 87.29%; COD: 约 50%; SS: 86%;	Jiang et al., 2015
透水铺装 Permeable pavement	深圳市 Shenzhen	TN: 46.29%; TP: 19.27%; SS: 70.26%	宫曼莉等, 2018 (Gong et al., 2018)
透水铺装-生物滞留 Permeable pavement-Biodetention	深圳市 Shenzhen	TN: 20.22%; TP: 70.27%; SS: 85.25%	宫曼莉等, 2018 (Gong et al., 2018)
人工湿地 (垂直流) Constructed wetland (Vertical flow)	无锡市 Wuxi	TN: 52.3%; TP: 58.8%; NH <sub>3</sub> -N: 33.2%	聂志丹等, 2007 (Nie et al., 2007)
人工湿地 (水平潜流) Constructed wetland (Horizontal subsurface flow)	无锡市 Wuxi	TN: 0.1%; TP: 57.9%; NH <sub>3</sub> -N: 27.4%	聂志丹等, 2007 (Nie et al., 2007)
人工湿地 (表面流) Constructed wetland (Surface flow)	无锡市 Wuxi	TN: 19.2%; TP: 26.3%; NH <sub>3</sub> -N: 14.1%	聂志丹等, 2007 (Nie et al., 2007)
人工湿地 Constructed wetland	西安市 Xi'an	Zn: 27.68%–54.14%; Cu: 24.14%–52.49%; Cd: 75.00%–87.88%; Cr: 59.10%–73.10%; Pb: 57.79%–73.20%	曹婷婷等, 2017 (Cao et al., 2017)
人工湿地 Constructed wetland	武汉市 Wuhan	TN: 82.6%–86.6%; TP: 89.0%–90.4%; COD: 69.0%–73.1%; SS: 64.7%–69.2%	尹炜等, 2006 (Yin et al., 2006)

之间 (Hsieh et al., 2005; 胡爱兵等, 2011); 该措施对常见重金属污染物去除范围在 50%—100% 之间, 如付恒阳等 (2017) 研究发现其对 Zn、Cu 与 Pb 的去除效率均大于 90%。在病原体微生物方面, 由于受空气湿度影响大, 其对大肠杆菌的去除去除率只有 2 log, 但对产气荚膜梭菌和 F-RNA coliphages 的去除率超过 3 log (Li et al., 2012)。可见生物滞留系统措施对不同污染物的去除效果差异较大。

结构、填料类型和植物种类显著影响该措施的除污效果。在结构方面, 有相关实验模拟了壤砂种植紫穗狼尾草、壤砂种植紫穗狼尾草设置饱和带、壤砂种植紫穗狼尾草设置饱和带并添加 10%木块的 3 种不同结构生物滞留池, 在进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度 (5.88±2.32) mg·L<sup>-1</sup> 情况下, 3 种结构措施对该污染物的去除率分别为 31.3%、85.7%和 95.6% (李立青等, 2017)。在填料方面, 常用填料介质有沙土分层、黄土、粗砂、细砂等, 分层填料介质对径流量截留效果优于黄土填料介质, 截留率可达到 44% (唐双成等, 2016); 含生物炭基质的生物滞留系统较无生物炭基质的生物滞留系统分别能减少 87%的 TP 与 52%的 TP (Spolek, 2011)。此外, 组合措施能够显著提高生物滞留系统的去污率, 以透水路面—生物滞留池措施为例, 入河径流经该组合措施

净化后污染物 SS、TN、TP 的平均污染负荷分别下降至地表冲刷污染负荷的 4.05%、43.47%、24.39%, 高于单一措施的净化效果 (宫曼莉等, 2018)。此外, 投入添加剂能够提高去污效果, 比如添加低成本、高性价比且可释放碳源的淀粉类可降解的餐盒 (SMB), 据相关实验发现经过微生物强化的 SMB 生物滞留系统对有机污染物与硝态氮去除率理想, 去除率分别达到 89.26%与 74% (彭博, 2018)。但是该措施仍然存在局限性, 建设与后期维护成本高, 影响了在城市推广。

## 2.2 绿色覆盖

绿色覆盖是利用在城市不透水面种植绿色植物净化污染物的源头控制措施, 包括绿色屋顶与城市绿地。城市绿地通过降低地表绿地高度使得周边的雨水自动汇集, 绿色屋顶则绿化各类建筑物的顶部和天台, 均起到增加雨水入渗、减少径流量及净化雨水径流作用 (洗丽铎等, 2013; Berndtsson, 2010)。据调查, 屋面约占城市不透水区域总面积的 40%—50%, 是受城市面源污染较为严重的区域 (Boulanger et al., 2010)。绿色覆盖措施对雨水径流中的大部分污染物有较好的净化效果, 如下沉式绿地对路面径流 SS 的去除率高达 94.5%, 而对 COD、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、TP 的平均削减率介于 47%—80% (陈祎璠等, 2014; Hou et al., 2014), 再如

绿色屋顶对径流 COD、TN、TP 去除率均大于 65% (Harper et al., 2015)。

植物的类型、土壤基质与湿及渗透时间等因素均影响绿色覆盖措施对污染物的去除率,因此学者们在渗透时间、植物类型与土壤方面上做了大量的研究。从时间角度来看,高含量有机质的绿色措施可以适当延长雨水径流在土壤基质的渗透时间,能够提高削减部分污染物效果(Liang et al., 2012)。从土壤基质类别与深度角度来看,改良土壤、丰富土壤成分、增加厚度,均能提高去污效果(Ju et al., 2015; 王晓晨等, 2015),沈庆然等(2016)对绿色屋顶有机污染物多环芳香烃的控制研究显示,增加绿色覆盖措施的基质厚度能够提高 PAHs 去除率。在基质类别方面,丰富的土壤基质净化效果较好,如含沸石基质对氮磷污染去除率较高,含高炉渣基质对磷去除率较高,而混合基质与改良基质对多种污染物去除率均提高(Berndtsson, 2010)。郑美芳等(2013)比较了混合基质(含碳渣和田园土)与人工基质两种屋顶的水质净化效果,后者水质中的 TP 总负荷则上升了 11.04%,而前者屋顶对 TN、CODCr、TP 的削减率分别达到 84.2%、61.4%、19.0%,因此得出以碳渣和田园土为混合基质的绿色屋顶的净化效果更为出色的结论。Wang et al. (2017)研究使用了含珍珠岩和蛭石为吸附基质的活性炭混合物双基层的绿色屋顶对污染物的浸出能力实验,在实验中未发现污染物的初期冲刷效应,且该改良措施将雨水 pH 5.6 左右提高到 6.5—7.6。另外,丰富土壤基质搭配与优化植被设计,既能高效去除污染物,又能提高措施的观赏性,如添加生物炭的土壤搭配种植景天属植物或黑麦草等植物(Spolek, 2011)。整体而言,绿色覆盖措施设计与构造较透水铺装措施与生物滞留措施简单,具有成本低、占地面积小及观赏价值高等优点,因此可以将此措施视为最为简单、较为理想措施。

### 2.3 透水铺装

透水铺装措施一般结构为面层、找平层、基层和土基(张巨松等, 2007),主要通过多种透水材料促进路面雨水下渗,利用各层结构的物理截留、化学吸附、生物与植物吸收等净化作用,达到削减地表径流量与净化雨水径流的目的,常见类型有:混凝土铺装、砖铺装、沥青铺装等(Wang et al., 2015)。在去污方面,该措施对不同污染物的净化效果大相径庭,如渗透性沥青路面对径流重金属污染物的去除效果理想,但对有机污染物的去除率相对较低(Jiang et al., 2015)。

常见的改良方法有:在水泥、粗骨料和面层等原有材料基础上添加或更换材料、改变各种材料的

配合比,以及增加材料比表面积(王俊岭等, 2016; Park et al., 2004)。首先使用添加剂,如粉煤灰、膨润土(Hu et al., 2006)等,有相关研究结果表明含粉煤灰的混凝土透水铺装比未含粉煤灰的透水铺砖材料对 CODCr 和 TP 的去除效果更为出色(徐大勇等, 2013)。再者,使用沸石、陶粒等骨料改性材料,国内有学者对比浮石、钢渣、沸石以及砾石 4 种多孔混凝土材料对氮磷污染物的吸附效果,发现沸石对氨氮的吸附效果最佳,浮石次之;而浮石对 TN 的吸附效果最佳,钢渣次之(张政科等, 2012)。此外,含膨润土和沸石的混凝土透水铺装措施对 COD、TP、Cu 的去除效果令人满意,而添加沸石后对 TN 的去除效果更为理想(王俊岭等, 2017)。优化透水铺装措施的面层材料配比、增加土壤与基质的孔隙度也是提高透水铺装措施净化效果的两条有效途径。有学者研究发现当水、灰、骨料配合比为 0.28:1:8,其中骨料为 20—30 mm 的粒径沸石时,该措施对氨氮的吸附量达到最大(岳衡等, 2012)。许国东等(2007)对比了两种填粒径分别为 10—20 mm 与 5—10 mm 对氮磷去除效果,结果表明粒径为 10—20 mm 的骨料多孔混凝土对 TP 去除率较高,而当将孔隙率设置为 25%时,该配料的透水铺装对 TN 的去除率最高。综上分析,该措施可采用 10—20 mm 沸石作为粗骨料,将水、灰、骨料配合比为 0.28:1:8,将孔隙率设置为 25%。但是人们对改良型透水铺装措施认识依然不足,只在公园、人行道、停车场等低流量小范围地方建设低成本简易型措施,不能充分凸显透水铺装措施的治理效果。

### 2.4 人工湿地系统

人工湿地系统是一种以人为设计方式实现自然湿地生态净化过程的系统,主要通过物理、化学以及微生物的代谢与降解作用达到除污目的(Greenway, 2010)。人工湿地系统可分垂直流、水平潜流以及表面流等类型,单级人工湿地和由不同工艺组合成的复合式湿地系统,对污染物的整体净化效果与出水水质的稳定性由高到低依次为:复合式>垂直流>水平潜流>表面流,如聂志丹等(2007)对这几种人工湿地对营养化的水体净化效果进行了比较实验,结果显示垂直流、水平潜流、表面流对水中氨氮、TP、TN 的平均去除率依次减少,整体而言垂直流人工湿地系统净化营养物质的效果最佳;在对重金属的研究中,曹婷婷等(2017)研究发现复合式人工湿地系统对常见重金属污染物的去除率高于任一种单级人工湿地系统。除了几种湿地系统组合,湿地与其他措施组合同样具有不错的净化效果,以复合潜流人工湿地与塘的两种措施组合联用为例,有研究结果显示该组合措施对

COD、TP、TN、SS的削减率均超过80%，长期运行能够维持削减效果，并且能够弹性适应水质水量变化（尹炜等，2006）。

在湿地系统植物与填料基质选择方面，植物类型以及基质成分类型都较为丰富，植物如芦苇、香蒲、菖蒲等，基质如沸石、粉煤灰、砾石等（张清，2011；邓辅唐等，2005）。杨敦等（2002）研究发现以芦苇或菖蒲为主要水生植物，以砾石或沸石为填料的4种人工湿地系统对TN、TP、COD<sub>Cr</sub>的去除率均超过80%，其中砾石搭配菖蒲的湿地系统对磷的吸收净化效果显著。此外，适当添加辅助物质同样能够影响湿地系统的净化效果，如添加生物炭提高土壤的空隙度以及水质的氧化还原电位（邓朝仁等，2019），添加不同的生物促生剂能够提高湿地系统中的微生物活性，从而促进微生物的新陈代谢作用等（童伟军等，2019）。人工湿地系统也因覆盖区域大、植物类型丰富的特点，被视为景观措施的代表。

除外，渗滤池、植草沟措施、岸边护岸带措施、雨水调节池等措施同样能净化水质、削减流量（白瑶等，2011）。LID措施在治理过程中不但能保护城市原有的生态系统，而且综合考虑城市土壤与水体生态的内容，修复已被破坏的水体与自然环境，符合现代新型城市建设发展的需求。

### 3 已有LID治理措施存在的问题

尽管这些LID措施通过投入适当的添加剂、选择合适的基质材料以及种植适应性强植物等方式，因其特点在部分大中城市得到适当的应用，但同时也暴露了这些LID治理措施的存在问题，如堵塞、材料耐受性下降、植物腐烂以及温度影响大等问题，这些问题在不同程度上影响了治理措施净化效果，严重时可导致治理措施充当污染源，进一步可威胁当地水生态。

#### 3.1 填料基质堵塞

渗透性良好的填料基质在LID治理措施生物净化过程中发挥重要的作用，既为微生物的生长繁殖提供场所，又为植物提供营养物，同时也是多种反应的界面。但随着运行时间变长，填料基质出现流失及植物叶片根系发生腐败，产生大量的有机与无机不可过滤物质（白少元等，2016；叶建锋等，2008），使基质层发生淤积、堵塞现象。填料基质堵塞是最为常见的问题，据美国环境保护署（USEPA）调查发现，100多个使用中的湿地系统约一半在使用后的5年内出现堵塞现象（Agency，2000）。众多LID治理措施中均使用了渗透性填料基质，但防止填料基质堵塞的举措仍然较少，且已有的举措净化效果提升不明显。

#### 3.2 温度影响大

含植物的LID措施往往受温度条件影响大，主要原因在于措施中的植物与微生物对周边环境的温度较为敏感，当温度发生变化时，水体中溶解氧含量也随之产生变化，微生物与植物体内酶活性受到抑制，从而影响着该措施对雨水径流生物净化效果。有研究表明，水温低于10℃，绿色措施污染物地处理效率降低，在4℃左右微生物硝化作用趋于停止，脱氮效果下降（Cookson et al.，2002）。此外，温度过低能引起措施水流过慢、基质堵塞与铺装材料抗压能力下降等问题，温度过高能引起城市热污染、地表细菌繁殖速度加快等，因此温度变化不但加重径流污染负荷，而且还降低了LID措施的治理效果。

#### 3.3 植物腐烂

大部分LID治理措施需要种植单一或多种挺水植物，然而这些植物往往难以抵挡秋冬季节的变化和部分有害细菌的危害，经长时间的浸泡后发生腐烂分解。有研究指出，在植物腐烂分解过程中会释放TP、TN、有机质等化学物质以及其他的克生物质，影响周边植物的生长和去污，同时也由此成为污染源（范云爽等，2010）。此外，植物的腐烂后枯枝落叶容易阻碍其自身新芽的萌发和生长（邵丽等，2009），并且堵塞基质填料的缝隙，成为基质堵塞的原因之一。

#### 3.4 材料性质局限

部分LID治理措施的使用寿命缩短，工程材料性质不可忽视。据了解，透水铺装治理措施中绝大多数的路面材料的损坏都是压力过大折断引起的，特别是遇到地基建筑不均匀和铺装材料尺寸过大的情况（李俊奇等，2019）。同时，该措施雨水径流通道—铺装材料孔隙结构也会因为气候变化产生小幅度的热胀冷缩，在高温条件和寒冷条件均会导致其渗透性和耐受性等性质能力下降。因此，材料的局限性在一定条件下也会影响工程措施效果。

此外，治理措施的设计仍存在问题，如：在治理措施设计与应用前，对当地自然条件与污染状况缺少了解，且缺失长期的数据，直接套用或混用经验公式进行设计。此外，投加肥料、喷洒除草剂和除虫剂的行为易导致这些治理措施的土壤在暴雨发生时充当污染源释放污染物，加重当地的面源污染。

### 4 展望

近年来，城市低影响开发面源污染治理措施经不断优化后提升了净化效果，但依然有改进发展空间，为此对提出如下展望：

（1）创新治理技术。过去多采用惰性、成本低廉的基质填料、吸收能力一般的植物以及单一的搭

配方式，对氮磷污染物的净化效果往往不稳定。因此，需要对传统治理措施进行优化改良以创新治理技术，如探索新的促渗材料、基质填料，具体例子如：往填料基质中添加含铝污泥、沸石以及 SMB，采用渗透系数介于 200—400 mm·h<sup>-1</sup> 的填料。

(2) 植物选择、种植方式与植物管理。采取群植和 2 种以上植物混植种植方式，一方面可适当增强 LID 治理措施净化能力，另一方面也能丰富措施的生态服务功能，如鉴赏功能。选择耐受性强、耐污能力强且能抗病虫的植物，比如选择对某种污染物有较强抵抗性的植物（如臭椿，抗烟尘粉尘，具有较强杀菌灭虫能力），能够保持长期一定净化能力。此外，在后续的维护管理中需要对枯萎的植物进行清理。

(3) 缓解基质的堵塞问题。堵塞问题不可避免，解决堵塞问题也是延长措施使用寿命的最有效方法。堵塞主要发生在基质结构表层的 0—15 cm 处，更换表层基质的方法能够维持措施的稳定运行，但是该方法时间成本高、工作量大且易重复引发基质堵塞的问题。因此，往后的措施应探索合适粒径的基质材料，此外附加搭配简易的预处理措施和辅助性措施，如设置初沉池等。

(4) 提高材料的适应能力。透水铺装广泛应用于商业区与居民区，往往需要渗透净化较大雨水径流量和承担巨大交通量。尽管已有相关改进研究并取得一定的效果，但是经长时间的水浸泡和干燥期，路面的结构与土基层整体强度和稳定性仍然大大下降。因此，该类措施今后的发展方向更应该围绕提高材料的渗透性、耐浸泡性、耐磨性以及耐压性。

要完全解决城市面源污染问题对我们来说仍然任重而道远，但最根本方法是减少人为污染，如减少日常的生活垃圾、工业污染排放以及汽车尾气排放等，尽量使用清洁能源。

#### 参考文献：

AGENCY E P, 2000. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters [DB/OL]. Cincinnati, Ohio 45268: United States Environmental Protection Agency: [2000-09]. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL.html>.

BERNDTSSON J C, 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering*, 36(4): 351-360.

BOULANGER B, NIKOLAIDIS N P, 2010. Mobility and aquatic toxicity of copper in an urban watershed [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 39(2): 325-336.

CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 8(3): 559-568.

COOKSON W R, CORNFORTH I S, ROWARTH J S, 2002. Winter soil temperature (2-15 degrees C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils; a laboratory and

field study [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 34(10): 1401-1415.

COTE S A, WOLFE S E, 2014. RESEARCH ARTICLE: Assessing the Social and Economic Barriers to Permeable Surface Utilization for Residential Driveways in Kitchener, Canada [J]. *Environmental Practice*, 16(1): 6-18.

DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, NI S B, 2001. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources [J]. *Chemosphere*, 44(5): 997-1009.

DAVIS B, BIRCH G, 2010. Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves [J]. *Environ Pollut*, 158(8): 2541-2545.

GASPERI J, SEBASTIAN C, RUBAN V, et al., 2014. Micropollutants in urban stormwater: occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8): 5267-5281.

GÖBEL P, DIERKES C, COLDEWEY W G, et al., 2007. Storm water runoff concentration matrix for urban areas [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1): 26-42.

GREENWAY M, 2010. Constructed wetlands for water pollution control-processes, parameters and performance [J]. *Developments in Chemical Engineering & Mineral Processing*, 12(5-6): 491-504.

GROMAIRE-MERTZ M C, GARNAUD S, GONZALEZ A, et al., 1999. Characterisation of urban runoff pollution in Paris [J]. *Water Science & Technology*, 39(2): 1-8.

HARPER G E, LIMMER M A, SHOWALTER W E, et al., 2015. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA [J]. *Ecological Engineering*, 78:127-133.

HELMREICH B, HILLIGES R, SCHRIEWER A, et al., 2010. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road—correlation analysis and seasonal influences [J]. *Chemosphere*, 80(9): 991-7.

HOU L Z, YANG H, LI M, 2014. Removal of chemical oxygen demand and dissolved nutrients by a sunken lawn infiltration system during intermittent storm events [J]. *Water Science and Technology*, 69(2): 398-406.

HSIEH C H, DAVIS A P, 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 131(11): 1521-1531.

HU Q H, QIAO S Z, HAGHSERESHT F, et al., 2006. Adsorption Study for Removal of Basic Red Dye Using Bentonite [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(2): 733-738.

JIANG W, SHA A M, XIAO J J, et al., 2015. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 100: 102-110.

JU Y L, MIN J L, HAN M, 2015. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs [J]. *Journal of Environmental Management*, 152: 171-176.

KREIN A, SCHORER M, 2000. Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments [J]. *Water Research*; 34(16): 4110-4115.

LI Y L, DELETIC A, ALCAZAR L, et al., 2012. Removal of Clostridium perfringens, Escherichia coli and F-RNA coliphages by stormwater biofilters [J]. *Ecological Engineering*, 49: 137-145.

LIANG M, BING Q, CHANG Q Z, 2012. Performance of urban rainwater retention by green roof: A case study of Jinan [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 178-181: 295-299.

LIU A, MA Y K, GUNAWARDENA J M A, et al., 2018. Heavy metals transport pathways: The importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution [J]. *Ecotoxicol Environmental Safty*, 164: 696-703.

PARK S B, TIA M, 2004. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete [J]. *Cement & Concrete Research*, 34(2):

- 177-184.
- ROY A H, WENGER S J, FLETCHER T D, et al., 2008. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States [J]. *Environmental Management*, 42(2): 344-359.
- SÁNCHEZ A S, COHIM E, KALID R A, 2015. A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas [J]. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6: 119-137.
- SPOLEK G A, 2011. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality [J]. *Environmental Pollution*, 159(8-9): 2111-2118.
- TIAN Y, LI T, HE S, et al., 2009. Characteristics of urban non-point source pollution in Suzhou city [C]//2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, ESAT 2009, Wuhan, China. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society: 2:359-362.
- WANG J L, WANG X M, ZHANG A, et al., 2015. Review on permeable pavement systems based on the concept of "sponge city" [J]. *Environment Engineering*, 33(12): 1-4, 110.
- WANG S M, HE Q, ZHANG J H, et al., 2012. The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(12): 3691-3700.
- WANG X O, TIAN Y M, ZHAO X H, 2017. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality [J]. *Science of the Total Environment*, 592: 465-476.
- YANG Y Y, TOOR G S, 2017. Sources and mechanisms of nitrate and orthophosphate transport in urban stormwater runoff from residential catchments [J]. *Water Research*, 112: 176-184.
- 白少元, 李雪芬, 丁彦礼, 等, 2016. 强化曝气对潜流人工湿地堵塞物分布规律的影响[J]. *环境科学学报*, 36(5): 1717-1722.
- BAI S Y, LI X F, DING Y L, et al., 2016. The effect of aeration on accumulation of solids in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(5): 1717-1722.
- 白瑶, 左剑恶, 千里里, 等, 2011. 雨水径流截流渗滤系统控制城市面源污染的中试研究[J]. *环境科学*, 32(9): 2562-2568.
- BAI Y, ZUO J E, GAN L L, et al., 2011. Urban non-point source pollution control by runoff retention and filtration pilot system [J]. *Environmental Science*, 32(9): 2562-2568.
- 曹婷婷, 王欢元, 孙婴婴, 2017. 复合人工湿地系统对重金属的去除研究[J]. *环境科学与技术*, 40(S1): 230-236.
- CAO T T, WANG H Y, SUN Y Y, 2017. Study on remove of heavy metals in composite constructed wetland system [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(S1): 230-236.
- 曹仲宏, 刘春光, 2012. 城市水环境面源污染及其控制[J]. *城市道桥与防洪* (10): 15-17.
- CAO Z H, LIU C G, 2012. Non-point source pollution of urban water environment and its control [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control* (10): 15-17.
- 陈丽旋, 曾锋, 罗丹玲, 等, 2005. 城市道路灰尘中邻苯二甲酸酯污染特征研究[J]. *环境科学学报*, 25(3): 409-413.
- CHEN L X, ZENG F, LUO D L, et al., 2005. Study of the distribution characteristics of phthalate esters in road dust of the city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(3): 409-413.
- 陈祎璠, 王闪, 徐心竹, 等, 2014. 下凹式绿地对降雨径流中氮素污染物削减作用的研究[C]//2014 第九届中国城镇水务发展国际研讨会与新技术设备博览会. 南宁: 中国城市科学研究会: 392-397.
- CHEN Y F, WANG S, XU X Z, et al., 2014. Study on Effect of Sunken Lawn on Rain Runoff Nitrogen Pollutants Removal [C]//The 9th China International Conference on Urban Water Development and New Technology Equipment Expo, 2014. Nanning: Chinese Society For Urban Studies: 392-397.
- 陈玉成, 李章平, 李章成, 等, 2004. 城市地表径流污染及其全过程削减[J]. *水土保持学报*, 18(3): 133-136.
- CHEN Y C, LI Z P, LI Z C, et al., 2004. Contamination of urban surface runoff and its whole course minimization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(3): 133-136.
- 邓朝仁, 梁坤坤, 黄磊, 等, 2019. 生物炭对潜流人工湿地污染物去除及N<sub>2</sub>O排放影响[J]. *环境科学*, 40(6): 350-356.
- DENG C R, LIANG Y K, HUANG L, et al., 2019. Influences of biochar on pollutant removal efficiencies and nitrous oxide emissions in a subsurface flow constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 40(6): 350-356.
- 邓辅唐, 孙珮石, 邓辅商, 等, 2005. 人工湿地净化滇池入湖河道污水的示范工程研究[J]. *环境工程*, 23(3): 29-31, 23.
- DENG F T, SUN P S, DENG F S, et al., 2005. Engineering research on constructed wetland for purifying pollution river water flowing [J]. *Environmental Engineering*, 23(3): 29-31, 23.
- 范云爽, 戴丽, 蒋云东, 2010. 人工湿地处理污染河水和湿地植物腐烂分解影响研究[J]. *环境科学导刊*, 29(3): 42-45.
- FAN Y S, DAI L, JIANG Y D, 2010. Research on decomposition of wetland plants and treatment of polluted water by constructed wetland [J]. *Environmental Science Survey*, 29(3): 42-45.
- 付恒阳, 李榜晏, 2017. 三种 LID 的雨水污染物去除效果评价[J]. *干旱区资源与环境*, 31(9): 92-97.
- FU H Y, LI B Y, 2017. Evaluating the effectiveness of three low impact development devices in the removal of stormwater contaminants [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(9): 92-97.
- 宫曼莉, 左俊杰, 任心欣, 等, 2018. 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估[J]. *环境科学*, 39(9): 4096-4104.
- GONG M L, ZUO J J, REN X X, et al., 2018. Evaluation of effect of urban non-point source pollution control on porous asphalt-bio-retention combined coads [J]. *Environmental Science*, 39(9): 4096-4104.
- 韩景超, 毕春娟, 陈振楼, 等, 2012. 城市交通干道降雨径流中 PAHs 的污染特征[J]. *环境科学学报*, 32(10): 2461-2469.
- HAN J C, BI C J, CHEN Z L, et al., 2012. Pollution characteristics of PAHs in urban runoffs from main roads in urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(10): 2461-2469.
- 胡爱兵, 张书函, 陈建刚, 2011. 生物滞留池改善城市雨水径流水质的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 33(1): 74-77, 82.
- HU A B, ZHANG S H, CHEN J G, 2011. Progress on the improvement of urban stormwater runoff quality by bioretention [J]. *Environmental Pollution & Control*, 33(1): 74-77, 82.
- 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等, 2002. 上海城市降水径流营养盐氮负荷及空间分布[J]. *城市环境与城市生态*, 15(1): 15-17.
- JIANG H Y, LIU M, GU Q, et al., 2002. Nutrient nitrogen loading and spatial distribution of storm-water runoff in Shanghai city [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 15(1): 15-17.
- 蒋敏杰, 李田, 邓文珊, 等, 2010. 屋面径流的细菌学特性调查与消毒效果评价[J]. *中国给水排水*, 26(13): 93-97.
- JIANG M J, LI T, DENG W S, et al., 2010. Investigation on bacteriological characteristics of roof runoff and disinfection efficiency [J]. *China Water & Wastewater*, 26(13): 93-97.
- 李俊奇, 张哲, 王耀堂, 等, 2019. 透水铺装设计与维护管理的关键问题分析[J]. *给水排水*, 55(6): 26-31
- LI J Q, ZHANG Z, WANG Y T, et al., 2019. Analysis of key problems in design and maintenance management of permeable pavement [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 55(6): 26-31
- 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等, 2006. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. *环境科学学报*, 26(7): 1057-1061.
- LI L Q, YIN Q Q, HE Q C, et al., 2006. Catchment-scale pollution process and first flush of urban storm runoff in Hanyang, Wuhan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(7): 1057-1061.
- 李立青, 胡楠, 刘雨情, 等, 2017. 3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用[J]. *环境科学*, 38(5): 1881-1888.
- LI L Q, HU N, LIU Y Q, 2017. Effects of three bioretention configurations on dissolved nitrogen removal from urban stormwater

- [J]. *Environmental Science*, 38(5): 1881-1888.
- 李小静, 李俊奇, 戚海军, 等, 2013. 城市雨水径流热污染及其缓解措施研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 33(1): 89-94.
- LI X J, LI J Q, QI H J, et al., 2013. Advance in thermal pollution of urban rainfall runoff and its mitigation measures [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 33(1): 89-94.
- 陆松柳, 章焱, 2018. 城市面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望[J]. *城市道桥与防洪* (7): 250-254, 224.
- LU S L, ZHANG Y, 2018. Research status and prospect on influential factors and control technology of urban non-point source pollution [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control* (7): 250-254, 224.
- 倪艳芳, 2008. 城市面源污染的特征及其控制的研究进展[J]. *环境科学与管理*, 33(2): 53-57.
- NI Y F, 2008. Characteristics and control progress for controlling urban non-point source pollution [J]. *Environmental Science and Management*, 33(2): 53-57.
- 聂志丹, 年跃刚, 金相灿, 等, 2007. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究[J]. *环境科学*, 28(8): 1675-1680.
- NIE Z D, NIAN Y G, JIN X C, et al., 2007. Pilot-scale comparison research of different constructed wetland types to treat eutrophic lake water [J]. *Environmental Science*, 28(8): 1675-1680.
- 彭博, 2018. SMB 改良型生物滞留池系统去除污染物研究[D]. 西安: 长安大学: 48-49.
- PENG B, 2018. Research on removal of pollutants by SMB modified bioretention system [D]. Xi'an: Chang'an University: 48-49.
- 邵丽, 林志祥, 张洪海, 等, 2009. 人工湿地存在的问题及解决措施[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 24(4): 603-606.
- SHAO L, LIN Z X, ZHANG H H, et al., 2009. Analysis and countermeasures of constructed wetland problems [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 24(4): 603-606.
- 沈庆然, 侯娟, 李田, 2016. 粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果[J]. *环境科学*, 37(12): 4700-4705.
- SHEN Q R, HOU J, LI T, 2016. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by extensive green roofs [J]. *Environmental Science*, 37(12): 4700-4705.
- 唐克旺, 2016. 海绵城市建设存在的误区[J]. *水资源保护*, 32(4): 160.
- TANG K W, 2016. Misconceptions in sponge city construction [J]. *Water Resources Protection*, 32(4): 160.
- 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等, 2016. 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*, 30(1): 73-78, 102.
- TANG S C, LUO W, JIA Z H, et al., 2016. Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and achieving the goal of sponge city construction [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30(1): 73-78, 102.
- 童伟军, 郑文萍, 马琳, 等, 2019. 不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响[J]. *水生生物学报*, 43(2): 431-438.
- TONG W J, ZHENG W P, MA L, et al., 2019. The impact of different amount biostimulants supplement on the performance of water purification in vertical flow constructed wetland [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 43(2): 431-438.
- 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等, 2003. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. *城市环境与城市生态*, 16(6): 283-285.
- WANG Y, LIU M, LIU Q M, 2003. Analysis and research progress of urban rainfall runoff non-point source pollution [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 16(6): 283-285.
- 王虹, 丁留谦, 程晓陶, 等, 2015. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. *水利学报*, 46(11): 1261-1271, 1279.
- WANG H, DING L Q, CHENG X T, et al., 2015. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(11): 1261-1271, 1279.
- 王吉苹, 朱木兰, 2009. 厦门城市降雨径流氮磷非点源污染负荷分布探讨[J]. *厦门理工学院学报*, 17(2): 57-61.
- WANG J P, JU M L, 2009. Nitrogen and phosphorus non-point pollution for urban stormwater runoff in Xiamen [J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 17(2): 57-61.
- 王建军, 李田, 侯娟, 等, 2014. 路面径流的大肠菌群污染及其雨水花园处理[J]. *环境工程学报*, 8(12): 5221-5225.
- WANG J J, LI T, HOU J, et al., 2014. Coliforms in road runoff and its removal by rain gardens [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 8(12): 5221-5225.
- 王俊岭, 聂练桃, 王雪明, 等, 2017. 透水铺装改性基层对典型径流污染物动态除污实验研究[J]. *科学技术与工程*, 17(34): 347-352.
- WANG J L, NIE L T, WANG X M, et al., 2017. Experimental investigation on dynamic adsorption of typical runoff pollutants on modified permeable pavement base layer [J]. *Science Technology and Engineering*, 17(34): 347-352.
- 王俊岭, 王雪明, 冯萃敏, 等, 2016. 改性透水混凝土铺装对雨水径流净化研究进展[J]. *混凝土* (2): 145-148, 152.
- WANG J L, WANG X M, FENG X M, et al., 2016. Purification performance of modified permeable concrete pavement to storm water runoff [J]. *Concrete* (2): 145-148, 152.
- 王书敏, 李兴扬, 张峻华, 等, 2014. 城市区域绿色屋顶普及对水量水质的影响[J]. *应用生态学报*, 25(7): 2026-2032.
- WANG S M, LI X Y, ZHANG J H, et al., 2014. Influence of green roof application on water quantity and quality in urban region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(7): 2026-2032.
- 王淑芳, 2005. 水体富营养化及其防治[J]. *环境科学与管理*, 30(6): 63-65.
- WANG S F, 2005. Water eutrophication and its prevention, control and treatment [J]. *Environmental Science and Management*, 30(6): 63-65.
- 王晓晨, 张新波, 赵新华, 等, 2015. 绿化屋顶基质材料及厚度对屋面径流雨水水质的影响[J]. *中国给水排水*, 31(1): 95-99.
- WANG X C, ZHANG X B, ZHAO X H, et al., 2015. Influence of substrate material and thickness of green roof on runoff quality [J]. *China Water & Wastewater*, 31(1): 95-99.
- 洗丽铨, 鲍海泳, 陈红跃, 等, 2013. 屋顶绿化研究进展[J]. *世界林业研究*, 26(2): 36-42.
- XIAN L B, BAO H Y, CHEN H Y, et al., 2013. Study progress of rooftop greening [J]. *World Forestry Research*, 26(2): 36-42.
- 徐大勇, 蔡昌凤, 廖斌, 2013. 掺粉煤灰多孔混凝土处理模拟酸性矿井水的试验研究[J]. *安徽工程大学学报*, 28(2): 17-20.
- XU D Y, CAI C F, LIAO B, 2013. Purification experimental of simulated acid mine drainage by fly ash-doped porous concrete [J]. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 28(2): 17-20.
- 许国东, 高建明, 吕锡武, 2007. 多孔混凝土水质净化性能[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 37(3): 504-507.
- XU G D, GAO J M, LU X W, 2007. Water-purification properties of porous concrete [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 37(3): 504-507.
- 杨敦, 徐丽花, 周琪, 2002. 潜流式人工湿地在暴雨径流污染控制中应用[J]. *农业环境保护*, 21(4): 334-336.
- YANG D, XU L H, ZHOU Q, 2002. Application of subsurface constructed wetlands in controlling storm runoff pollution control [J]. *A Journal of Agro-Environment Science*, 21(4): 334-336.
- 叶建锋, 徐祖信, 李怀正, 2008. 垂直潜流人工湿地堵塞机制: 堵塞成因及堵塞物积累规律[J]. *环境科学*, 29(6): 1508-1512.
- YE J F, XU Z X, LI H Z, 2008. Clogging mechanism in vertical-flow constructed wetland: clogging cause and accumulation distribution characteristics [J]. *Environmental Science*, 29(6): 1508-1512.
- 尹炜, 李培军, 叶阔, 等, 2006. 复合潜流人工湿地处理城市地表径流研究[J]. *中国给水排水*, 22(1): 5-8.
- YIN W, LI P J, YE M, et al., 2006. Performance of hybrid subsurface constructed wetlands for treating urban runoff [J]. *China Water & Wastewater*, 22(1): 5-8.
- 于振亚, 杜晓丽, 王蕊, 等, 2018. 交通密度对道路雨水径流溶解性有机物污染特性的影响[J]. *环境科学学报*, 38(2): 528-535.



- YU Z Y, DU X L, WANG R, et al., 2018. Impact of traffic density on dissolved organic matter in road stormwater runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(2): 528-535.
- 岳衡, 魏清伟, 王劲松, 等, 2012. 具氨氮吸附效能的沸石多孔混凝土配合比优化[J]. *混凝土* (11): 139-141.
- YUE H, GUO Q W, WANG J S, et al., 2012. Optimization of zeolite porous concrete proportion with ammonia nitrogen adsorption efficiency [J]. *Concrete* (11): 139-141.
- 张巨松, 张添华, 赵雅静, 等, 2007. 透水路面设计的几个问题[J]. *北方交通* (1): 1-4.
- ZHANG J S, ZHANG T H, ZHAO Y J, et al., 2007. Some problems about pervious pavement design [J]. *Northern Communications* (1): 1-4.
- 张清, 2011. 人工湿地的构建与应用[J]. *湿地科学*, 9(4): 373-379.
- ZHANG Q, 2011. Construction and application of constructed wetlands [J]. *Wetland Science*, 9(4): 373-379.
- 张巍, 张树才, 万超, 等, 2008. 北京城市道路地表径流及相关介质中环芳烃的源解析[J]. *环境科学*, 29(6): 1478-1483.
- ZHANG W, ZHANG S C, WAN C, et al., 2008. PAH sources in road runoff system in Beijing [J]. *Environmental Science*, 29(6): 1478-1483.
- 张政科, 魏清伟, 颜智勇, 等, 2012. 具氮、磷吸附特性的多孔混凝土材料优选[J]. *混凝土* (10): 89-91.
- ZHANG Z K, GUO Q W, YAN Z Y, et al., 2012. Optimization of porous concrete materials with nitrogen and phosphate adsorption characteristic [J]. *Concrete* (10): 89-91, 131.
- 郑美芳, 邓云, 刘瑞芬, 等, 2013. 绿色屋顶屋面径流量水质影响实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 47(10): 1846-1851.
- ZHENG M F, DENG Y, LIU R F, et al., 2013. Influence of two greenroofs on runoff quantity and quality [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 47(10): 1846-1851.
- 郑志周, 李海燕, 2017. 水环境中多环芳烃的污染现状及研究进展[J]. *环境监测管理和技术*, 29(5): 1-6.
- ZHENG Z Z, LI H Y, 2017. Pollution status and research progress of polycyclic aromatic hydrocarbons in water environment [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 29(5): 1-6.

## Research Advance and Prospects on Low Impact Development Control Measures for Urban Non-Point Source Pollution

LI Dingqiang<sup>2,3</sup>, LIU Jiahua<sup>1,2,3</sup>, YUAN Zaijian<sup>2,3\*</sup>, LIANG Chen<sup>2,3</sup>, NIE Xiaodong<sup>2,3</sup>, MA Dongfang<sup>1,2,3</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environmental Pollution Integrated Control/  
Guangdong Institute of Eco-Environmental Science & Technology, Guangzhou 510650, China;

3. Guangdong Engineering Center of Non-point Source Pollution Prevention Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** The urban non-point source pollution refers to various contaminants carried by surface runoff in urban areas, which are generated by precipitation washing the atmosphere and scouring the ground surface and further pollutes receiving water by the way of dissolution and diffusion. In recent years, as urbanization process of China accelerates, the urban non-point source pollution has gradually become an important factor affecting water quality and a severe problem of water environment management. Optimizing and generalizing the non-point source pollution control measures of low impact development (LID) are the effective ways to alleviate the situation, thus, this study summarized the advances of relative LID control measures. In high-volume urban areas, vehicle emission and atmospheric deposition are the main sources of non-point pollutants, which include nitrogen and phosphorus pollutants, organic pollutants, heavy metal pollutants, biological pollutants, and other urban non-point pollutants. City governments control non-point source pollution by combining engineering measures with non-engineering measures. And the engineering measures control pollution of non-point source from three processes: source, migration and terminal. Taking biological retention system, green cover, pervious pavement and constructed wetland system as examples, the four main LID engineering control measures are discussed. This study focuses on summarized four LID control measures, including their basic structures and removal effects on pollutants, as well as the removal effects of improved structures. The effects of LID control measures are often influenced by the blockage of filler matrix, the change of temperature, the rot of plant, and the decline of facility material tolerance, which were also discussed in this study. Finally, this study put forward prospects for addressing these issues, such as choosing plants with stable absorptive capacity and collocation, adopting simple auxiliary measures to alleviate filler matrix blockage, and exploring new materials with strong permeability and tolerance.

**Key words:** urban non-point source pollution; low impact development; control measure; research advance; prospects