

低影响开发(LID)透水铺装技术研究进展

张彬鸿¹, 李家科¹, 李亚娇²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 透水铺装技术作为低影响开发(low impact development, LID)措施之一, 对于消纳、净化降水径流具有重要作用。主要从透水铺装系统的结构和类型、对径流量的削减效果、对水质净化效果及其水质水量模拟模型等4个方面论述了国内外主要研究进展和理论成果; 从透水铺装技术的结构稳定性、效能、影响因素、模拟模型等方面探讨了目前该技术研究存在的不足; 对该技术未来主要研究方向进行了展望, 为我国生态城市建设和城市水环境改善提供借鉴和参考。

关键词: 低影响开发; 透水铺装技术; 水质净化; 水量调控; 水质水量模型

中图分类号: U416.224

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0137-08

Progress in the permeable pavement technology for Low – impact Development (LID)

ZHANG Binhong¹, LI Jiakel¹, LI Yajiao²

(1. State Key Laboratory Base of Eco – Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Permeable pavement technology, as one of the low-impact development (LID) measures, plays an important role in detaining, absorbing and purifying rainfall runoff. In this paper, the main research progress and theoretical achievements at home and abroad are discussed from four aspects: the structure and type of permeable pavement system, the regulation effect of runoff water quality purification water quantity and its water quality and water quantity simulation model. The deficiency of present research on permeable pavement technology including structural stability, performance, affecting factors, simulation models and other aspects is discussed. The future research direction of this technology is also discussed. It will provide reference for the construction of eco-city and the improvement of urban water environment.

Key words: low impact development (LTD); permeable pavement technology; water purification; water quantity regulation; water quality and water quantity simulation model

1 研究背景

随着我国城市化步伐的加快,城市下垫面的结构与功能逐渐发生变化,大量的水域、林地、草地、农田被水泥、沥青等不透水材料所替代,这种现象导致城市下垫面透水性能降低,继而表现为地表径流量增加、汇流时间缩短、洪峰增大^[1-2],这也是城市内涝形成的主要原因。同时地表径流中含有悬浮颗粒物、持久性有机污染物、农药、重金属、营养元素、有

机质和其他有代表性的工业源化合物,这些污染物随径流进入受纳水体,造成了水污染^[3]。

透水铺装是一种典型的通过增大城市透水面积对城市雨水径流进行调控的低影响开发(low impact development, LID)措施^[4]。它能在满足人们生活便利的同时,又具有良好的渗透性,减轻了雨水径流对城市水体的污染物输入,改善城市水环境质量,能够在一定程度上缓解城市化过程中带来的负面影响。发达国家40年前就开始研究并开发透水性地面材

收稿日期:2017-03-29; 修回日期:2017-04-22

基金项目:陕西省自然科学基金重点项目(2015JZ013); 国家自然科学基金项目(51279158)

作者简介:张彬鸿(1991-),男,陕西铜川人,硕士研究生,主要研究方向为城市雨洪管理。

通讯作者:李家科(1975-),男,湖北荆门人,博士,教授,主要研究方向为非点源污染与水资源保护。

料,20 世纪 70 年代,法国最早提出透水性路面的设想;自 1986 年开始,英国的 Pratt 等^[5]开始对透水性路面的径流控制和污染物的去除做过一系列研究;日本也于 70 年代为解决因抽取地下水导致地基下沉问题而开发了透水沥青和透水混凝土材料,并在公园、广场、城市道路得到广泛应用;欧美与 20 世纪 80 年代起开始广泛研究使用透水铺装,德国政府致力于到 2010 年把全国 90% 的路面改造成透水铺装,美国各州也相继将透水铺装作为雨水管理的一种有效措施并得到广泛应用。透水铺装在我国的研究和应用起步较晚,但也取得了较大进展,2007 年北京市发布《北京市透水人行道设计施工技术指南》,2011 年发布《透水混凝土路面技术规程 (DB11/T 775 2011)》;我国台湾地区对于透水铺装的应用和研究比较深入和广泛,逐步形成了设计、试验和应用体系。

随着人们对生态环境的日益重视,透水铺装也会越来越受到人们的青睐。本文总结了透水铺装的类型和结构、透水铺装对城市雨水径流水质和水量

的影响效果、机理及模型模拟,探讨了目前存在的不足,以期为今后透水铺装的设计和推广应用提供有效的借鉴和参考。

2 透水铺装的结构和类型

透水铺装的结构形式多样,最基本的构造是自上而下为透水面层、找平层(过滤层)、基层、垫层、和土基。图 1(a)为美国新泽西州和宾夕法尼亚州《暴雨洪水最佳管理措施手册》定义的透水铺装标准结构,图 1(b)为常用的透水混凝土连锁块铺装结构。表 1 列出了透水铺装系统结构、功能及材料。

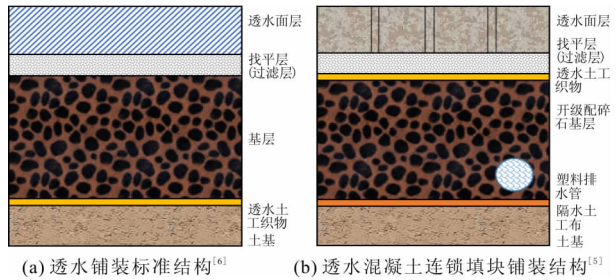


图 1 透水铺装构造示意图

表 1 透水铺装系统结构层功能及材料^[7-9]

结构层	功能	材料	备注
面层	直接承受载荷、透水、贮水、抗磨、抗滑	透水砖、透水混凝土、透水沥青	
找平层	连接面层与基层、透水、过滤、施工找平	中砂、干硬性水泥砂浆、小粒径开级配碎石	当面层结构为透水水泥混凝土,或面层为小尺寸的透水砖时可不设置
基层	承受载荷、透水、贮水	透水水泥混凝土、透水级配碎石、透水水泥稳定碎石	
底基层	防止渗入路床的水或地下水因毛细现象上升、承载、透水、贮水	透水级配碎石	新建或具有停车功能的人行道需设此层
垫层	防止渗入路床的水或地下水因毛细现象上升,缓解含水土基冻胀对路面结构整体稳定的影响	小粒径碎石、粗砂、中砂(土工织物)	当土基为透水性能较好的砂性土或底基层材料为级配碎石时,可不设置垫层

透水铺装按其排水方式可分为全透式、半透式和排水式路面^[10],全透式路面的面层、基层、垫层均有良好的透水性,土基上方常设透水土工网格布以提高承载力。雨水沿面层、基层、垫层一路下渗。主要用于人行道、停车场、公园、生活小区等场地。西咸新区同德佳苑小区内的非机动车道及轻型车道与停车场等透水面层采用棕红色陶土烧结砖,基层为 150 mm 厚的 C20 透水混凝土,底基层为 300 mm 厚的碎石垫层,土基为素土夯实。半透式路面面层和基层具有良好的透水性,垫层则为沥青砂等不透

水材料,土基上方常加设不透水土工布,雨水流经面层、基层后沿不透水垫层排出路基,如须收集滤渗后的雨水,须要在基层底部安装穿孔排水管。主要应用于轴载较轻的城镇道路、停车场、广场、小区道路等。英国 Clifton Campus 建造的一座停车场^[5]就采用半透水形式,并在基层底部采用不透水薄膜阻止水分渗入土基,利用基层埋设的排水管将滤后水进行收集。排水式路面仅面层使用透水材料,面层下设隔水层,基层不透水,渗入面层内部的水分通过道路横坡向道路两侧流动,最终汇入雨水边沟。此类

路面典型面层材料为开级配沥青磨耗层(OGFC),大多应用于承载能力要求较高的城市道路或者高速公路。我国第 1 条排水式路面为咸阳机场高速公路,修建了长约 18km 的排水式沥青路面;在重庆渝林高速公路修筑了长约 3 km 的实体工程^[11]。

透水铺装按其面层材料可以分为透水沥青混凝土、透水水泥混凝土、透水砖等^[10-12]。透水面层应具有良好的透水性,同时应具有一定的强度与刚度,透水砖可分为砖体本身透水和砖体本身不透水或微弱透水而依靠砖体间的间隙进行渗水的透水砖^[13],透水水泥混凝土采用单一粒径粗骨料并用水泥和少量砂包裹其表面形成较大透水孔隙。透水沥青混凝土采用较大用量的单一级粗骨料、较少的细集料

与沥青等胶凝材料形成多孔开级配结构^[10]。常用透水面层材料及技术指标见表 2。

3 透水铺装对雨水径流量的削减效果

透水铺装是改善暴雨时路面积水的一种有效措施,与传统不透水路面相比,由于透水性路面提高了雨水下渗的速率,可减少地表的雨水径流量、降低峰值流速、延迟地表雨水达到峰值流量的时间^[17-18]。总结了近年来国内外透水铺装对径流体积和流量的研究结果,如表 3 所示。由表 3 可知不同的透水铺装结构对径流削减效果不尽相同,但都得出了相似的结论,即透水铺装对降雨径流体积和流量削减效果明显。

表 2 常用透水面层材料及技术指标^[14-16]

材料分类	骨料材料	胶凝材料与添加剂	孔隙率/ %	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	透水系数/ (mm·s ⁻¹)
透水水泥混凝土	普通碎石、矿渣、陶粒、浮石等	水泥、硅粉、粉煤灰、改良剂等	10~25	15~30	3.0~5.0	1.0~10.0
透水沥青混凝土	普通碎石、矿渣等	沥青、高分子树脂、矿粉、纤维稳定剂等	10~25	15~30	3.0~5.0	1.0~10.0
混凝土透水砖	普通碎石、矿渣等	水泥、粉煤灰、增强剂等	15~20	25~35	4.5~6.0	1.0~15.0
烧结透水砖	陶瓷碎粒、长石、建筑废料等	黏土、粉煤灰、高岭土等	15~20	25~35	4.5~6.0	1.0~15.0

表 3 透水铺装径流体积和流量削减效果

透水铺装类型	研究历时(场次)	径流削减
PICP ^[19]	18 场	峰值流量平均降低 83%
PC、PICP、CGP ^[20]	40 场	地表雨水径流量减少 98.17%~99.86%
PGC ^[21]	4 个月(9 场)	比不透水沥青路面减少 93% 的径流量
PICP ^[22]	2 a	比不透水沥青路面减少 70% 的径流量,径流系数 0.29~0.67
PC、PGP ^[23]	9 场人工试验	与普通路面相比,洪峰流量削减率为 24%~70%

注:PICP-连锁混凝土透水铺装;PC-透水混凝土路面;CGP-混凝土网格透水铺装;PGC-嵌草沥青网格路面;PGP-塑料网格透水砖铺面。

试验表明^[24],新建的透水混凝土路面的降雨入渗率达 7~20 m/h,实验室测得其渗透率为 42 m/h。北京市路政局发布《北京市透水人行道设计施工技术指南》要求透水面层材料的渗透系数应达到 1×10⁻⁴ m/s,雨水入渗系统的土壤渗透能力至少应达到 1×10⁻⁶ m/s,设计满足 2 年一遇暴雨强度下,持续降雨 60 min 不产流。即使在基层土壤渗透能力不理想时,通过在路面结构层内安装排水管,仍可降低地表径流和峰值流量,当在透水铺装结构层安装排水管收集雨水时,透水铺装地表雨水径流量削减了 40%~90%,比无收集措施提高 10%^[18]。连锁

混凝土路面砖铺面的径流削减与缝隙空腔面积有关,Collins 等^[20]对北卡罗来纳州的透水铺装监测表明缝隙空腔面积为 12.9% 的铺面径流稍大于 8.5% 的铺面。相同的面层材料不同的结构层对径流的削减率也不相同,朱春阳等^[25]对 3 种透水砖铺面不同结构的透水铺装进行研究发现在 1 h 降雨为 41.5 mm 和 2 h 降雨 83.08 mm 情况下,3 种结构路面均不产流,而在 1 h 降雨 107.17 mm 情况下基层结构自上而下为 1:4 干硬性水泥砂浆 2 cm、级配碎石 23 cm 的铺装结构雨水入渗效果最好。

研究表明^[26],渗透能力的下降很大一部分是因

为长期使用导致透水铺装孔隙的堵塞,影响运行效果,尽管降雨入渗能力有所下降,但其降雨入渗率仍为降雨强度的 4~5 倍。然而其他的研究表明透水铺装在使用 2~3 a 后渗透率下降了 35%~50%,且透水铺装从运行第 1 年就开始发生堵塞,其透水率的下降与其交通强度与污染程度有关,在农村地区的透水铺装渗透率下降了 30%~50%,城市中下降了 40%~70%,重度污染地区下降了 60%~90%^[27-28]。随着运行时间的增加,透水铺装的渗透率有明显的下降,主要原因是其表面的磨损与孔隙的堵塞,Dierkes 等^[29]的研究表明,定期维护对透水铺装保持高渗透率至关重要,而 Baladès 等^[27]的研究发现堵塞往往发生在透水铺装表面的 2 cm,目前常用的透水铺装维护的办法有 4 种:(1)机械清扫之后用水冲洗。(2)真空清洗之后机械清扫。(3)真空清洗。(4)高压冲洗和真空清洗相结合。现阶段真空清洗可用于预防性维护,真空清洗之后采用高压冲洗可用于修复性维护。

4 透水铺装对城市非点源污染的控制机理和效果

城市非点源污染是指城市降雨径流淋洗与冲刷大气和汇水面各种污染物引起的收纳水体的污染,即城市降雨径流污染,是城市水环境污染的重要因素^[30]。城市非点源污染包括总悬浮固体(TSS)、氮(N)、磷(P)、重金属、石油、酚等^[31-32]。大量研究表明透水铺装能削减径流、调节洪峰流量方面有明显的作用,而其对城市非点源污染的作用往往被忽视。

4.1 对 TSS 的去除效果

降雨径流中的 TSS 主要是通过透水铺装面层内部空隙的过滤拦截及基层的吸附去除的。大量研究发现透水铺装对 TSS 具有良好的净化作用,Ahiablame 等^[33]总结领域研究成果指出,透水铺装对径流中 TSS 的去除率为 58%~94%。Fassman 等^[34]对一处透水铺装进行监测表明其对 TSS 的去除率达到 70%。Brown 等^[35]对生态碎石和透水沥青混凝土路面两种透水铺装进行对污染物的控制效果研究,结果表明其对 SS 的去除率在 90%~96%,Eck 等^[36]对 3 处不同地点的透水沥青路面进行检测分析,结果显示其对 TSS 的去除率与传统路面相比增大了 90%。Wei Jiang 等^[37]对透水沥青路面过滤效果进行研究表明在 70 min 的人工模拟降雨中对 SS 的去除达到 90.1%,这取决于其中 SS 颗粒物的粒径大于 0.45 μm,这种粒径很容易被沥青透水铺装

拦截和吸附。透水混凝土路面在去除颗粒态悬浮物及沉淀颗粒物方面效果显著。Kuang 等^[38]试验发现,透水混凝土路面对沉淀颗粒物可全部去除,对悬浮颗粒物去除率也可达到 50%。研究发现不同的结构层对径流中 SS 的去除效果差异明显,张玉玉等^[23]对具有导渗管的透水混凝土路面进行研究发现,雨水经透水混凝土面层、多孔稳定碎石基层、级配碎石底基层对 SS 去除率依次减小。

透水铺装长期运行会导致透水面层孔隙的堵塞,在导致渗透能力下降的同时也伴随着对 TSS 去除能力的下降。因此可根据道路级别及使用情况定期对透水面层进行维护,以恢复透水铺装对 TSS 的去除效果。

4.2 对 N 的去除效果

降雨径流中的氮素在透水铺装系统内的去除转化主要包括结构层截留、吸附、氨化、反硝化作用等(如图 2),输入系统的氮素主要由暴雨冲刷产生的无机物和有机物组成,也包括降雨、积尘等少量含氮物质。

通过大量现场和室内研究,分析了透水路面对城市雨水径流中的氮的去除效果,结果显示透水路面对雨水中的氨氮(NH_4^+-N)去除效果良好,而对总氮(TN)和硝态氮(NO_3^--N)的去除效果并不明显^[37,39]。Collins 等^[20]研究了北卡罗莱纳州东部的 4 种透水路面,发现地下排水管中 NH_4^+-N 和 TN 的浓度均低于沥青路面的地表雨水径流浓度,而除了混凝土透水铺装外,其他 3 种透水路面渗入地下的水中的硝态氮(NO_3^--N)和亚硝态氮(NO_2^--N)的浓度均高于沥青路面地表雨水径流的浓度,这可能是在透水路面材料内部发生硝化作用。Collins 等^[20]监测了连锁混凝土透水铺装(PICP)和透水混凝土路面(PC)路面底部出流的 pH,结果与 Drake 等^[40]的监测结果一致,均接近或处于亚硝化细菌和硝化细菌的最佳生长范围($\text{PH}=7.6\sim 8.8$),其出流中的 NH_4^+-N 和凯氏氮(TKN)的浓度明显小于不透水沥青径流浓度,而 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的浓度则明显大于透水沥青的径流中的浓度。在对透水沥青路面(PA)出水水质的研究显示硝化作用仍是影响氮素转化的主要过程,Roseen 等^[41]对新坎布尔州的一处透水沥青路面进行监测,发现其出水中 PH 接近硝化细菌的最佳生长范围进而有利于硝化作用的进行。Roseen 等^[42]发现透水沥青路面出水中的溶解态无机氮(NO_2^--N 、 NO_3^--N 与 NH_4^+-N 之和)浓度比不透水沥青路面径流浓度高出 35%。透水铺装一般选用开级配碎石基层,这种结构具有较大空隙,平常不降雨时容易形成有氧环境,有利于亚硝化细菌和

硝化细菌的大量繁殖, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 经亚硝化细菌转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 再经硝化细菌的硝化作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 进而导致了出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的下降。除了微生物的转化作用, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果明显也是由于有基质为带负电荷的碎石和土壤对带正电荷的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附^[16]。

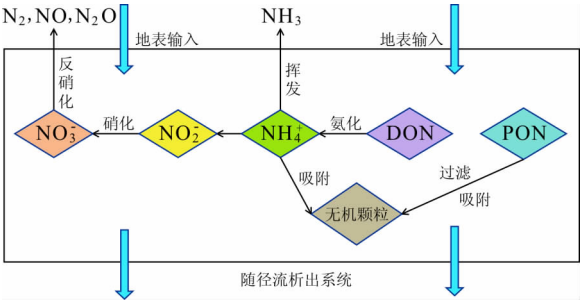


图 2 氮在透水铺装内的迁移转化

研究中发现,在透水铺装底部设置厌氧区对 TN 的去除效果并没有被证实^[43]。在对安大略省的一处透水路面土基进行硬化处理并在结构底部安装球阀以增加其水力停留时间,这样在底部就形成了缺氧的环境,然而监测结果显示 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值比不透水沥青径流浓度还大^[40]。Collins 等^[44]在北卡罗来纳州一处连锁混凝土透水路面内部设置了一个储水区,然而出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度反而有明显的增加,其中的原因可能是没有足够的碳源来支持反硝化作用的进行。如果进水中含大量颗粒态有机氮,则透水铺装对其 TN 的去除效果比较明显,颗粒态有机氮可依附在 SS 上通过结构层的过滤截留,在对安大略省的 3 处透水路面监测后显示,其对 TN 的去除率比不透水沥青路面高出约 35% ~ 45%,其中不透水沥青路面径流中颗粒态有机氮占比最大,透水铺装对颗粒态有机氮的去除比例也是最大^[40]。

4.3 对 P 的去除效果

降雨径流中的磷素在透水铺装系统内的去除转化主要包括结构层截留、吸附、化学沉淀作用、微生物作用等(如图 3)。

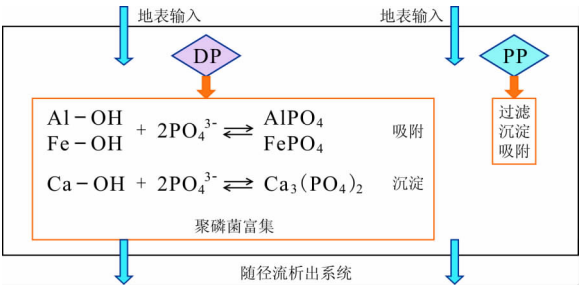


图 3 磷在透水铺装内的迁移转化

国内外学者通过大量现场和室内研究显示透水路面对城市雨水径流中的磷的去除效果良好。Bean 等^[45]对北卡罗来纳州一处连锁混凝土透水路面底部水质进行分析,并与普通沥青路面雨水径流对比,连锁混凝土透水路面出水中 TP 的浓度为 0.01 ~ 0.28 mg/L,而普通沥青路面 TP 的浓度为 0.03 ~ 0.98 mg/L,表明连锁混凝土透水铺装对 TP 浓度削减效果明显。Eck 等^[36]对美国德克萨斯州不同地点的透水沥青公路进行采样分析,与普通沥青路面雨水径流相比,透水沥青 TP 的去除率分别为 75%、66%、78%。赵现勇等^[46]选取 3 种透水铺装对其污染物削减能力进行研究,结果表明不同进水水质情况下透水混凝土铺装对 TP 浓度最佳削减效果为 64.91%、透水砖铺装为 94.62%、透水草皮砖为 84.42%,且随进水浓度的增大浓度削减能力有所下降。崔珍珍^[47]研究了在一定降雨强度及进水浓度下透水混凝土砖铺装各结构层对 TP 的去除率,结果显示透水混凝土砖对 TP 的平均去除率为 71.2%,研究中发现 TP 易吸附于颗粒物并最终 SS 的形式去除,但在进水水量过大而产生冲刷效应时,TP 可能发生解吸现象。Wei jiang 等^[37]的研究结果显示随着降雨时间的增加,出水中 TP 的浓度去除率也随之增大,这可能是由于降雨后期聚磷菌一类微生物的出现,有助于对磷的去除。

城市降雨径流中的 P 按物理形态可分为颗粒态磷(PP)和溶解态(DP),PP 在径流中主要依靠过滤、沉淀和吸附作用去除;DP 则一方面通过透水铺装结构层中含有铁、铝或钙等金属离子对雨水中磷酸根离子的吸附和离子交换作用,最终形成颗粒态金属盐以沉淀形式去除,另一方面,聚磷菌一类的微生物的摄取也是去除 DP 的重要手段。

5 透水铺装的模拟模型

尽管透水铺装对水量削减和水质污染物的去除效果非常明显,但其融入可持续发展的城市排水系统却是极其缓慢的,其一个关键限制因素就是缺少可以利用的分析和模拟工具^[48]。在所有的 LID 措施中,透水铺装是最缺少可用来模拟其水力特性模型的单项措施,主要是由于其组成材料的多样性和其内部结构的高渗透率,这种高渗透性可导致优先流的形成,尤其是在透水铺装系统的基层和底基层,而这种现象给透水铺装系统的数值模拟造成了很严重的问题^[49]。

雨洪管理模型(Storm Water Management Model,

SWMM)就是可用来模拟的模型之一^[50],然而在用SWMM模型进行模拟时出现了错误,尤其是在基层和底基层的下渗过程^[51]。HYDRUS模型是现阶段对透水铺装模拟应用较多的模型,Ilgen等^[52]利用HYDRUS-2D对透水铺装进行了数值分析并利用实测数据对模型进行校正,利用校正后的模型模拟不同情况下的数据,结果显示其土壤水动力参数具有敏感性和不确定性,模拟过程中优先流效应也没有考虑在内。Carbone等^[53]利用HYDRUS-1D对4种降雨情况下的透水铺装进行模拟标定和优化,模拟过程中运用了具有传质方程的双孔介质模型,忽略了路面的不同的水力特性并将其结构层均一化处理,结果表明HYDRUS-1D对透水铺装水力特性的模拟较为适宜。Brunetti等^[54]利用HYDRUS-1D研究卡拉布里亚大学的透水铺装,模拟过程分为两种情形,第一种利用单孔介质模型进行全结构模拟,第二种利用双孔介质模型对基层和底基层进行模拟,结果显示双孔介质模型可更好地对基层和底基层的可变饱和流进行模拟。意大利的Ranieri等将透水沥青路面视作一个在稳定降雨强度补充下,雨水沿着不透水基层沿坡度向下的一维无侧限流动,并在此基础上建立了Ranieri模型,该模型将最大流动路径长度(maximum flow path length, MFPL)作为设计目标,通过推导给出避免路面出现积水所需的最大流动路径并在实际工程中得到广泛利用^[55-56]。PCSWMM-PP是由加拿大水力计算研究所开发的专门用于渗透铺装的模型工具,可根据所输入的材料与结构参数模拟整个蓄水、渗透过程。该模型在计算时将主体结构层分为面层、基层及土基3部分,考虑基层利用自身孔隙临时贮存雨水的功能特点,将其分为基层不饱和区和饱和区两个单元。此软件可对各种因素对透水铺装保水综合指标的影响方式进行分析,对透水铺装的设计具有较好的参考价值。赵亮^[57]借助PCSWMM-PP模型对透水铺装的透水功能进行分析,提出了相关透水铺装功能设计的要求与方法。

6 结论与展望

6.1 目前存在的不足

作为LID体系中的典型技术之一,透水铺装技术在削减城市雨水径流量和改善雨水径流水质方面有较好的效果,在美国和欧洲国家得到了广泛的应用。国内在透水铺装的研究和使用方面还处于初级阶段,应用实例较少,目前我国还没有专门用于透水铺装技术的设计标准和手册,这都将影响透水铺装

的设计水平及运行效果,也使得透水铺装在我国的应用相对滞后。

就透水铺装技术研究的不足可以归纳为:(1)透水铺装作为一种具有双重作用的结构,既承担了交通量同时又兼具渗透、储存、排放和处理雨水径流的作用,与传统路面结构有较大差异,强度和整体性均较差,因此透水路面的破坏规模较大,较严重,常见的典型破坏有不均匀沉陷、车辙与推移、面层碎裂与松散,其主要原因在于透水铺装结构层和土基长时间被水浸泡,整体强度和稳定性急剧下降,造成结构薄弱并引发了多种病害,降低了路面使用寿命。因此,针对透水路面结构稳定性和应用材料性能的研究十分必要。(2)透水铺装对TN的处理效果很差,目前并未找到有效的方案,增加水力停留时间和设置淹没区均有可能造成路面结构的加速破坏且效果均不明显。(3)缺乏关于透水铺装设施对水量削减能力的量化方法,关于降雨强度和降雨频率对透水铺装设施处置效果影响的研究较少。(4)结构性质、微生物繁殖情况、渗透能力、降雨间隔时间、水力负荷、污染负荷等都不不同程度地影响透水铺装设施的处理效果,考虑这些耦合因素影响的出水水质、水量的研究较少。(5)由于透水铺装系统的特殊结构和众多不确定因素导致缺少可以利用的分析和模拟工具。

6.2 展望

通过对以上透水铺装的分析和总结可以确定透水铺装技术的主要研究方向:

(1)透水铺装对TSS、N、P的去除提效技术研究,怎样提高对污染物质的去除效果。在对TSS的研究方面,应着重考虑透水铺装的渗透性研究,怎样提高其表面渗透性;在对N、P的去除提效研究方面,确定其主要限制因素,增加水力停留时间和设置淹没区是否可以明显提高N的去除率,氮源对淹没区设置的影响程度。

(2)透水铺装设计优化研究,首先考虑透水铺装作为路面所具有的性质(强度、刚度、耐磨性等),结合透水铺装的入流情况(水力负荷、污染负荷)和目标净化去除效果,明确主要设计参数(结构层组合方式、材料、厚度等)的设计方法。现阶段透水路面结构层多采用传统材料,因此针对性地开发具有多种污染物净化能力的新型基层材料或添加剂也是未来的一个研究方向。

(3)透水铺装维护技术研究,保持良好的渗透性及路用功能。

随着我国城市化进程的加快,缺水和水污染问

题严重。近年来我国大力提倡“海绵城市”的建设,透水铺装作为建设海绵城市的具体措施有着广阔的应用前景,我国在研究透水铺装时应借鉴国外已有研究成果并结合我国实际情况选择性地吸收和利用,以形成自己的一套理论措施并指导我国“海绵城市”的建设,为我国城市雨洪管理服务。

参考文献:

- [1] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报, 2012(1):1-4.
- [2] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9):802-806.
- [3] 张 蕾, 周启星. 城市地表径流污染来源的分类与特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11):2272-2279.
- [4] 孙艳伟, 魏晓妹, POMEROY. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2011, 22(2):287-293.
- [5] Pratt C J, Mantle J D G, Schofield P A. UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality[J]. Water Science & Technology, 1995, 32(1):63-69.
- [6] New jersey stormwater BMP manual, Chapter 7.9. Standard for Pervious Paving System[S]. 2004.
- [7] 赵 亮. 城市透水铺装材料与结构设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [8] 孙中阁, 孙荣山, 王众毅, 等. 北京市透水人行道设计施工技术指南[Z]. 北京: 北京市路政局, 2007.
- [9] 么海博. 透水铺装控流截污试验及其设计应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- [10] 王德蜜, 姜 迪, 狄升贯. 透水路面铺装设计与材料应用综述[J]. 城市道桥与防洪, 2013(9):35-38.
- [11] 万义芳, 颜 兵, 王紫鹃, 等. 排水式沥青混凝土面层应用研究与总结[J]. 城市道桥与防洪, 2010(2):116-123.
- [12] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Evaluation of various types of permeable pavements with respect to water quality improvement and flood control[J]. American Society of Civil Engineers, 2006:275-289.
- [13] 胡 漪. 海绵城市建设与混凝土透水砖制品工艺及装备[J]. 砖瓦, 2017(1):45-49.
- [14] 王 宁, 张凯峰, 赵世冉, 等. 钢渣透水混凝土力学性能与透水性能研究[J]. 商品混凝土, 2016(2):51-53+72.
- [15] 何祥清. 透水混凝土的配制及市场应用分析[J]. 中小企业管理与科技旬刊, 2016(20):64-65.
- [16] 王 哲, 谢 杰, 谢 强, 等. 透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S2):138-143.
- [17] Bean E Z, Hunt W F, Bidelspach D A. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2007, 133(3):249-255.
- [18] 赵 飞, 张书函, 陈建刚, 等. 透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究[J]. 给水排水, 2011, 27(S1):254-258.
- [19] Fassman Elizabeth A, Blackbourn Sam. Low impact development: new and continuing applications[C]//. Proceedings of the 2nd National Low Impact Development Conference 2007:290-306.
- [20] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Hydrologic and water quality evaluation of four permeable pavements in North Carolina, USA[C]//. Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection, ASCE, 2008(333):1-10.
- [21] Dreelin E A, Fowler L, Carroll C R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events[J]. Water Research, 2006, 40(4):799-805.
- [22] Fassman E A, Blackbourn S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(6):475-485.
- [23] 张玉玉. 高效渗透减排透水铺装对径流的控制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- [24] Welker A L, Jenkins J K G, Mccarthy L, et al. Examination of the material found in the pore spaces of two permeable pavements[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(4):278-284.
- [25] 朱春阳, 李树华, 李晓艳, 等. 透水性铺装结构对雨水入渗过程的影响[J]. 北京园林, 2009, 25(4):19-26.
- [26] Kumar K, Kozak J, Hundal L, et al. Insitu infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot-A four-year study[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 167:8-14.
- [27] Baladès J D, Legret M, Madiéc H. Permeable pavements: Pollution management tools[J]. Water Science & Technology, 1995, 32(1):49-56.
- [28] Jennifer M, Terry L. Practical review of pervious pavement designs[J]. Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica, 2014, 42(2):111-124.
- [29] Dierkes C, Lucke T, Helmreich B. General technical approvals for decentralised sustainable urban drainage systems (SUDS): The current situation in germany[J]. Sustainability, 2015, 7(3):3031-3051.
- [30] 林积泉, 马俊杰, 王伯铎, 等. 城市非点源污染及其防治研究[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(S1):63-65.
- [31] 车 伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理——城市节约用水技术丛书[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [32] 马晓宇, 朱元励, 梅 琨, 等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究,

- 2012, 25(1):95 – 102.
- [33] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2012, 223(7):4253 – 4273.
- [34] Fassman E A, Blackbourn S. Permeable pavement performance over 3 years of monitoring[C]// *Low Impact Development International Conference*, 2010:152 – 165.
- [35] Brown C, Chu A, Duin B V, et al. Characteristics of sediment removal in two types of permeable pavement. [J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2009, 44(1):59 – 70.
- [36] Eck B J, Winston R J, Hunt W F, et al. Water quality of drainage from permeable friction course [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(2):174 – 181.
- [37] Wei Jiang, Sha Aimin, Xiao Jingjing, et al. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 100:102 – 110.
- [38] Kuang X, Sansalone J, Gnecco I, et al. Cementitious permeable pavement as an LID practice for hydrologic and particle In – Situ control[C]// *World Environmental and Water Resources Congress*, 2007(243):1 – 10.
- [39] 龚应安, 陈建刚, 张书函, 等. 透水性铺装在城市雨水下渗收集中的应用[J]. *水资源保护*, 2009, 25(6):65 – 68.
- [40] Drake J, Bradford A, Setters T V. Stormwater quality of spring-summer – fall effluent from three partial – infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 139(139C):69 – 79.
- [41] Roseen R M, Ballesterio T P, Houle J J, et al. Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(1):81 – 89.
- [42] Roseen R M, Ballesterio T P, Houle J J, et al. Seasonal performance variations for storm – water management systems in cold climate conditions. [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(3):128 – 137.
- [43] Collins K A, Lawrence T J, Stander E K, et al. Opportunities and challenges for managing nitrogen in urban stormwater: A review and synthesis[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(11):1507 – 1519.
- [44] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Side – by – side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north carolina[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6):512 – 521.
- [45] Bean E Z, Hunt W F, Bidelsbach D A. Evaluation of four permeable pavement sites in eastern north carolina for runoff reduction and water quality impacts[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2007, 133(6):583 – 592.
- [46] 赵现勇, 程方, 张杏娟, 等. 不同结构透水路面对雨水径流污染物的削减作用[J]. *天津城建大学学报*, 2012(4):280 – 285.
- [47] 崔珍珍. 透水路面结构层雨水入渗与水质净化性能及机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [48] Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3):394 – 405.
- [49] Brattebo B O, Booth D B. Long – term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. [J]. *Water Research*, 2003, 37(18):4369 – 4376.
- [50] Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM) [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(6):813 – 814.
- [51] Zhang Shouhong, Guo Yiping. SWMM simulation of the stormwater volume control performance of permeable pavement systems [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(8):1 – 8.
- [52] Illgen M, Harting K, Schmitt T G, et al. Runoff and infiltration characteristics of pavement structures: review of an extensive monitoring program. [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2007, 56(10):133 – 140.
- [53] Carbone M, Brunetti G, Piro P. Hydrological performance of a permeable pavement in mediterranean climate[C]// *International Multidisciplinary Scientific Geoconferences Sgem*. 2014:381 – 388.
- [54] Brunetti G, Šimunek J, Piro P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540:1146 – 1161.
- [55] Sansalone J, Kuang X, Ranieri V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2008, 134(5):666 – 674.
- [56] Barrett M E. Effects of a permeable friction course on highway runoff[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2008, 134(5):646 – 651.
- [57] 赵亮. 城市透水铺装材料与结构设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.