

我国透水路面发展研究综述

周晋军^{1,2}, 黄天意², 刘家宏^{3,4}, 王昊¹, 庞亚莉¹

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

4. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038)

摘要:从政策、标准、方法、技术、效益评估等方面综述了我国透水路面的技术方案和综合效益, 并将我国透水路面发展历程划分为学习阶段、启动阶段、发展阶段、快速建设阶段、规范化阶段5个阶段。讨论了现行透水路面的分类方式、评价指标和建设规划, 分析了透水路面的效益及评价方法。针对我国透水路面铺设缺乏方向性、技术标准不全面等问题, 提出了完善透水路面评价机制、制定适当的透水路面建设指导原则、科学定量分析透水路面建设的可行性、对各地透水路面建设的合理性进行评估、鼓励在适宜区域内建设透水路面、加强标准和技术规范的制定和修订等建议。

关键词:透水路面; 海绵城市; 雨水管理; 城市雨水利用; 雨水资源化

中图分类号: TV211; U461.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)04-0078-11

Review of permeable pavement development in China//ZHOU Jinjun^{1,2}, HUANG Tianyi², LIU Jiahong^{3,4}, WANG Hao¹, PANG Yali¹ (1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Key Laboratory of Digital Twin Watershed, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: This paper summarizes the technical schemes and comprehensive benefits of permeable pavement in China from the aspects of policy, standard, method, technology, and benefit evaluation. It divides the development course of China's permeable pavement into five stages: learning stage, start-up stage, development stage, rapid construction stage, and standardization stage. Current classification methods, evaluation indices, and construction plans for permeable pavement are discussed. The benefits of permeable pavement and the main evaluation methods are analyzed. In view of the lack of directivity in permeable pavement installation and incomplete technical standards in China, some suggestions are put forward, such as improving the evaluation mechanism of permeable pavement, formulating appropriate guiding principles of permeable pavement construction, scientifically and quantitatively analyzing the feasibility of permeable pavement construction, evaluating the rationality of permeable pavement construction in various places, encouraging the construction of permeable pavement in suitable areas, and strengthening the formulation and revision of standards and technical specifications.

Key words: permeable pavement; sponge city; rainwater management; urban rainwater utilization; rainwater resource utilization

随着我国城市化进程的快速推进, 城市道路面积显著扩大。据统计, 截至2021年, 我国城市道路面积已超过1万km², 与2011年相比增长了近2倍。然而, 在优化交通出行效率的同时, 城市道路的大面积铺设也带来了城市内涝和城市热岛化等问

题^[1]。城市地表大规模硬化以及道路面积的增加, 使得下垫面的综合降雨径流系数增大, 雨水径流峰值增大, 从而加剧了城市内涝的发生程度^[2]。此外, 混凝土或沥青路面的地表反射率远低于自然土壤, 硬化路面改变了城市下垫面的热力性质, 降低了

基金项目:内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0007); 国家自然科学基金重大项目(52192671); 北京市自然科学基金项目(8242003); 北京市教委科技计划一般项目(KM202310005023, KM202210005017)

作者简介:周晋军(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事城市水文循环研究。E-mail: zhoujj@bjut.edu.cn

通信作者:刘家宏(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事城市水文研究。E-mail: liujh@iwahr.com

地面总体反射能力,导致热量积蓄在地面层中,同时由于路面材料的比热容较大,造成了“夜晚降温缓慢”的城市道路侧的热岛现象。针对上述问题,一些国家提出了一系列的水管理措施以解决城市道路铺设所带来的问题,如美国的低影响开发、英国的可持续城市排水系统、澳大利亚的水敏感型城市设计等^[3-5],这些策略的共性之一就是通过铺设透水路面来替代不透水路面。透水路面具有良好的透水和排水性能,可以有效缓解城市内涝问题。另外,透水路面材料通常还具有多孔散热性、高比热容、孔隙储水等特性,能有效缓解城市热岛效应^[6]。可见透水路面既能调节城市水文循环过程,也能改善城市生态环境,近年来被广泛应用于我国城市道路、广场、停车场等地面的铺设,是防治内涝、缓解热岛效应的重要措施之一。透水路面的相关发展和研究在推进城市建设方面具有重要意义。

国外对城市路面对雨水径流和生态环境的影响认识较早,早在1940年便开始研发和制作多孔混凝土^[7],日本、美国和新加坡等国家从1950年开始开展透水路面的相关研究,并进行了试点铺设^[8]。我国对透水路面的研究始于1990年左右,但真正大面积铺设是在2012年提出建设海绵城市之后^[9-11]。近年来,我国政府对透水路面的发展给予了大力支持,GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》第8.2.5条对建筑室外的透水地面面积比进行了详细评分,以此鼓励采用更多的透水路面。2015年印发的《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发〔2015〕75号)要求推动海绵型建筑和相关基础设施建设,到2030年,城市建成区80%以上的面积应实现降雨的就地消纳和利用。这些政策明确了透水路面对我国城市发展的重要性,作为一种经济实用且能显著削减径流的绿色生态型地面类型,城市透水路面具有广阔的应用前景和推广价值。

伴随海绵城市建设的推进,我国透水路面的相关研究也逐渐增多,本文总结和分析我国透水路面的发展和研究现状,回顾我国透水路面的主要发展历程,讨论现行透水路面的分类方式、评价指标和建设规划,分析透水路面的效益以及当前主要的效益评价方法,并探讨透水路面发展建设中存在的问题和需要进一步改进的领域。

1 我国透水路面发展历程

我国关于透水路面的相关文献可以追溯至20世纪80年代。1984年熊光泽^[12]翻译了来自苏联的关于透水路面的相关实验内容;1987年刘琪

亮^[13]翻译了一篇来自日本的文章,详细介绍了透水路面铺设对城市在各个领域发展的优势;1988年北京市开始尝试铺设透水混凝土,但由于材料和施工方法选择不当,铺设过程耗时较长^[8];1989年薛英超^[14]介绍了日本的雨水下渗技术,并对其工程效益进行了分析。1990年后,随着我国城市化的快速发展,城市水环境问题和洪涝灾害问题日益严重,透水路面在我国的关注度随之提升,学者们开始对透水路面的结构设计和材料配比进行研究^[15-17]。一些城市开始探索透水路面的建设实践,例如北京市于1993年提出“黄土不露天”行动,要求在树坑周围填充透水路砖,以降低沙尘的可扬起面积^[18];天津市于2003年开始试点铺设彩色透水路砖;兰州市于2005年使用透水砖对西津西路进行了改造;哈尔滨市于2006年建设了该市首条透水人行景观路面;南京市在2007年的透水混凝土鉴定会上宣布逐渐推广透水路面的建设;无锡市于2009年在运河西路建设了较高空隙率的沥青路面。为规范逐渐增加的透水路面建设,2009年,住房和城乡建设部发布了CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》,随后在2012年发布了CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》。

在2010年之前,尽管透水路面在部分地区得到了应用,但其推广力度较小,建设范围有限,研究内容也相对较少。2011年,董淑秋等^[19]提出了以生态海绵理念进行城市建设的提议,随后在“2012低碳城市与区域发展科技论坛”中,生态海绵理念被进一步细化,并首次提出了海绵城市的概念,得到了各级政府和研究者的广泛重视^[20-21]。海绵城市作为一种城市雨洪管理概念,提倡通过灰色与绿色基础设施的结合,解决水生态环境问题和水资源问题,从而实现城市的可持续发展。随着相关政策的出台,如《关于开展中央财政支持海绵城市建设试点工作的通知》(财建〔2014〕838号)和《住房和城乡建设部办公厅关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知》(建办城〔2022〕17号),透水路面作为一种符合海绵城市理念的工程措施受到了更多关注,以“透水路面”作为关键词在中国知网进行的主题检索显示,2012—2022年的期刊文献和学位论文数量总和比2001—2011年增加了约4.3倍。将2003—2022年相关文献数量按发表年进行分类汇总并归一化,分析显示从2013年开始文献占比迅速增加,并在2019年达到峰值,2020—2022年文献占比有所下降,总体变化趋势与海绵城市的发展趋势相似,由此可见透水路面在国内的关注度与海绵城市的发展密切相关。

国务院办公厅在 2015 年发布了《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发[2015]75 号),明确提出推进海绵城市建设的要求,并在 2015 年和 2016 年分别对两批城市进行试点工作^[22],加快了推进了透水路面的铺装建设。2018 年,住房和城乡建设部发布 GB/T 51345—2018《海绵城市建设评价标准》,对海绵城市建设进行了规范。交通运输部在 2020 年发布 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》,进一步提升了透水路面的设计和施工质量。住房和城乡建设部 2021 年发布 CJ/T544—2021《聚合物透水混凝土》为透水混凝土的发展提供了技术支持。2022 年,《住房和城乡建设部办公厅关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知》(建办城[2022]17 号)的发布更是强调了透水路面建设的重要性,并要求依法依规,科学地施工建设。上述标准和文件的出台为透水路面和海绵城市的规范化发展提供了强有力的政策支持。为了适应不断发展的透水路面材料和工程技术,相关行业技术规程和标准也在开始进行修正和更新,住房和城乡建设部在 2020 年公开征集对 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》的修改意见,在 2022 年启动对 GB/T 25993—2010《透水路面砖和透水路面板》的修订工作。

图 1 梳理和展示了我国透水路面发展的关键阶段和里程碑事件,反映出政策、技术和实践的相互影响和发展。将我国透水路面发展历程划分为 5 个阶段:①1980—1989 年,该阶段是我国透水路面发

展的学习阶段,主要通过翻译国外相关文献,学习和了解透水路面的相关技术和应用;② 1990—2011 年,我国透水路面发展进入启动阶段,着手将理论研究尝试转化为实践应用,开始在一些城市铺设透水路面,并拟定了相关的技术施工标准;③2012—2014 年,随着海绵城市概念的提出,透水路面的关注度显著提升,其建设规模和研究范围开始逐渐扩大,我国透水路面研究进入发展阶段;④2015—2018 年,海绵城市建设试点的启动,推动了透水路面迈入快速建设阶段,在这一阶段,透水路面技术得到了迅速的推广和实施;⑤2019 年以后,透水路面相关的研究热度开始下降,部分地区透水路面的快速建设暴露出问题,更多政策和规范相继出台以规范透水路面建设,推动透水路面走向更科学、规范的发展,中国透水路面建设驶入再发展阶段,也可称作规范化阶段。

2 透水路面技术

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,路面结构可以分为面层、基层和底基层 3 部分。当不透水路面占总路面面积超过 20%时,地面雨水径流流量将呈指数型增长^[23],这种现象不仅增加了城市排水系统的压力,也可能导致城市内涝等问题。相比之下,透水路面的设计理念具有显著优势。透水路面的主要特点是允许部分雨水透过路面,将雨水分散至路面面层以下,从而实现雨水的有效分散,减少径流流量,降低城市排水系统的压力。这种设计使得透水路面在降水量较小时不易产生积水现象,有助于提升城市雨水管理。

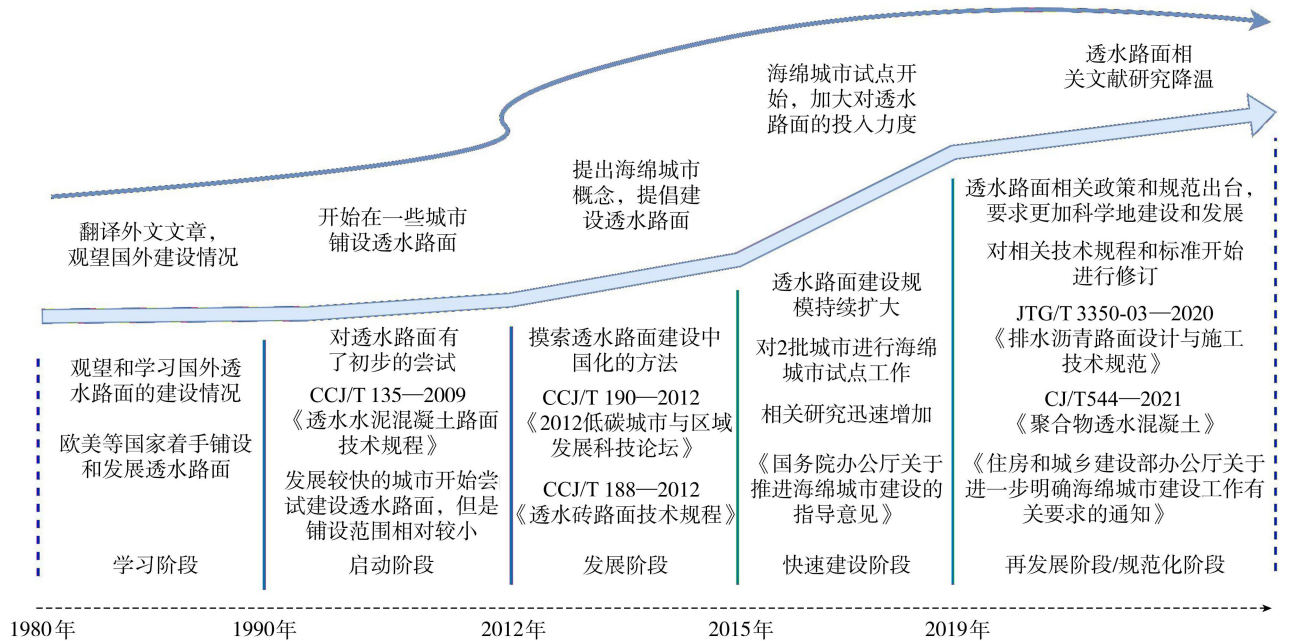


图 1 我国透水路面发展历程

2.1 透水路面分类

2.1.1 基于路面结构的分类

透水路面的类型可以根据其结构特性进行划分,王德蜜等^[24]将透水路面分为面层透水、半透水和全透水 3 种,参照 CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》,这 3 种类型分别被称为 I、II 和 III 型路面。而在 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》中,面层透水和半透水分别被称为半透水路面和全透水路面。为便于理解和区分,本文按雨水在基层的排出方向,将透水路面分为仅面层透水,面层、基层透水,面层、基层、底基层透水 3 类。在仅面层透水路面设计中,基层为不透水材料或基层顶部设有不透水层,雨水透过面层后会沿基层顶部排出。面层、基层透水路面的面层和基层采用排水材料,底基层为不透水材料,或底基层顶部设不透水层,雨水依次透过面层和基层后,沿底基层顶部排出。面层、基层、底基层透水的路面的面层、基层和底基层均为透水材料,雨水依次透过面层、基层和底基层,最后到达路基。虽然理论上路基也可以使用透水材料制作,使其成为路基透水路面,但这种设计在强度上尚未得到充分证明,因此在实际工程中的应用较少。相同造价条件下,透水材料的强度通常低于不透水材料,当更多路面层使用透水材料时,路面的轴载能力会相应下降^[25-26]。对于不同结构的路面,其荷载能力存在差异,例如,面层透水路面可承载 58.8 KN 负荷,而基层透水路面只能承载 39.2 KN 负荷。如果底基层路面想达到较高轴载能力,则各级配层就需要更大的厚度^[27],因此,底基层透水路面更多地被应用于人行道、非机动车道或景观道路等荷载较轻的场景上。

2.1.2 基于透水方式的分类

根据透水方式的不同,透水路面可以分为渗透透水、孔隙透水和渗透孔隙透水 3 种类型。其中,渗透透水路面通过材料内部结构或材料单体之间存在的微孔实现透水,这类孔隙较小,通常不易使人注意,路面较为平整且连贯。代表性的路面有透水混凝土路面、透水沥青路面,以及由陶瓷、玻璃颗粒和树脂等制成的路面。相比之下,孔隙透水路面通过

在铺装时控制各铺装单体间距来实现透水,孔隙有矩形、三角形、圆形等多种形状。渗透孔隙透水路面则将以上渗透透水和孔隙两种方式相结合。

孔隙透水路面和渗透孔隙透水路面在保持良好透水性的同时,也更具美感,兼具实用性和装饰性。然而,由于孔隙较大,常使行车过程中产生颠簸感,而且铺装单体暴露在路面的边缘处容易在高负荷下发生磕破、损毁等现象。因此,渗透透水路面更常用于行车道路面,而孔隙透水路面和渗透孔隙透水路面更多应用于非行车道路面。

2.1.3 基于路面材料的分类

透水路面的材料类型多样,常见的 7 种类型如表 1 所示,各类材料的选择应根据具体应用场景和预期性能需求来决定。石质材料由于易获取和造价低廉,常被用于公园内的步行道路。而水泥透水路面一般制成混凝土结构,由于采用开级配混合料,抗疲劳强度相对较低,因此常用于非机动车道或人行道路^[28]。沥青透水路面平整且防滑,适用于大负荷的机动车道路。然而,沥青和水泥透水路面寿命相对较短,一般在使用 3 a 后就可能发生较严重的堵塞,需要进行清理^[29]。树脂透水路面造价较高,但具有基面平整和色彩丰富的优点,故多用于景观道路和高档住宅的人行步道。塑胶透水路面主要用于运动场地,能有效防止运动场地因雨水浸泡而损坏。草坪透水路面的建设主要有两个目标:①在绿化地上铺设硬质格网,以保护草坪或降低造价;②使用草坪砖进行铺设,同时在砖体中心种植绿化物,以提升美观性。陶瓷透水路面具备良好的水力和机械性能,耐磨、防冻融和抗压性能好^[30],但其高价格、施工复杂性和对冲击的敏感性限制了其在更大规模下的应用。

2.2 透水路面评价指标

透水路面的评估主要关注其在海绵城市建设方面的渗透、蓄水降温、再生寿命三个方面的性能。渗透性能是通过透水系数、可渗透面积和最早下渗时间来评价的^[31]。透水系数描述了单位时间内单位面积透水路面的透水能力,较高的透水系数意味着较高的透水速率,但透水系数并非选择材料的唯一标准,因为具有较高透水系数的材料往往伴随着更

表 1 透水路面按材料分类

类型	具体材料	应用程度	成本/(元/m ²)	适用场所
石质透水路面	将石英石、花岗岩或石灰石等石材打制成的小石块	多	70~120	人行道路
水泥透水路面	水泥、砂子和碎石,常以混凝土形式制成	多	50~200	非机动车道或人行道路
沥青透水路面	沥青和石料	多	300~800	机动车道路
树脂透水路面	环氧树脂、聚氨酯等具有较好的透水性能的树脂与颗粒状材料混合	较多	120~500	景观道路
塑胶透水路面	聚乙烯、聚丙烯或三元乙丙等透水塑胶	较多	90~500	运动场地
草坪透水路面	将草坪格网铺盖在绿化路面上或使用绿化砖	少	10~70	绿化道路
陶瓷透水路面	煤渣、石英和废陶瓷等烧制的陶瓷颗粒层或陶瓷砖	少	150~300	人行道路

高的造价。为了在成本和效益间取得平衡,设计者往往更倾向于增加可渗透面积来抵消材料透水系数的适当下降。最早下渗时间是指从降雨开始到路面开始下渗雨水径流的时间,最早下渗时间越短,透水路面的启动能力较强。虽然不同透水路面的最早下渗时间差异不大,但在降雨频繁且降水量较小的地区仍是一个需要特别关注的指标。目前,我国常用的透水系数测量方法有3种:①DB11/T 775—2010《透水混凝土路面技术规程》中附录B的方法;②美国标准 ASTM C1781/1781M-15《块材透水路面结构系统的渗透率测试方法》^[32];③GB/T 25993—2010《透水路面砖和透水路面板》中附录C的方法。研究表明,透水路面的透水系数与孔隙率存在一定的联系,通常情况下孔隙率增大,透水系数增大^[33]。但是透水系数与孔隙率关系研究尚未得到一致的结论,孔隙结构与渗透性能之间的关系仍然是透水路面材料研究的重点^[34]。

透水路面的蓄水降温性能描述了其在积水时利用路面下层的储存空间或材料孔隙来储存雨水,并通过蒸发吸收周围环境的热量,从而达到降温效果,这涉及蓄水性能和降温性能两方面。CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》提出骨料级配要求的蓄水容积不如单粒级骨料^[35],因此在设计路面蓄水性能时应考虑更高的标准。姜雄^[36]指出,在设计较大蓄水能力的透水路面时应增加铺装厚度并减小孔隙率。降雨积水会增加路面含水量,而蒸发和蓄水下渗则会降低路面含水量。当降水量较大使路面含水接近上限时,含水上限大的路面蓄水更多;而当降水量较小,无法达到路面含水上限时,渗水速度快的路面则蓄水更多。面层材料主要通过孔隙率和光反射率来影响透水路面的降温效果,透水性沥青路面降温效果与其孔隙率呈正线性相关关系,材料的吸水能力对透水材料的蒸发冷却效果有重要影响^[37]。透水路面的降温效果主要通过孔隙热对流和孔隙含水蒸发吸热进行^[38]。从已有研究来看,缺少路面构造对降温效果影响的实测和理论分析研究,而且透水路面降温研究是城市水文研究的热点问题之一^[39-40]。

透水路面由于其丰富的孔隙结构,与传统路面相比更容易被泥沙、树叶等杂物堵塞,从而影响路面的排水效果,因此其渗漏再生寿命性能成为重要的考虑因素。这类性能包括单次使用时间和最大养护次数两方面。其中,单次使用时间是指透水路面无养护情况下持续使用直至堵塞所需的时间,最大可清理次数是指透水路面经反复养护后最终丧失透水能力所需的养护次数。Pezzaniti 等^[41]的长期试验表明,透水路面通常需要15~20 a 时间才会完全丧

失透水性能。然而,由于城市发展改造等原因,我国城市路面翻修频率较高,大翻修周期往往小于15 a,因此最大养护次数在国内的关注度相对较低。相反,国内更关注透水路面在养护后的单次使用时间,以及在多次养护后单次使用时间的下降程度。透水路面的使用寿命主要取决于路面结构设计、配合比例设计、路面材料选择、施工技术、养护情况等^[42]。随着我国海绵城市建设理念的推广,透水路面的建设规模在增大^[38],透水路面的使用寿命逐渐受到关注,相关研究将可能是未来一段时期透水路面研究的热点之一。

除上述性能外,透水路面还需要考虑其耐久性能(如防杂草生长、抗紫外线、抗老化、抗腐蚀、抗磨损和抗压等)、稳定性/硬度(在荷载下不易发生变形和破坏)、可施工性、成本造价和环保性(如材料制作、长期使用过程中产生的污染物以及材料的可回收性)等性能。在特殊地区,还需要考虑透水路面的抗冻性、防滑性和美观性。

2.3 透水路面规划设计

在规划过程中,设计参数的把控是关键,需要从水文、结构和建设层次等方面对透水路面应该具备的性能进行材料和工艺的遴选。此外,模拟预测、经济分析、绿色分析是透水路面规划的重要环节。如果透水路面还需要满足资源回收要求,则可选择由废弃物掺杂的透水材料或设计成可对雨水再利用的路面。在技术路线中,透水路面发展主要关注4个方向:提高强度、提高透水能力、资源回收利用以及污染防治。

2.3.1 提高强度

透水路面的强度是一个较广泛的概念,包括抗折强度、抗压强度、抗冻融能力和耐磨能力等,通常讨论的强度是抗压强度。作为道路荷载系统的一部分,透水路面首先需要确保其强度合格。例如,频繁通行机动车的公园景观道路不能使用抗压强度较低的陶瓷透水砖,而应采用砂基透水砖等抗压强度大的透水路面材料;相反,在非机动车通行的景观道路上,陶瓷透水砖由于色彩丰富而被广泛使用。因此,只有在强度满足使用要求的前提下,才会进一步考虑选择透水系数较大的材料。提高透水路面强度的方法主要是改进材料,使用复合结构也是提高强度的一种方法,例如将多种材料按从强到弱从上往下排列,以保护强度较弱的材料。然而,这种方法的施工难度较大,因此改进材料仍然是提高路面强度的较优选择。安邦国^[43]研制的玻璃纤维网格结构透水砖,其抗压强度相比无网格结构的透水砖提高了约3%。李尚辉等^[44]将硅灰掺入透水混凝土中,当

掺量比为 3%~5%时抗压能力提升最大,养护 28 d 后强度提高约 31%。Yang 等^[45]在透水混凝土中掺入粒径较小的骨料、硅粉和减水剂,使透水混凝土的强度得以提高,抗压强度可达 50 MPa。这些研究者通过改良材料,使透水路面的强度得到了相应提高。然而透水路面是一种综合性路面,既要考虑强度,又要考虑透水能力。付春杰^[46]指出,聚乙烯胶粉复合改性沥青的强度虽然大于普通沥青透水料,但是透水系数相对降低了 37.5%,因此材料强度的改良应该在确保不过多影响透水能力的前提下进行。

2.3.2 提高透水能力

高透水系数有助于提高单位面积透水路面的径流吸收能力。对于孔隙透水路面,可以通过调整铺装单元间距提高透水系数,间距越大,其透水系数越大,但在设计时必须考虑孔隙大小对路面行走对象的影响,通常将间距设置为 3~15 mm。依靠渗透作用进行排水的路面(渗透透水路面和部分渗透孔隙透水路面)主要通过材料的孔隙进行排水,表 2 总结了提高该类透水路面透水能力的方法。提高透水能力较为直接的方法是提高透水系数,透水系数与孔隙率呈良好的正相关关系^[47],因此,优先考虑提高材料孔隙率,例如增大比表面积、调整材料成分和降低密实度等。关宇等^[48]使用再生骨料替换了级配材料中的天然砂石,所制备的再生骨料透水混凝土的透水系数可达 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》要求的透水系数(>0.5 mm/s)的 10 倍以上。CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》的要求为大于 0.53 mm/s,封志佼^[49]使用天然橡胶乳液改进了环氧沥青透水路面,透水系数可达 0.93 mm/s 以上,高于行业标准要求值。过度提高孔隙率可能会导致材料机械性能的下降,从而无法达到承受荷载所需的硬度。在不大幅增加孔隙率的条件下,考虑孔隙的连通性也是一种提高透水系数的方法^[50]。

除此之外,通过改进制备工艺进而提高材料孔隙率
表 2 渗透作用为主的透水路面透水系数的提高方法

方法	具体内容
增大比表面积	使用高比表面积的纤维材料和细颗粒材料,使用多孔结构
调整材料成分	调整级配比,添加具有透水性质的聚合物、树脂或其他化学添加剂
降低密实度	降低密实度和压实度
改进制备工艺	改进透水路面材料的制备工艺,提高材料透水性和均匀性
提高表面润湿性	添加亲水改性剂,提高表面亲水能力和寿命
采用多层结构	通过采用多层结构的透水路面设计
提高环境耐受力	提高抵抗外部环境变化改变内部孔隙结构的能力

隙的比表面积和均匀度可以使路面更充分地发挥散水功能,从而间接提高透水系数。由于材料表面与空气和污染物接触频繁,路面的亲水能力可能会下降,导致雨水不易流入孔隙,因此还应注意提高和维持路面的润湿性。对于孔隙度大但是荷载强度不高的材料,采用多层结构可以将孔隙较大的脆弱材料保护起来,从而提高整体透水能力。对于外部环境条件,如温度、湿度、太阳辐射等,都会影响材料的透水性能,具有强环境耐受能力的透水路面可以防止路面孔隙劣化,以提高长期透水能力。

2.3.3 资源回收利用

透水路面在多数应用场景中对制备的材料来源要求并不高,只要能满足荷载所需硬度和所需透水系数,并且在制备和使用过程中不对环境造成危害的材料,均可添加至透水路面的骨料级配中,同时由于路面的铺设面积大,可消耗的废弃材料多,因此透水路面被广泛视为资源再利用的有效工具。许多研究已经证明使用废弃材料铺设透水路面的可行性。例如:邱剑辉等^[51]用河湖淤泥制备透水路面砖,当淤泥掺和量控制在 10%以内时,可取得较好透水效果;路遥^[52]用粉碎后的废弃砖块铺设透水路面,然而这种透水砖的成型压力与透水系数成反比,最好的成型压力需要控制在 2.5~3.5 MPa;Ulloa-Mayorga 等^[53]使用破碎混凝土和破碎陶瓷制备的透水混凝土和安邦国^[43]用钢渣制备的透水路面砖在满足硬度要求的前提下表现出了较高的透水系数。但是值得注意的是,当废弃材料掺和至透水路面中时,透水能力和路面抗压强度可能会下降,需要通过调整合适的掺和比、水灰比和胶骨比等才能得到较理想的制备材料。

透水路面资源回收利用的另一种方式是对雨水的收集和利用。透水路面的雨水收集方式可分为渗透式收集和调蓄收集,最常用的是在基层中设置透水盲管进行导流,将雨水导流至调蓄容器,海绵城市相关的设计标准或规范均要求透水铺装设置透水盲管。工程中也有部分透水路面通过下方的透水盲管将雨水引导至周围绿化区、河湖水体中,回补地表或地下水。

2.3.4 污染防治

透水路面新建成后的一段时间里,路面的透水能力可以保持在较高水平,甚至可能出现污染物从孔隙中穿透的现象^[54],然而透水路面在长期使用后会面临堵塞问题,水中的污染物会在表面逐渐累积,而不会继续进入内部孔隙。研究表明,污染物主要分布在透水路面表面 2~3 cm 范围内^[55],在使用 5 a 后,缝隙中的颗粒含量可能增加近 100 倍^[51]。因

此,定期维护和清理污染物至关重要。

孔隙透水路面透水能力的丧失主要是因为物理堵塞和化学堵塞。为防止孔隙透水路面堵塞,铺装单元的间距应控制在 10 mm 左右,同时采用多种清理方法,如人工清理、吸尘器清理或压力水清理^[32]。渗透作用为主的透水路面的堵塞通常由物理、化学和生物因素共同引起,但物理和化学堵塞在许多情况下占主导地位^[29]。生物堵塞一般是指藻类、细菌和附着在路面孔隙的植物根系侵占孔隙空间而导致的孔隙堵塞。因此,高孔隙度带来高透水系数的同时也伴随着易堵塞风险,需要定期进行有效清理以维持其透水性能。人工清理、真空抽吸、气冲和水冲是渗透作用为主的透水路面常用的污染物清理方式,然而,由于不同类型的污染物对清理方法的反应不同,使用单一的清理方法无法取得理想效果,使用两种或更多清理方法,根据污染物的特性和堵塞程度进行调整和优化,可能会取得更好的效果^[56]。例如,水冲方式中反冲洗比直接对路面冲洗更能有效清除堵塞^[57],可以考虑在透水铺装施工前在地下提前埋设好反冲洗管,便于后期的维护和清理。

当透水系数低于 0.1 cm/s 时,清理可能无法取得良好的效果^[58],这意味着透水路面必须定期、频繁地进行清理,避免透水系数低于临界值,以防止其透水性能严重下降。此外,污染物的物理性质,如粒径和形状,也影响堵塞程度和清理效果。例如,粒径为 0.15~0.3 mm 的小粒径污染物容易透过路面孔隙,而粒径为 0.3~0.6 mm 的污染物则容易导致堵塞,粒径大于 0.6 mm 的污染物对路面的堵塞现象不明显^[59]。值得注意的是,即使粒径相同,不同类型的污染物也可能造成不同程度的堵塞,例如,同等粒径的黏土造成的堵塞效果是砂子的 10 倍左右^[60],因此需要根据污染物类型选择合适的清理方式或调整清理强度。使用水冲法进行短时清理时,需要特别注意水流可能会带动被堵塞孔隙内的松散污染物转移至其他孔隙,这种二次转移可能会暂时提高透水性,但并没有真正解决堵塞问题^[59]。因此,水冲的操作时间应尽可能延长,以确保污染物被彻底清除。

3 透水路面效益

透水路面设计的初衷是管理城市雨水或废水,避免路面积水问题。然而,在铺设使用一段时间后透水路面带来了诸多效益,从而促使其在低影响开发和海绵城市建设中得到广泛应用。

a. 行车优化。透水路面由于存在孔隙,能有效减少路面反射,从而减轻日间路面反光和夜间车辆灯光引起的眩目现象。此外,孔隙连通性降低了轮

胎与空气的抽压作用,轮胎行进时会将空气挤压进孔隙,空气在孔隙中运动,通过摩擦和空气运动的黏滞阻力,将部分声能转变为热能,从而降低行车噪声。

b. 热交换性。透水路面的高孔隙率和空气含量赋予其优越的热交换性能。这类透水路面中的面层和基层材料一般由颗粒状材料组成,具有较大的长波辐射率,使其能够更好地吸收和释放热量。因此,透水路面可以通过长波辐射方式将吸收的太阳能量散发出去,从而降低路面表面温度。同时,透水路面的面层或基层一般是导热材料,透水路面材料的导热系数一般为 0.3~0.5 W/(m·K),远低于传统路面材料的热传导系数,这意味着它能更快地传递热量。此外,透水路面孔隙存储的雨水在蒸发过程中能够带走部分热量,从而进一步增强其降温效果。这一系列的热学特性使得透水路面能够有效地调节路面温度和城市热环境,避免夏季高温时的软化现象,降低城市热岛效应,从而改善环境温度。

c. 抵冻抗热。孔隙的存在能够缓解冻融产生的结构破坏问题,在高温天气下材料的相互挤压程度也相对较低,可以增强透水路面的耐久性。

d. 美化性。部分透水路面的丰富颜色和独特设计有助于提升城市美感,彩色路面主要为树脂透水路面和陶瓷透水路面,沥青和混凝土透水路面因为容易脱色,实际使用较少。

e. 径流削弱。透水路面通过吸收雨水并引导其下渗,在一定降雨强度内,道路无积水,改善城市风貌。通过结合引导式装置,雨水在排至路面下后,继续排入地下水层或排入雨水收集设施中,降低径流流量,缓解市政排水压力。

f. 污染物控制。透水路面的孔隙结构可以截留雨水中的污染物,从而起到一定的过滤作用。

透水路面效益评估的目的是比选更好的施工方法、材料和敷设方式,评估方法主要有以下 3 种:

a. 径流评价法。该方法通过径流模型(如暴雨洪水管理模型 SWMM)来估计径流量的减少;或者在雨水管网内设流量计,比较铺设路面前后径流量的变化,以评估透水效益。该方法操作简便,但未考虑建设成本、维护成本 and 环境影响等因素。

b. 综合分析法。该方法旨在全面评估透水路面效率,通过在路面的整个生命周期中考虑各种因素对路面的影响,包括环境、社会、经济及可持续性。这种方法评估范围较全面,但由于需要考虑的因素较多,建模难度较大,且所需的模型参数数据不易获得。刘成成^[61]提出了一个综合分析透水路面的模型——灰色直觉模糊综合评价模型,该模型从

环境、经济和社会效益 3 个角度对透水路面进行评价,输入参数包括噪声、景观效果、光环境评价等 19 个指标。

c. 《绿色基础设施建模工具包》(*Green Infrastructure Modeling Toolkit*)。2014 年该工具包由美国环境保护局发布,是一种评估包括透水路面在内的绿色基础设施在环境、社会和经济效益的框架和方法^[62],从水文学、生态学和社会经济学分析绿色基础设施的影响,是一种较先进的评估工具。

4 存在的问题和建议

4.1 透水路面存在局限性,要适宜铺设

虽然透水路面在许多方面都展现出显著优势,但其铺设与应用中仍存在许多尚未解决的问题。我国地域广阔,各地环境特征差异显著,忽视透水路面的局限性,在不适宜的地区进行透水路面的铺设可能会对其使用效果产生不良影响。

在湿冷且降雨频繁的地区,透水路面接收下渗的雨水并存储在路面孔隙中,由于孔隙水分难以快速蒸发,孔隙内常保有高含水量,可能滋生藻类和细菌,从而影响路面的使用寿命。在极端天气易发地区,孔隙的存在可能会导致路面损坏,如暴雨后孔隙内充满水分,紧接着进入严寒气候,孔隙水迅速凝结成冰,体积增大,有撑毁路面的可能。在加油站、化工厂和生鲜装卸码头等不适宜铺设透水路面的区域铺设透水路面是被禁止的,否则可能会导致路面污染物径流渗入地下,侵蚀道路基层,加剧土壤和地下水污染。在卡车和吊装机等重型车辆频繁通行地区,目前透水路面在强度上还难以满足需求。在酸雨严重的地区,雨水会溶解地表石块,积水中的碳酸盐在蒸发后会沉积在路面的孔隙处。此外,雨水径流还会裹挟微小的不溶性碳酸盐物质堵塞孔隙,逐渐积累成碳酸盐沉淀物,这些沉积物容易风化,致使路面光滑,一定程度上增加了路面的行车风险。透水路面的透水能力与堵塞周期成反比,随着使用时间的增加,堵塞情况会更严重^[63],这导致透水路面的养护成本相对较高。错误的养护方式可能会严重降低透水性能,因而增加了养护的复杂程度。对于铺设面积大、资金有限或人力频繁养护的地区,也可能导致透水路面的损坏。

4.2 透水路面铺设缺乏方向性

透水路面铺设旨在缓解路面径流。我国出台的相关政策鼓励兴建透水路面,但并未详细指明哪些区域需要建设、应该建设或值得建设,这导致部分地区为满足相应的绿色建筑评价标准而盲目铺设透水路面。例如,为满足透水路面面积的要求,镇江部分地区在短时间大规模建设透水路面,但由于施工方

法、环境因素和材料问题等,部分路面的透水能力逐渐下降,甚至已经失去透水能力。尽管透水路面在生态和经济效益方面优于传统硬化路面,但其前期投入成本通常高于传统路面^[64],在降雨不频繁或雨水管网建设完善、排水良好的地区建设透水路面,可能无法充分发挥其透水效益,同时还增加了建设成本和施工复杂度。目前我国对透水路面最低性能、材料选择、设计和施工方法给出了较明确的建议 and 规定,但仍缺乏符合我国国情的透水路面效益评价方法,这也是造成透水路面盲目建设的原因之一。

建议完善透水路面的评价机制,制定适当的透水路面建设指导原则,科学定量分析透水路面建设的可行性,对各地透水路面建设的合理性进行评估,鼓励在适合的区域内建设透水路面。同时,建立透水路面铺装完成后的经济、自然和社会效益的数据收集和分析方法,研究透水路面铺装前后的效益变化,以进一步完善透水路面铺装的方向性指导制度。

4.3 透水路面技术标准不全面

透水路面在我国经历了 20 多年的发展历程,其材料、结构和施工方法均取得了显著的突破和创新。目前出台的主要相关规范和技术规程中对于透水路面的应用条件和使用范围缺乏明确的指导性意见。此外,缺乏对透水路面的统一规范,对于不同类型透水路面的规范和技术规程大多是地方标准,而行业规范相对欠缺,例如针对树脂和陶瓷路面等。现有规范在定义透水路面的抗折强度、抗压强度和透水系数时按等级划分,而对于不同应用场景的分类要求则相对缺乏。此外,其他性能指标如储水能力、抗冻性和防滑性等规范中往往被忽视,这些问题在一定程度上影响了透水路面在我国的推广和普及。透水路面的材料或结构孔隙容易被污染物堵塞,因此透水路面的建设并非是一劳永逸的,然而我国透水路面的建设存在“重建设,轻管理”的现象,忽视了透水路面的运营维护,在现有规范和规程中也较少提及,导致透水路面在建设后寿命和透水能力达不到预期效果。

建议加强技术规范和标准的制定和修订,考虑各类型透水路面的不同特点制定规范,对抗冻性、防滑性和耐久性等多项性能指标进行全面考虑;同时,需要增添制定透水路面养护的相关规范和技术规程,以保证透水路面在投入使用后能保持良好的性能;此外,针对不同的应用场景、地理环境和气候条件,对透水路面施工方案和技术指标进行分别讨论,避免“一刀切”情况的发生;最后,综合透水路面存在的共性,制定统一的透水路面技术规程,并增添其他相关类型透水路面的技术规范和标准,完善透水路面的养护管理体系,提高透水路面技术规范的全

面性,推动我国透水路面技术的进一步发展。

5 结 语

我国透水路面发展历程可以划分为 5 个阶段:学习阶段(1980—1989 年)、启动阶段(1990—2011 年)、发展阶段(2012—2014 年)、快速建设阶段(2015—2018 年)、再发展/规范化阶段(2019 年至今)。海绵城市的发展极大地推动了透水路面的建设,随着更多规范化技术指标的出台,透水路面开始迈向科学化的发展道路。

透水路面可按路面结构、透水方式和路面材料 3 方面来进行分类,其评价指标广泛,主要关注其透水能力、蓄水降温性能和再生寿命 3 点。我国透水路面发展趋势主要集中于提高强度、提高透水能力、提高资源回收利用以及污染物防治水平等 4 个方面。为提升透水路面的性能和适用能力,需要结合各方向进行深入研究,通过材料创新和设计优化推动透水路面的普及与应用。

当前我国在透水路面建设方向的确定上存在一定的盲目性,缺乏透水路面建设的指导基准,同时相关的规范和技术指标尚未完善,缺乏对不同场景下性能指标的具体要求。此外,透水路面的建设需要因地制宜,充分考虑透水路面的局限性,同时需要完善透水路面的效益评估指标和制度,加强透水路面的科学化管理。

参考文献:

[1] 董庆超. 城市干线道路全透水沥青路面优化设计研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[2] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong, et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 86-92. (in Chinese))

[3] COSGROVE W J, LOUCKS D P. Water management: current and future challenges and research directions[J]. Water Resources Research, 2015, 51 (6): 4823-4839.

[4] LOUCKS D P, VAN BEEK E. Water resources planning and management: an overview[M]//LOUCKS D P, VAN BEEK E. Water Resource Systems Planning and Management. Cham:Springer, 2017: 1-49.

[5] 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.

[6] 许道坤,吕伟娅. 低冲击开发模式应用:透水路面发展综述[J]. 新型建筑材料, 2012, 39 (3): 31-34. (XU

Daokun, LYU Weiya. Low impact development model application: pervious pavement development review [J]. New Building Materials, 2012, 39 (3): 31-34. (in Chinese))

[7] CHEN J S, YANG C H. Erratum to: porous asphalt concrete: a review of design, construction, performance and maintenance [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13 (6): 613.

[8] 韩三梅. 新型道路铺装材料:透水路面砖[J]. 建筑知识, 1991, 64 (6): 6-7. (HAN Sanmei. New road paving material permeable pavement brick [J]. Architectural Practice, 1991, 64 (6): 6-7. (in Chinese))

[9] 徐书东,董昭,柳久伟,等. 透水沥青路面研究综述[J]. 山东交通科技, 2022 (6): 156-159. (XU Shudong, DONG Zhao, LIU Jiuwei, et al. Review on permeable asphalt pavement [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2022 (6): 156-159. (in Chinese))

[10] 邓显石,阳芳. 透水混凝土的应用现状研究[J]. 四川建材, 2020, 46 (11): 1-2. (DENG Xianshi, YANG Fang. Research on the application status of pervious concrete [J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46 (11): 1-2. (in Chinese))

[11] 杨志胡. 海绵城市中透水材料综述[J]. 广东建材, 2022, 38 (11): 92-94. (YANG Zhihu. A review of permeable materials in sponge cities [J]. Guangdong Building Materials, 2022, 38 (11): 92-94. (in Chinese))

[12] 熊光泽. 透水沥青混凝土配比设计及制备工艺[J]. 国外公路, 1984 (5): 29-32. (XIONG Guangze. Permeable asphalt concrete ratio design and preparation process [J]. Journal of China & Foreign Highway, 1984 (5): 29-32. (in Chinese))

[13] 刘琪亮. 透水性混凝土[J]. 混凝土与水泥制品, 1987 (4): 23-24. (LIU Qiliang. Permeable concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 1987 (4): 23-24. (in Chinese))

[14] 薛英超. 一个值得重视的课题:城市雨水的利用及下渗设计[J]. 建筑技术通讯(给水排水), 1989 (6): 43-44. (XUE Yingchao. The utilization and infiltration design of urban rainwater is a subject worthy of attention [J]. Water & Wastewater Engineering, 1989 (6): 43-44. (in Chinese))

[15] 章廷凯. 透水路面及其环境效果[J]. 市政工程, 1993 (4): 13-20. (ZHANG Tingkai. Permeable pavement and its environmental effect [J]. Municipal Engineering, 1993 (4): 13-20. (in Chinese))

[16] 黄卫,钱国超. 透水沥青路面和混合料组成设计[J]. 中国市政工程, 1993 (2): 4-7. (HUANG Wei, QIAN Guochao. Permeable asphalt pavement and mixture composition design [J]. China Municipal Engineering, 1993 (2): 4-7. (in Chinese))

[17] 杨学广,张兴,王玉泉. 排水路面的发展与现状[J]. 黑龙江交通科技, 2002, 25 (5): 40-41. (YANG Xueguang,

- ZHANG Xing, WANG Yuquan. Development and actuality of drainage road pavement[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2002, 25(5): 40-41. (in Chinese))
- [18] 王武祥. 透水透气型彩色混凝土路面砖[J]. 新型建筑材料, 1995(7): 27-30. (WANG Wuxiang. Permeable colored concrete pavement brick [J]. New Building Materials, 1995(7): 27-30. (in Chinese))
- [19] 董淑秋, 韩志刚. 基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J]. 城市发展研究, 2011, 18(12): 37-41. (DONG Shuqiu, HAN Zhigang. Study on planning an “eco-sponge city” for rainwater utilization [J]. Urban Development Studies, 2011, 18(12): 37-41. (in Chinese))
- [20] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016(1): 79-97. (in Chinese))
- [21] 耿宏, 沈小华, 陈亮. 浅谈海绵城市设计途径与展望[J]. 市政技术, 2018, 36(4): 166-168. (GENG Hong, SHEN Xiaohua, CHEN Liang. On design approach and prospect of sponge city [J]. Municipal Engineering Technology, 2018, 36(4): 166-168. (in Chinese))
- [22] 周培. 对试点后海绵城市建设的思考[J]. 给水排水, 2020, 56(增刊1): 659-665. (ZHOU Pei. Thinking on sponge city construction after pilot stage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(Sup1): 659-665. (in Chinese))
- [23] DIETZ M E, CLAUSEN J C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(4): 560-566.
- [24] 王德蜜, 姜迪, 狄升贯. 透水路面设计与材料应用综述[J]. 城市道桥与防洪, 2013(9): 35-38. (WANG Demi, JIANG Di, DI Shengguan. Summarization on design of permeable pavement and application of materials [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(9): 35-38. (in Chinese))
- [25] XIE Ning, AKIN M, SHI Xianming. Permeable concrete pavements: a review of environmental benefits and durability[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 1605-1621.
- [26] 董祥, 沈正. 我国城市道路透水路面建设的工程选址与类型选择分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(3): 145-150. (DONG Xiang, SHEN Zheng. Analysis on choice of engineering site and type in Chinese urban pervious pavement construction [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(3): 145-150. (in Chinese))
- [27] 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.
- [28] 梁义婕, 任霞, 李莉. 海绵城市建设: 透水铺装材料研究应用现状[J]. 四川建筑, 2022, 42(2): 300-302. (LIANG Yijie, REN Xia, LI Li. Research and application of permeable paving materials for sponge city construction[J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(2): 300-302. (in Chinese))
- [29] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221-233.
- [30] LU Guoyang, LIU Pengfei, WANG Yuhong, et al. Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 1052-1060.
- [31] 严苗瑜. 透水沥青路面湿物理性能及不同条件下的蒸发降温效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [32] 曹可. 透水砖路面透水及恢复性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [33] 张炯, 明瑞平, 代朝霞, 等. 透水混凝土渗透性能及堵塞研究综述[J]. 混凝土, 2019(7): 94-99. (ZHANG Jiong, MING Ruiping, DAI Zhaoxia, et al. Review on permeability property and clogging of pervious concrete [J]. Concrete, 2019(7): 94-99. (in Chinese))
- [34] 牛建森, 张辰, 傅林, 等. 典型透水沥青铺装对降雨污染控制效果研究[J]. 市政技术, 2019, 37(1): 179-182. (NIU Jiansen, ZHANG Chen, FU Lin, et al. Research of the typical permeable asphalt pavement on rainfall pollution control effect [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(1): 179-182. (in Chinese))
- [35] 李嘉鹏. 透水铺装材料空隙特征对其蓄渗性能的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [36] 姜雄. 透水路面结构层设计技术探讨[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(6): 237-238. (JIANG Xiong. Discussion on design technology of permeable pavement structural layer [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2019, 42(6): 237-238. (in Chinese))
- [37] 汪俊松, 张玉, 孟庆林, 等. 透水路面蒸发降温效应研究综述[J]. 建筑科学, 2017, 33(4): 142-149. (WANG Junsong, ZHANG Yu, MENG Qinglin, et al. Review on the evaporative cooling effect of permeable pavements[J]. Building Science, 2017, 33(4): 142-149. (in Chinese))
- [38] 彭思思, 余太平, 汪齐, 等. 关于海绵城市建设的思考[J]. 市政技术, 2021, 39(4): 119-123. (PENG Sisi, YU Taiping, WANG Qi, et al. Thoughts about the construction of sponge city [J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(4): 119-123. (in Chinese))
- [39] 陈宏庆, 杨子凡, 蒋春发, 等. 阻热沥青路面结构温度场研究[J]. 市政技术, 2021, 39(11): 35-41. (CHEN Hongqing, YANG Zifan, JIANG Chunfa, et al. Study on temperature field of heat-resistance asphalt pavement[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(11): 35-41.

- (in Chinese))
- [40] WANG Chenghao, WANG Zhihua, KALOUSH K E, et al. Cool pavements for urban heat island mitigation: a synthetic review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111171.
 - [41] PEZZANITI D, BEECHAM S, KANDASAMY J. Influence of clogging on the effective life of permeable pavements [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2009, 162(2): 211-220.
 - [42] 王鸿森, 张杨, 郑扬. 高速公路服务区透水路面路用性能及应用效果评价[J]. *市政技术*, 2023, 41(1): 47-51. (WANG Hongsen, ZHANG Yang, ZHENG Yang. Evaluation on road performance and application effect of expressway service area [J]. *Journal of municipal Technology*, 2023, 41(1): 47-51. (in Chinese))
 - [43] 安邦国. 钢渣-再生混凝土混合骨料透水砖制备与性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
 - [44] 李尚辉, 富英春. 硅灰对透水水泥混凝土路面强度影响的研究[J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2021, 30(6): 17-21. (LI Shanghui, FU Yingchun. Research on the influence of silica fume on the strength of permeable cement concrete pavement [J]. *Journal of Hunan City University (Natural Science)*, 2021, 30(6): 17-21. (in Chinese))
 - [45] YANG Jing, JIANG Guoliang. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(3): 381-386.
 - [46] 付春杰. 改性沥青在透水沥青混凝土中的应用[J]. *市政技术*, 2016, 34(4): 194-196. (FU Chunjie. Application of modified asphalt in permeable asphalt concrete [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2016, 34(4): 194-196. (in Chinese))
 - [47] LIAN C, ZHUGE Y, BEECHAM S. The relationship between porosity and strength for porous concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(11): 4294-4298.
 - [48] 关宇, 辛继宝, 欧小凡, 等. 再生骨料透水路面结构工程应用[J]. *住宅与房地产*, 2019(23): 58-61. (GUAN Yu, XIN Jibao, OU Xiaofan, et al. Application of reclaimed aggregate in permeable pavement structure engineering [J]. *Housing and Real Estate*, 2019(23): 58-61. (in Chinese))
 - [49] 封志佼. 热固性环氧沥青透水路面关键技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
 - [50] NEITHALATH N, SUMANASOORIYA M S, DEO O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction [J]. *Materials Characterization*, 2010, 61(8): 802-813.
 - [51] 邱剑辉, 王奔烁, 郭煜沛, 等. 河湖淤泥制备混凝土透水路面砖的研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2022, 35(4): 45-49. (QIU Jianhui, WANG Benshuo, GUO Yupei, et al. Study on the preparation of concrete permeable pavement bricks with river and lake sludge [J]. *Journal of ZhongKai University of Agriculture and Technology*, 2022, 35(4): 45-49. (in Chinese))
 - [52] 路遥. 城市建筑垃圾资源化利用制备透水性路面材料的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018.
 - [53] ULLOA-MAYORGA V A, URIBE-GARCÉS M A, PAZ-GÓMEZ D P, et al. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates [J]. *Ingeniería e Investigación*, 2018, 38(2): 34-41.
 - [54] 高鹏. 透水混凝土堵塞机理、疲劳及抗冻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
 - [55] 谢西, 姜成, 林晨彤, 等. 透水混凝土路面堵塞及其恢复效果研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(1): 46-49. (XIE Xi, JIANG Cheng, LIN Chentong, et al. Research on clogging and effectiveness of restoration measures of permeable concrete pavement [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(1): 46-49. (in Chinese))
 - [56] SHIRKE N A, SHULER S. Cleaning porous pavements using a reverse flush process [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2009, 135(11): 832-838.
 - [57] MISHRA K, ZHUGE Yan, KARUNASENA W. Clogging mechanism of permeable concrete: a review [C]// *Proceedings of Understanding Concrete Conference*. Sydney: [s. n.], 2013.
 - [58] 王志仁. 透水混凝土疏堵技术研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
 - [59] VAN BOCHOVE G G. Twinlay, a new concept of drainage asphalt concrete [C]// *Proceedings of Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Strasbourg: European Asphalt Pavement Association, 1996.
 - [60] COUGHLIN J P, CAMPBELL C D, MAYS D C. Infiltration and clogging by sand and clay in a previous concrete pavement system [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(1): 68-73.
 - [61] 刘成成. 基于海绵城市理论的透水铺装综合效益评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
 - [62] JAYASOORIYA V M, NG A W M. Tools for modeling of stormwater management and economics of green infrastructure practices: a review [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(8): 2055.
 - [63] 杜晓丽, 杨明哲, 尹子杰, 等. 全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 25-31. (DU Xiaoli, YANG Mingzhe, YIN Zijie, et al. Study on infiltration-runoff model of permeable brick pavement during full clogging cycle [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 25-31. (in Chinese))
 - [64] ZHOU Long, SHEN Guoqiang, WOODFIN T, et al. Ecological and economic impacts of green roofs and permeable pavements at the city level: the case of Corvallis, Oregon [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2018, 61(3): 430-450.

(收稿日期: 2023-07-06 编辑: 俞云利)