

# 基于 LID 理念的透水路面生态效益研究进展

李 阳<sup>1,2</sup>, 刘颖华<sup>1,2</sup>, 刘滋菁<sup>1,2</sup>, 管运涛<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳研究生院 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 广东深圳 518055; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

**摘 要:** 随着城市化的发展,降雨不仅产生了城市内涝问题,径流中的污染物也对水环境造成了威胁。透水路面作为低影响开发(LID)技术之一,它可以控制道路径流、削减面源污染,减弱“城市热岛”效应,对城市发展具有良好的生态效益。国内对透水路面的环境效益研究较少,介绍了国外对透水路面生态效益的研究现状、不足和趋势,可以为国内透水路面研究提供一定的参考。

**关键词:** 透水路面; 面源污染; 低影响开发

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)02-0037-05

## Progress in Research on Ecological Benefits of Permeable Pavement Based on LID Concept

LI Yang<sup>1,2</sup>, LIU Ying-hua<sup>1,2</sup>, LIU Zi-jing<sup>1,2</sup>, GUAN Yun-tao<sup>1</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the development of urbanization, heavy rainfall not only causes urban waterlogging problems, pollutants in runoff present a considerable threat to water environment. The control of the road runoff and the reduction of the non-point source pollution can be easily realized by using the permeable pavement, which is one of the Low Impact Development (LID) technologies. It can also mitigate urban heat island effect and bring excellent ecological benefits for the city development. The research on economic benefit of the permeable pavement is very limited in China. The research status, deficiency and trends of the ecological benefit of the permeable pavement in foreign countries were introduced to provide reference for research on the permeable pavement in China.

**Key words:** permeable pavement; no-point source pollution; Low Impact Development (LID)

透水路面是一种重要的 LID 技术,由透水面层、基层和垫层等部分组成,雨水可以通过面层进入到基层中,然后进一步渗入土壤或者由预埋的管道排走。研究发现,透水路面对城市发展具有良好的环境效益。因此,有必要对透水路面进行深入研究。

### 1 透水路面控制道路径流研究

#### 1.1 雨水渗透过程

掌握雨水渗透的过程和特征,有利于设计更合理的透水路面。Scholz 等<sup>[1]</sup>将雨水透过面层的径流分为两种,一种是面层材料本身含有大量孔隙,雨水

通过面层孔隙而渗入基层,进而进入到土壤层或者预埋的管网中,这类材料主要包括透水混凝土、透水沥青等。另一种面层材料不含孔隙或者是含有少量的孔隙,雨水主要通过面层之间的缝隙进入到基层中,进而进入到土壤层或者预埋管网中。这类材料主要包括透水混凝土砖等,其中整体孔隙式面层的透水系数高于块状缝隙式。

William 等<sup>[2]</sup>将雨水渗透分为浸润、积累、径流和干燥四个阶段,并分别研究了每个过程的水力特征,具体见表 1。

表 1 渗透过程水力特征

Tab. 1 Hydraulic characteristics of penetration process

项目	过程描述
浸润	降雨强度小于渗透系数,进入透水路面的雨水完全流出
积累	降雨强度增大并大于渗透系数,进入透水路面的雨水不能完全流走,将充满基层中的孔隙
径流	当降雨继续,基层孔隙被充填完毕,雨水形成径流
干燥	降雨停止,基层孔隙中的雨水流出,基层趋于干燥

## 1.2 透水路面控制道路径流影响因素

透水路面作为一种 LID 技术,它的使用效果会受到面层类型、基层结构、降雨水质和类型等因素的影响。Luis 等<sup>[3]</sup>用不同降雨强度对不同面层类型的透水路面进行测试,发现不同面层的透水率有所不同,但是在 100 年一遇的降雨强度下,所有类型的透水面层均不会产生径流,因此透水路面面层并不是控制径流的主要限制因素。

Kelly 等<sup>[4]</sup>发现面层类型对透水系数有影响,但是基层的特性对透水路面的影响更大。与传统道路基层不同,透水道路的基层具有大量的孔隙,孔隙的性质是影响透水路面使用的重要因素。Sansalone 等<sup>[5]</sup>用 X 射线断层摄影技术和重量法—几何法测定了透水路面的有效孔隙率、孔隙分布和迂曲度等,测得孔隙迂曲度为 2.89 ~ 5.91;当孔隙率 < 25% 时,总孔隙率是大于有效孔隙率的;当孔隙率 > 25% 时,孔隙互相连通,有效孔隙率接近总孔隙率。可见即使孔隙率相同时,透水性也可能是不一样的。Kuang 等<sup>[6]</sup>在 Kozeny - Carman 模型基础上,针对透水路面提出了新的孔隙结构模型,新的孔隙模型可以通过有效孔隙率、比表面积、迂曲度等参数拟合出透水路面的透水系数。

降雨的水力特征和水质也会影响透水路面的使用效果,当降水过于集中或水质较差时,透水路面削

减径流的作用将会降低。Kuang 等<sup>[7]</sup>研究了透水路面面层截留污染物对透水系数的影响,并在实验条件下建立了透水系数衰减模型。Dae-Geun 等<sup>[8]</sup>发现总雨量对透水路面延缓洪峰的影响较小,雨强对透水路面延缓洪峰的影响较大,当雨强为 50 mm/h 时,其底部在降雨 17 min 后开始出水,当降雨强度增加到 150 mm/h 时,时间缩短到 8 min。

温度对透水路面削减径流的影响不大。Drake 等<sup>[9]</sup>研究了在低温和低渗透率基层下透水路面的使用情况,发现冻融循环对透水路面的使用效果有一定影响,但在低温下透水路面仍可以正常运行。Roseen 等<sup>[10]</sup>分别监测了冬夏两季的透水路面使用情况,发现透水路面的使用效果差别不大。

不同因素对透水路面控制径流的影响如表 2 所示。

表 2 不同因素对透水路面控制径流的影响强度

Tab. 2 Effect of influence factors to runoff control in permeable pavement

项目	面层材料	基层孔隙	水质	降雨类型	温度
影响强度	有影响	影响强烈	影响强烈	影响强烈	影响弱

## 2 透水路面控制面源污染物研究

### 2.1 透水路面对面源污染物的去除

很多学者研究发现透水路面能够有效去除雨水中的 TSS 和重金属,虽然监测结果有所不同,但对污染物的去除率都可以达到 50% 以上。

雨水中含有大量的氮、磷,是引起自然水体富营养化的重要原因之一。Kelly 等<sup>[11]</sup>发现相对于传统路面产生的径流,透水路面的出水含有更少量的氨态氮,但是含有更高的硝态氮,研究者认为这是因为透水路面的透气性好,基层中氧气含量较高。当在透水路面底层加一层细砂后,出水总氮会降低。Tota-Maharaj 等<sup>[12]</sup>在实验中发现出水磷含量会降到一个很低的水平,去除率可以达到 78%,但是对磷的控制机理还有待继续研究。

透水路面对碳水化合物等环境危害较大的有机物也有很好的去除效果。Thomas 等<sup>[13]</sup>对透水路面出水中的多环芳烃(PAH)进行监测,结果表明透水路面能去除 PAH。Brattebo 等<sup>[14]</sup>在实验中监测了透水路面对雨水中机油的控制效果,在出水中没有检测出机油。Robert 等<sup>[15]</sup>发现相对于传统道路,透水路面需要较少的除雪剂就可达到除雪的目的,同时还能控制氯化物的释放,减小氯化物的污染。

## 2.2 透水路面中微生物的研究

透水路面中含有大量的微生物,微生物降解是去除截留污染物的主要途径,研究透水路面中微生物特性,为功能菌创造最适条件来增加其丰度和活度,可以提高降解污染物的能力。分子生物学等技术的发展,提供了更多研究微生物的方法。Newman 等<sup>[16]</sup>研究发现道路表面会存在大量的微生物来降解污染物,长期使用的透水路面无需预先加入微生物就可以形成一个稳定的微生物群落。Fan 等<sup>[17]</sup>利用 DGGE、CLPP 等技术研究了透水路面结构层中的微生物,发现面层类型不同的透水路面中微生物的活性和种类有差别(见表 3)。

表 3 不同类型透水路面中微生物特征

Tab. 3 Characteristics of different types of microorganisms in water permeable pavement

项 目	特点
JW 透水路面	细菌种类、数量多,微生物活性高
大孔隙沥青路面	真菌数量多,降解氮化合物活性高
透水混凝土砖	放线菌多,活性低,代谢多样性高
玻璃纤维透水混凝土砖	微生物数量少,代谢多样性高

## 2.3 影响因素

透水路面去除污染物是一个复杂的过程,会受到很多环境因素的影响。水质是影响透水路面去除污染物能力的重要因素,比如 Mbanaso 等<sup>[18]</sup>发现当雨水中的草甘膦除草剂含量较高时,透水路面中的微生物种群将会减少,当含量超过 72 mg/L 时,将会影响微生物降解污染物的能力,使出水水质变差。温度可以影响微生物的活性,不同温度下,透水路面中的微生物对污染物的降解能力也会不同。一些学者提出了新的概念,将地热和透水路面一起联用,地热可以影响微生物的生长,从而影响微生物对污染物的降解<sup>[19]</sup>。透水材料会粘附一些杂质,因此透水路面在截留雨水中污染物的同时也会向水中释放杂质。Elizabeth 等<sup>[20]</sup>在实验中发现透水路面出水中的 TSS 粒径为 5~6  $\mu\text{m}$ ,而地表径流中的 TSS 粒径主要为 70~80  $\mu\text{m}$ ,出水中粒径为 5~6  $\mu\text{m}$  的颗粒物高于径流中的含量,说明基层材料向出水中释放了杂质。不同粒径基层材料中含有的杂质含量不同(见表 4),因此选择合适的材料并进行预处理是必要的。现在透水路面的应用越来越广泛,透水路面可以和其他的 LID 技术进行联用。将透水路面同生物滞留池联用,相比单独使用的透水路面,这种设计

处理雨水的处理能力更强,对污染物的去除率也更高<sup>[21]</sup>。

表 4 基层材料水洗实验结果

Tab. 4 Experimental results of base material washing

项 目	$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$		
	TSS	Cu	Zn
垫层(粒径为 2~5 mm)	337 400	14.1	65.0
基层上部(粒径为 12 mm)	31 500	1.4	4.0
基层下部(粒径为 40 mm)	17 200	2.2	6.6

## 3 缓解“城市热岛”效应

随着城市化的发展,“城市热岛”现象受到广泛关注。由于透水路面和传统路面在材料、结构上都有所不同,因此,二者的热力特征也会不同(见表 5)<sup>[22~24]</sup>。

表 5 传统路面和透水路面的比较

Tab. 5 Comparison of traditional pavement and permeable pavement

项 目	传统路面	透水路面
光反射率	强	弱
储存热能能力	强	弱
透水性	弱	强

透水路面的基层能够暂时储存雨水,储存的水通过渗透、蒸发等方式排走,其中水分蒸发是降低地面温度的主要原因之一,可以缓解“城市热岛”效应。Takashi 等<sup>[25]</sup>发现降雨过后,透水路面的温度比传统路面低 5 K,而且这种“制冷”效果会持续 14 天。在一定范围内,透水路面中含有的水越多,透水路面的表面温度会越低,同时持续的时间也会更长<sup>[26]</sup>。但是当透水路面处于干燥状态时,Keven 等<sup>[23]</sup>却发现透水路面的表面温度高于传统路面的表面温度,同时发现透水路面能够储存的能量更少,在晚上降温速度更快,不会在晚上向外散发热量。可见当透水路面处于干燥时,其在白天给行人的感官效应并不一定好。向路面洒水是改善这种状况的方法之一。洒水后路面的温度会降低,但是水的储存潜热的能力较高,未蒸发完毕的水会增加透水面层的储能<sup>[27]</sup>。在晚上含水透水路面会向周围释放储存的能量,因此应该适度洒水,水分蒸发能在白天完成,减少透水路面储能对城市的影响。

透水路面的表层材料和结构也会影响路面的温度。Yilmaz 等<sup>[28]</sup>比较了高于不同地面 2 m 的空气温度,发现草地上面的温度低于沥青路面的温度;因此在城市道路上设置绿地,不仅能够起到美观作用,



还能缓解“城市热岛”效应。Li等<sup>[29]</sup>对不同类型面层的透水路面进行监测,发现细砂的蒸发率高于级配砾石的,级配砾石的蒸发率高于透水沥青和透水混凝土。因此应该根据环境选择适当的面层材料和

基层结构。

为了提高透水路面对于“城市热岛”效应的控制,学者们提出了一些新的技术和研究方向,如表6所示。

表6 新兴技术汇总

Tab.6 Emerging technologies of permeable pavement

技术表述	面层类型	监测结果	参考文献
在大孔隙沥青中加入钢制持水器	涵水沥青	比传统的大孔隙沥青低 0.6 K	[30]
飞炉粉加入到沥青中	涵水沥青	比级配沥青路面低 14 K	[1]
在混凝土中加入底灰和泥煤苔	透水混凝土	比大孔隙沥青路面低 9 K	[31]
在陶瓷中加入颗粒细小的飞灰	透水瓷砖	降低了表面的温度	[32]
工业废品作为材料	透水瓷砖	含水时比周围的空气低 25 K	[33]

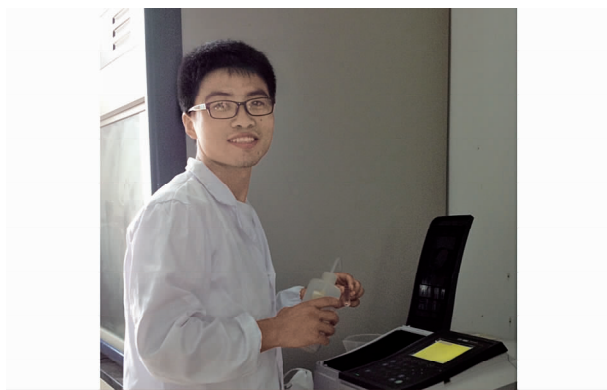
#### 4 结语

透水路面对城市的生态效益十分显著,但是已有的研究成果还不能完全解释透水路面的工作过程,还需从以下方面加强研究:①微生物降解对于透水路面控制面源污染十分重要,应继续研究透水路面中的微生物种群组成,弄清去除污染物的主要功能菌,找出有利于微生物富集的基层材料。②监测结果显示,透水路面可以控制雨水中的污染物,但是磷在基质中的吸附和释放的过程还需进一步研究。③温度是微生物代谢活动的重要影响因素,需要研究温度和微生物自身生长、降解污染物之间的关系。

#### 参考文献:

- [1] Scholz M, Grabowiecki P. Review of permeable pavement systems [J]. Build Environ, 2007, 42: 3830 - 3836.
- [2] William D M, Nigel B K. Hydrologic characterization of undrained porous pavements [J]. J Hydrol Eng, 2014, 19(6): 1069 - 1079.
- [3] Luis A S, Susanne M C, Daniel Castro-Fresno, et al. Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas [J]. Water Sci Technol, 2014, 69(7): 1526 - 1533.
- [4] Kelly A C, William F H, Jon M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina [J]. J Hydrol Eng, 2008, 13(12): 1146 - 1157.
- [5] Sansalone J, Kuang X, Ranieri V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage [J]. J Irrig Drain Eng, 2008, 134(5): 666 - 674.
- [6] Kuang X, Sansalone J, Ying G, et al. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement [J]. J Hydrol, 2011, 399(3): 148 - 157.
- [7] Kuang Xuheng, Fu Yanrong. Coupled infiltration and filtration behaviours of concrete porous pavement for storm-water management [J]. Hydrol Process, 2013, 27(4): 532 - 540.
- [8] Dae-Geun Park, Noe Sandoval, Lin Wuguang, et al. A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement [J]. KSCE J Civil Eng, 2013, 18(2): 514 - 520.
- [9] Drake J, Bradford A, Van Seters. Winter effluent quality from partial-infiltration permeable pavement systems [J]. J Environ Eng, 2014, 140(11): 1 - 13.
- [10] Roseen R M, Ballesterio T P, Houle J J, et al. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions [J]. J Environ Eng, 2009, 135(3): 128 - 137.
- [11] Kelly A C, William F H, Jon M. Side-by-side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina [J]. J Hydrol Eng, 2010, 15(6): 512 - 521.
- [12] Kiran Tota-Maharaj, Miklas Scholz. Efficiency of Permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions [J]. Environ Prog Sustain Energy, 2010, 29(3): 358 - 369.
- [13] Thomas B B, Mark H S, Janelle A, et al. Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Rhode Island [J]. Environ Geol, 2008, 55(3): 571 - 582.
- [14] Brattebo B O, Booth D B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems [J]. Water Res, 2003, 37: 4369 - 4376.
- [15] Robert M R, Thomas P B, Kristopher M H, et al. Assessment of winter maintenance of porous asphalt and its function for chloride source control [J]. J Transp Eng,

- 2014,140(2):1-8.
- [16] Newman A P, Coupe S J, Smith H G, *et al.* The microbiology of permeable pavements [A]. 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving [C]. California: US EPA, 2006.
- [17] Fan L F, Wang S F, Chen C P, *et al.* Microbial community structure and activity under various pervious pavements [J]. J Environ Eng, 2014, 140(3):1-9.
- [18] Mbanaso F U, Coupe S J, Charlesworth S M, *et al.* Potential microbial toxicity and non-target impact of different concentrations of glyphosate-containing herbicide (GCH) in a model pervious paving system [J]. Chemosphere, 2014, 100:34-41.
- [19] Tota-Maharaj K, Scholz M, Ahmed T, *et al.* The synergy of permeable pavements and geothermal heat pumps for stormwater treatment and reuse [J]. Environ Technol, 2010, 31(14):1517-1531.
- [20] Elizabeth A F, Samuel D B. Road runoff water-quality mitigation by permeable modular concrete pavers [J]. J Irrig Drain Eng, 2011, 137(11):720-729.
- [21] Brown R A, Line D E, Hunt W F. LID treatment train: pervious concrete with subsurface storage in series with bioretention and care with seasonal high water tables [J]. J Environ Eng, 2012, 138(6):689-697.
- [22] Kevern J T, Schaefer V R. Temperature response in a pervious concrete system designed for stormwater treatment [A]. Geotrans 2008: Geo Sustainability and Geohazard Mitigation [C]. New Orleans: Geotechnical Special Publication, 2008.
- [23] Kevern J T, Haselbach L, Schaefer V R. Hot weather comparative heat balances in pervious concrete and impervious concrete pavement systems [A]. Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands [C]. Berkeley: SICCUIH, 2009.
- [24] Li Hui, Harvey J, Jones D. Cooling effect of permeable asphalt pavement under dry and wet conditions [A]. 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board [C]. USA: TRB, 2013.
- [25] Takashi Asaeda H, Vu Thanh C. Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment [J]. Build Environ, 2000, 35:363-375.
- [26] Karasawa K, Toriiminami N, Ezumi K K. Evaluation of performance of water-retentive concrete block pavements [A]. 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving [C]. California: US EPA, 2006.
- [27] Yamagata H, Nasu M, Yoshizawa M, *et al.* Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater [J]. Water Sci Technol, 2008, 57(5):763-771.
- [28] Yilmaz H, Toy S, Irmak M, *et al.* Determination of temperature differences between asphalt, concrete, soil and grass surfaces of the city of Erzurum, Turkey [J]. Atmosphere, 2008, 21(2):135-146.
- [29] Li H, Harvey J, Ge Z S. Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials [J]. Constr Build Mater, 2014, 65:367-375.
- [30] Nakayama T, Fujita T. Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas [J]. Landscape Urban Plan, 2010, 96(2):57-67.
- [31] Jong-Bin P, Jung-Hun L, Hee-Bum P, *et al.* Novel porous pavement blocks for urban rainwater management and non-point source pollution control [EB/OL]. <http://www.iwahq.org/content/suite/upload/iwa/Document/P06.pdf>, 2015-02-14.
- [32] Boriboonsomsin K, Reza F. Mix design and benefit evaluation of high solar reflectance concrete for pavements [A]. 86th Annual TRB Meeting [C]. USA: TRB, 2011.
- [33] Ozaki T, Suzuki Y. Study on the contribution of water-retentive ceramic tile to the reduction of environment heat accumulation [J]. J Hydraul Eng, 1998, 42:61-66.



作者简介:李阳(1990-),男,山东兰陵人,硕士,主要研究方向为低影响开发技术在雨洪管理中的应用。现工作单位为中铁第四勘察设计院集团有限公司。

E-mail: guanyat@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2016-05-18