

DOI: 10.13205/j.hjgc.202209016

解超,王思思,吕彬. 基于LCA的北京市透水水泥混凝土路面的环境影响分析[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 118-125.

# 基于LCA的北京市透水水泥混凝土路面的环境影响分析

解超<sup>1,2</sup> 王思思<sup>1,2,3</sup> 吕彬<sup>4\*</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 3. 北京建工建筑设计研究院, 北京 100044; 4. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 透水铺装因其雨水入渗和净化等功能成为未来城市道路铺装的重点发展方向, 其生命周期资源环境影响的影响机制与因素需开展系统全面分析。基于北京市的降雨特征和路面工程实际, 采用生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 方法, 综合分析透水水泥混凝土路面全生命周期产生的环境影响, 并结合雨水管理模型 (storm water management model, SWMM) 模拟透水铺装在使用阶段的环境效益, 对比了不同维护方式给透水水泥混凝土路面环境影响带来的变化。结果表明: 透水水泥混凝土路面在生产阶段的水泥投入, 是造成其生命周期环境影响的主要因素, 但在使用阶段因透水和净水作用产生的环境效益可以抵消部分其他阶段产生的环境影响。从环境角度而言, 日常清扫+高压冲洗是透水水泥混凝土路面最佳的维护方式。但是由于使用年限可影响不同维护方式的环境表现, 建议综合考虑使用年限选择适合的维护方式, 以降低透水水泥混凝土路面的资源环境影响。因此, LCA 与 SWMM 的耦合应用可以更准确地量化透水铺装全生命周期环境效益及其关键影响因素。该方法有望应用于其他低影响开发 (low impact development, LID) 设施甚至整个海绵城市资源环境影响的系统评价。

**关键词:** 生命周期评价; 透水铺装; 维护方式; 环境影响; 透水水泥混凝土

## ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS OF PERMEABLE CEMENT CONCRETE PAVEMENT IN BEIJING BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT

XIE Chao<sup>1,2</sup>, WANG Sisi<sup>1,2,3</sup>, LV Bin<sup>4\*</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Construction Engineering Architectural Design Institute, Beijing 100044, China; 4. State Key Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Permeable pavement has become the key development direction of urban road pavement in the future because of its functions of rainwater infiltration and purification. The impact mechanism and factors of resource and environment impact in its life cycle need to be systematically and comprehensively analyzed. Based on the rainfall characteristics and pavement engineering practice in Beijing, this paper comprehensively analyzed the environmental impact of permeable cement concrete pavement in the whole life cycle with the life cycle assessment (LCA). Combined with the stormwater management model (SWMM), this paper simulated the environmental benefits of permeable pavement in the use stage, and compared the changes brought by different maintenance methods to the environmental impact of permeable cement concrete pavement. The results

收稿日期: 2021-10-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“建筑与小区绿地的径流削减效果影响因子及径流系数研究”(31870704); 国家自然科学基金重点项目“城市生态资产的评估方法与管理机制研究”(71734006)

第一作者: 解超 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境科学与系统工程。598320896@qq.com

\* 通信作者: 吕彬 (1982-), 男, 副研究员, 主要研究方向为产业生态学与固体废物管理。binlv@cees.ac.cn

showed that the input of cement in the production stage was the main factor causing the environmental impact in its life cycle. The environmental benefits provided by rainwater infiltration and purification in the use stage could offset the environmental impact in other stages. From the environmental perspective, daily cleaning + high-pressure washing was the best available maintenance method for permeable cement concrete pavement. However, the service life should be taken into consideration to select the most suitable maintenance method, for the best environmental performance of the permeable pavement. Therefore, the coupling application of LCA and SWMM could more accurately quantify the environmental benefits and key influencing factors of permeable pavement in the whole life cycle. This method was expected to be applied to the systematic evaluation of resource and environmental impact of other LID facilities and even the whole sponge city.

**Keywords:** life cycle assessment; permeable pavement; maintenance methods; environmental impact; permeable cement concrete

## 0 引言

随着我国海绵城市建设的快速发展,透水铺装作为低影响开发设施之一在海绵城市建设中得到了广泛应用,主要集中于人行步道、非机动车道和停车场等区域。自2015年开始,我国开展了第一批海绵城市试点建设,据统计第一批海绵城市试点区中已建成透水铺装占城市道路面积的12%~17%。

透水铺装能削减雨水径流、补充地下水、缓解城市热岛效应等方面效果显著,具有良好的资源环境效益<sup>[1]</sup>。然而与传统铺装相比,透水铺装制备、施工、维护过程中需要消耗更多资源和能源,同时可能造成更多环境污染物排放<sup>[1]</sup>,如生产阶段需要减水剂等材料以及间断级配、水泥包裹和振动成型等特定工艺<sup>[2]</sup>,维护阶段高压冲洗车和真空吸尘器的投入使用等。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是针对产品或工业行为开展全生命周期评价的一种系统方法<sup>[3]</sup>,包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果分析4个步骤<sup>[4]</sup>。目前,LCA在透水铺装工程领域的应用较普通路面工程来说不够普遍且系统边界尚未一致,多数已有针对透水铺装的LCA研究结果显示,透水铺装材料生产和建设阶段的资源环境影响与传统铺装相比并不占优势,而在使用阶段,透水铺装所带来的环境效益可有效弥补建设阶段的劣势<sup>[1]</sup>。SWMM模型中的低影响开发模型可以对透水铺装进行模拟,开展水文响应及其滞洪减污效果模拟和生态效益<sup>[5]</sup>。若通过LCA与SWMM相结合对透水铺装进行系统全面分析,综合考虑透水铺装雨水入渗和雨水净化方面产生的环境效益及全生命周期阶段产生的环境影响,可更加科学地对透水铺装的环境效益、经济效益和社会效益进行评价,以助力海绵城市乃至城市生态系统的良性发展。

本文选用作为透水铺装主要材料之一的透水水泥混凝土为研究对象。透水水泥混凝土是一种无细骨料的多孔隙轻质混凝土,主要应用于广场、道路、停车场,可以增加城市的透水空间,对调节城市微气候、缓解热岛效应具有良好效果<sup>[6]</sup>。为量化透水水泥混凝土路面在城市道路应用中产生的环境效益和影响,并对比不同维护方式给透水水泥混凝土路面环境效益和影响带来的变化,本研究基于SimaPro软件,分析了透水水泥混凝土路面从原材料生产到废弃处置的全过程。其中在使用维护阶段,结合北京市实际降雨数据,应用SWMM模型模拟得出透水水泥混凝土路面产生的雨水入渗量和污染物去除量,以便量化分析透水水泥混凝土路面在使用和维护阶段产生的环境效益和影响。

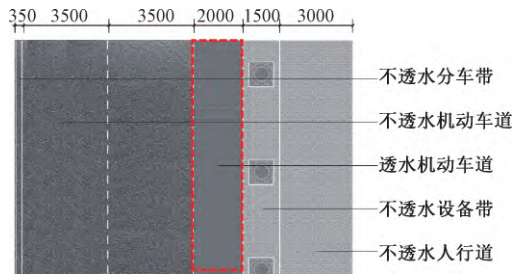
## 1 目标与范围的确定

### 1.1 研究目标

本文研究目标是以北京地区为例对透水水泥混凝土非机动车道进行生命周期评价,分析透水水泥混凝土路面生命周期范围内产生的环境影响,在使用阶段重点评估在雨水入渗和雨水净化方面带来的环境效益,以及不同维护方式对透水水泥混凝土路面环境影响和环境效益的影响。根据分析结果探讨北京地区透水水泥混凝土路面的全生命周期资源环境效益,为政府相关部门的决策提供理论依据。

### 1.2 功能单位

本研究中的透水水泥混凝土非机动车道包括透水水泥混凝土面层、透水水泥混凝土稳定碎石基层和级配碎石基层。在进行生命周期评价时,功能单位确定为长度为1 km、宽度为2 m的透水水泥混凝土非机动车道(见图1),其主要承担城市次干道单侧汇水,使用年限设为15年<sup>[7]</sup>。



注: 红色虚线范围内为本研究的透水水泥混凝土非机动车道

图1 透水水泥混凝土非机动车道

Figure 1 Permeable cement concrete non-motorized Lane

### 1.3 系统边界

系统边界涵盖透水水泥混凝土非机动车道从原材料生产到废弃处置的全过程,具体包括原材料制备、原材料到施工场地运输、铺设施工、清扫养护和废弃处置等单元过程,按生命周期阶段可分为生产阶段、运输阶段、施工阶段、使用阶段、维护阶段和废弃阶段6个主要环节(图2)。

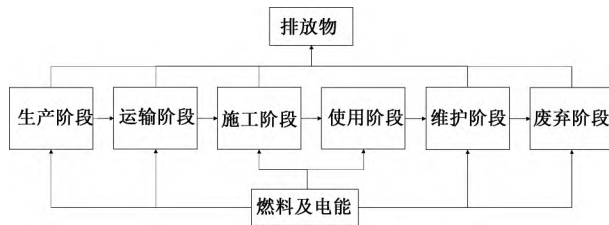


图2 系统边界

Figure 2 The system boundary

在透水水泥混凝土路面使用过程中,通过雨水渗透和雨水净化产生的环境效益是评价透水水泥混凝土路面生命周期环境影响的重要组成部分。因此,本文将透水水泥混凝土路面在使用过程中产生的环境效益纳入研究系统中。

土路面生命周期环境影响的重要组成部分。因此,本文将透水水泥混凝土路面在使用过程中产生的环境效益纳入研究系统中。

## 2 清单分析

### 2.1 生产阶段

根据 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》<sup>[8]</sup>规定,透水水泥混凝土路面主要由透水水泥混凝土面层、透水水泥混凝土稳定碎石基层、级配碎石基层和路基构成,其具体构成如图3所示。

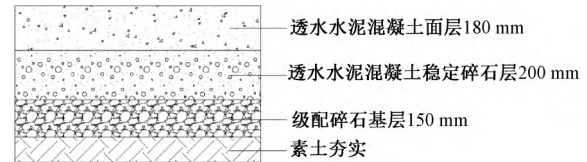


图3 透水水泥混凝土路面结构

Figure 3 Permeable cement concrete pavement structure

透水混凝土路面生产阶段主要考虑水泥、碎石、减水剂和水等材料,各结构层原材料数据来自文献[9]、JTG/T 3832—2018《公路工程预算定额》<sup>[10]</sup>和 JTG/T 3833—2018《公路工程机械台班费用定额》<sup>[11]</sup>。其中,减水剂生产过程的输入与输出清单来源于现有文献[12],由于数据库中缺少生产减水剂所需的工业萘数据且其用量较少,本文不考虑工业萘产生的环境影响。假设水泥和碎石原料加工厂到混凝土搅拌站的运输距离为100 km<sup>[13]</sup>,减水剂使用较少暂不考虑其加工厂到混凝土搅拌站的运输距离。运输和机械设备燃烧柴油产生的排放数据来源于文献[14],详见表1。

表1 透水水泥混凝土路面生产阶段数据清单

Table 1 The input list of permeable cement concrete pavement in the production stage

| 原材料              |           |         |                      | 能耗        |         |                      | 排放物                 |                     |        |                     |
|------------------|-----------|---------|----------------------|-----------|---------|----------------------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|
| 水/m <sup>3</sup> | 32.5级水泥/t | 碎石/t    | 减水剂/kg               | 电能/(kW·h) | 柴油/kg   | CO <sub>2</sub> /kg  | CH <sub>4</sub> /kg | SO <sub>2</sub> /kg | CO/kg  | NO <sub>x</sub> /kg |
| 83.60            | 163.63    | 2106.25 | 1.42×10 <sup>3</sup> | 1021.86   | 9942.85 | 3.39×10 <sup>4</sup> | 1.38                | 7.44                | 446.47 | 26.26               |

### 2.2 运输阶段

假设混凝土搅拌站到施工场地的运输距离为30 km<sup>[13]</sup>,参照 JTG/T 3832—2018<sup>[10]</sup>和 JTG/T 3833—2018<sup>[11]</sup>,得到该阶段对能源消耗量,并参考文献[14]得出运输设备燃烧柴油产生的排放数据,如表2所示。

表2 透水水泥混凝土路面运输阶段数据清单

Table 2 The input list of permeable cement concrete pavement in the transportation stage

| 能耗/<br>排放物 | 柴油/<br>MJ            | CO <sub>2</sub> /<br>kg | CH <sub>4</sub> /<br>kg | SO <sub>2</sub> /<br>kg | CO/<br>kg | NO <sub>x</sub> /<br>kg |
|------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| 数量         | 1.54×10 <sup>5</sup> | 1.14×10 <sup>4</sup>    | 0.45                    | 2.52                    | 150.43    | 8.84                    |

### 2.3 施工阶段

施工阶段涉及土方开挖、土基稳定、基层摊铺和路面摊铺等工作内容。参照2017年《〈北京市建设工程计价依据——预算消耗量定额〉绿色建筑工程》<sup>[15]</sup>、JTG/T 3832—2018<sup>[10]</sup>和 JTG/T 3833—2018<sup>[11]</sup>确定施工阶段所使用的机械类型及其工作量,通过计算得到其能耗量,并根据文献[14]中机械设备燃烧柴油产生的排放数据,得到施工阶段排放数据见表3。

### 2.4 使用阶段

在使用阶段,透水铺装可通过雨水入渗和净化产

表 3 透水水泥混凝土路面施工阶段清单

Table 3 The input list of permeable cement concrete pavement in the construction stage

| 能耗/<br>排放物 | 柴油/<br>kg | 水/<br>t | 电能/<br>(kW·h) | CO <sub>2</sub> /<br>kg | NO <sub>2</sub> /<br>kg | SO <sub>2</sub> /<br>kg | CO/<br>kg | CH <sub>4</sub> /<br>kg | PM <sub>10</sub> /<br>kg |
|------------|-----------|---------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------|
| 数量         | 951.36    | 113.00  | 111.60        | 3.01×10 <sup>3</sup>    | 31.04                   | 0.67                    | 10.25     | 0.08                    | 2.00                     |

生环境效益,其透水原理是依靠透水铺装系统的大孔隙结构,然而道路上的粉尘和泥沙会堵塞透水铺装的孔隙,对其透水性能产生严重干扰<sup>[16]</sup>。同时,随着透

表 4 透水铺装 LID 参数设定

Table 4 The lid parameter setting of permeable pavements

| 表面层         |                          |            | 路面层       |     |                | 蓄水层       |      |                |
|-------------|--------------------------|------------|-----------|-----|----------------|-----------|------|----------------|
| 蓄水高度/<br>mm | 表面粗糙度<br>(曼宁 <i>n</i> 值) | 表面坡度/<br>% | 厚度/<br>mm | 孔隙率 | 渗透性/<br>(mm/h) | 厚度/<br>mm | 孔隙率  | 渗透性/<br>(mm/h) |
| 5           | 0.013                    | 1.14       | 180       | 0.2 | 245            | 350       | 0.52 | 200            |

表 5 地表污染物参数设定

Table 5 The parameter setting of surface pollutants

| 参数  | 最大积累量/<br>(kg/ha <sup>2</sup> ) | 半饱和累积<br>时间/d | 冲刷系数                 | 冲刷<br>指数 |
|-----|---------------------------------|---------------|----------------------|----------|
| TSS | 220                             | 10            | 0.7×10 <sup>-2</sup> | 1.8      |
| COD | 200                             | 10            | 0.6×10 <sup>-2</sup> | 1.8      |
| TN  | 7                               | 10            | 0.4×10 <sup>-2</sup> | 1.7      |
| TP  | 0.6                             | 10            | 0.2×10 <sup>-2</sup> | 1.7      |

2.4.2 效益清单

透水水泥混凝土路面的维护通常采用抽真空、高压冲洗或抽真空与高压冲洗结合的方式<sup>[23-24]</sup>。3 种清理方式中,高压冲洗的效果最佳,可提高 10%~20%的渗透率,抽真空可提高 4%的渗透率<sup>[25-26]</sup>。因此,本文研究透水水泥混凝土路面在日常清扫、日常清扫+抽真空和日常清扫+高压冲洗 3 种维护方式下产生的环境效益及影响。

透水水泥混凝土路面的环境效益可通过补充地下水、污染物去除和减少污水处理厂工作负荷进行核算。

1) 补充地下水。通过 SWMM 量化 3 种维护方式下该透水水泥混凝土路面 15 年内产生的雨水入渗量,将其作为补充地下水效益。

2) 污染物去除。根据文献<sup>[17]</sup>中透水水泥混凝土的渗透率与污染物去除率随着使用年限的变化规律,结合不同维护方式的恢复效果<sup>[25-26]</sup>,总结得出 3 种维护方式下透水水泥混凝土路面对 TSS、COD、TN 和 TP 4 种污染物净化率随着使用年限的变化规律,如图 4 所示。通过 SWMM 量化 3 种维护方式下该透水混凝土非机动车道 15 年内对 TSS、COD、TN 和 TP 4 种污染物去除量,将其作为污染物去除效益。

水铺装使用年限的增加,其透水能力下降,但各类污染物的净化率得到了一定提升<sup>[17]</sup>。本节通过 SWMM 模型,对 15 年内该非机动车道透水铺装系统的透水和净水效果进行仿真模拟,并对其环境效益进行核算。

2.4.1 模型参数设定

模型参数设定参照 SWMM 用户手册和文献<sup>[18-22]</sup>,具体参数取值见表 4.5。

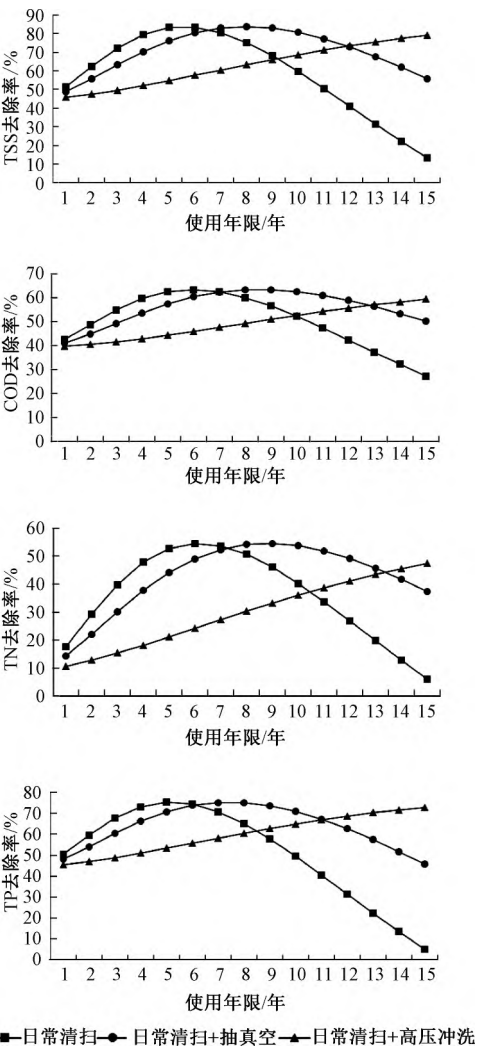


图 4 透水混凝土对各类污染物净化率随使用年限的变化规律  
Figure 4 Variation law of purification rate of various pollutants by permeable concrete with service life

3) 减少污水处理厂工作负荷。通过透水铺装净

化、储存的雨水可直接作为灌溉用水再次使用<sup>[27]</sup>，在一定程度上减少了相关污水处理厂的成本<sup>[28]</sup>，因此，本研究通过计算污水处理厂处理等量污水所产生的能耗和排放，将其负值作为该透水水泥混凝土路面部分环境效益进行核算。其中，污水处理厂处理污水产生的能耗和排放数据来自文献[29]。经计算，该透

水水泥混凝土路面在日常清扫、日常清扫+抽真空和日常清扫+高压冲洗 3 种维护方式下通过补充地下水、污染物去除与减少污水处理厂工作负荷产生的效益清单(本文中透水铺装产生的正面效益均用负值表示)如表 6 所示。

表 6 透水水泥混凝土非机动车道在不同维护方式下的效益清单

Table 6 The benefits list of permeable cement concrete non-motorized lane with different maintenance methods

| 能耗/排放物    | 水/<br>m <sup>3</sup>  | TSS/<br>kg            | COD/<br>kg            | TN/<br>kg | TP/<br>kg | 电能/<br>(kW·h)         | 聚合氯化铝<br>PAC/kg | 聚丙烯<br>PP/kg          | CH <sub>4</sub> /<br>kg | H <sub>2</sub> S/<br>kg | NH <sub>3</sub> /<br>kg | N <sub>2</sub> O/<br>kg | 油脂/<br>kg |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| 日常清扫      | -3.13×10 <sup>5</sup> | -4.50×10 <sup>3</sup> | -3.62×10 <sup>3</sup> | -89.18    | -10.10    | -8.94×10 <sup>4</sup> | -703.98         | -879.82               | -494.35                 | -1.81                   | -1.03                   | -253.43                 | -31.29    |
| 日常清扫+抽真空  | -3.61×10 <sup>5</sup> | -5.13×10 <sup>3</sup> | -3.75×10 <sup>3</sup> | -102.97   | -12.35    | -1.03×10 <sup>5</sup> | -812.52         | -1.02×10 <sup>3</sup> | -570.57                 | -2.09                   | -1.19                   | -292.51                 | -36.11    |
| 日常清扫+高压清洗 | -4.39×10 <sup>5</sup> | -3.79×10 <sup>3</sup> | -2.74×10 <sup>3</sup> | -61.49    | -10.28    | -1.26×10 <sup>5</sup> | -988.34         | -1.24×10 <sup>3</sup> | -694.03                 | -2.55                   | -1.45                   | -355.8                  | -43.93    |

## 2.5 维护阶段

根据北京市 DB11/T 353—2014《城市道路清扫保洁质量与作业要求》<sup>[30]</sup>规定，该路面每日机械清扫作业不少于 1 次。抽真空和高压冲洗维护频率设为 1 年 1 次。维护能耗数据来源于 JTG/T 3832—2018<sup>[10]</sup>和 JTG/T 3833—2018<sup>[11]</sup>。机械设备燃烧柴油产生的排放数据来源于文献[14]，详见表 7。

表 7 不同维护方式能耗与排放清单

Table 7 The energy consumption and emission list of different maintenance methods

| 能耗/排放物              | 日常清扫                 | 日常清扫+抽真空             |         | 日常清扫+高压冲洗            |         |
|---------------------|----------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
|                     | 日常清扫                 | 日常清扫                 | 抽真空     | 日常清扫                 | 高压冲洗    |
|                     | 1 日 1 次              | 1 日 1 次              | 1 年 1 次 | 1 日 1 次              | 1 年 1 次 |
| 柴油总消耗量/kg           | 1.98×10 <sup>4</sup> | 1.98×10 <sup>4</sup> |         | 2.00×10 <sup>4</sup> |         |
| 总电耗量/(kW·h)         | —                    | 1.25×10 <sup>3</sup> |         | —                    |         |
| 水量/m <sup>3</sup>   | —                    | —                    |         | 1.65                 |         |
| CO <sub>2</sub> /kg | 6.32×10 <sup>4</sup> | 6.32×10 <sup>4</sup> |         | 6.37×10 <sup>4</sup> |         |
| CH <sub>4</sub> /kg | 2.58                 | 2.58                 |         | 2.60                 |         |
| SO <sub>2</sub> /kg | 13.87                | 13.87                |         | 13.99                |         |
| CO/kg               | 831.23               | 831.23               |         | 837.92               |         |
| NO <sub>x</sub> /kg | 48.95                | 48.95                |         | 49.35                |         |

## 2.6 废弃阶段

本研究仅考虑透水水泥混凝土面层和透水水泥混凝土稳定碎石基层的废弃处理，废弃阶段包括路面挖除、废弃混凝土从路面到填埋处的运输以及废弃混凝土作为基础填料处置。由于废弃混凝土作为基础填料一般为就近处置，所以假设废弃混凝土到填埋运输距离为 1 km。路面挖除和运输消耗的柴油能耗和排放数据均来自 JTG/T 3832—2018<sup>[10]</sup>、JTG/T 3833—2018<sup>[11]</sup>和文献[14]。废弃混凝土作为基础填料处置的能耗和排放数据来自文献[31]，详见表 8。

表 8 透水水泥混凝土路面废弃阶段清单

Table 8 The list of permeable cement concrete pavement in waste stages

| 能耗/排放物               | 挖除路面                 | 运输                   | 基础填料处理               | 总计                   |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 电能/(kW·h)            | —                    | —                    | 4.09×10 <sup>4</sup> | 4.09×10 <sup>4</sup> |
| 柴油/kg                | 564.82               | 258.45               | 0.41                 | 823.68               |
| 水/t                  | —                    | —                    | 4.06×10 <sup>3</sup> | 4.06×10 <sup>3</sup> |
| CO <sub>2</sub> /kg  | 1.78×10 <sup>3</sup> | 5.59×10 <sup>4</sup> | 4.67×10 <sup>4</sup> | 1.04×10 <sup>5</sup> |
| NO <sub>x</sub> /kg  | 18.43                | 43.30                | 213.44               | 275.17               |
| CO/kg                | 6.09                 | 735.89               | 113.36               | 855.34               |
| SO <sub>2</sub> /kg  | 0.40                 | 12.28                | 42.21                | 54.89                |
| 粉尘/kg                | —                    | —                    | 482.92               | 482.92               |
| COD/kg               | —                    | —                    | 1.27                 | 1.27                 |
| SS/kg                | —                    | —                    | 8.07                 | 8.07                 |
| CH <sub>4</sub> /kg  | 0.05                 | 2.26                 | —                    | 2.31                 |
| PM <sub>10</sub> /kg | 1.19                 | —                    | —                    | 1.19                 |

## 3 结果与分析

### 3.1 环境影响分析

#### 3.1.1 全生命周期环境影响分析

运用 SimaPro 中的 ReCiPe 2016 Midpoint 方法经过标准化分析后，得到 3 种维护方式下的透水水泥混凝土路面生命周期各类环境影响分值，如表 9 所示。可看出：透水水泥混凝土路面全生命周期内在人体致癌毒性、人体非致癌毒性、淡水生态毒性和海水生态毒性 4 个方面产生的环境影响最为严重，其分值分别为 3215.32 ~ 8663.16、642.72 ~ 660.84、400.65 ~ 424.97、686.83 ~ 713.81。同时，透水水泥混凝土在水损耗和淡水富营养化两方面可以产生正面的环境效益。

从生命周期各个阶段来看，透水水泥混凝土路面的材料生产阶段是产生各类环境影响的主要阶段，约占整个生命周期环境影响的 60% 以上(图 5)。这主要是由于透水水泥混凝土路面的生产阶段需要大量

水泥,而水泥的生产会造成较为严重的环境影响。由于本研究考虑了使用阶段的环境效益,路面在使用阶段的补充地下水、雨水净化和减少污水处理厂负荷作用抵消了部分其他阶段产生的环境影响。

表9 透水水泥混凝土路面生命周期影响分值

Table 9 The life cycle impact score of permeable cement concrete pavement

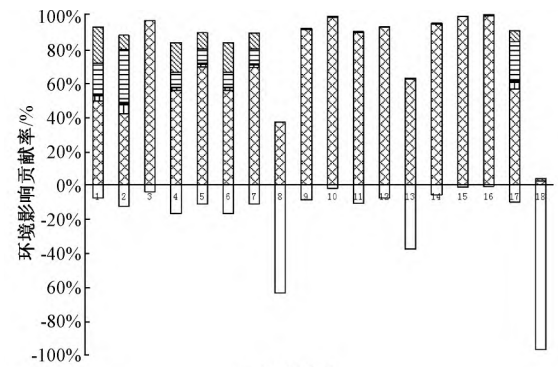
| 影响类别        | 日常清扫     | 日常清扫+抽真空 | 日常清扫+高压冲洗 |
|-------------|----------|----------|-----------|
| 全球变暖        | 111.75   | 110.27   | 107.64    |
| 平流层臭氧消耗     | 1.14     | 1.11     | 1.06      |
| 电离辐射        | 4.09     | 4.06     | 4.02      |
| 臭氧形成 人体健康   | 82.90    | 79.72    | 74.29     |
| 细颗粒物形成      | 43.37    | 42.46    | 40.82     |
| 臭氧形成 陆地生态系统 | 96.17    | 92.48    | 86.18     |
| 土地酸化        | 90.97    | 89.07    | 85.60     |
| 淡水富营养化      | -7.14    | -10.78   | -7.89     |
| 海水富营养化      | 0.10     | 0.10     | 0.10      |
| 陆地生态毒性      | 172.66   | 172.05   | 171.07    |
| 淡水生态毒性      | 424.97   | 415.69   | 400.65    |
| 海水生态毒性      | 713.81   | 703.51   | 686.83    |
| 人体致癌毒性      | 8663.16  | 6583.72  | 3215.32   |
| 人体非致癌毒性     | 660.84   | 653.93   | 642.72    |
| 土地使用        | 0.23     | 0.23     | 0.23      |
| 矿产资源耗竭      | 0.03     | 0.03     | 0.03      |
| 化石资源耗竭      | 111.75   | 109.74   | 106.24    |
| 水耗损         | -1132.43 | -1313.36 | -1606.43  |

### 3.1.2 维护方式对全生命周期的影响研究

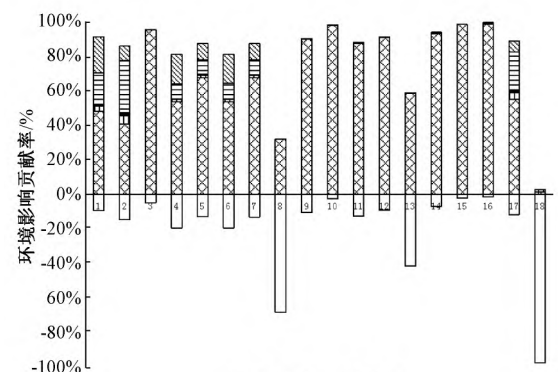
3种维护方式下的透水水泥混凝土路面产生的各类环境影响和环境效益存在一定差异。其中,日常清扫+高压冲洗对路面的透水性恢复效果最好,雨水入渗总量最高。因此,日常清扫+高压冲洗维护方式下的路面在水损耗方面的环境效益最高,分别为日常清扫和日常清扫+抽真空维护方式下路面的1.42,1.22倍。

由于使用阶段入渗的雨水可直接再次利用,有效减少了接纳污水处理厂的工作负荷,抵消了部分其他阶段产生的环境影响,因此日常清扫+高压冲洗维护方式下路面产生的各类环境影响均小于另外2种维护方式。其中,人体致癌毒性方面的环境影响差异尤为明显,日常清扫+高压冲洗维护方式下透水水泥混凝土路面在该方面产生的环境影响分别占日常清扫和日常清扫+抽真空维护方式下路面的37.11%和48.84%。

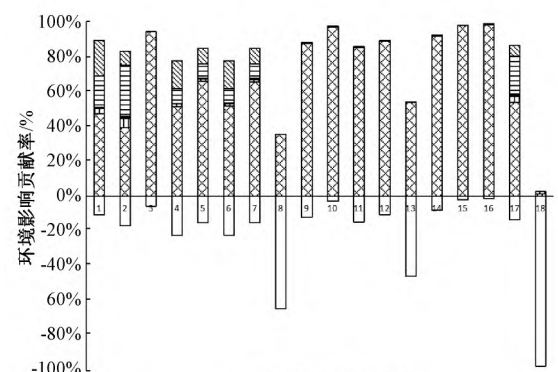
由于日常清扫+抽真空维护方式下路面在使用阶段对雨水污染物去除量最高,因此其在淡水富营养化方面产生的环境效益最高,分别是日常清扫和日常



a—日常清扫



b—日常清扫+抽真空



c—日常清扫+高压冲洗

■废弃阶段 ■维护阶段 □使用阶段 ■施工阶段 ■运输阶段 ■生产阶段

- 1—全球变暖 2—平流层臭氧消耗 3—电离辐射 4—臭氧形成 人体健康  
5—细颗粒物形成 6—臭氧形成 陆地生态系统 7—土地酸化  
8—淡水富营养化 9—海水富营养化 10—陆地生态毒性  
11—淡水生态毒性 12—海水生态毒性 13—人体致癌毒性  
14—人体非致癌毒性 15—土地使用 16—矿产资源耗竭  
17—化石资源耗竭 18—水耗损

图5 透水水泥混凝土路面全生命周期主要阶段排放的环境影响贡献

Figure 5 Environmental impact contribution in the main stages of the permeable cement concrete pavement life cycle

清扫+高压冲洗维护方式下路面的1.51,1.37倍。

经综合比较分析,不同维护方式下透水水泥混凝土路面产生的综合环境影响顺序为日常清扫>日常

清扫+抽真空>日常清扫+高压冲洗。日常清扫+抽真空维护下的路面在淡水富营养化方面产生环境效益最高,日常清扫+高压冲洗维护下路面在水损耗方面产生环境效益最高。

### 3.2 碳排放的影响

运用 SimaPro 中的 IPCC 2013 GWP 100a 方法经过特征化分析后,得到日常清扫、日常清扫+抽真空和日常清扫+高压冲洗维护方式下透水水泥混凝土路面全生命周期碳排放量分别为 83.62, 82.56, 80.70 t CO<sub>2</sub>, 可看出日常清扫+高压冲洗维护方式对于路面碳减排最具优势。从生命周期阶段来看,路面生产阶段的碳排放接近全生命周期碳排放总量的 60%,其次为废弃阶段和维护阶段的碳排放占全生命周期碳排放总量的 15%左右。而使用阶段对减少路面全生命周期碳排放具有明显贡献,减少了路面全生命周期 8%~10%的碳排放,这主要是因为路面使用阶段的雨水渗透和雨水净化作用可以减少污水处理厂工作负荷。

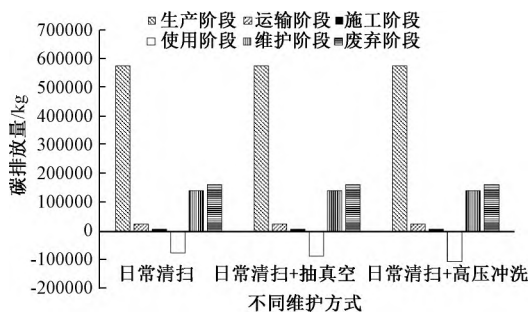


图6 透水水泥混凝土路面生命周期主要阶段的碳排放  
Figure 6 Carbon emission in the main life cycle stages of the permeable cement concrete pavement

### 3.3 敏感性分析

使用年限是核算透水水泥混凝土路面环境影响的关键参数,本文设定的透水水泥混凝土路面的使用年限为 15 年,但透水水泥混凝土路面的实际使用年限在 0~15 年内随着具体使用场景而不同。在保持其他因素不变的条件下,选取透水水泥混凝土路面的使用年限为 5, 10, 15 年进行敏感性分析。

图 7 为不同使用年限下透水水泥混凝土路面生命周期影响分值比较结果。可见,随着使用年限增加,透水水泥混凝土路面的生命周期环境影响降低,环境效益得到提升。当使用年限为 5 年时,3 种维护方式下路面在淡水富营养化方面均产生负面环境影响,日常清扫+高压冲洗维护下路面在水耗竭方面产生的环境效益最高,日常清扫+抽真空为该情境下最

优的维护方式。当使用年限为 10 年时,3 种维护方式下路面在淡水富营养化方面均产生正面的环境效益,日常清扫+抽真空维护下路面生命周期环境影响低于另外 2 种维护方式。当使用年限为 15 年时,日常清扫+高压冲洗维护下路面生命周期环境影响最低,在水损耗方面的环境效益明显高于另外 2 种维护方式,日常清扫+高压冲洗为该情境下最优的维护方式。

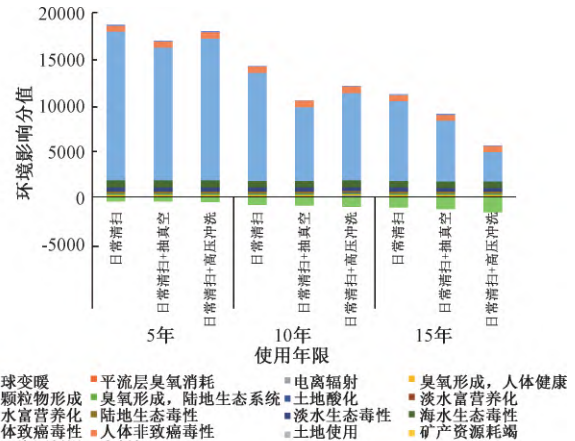


图7 不同使用年限下透水水泥混凝土路面生命周期影响分值比较

Figure 7 Comparison of life cycle impact scores of permeable concrete pavement with different service lives

通过上述分析,使用年限是不同维护方式下透水水泥混凝土路面环境影响的重要因素。

## 4 结论

本研究针对北京市 3 种不同维护方式下透水水泥混凝土路面进行了生命周期评价分析,得出以下结论:

1) 透水水泥混凝土路面在原材料生产阶段所需的水泥投入,是造成其生命周期内环境影响尤其是碳排放的主要因素。

2) 透水水泥混凝土路面在使用阶段因雨水入渗和净化作用产生的环境效益可以抵消部分其他阶段产生的环境影响。

3) 在通常条件下,不同维护方式下透水水泥混凝土路面产生的综合环境影响顺序为:日常清扫>日常清扫+抽真空>日常清扫+高压冲洗,日常清扫+高压冲洗为该条件下环境影响最小的维护方式。

4) 由于使用年限是不同维护方式下透水水泥混凝土路面的环境影响的重要因素,建议综合考虑场地周边环境条件、道路荷载情况等因素对使用年限的影响,选择最适合的路面维护方式。

## 参考文献

- [1] 解超, 吕彬, 王思思, 等. 基于生命周期思想的透水铺装资源环境影响评价述评[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 197-202, 44.
- [2] 王海燕, 刘华章. 混凝土透水砖的配合比设计、生产与施工[J]. 新型建筑材料, 2007(7): 27-29.
- [3] 姜雪, 李小平, 董琰丽, 等. LCA在产品生命周期环境影响评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(增刊2): 188-191.
- [4] 郑晓云, 徐金秀. 基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究: 以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J]. 建筑经济, 2019, 40(1): 107-111.
- [5] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33-42.
- [6] 陈汉昌. 透水水泥混凝土力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2011, 40(11): 51-54.
- [7] PRATT C J. Permeable pavements for stormwater quality enhancement in urban stormwater quality enhancement: source control, retrofitting, and combined sewer technology[J]. Fort Collins: ASCE, 1990, 131-155.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 张贤超. 高性能透水混凝土配合比设计及其生命周期环境影响评价体系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程预算定额: JTG/T 3832—2018[S].
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程机械台班费用定额: JTG/T 3833—2018[S].
- [12] 陶然. 萘系和聚羧酸系减水剂环境协调性评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [13] 高唱. 基于LCA的再生混凝土环境影响评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [14] 李海洋. 基于LCA温拌沥青路面建设期节能减排效果及经济性评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [15] 北京市住房和城乡建设委员会关于执行2017年《〈北京市建设工程计价依据——预算消耗量定额〉绿色建筑工程》有关规定的通知[J]. 北京市人民政府公报, 2017(42): 27-28.
- [16] 王兴梓, 侯精明, 李丙尧, 等. 多孔透水砖下渗衰减规律试验研究[J]. 给水排水, 2019, 55(增刊1): 68-71.
- [17] 董星海, 康爱红, 徐雪玲, 等. 透水混凝土阻滞路面径流污染物的效应[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8): 250-255.
- [18] ABERA L E, SURBECK C Q, O'REILLY A M. Simulated performance of in-place pervious concrete under varying storms, surface areas, and infiltration rates[J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2018, 4(2): 04018003.
- [19] BAI Y R, LI Y H, ZHANG R Y, et al. Comprehensive performance evaluation system based on environmental and economic benefits for optimal allocation of LID facilities[J]. Water, 2019, 11(2): 11020341.
- [20] ZHU H R, YU M M, ZHU J Q, et al. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2019, 8(4): 373-382.
- [21] 熊丽君. 基于参数敏感性和径流调控的LID优化设计方法[J]. 给水排水, 2020, 56(5): 78-83, 88.
- [22] 周志才. 基于SWMM模型的上海市松江国际生态商务区海绵城市建设效果评价[J]. 环境工程, 2020, 38(8): 167-173.
- [23] HU N, ZHANG J, XIA S, et al. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121463.
- [24] WINSTON R J, AL-RUBAEI A M, BLECKEN G T, et al. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate-The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 169: 132-144.
- [25] 亓雪颖. 北京城区不同类型透水铺装入渗性能及清理维护效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [26] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221-233.
- [27] NNADI E O, NEWMAN A P, COUPE S J. Geotextile incorporated permeable pavement system as potential source of irrigation water: effects of re-used water on the soil, plant growth, and development[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2014, 42(2): 125-132.
- [28] 余太平, 何延召, 蔡洪, 等. 透水铺装合理搭配在海绵建设中的综合效益[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 46-51.
- [29] 张倩芸. 基于LCA的污水处理系统的环境影响评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [30] 北京市质量技术监督局. 城市道路清扫保洁质量与作业要求: DB11/T 353—2014[S].
- [31] 崔东阁. 基于LCA的混凝土环境负荷及废弃处理处置最优化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.