

# 基于灰云模型的装配式储水道路可持续性评价

张杰辉, 陈佳妮

(福建理工大学 管理学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 装配式储水道路是缓解城市内涝等问题的创新型城市道路设计方案, 在实际应用与探索中, 对其进行可持续性评价, 有利于其向标准化、规模化更好发展。研究围绕装配式储水道路, 从环境、功能效益、社会健康等维度分析后构建了可持续性评价指标体系, 运用决策实验室分析法与熵权法计算指标的主、客观权重, 并应用博弈论进行组合赋权, 再结合灰色系统理论与云模型对其可持续性进行更准确、客观的评价。基于此, 提出装配式储水道路可持续性发展的有效建议。为其标准化生产与规模化应用提供科学合理的决策依据, 推动城市基础设施向绿色化、低碳化方向发展。

**关键词:** 装配式储水道路; 可持续性评价; 灰云模型; 组合赋权

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0223-10

## Sustainability evaluation of prefabricated water-retaining roads based on grey cloud model

ZHANG Jiehui, CHEN Jiani

(School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Prefabricated water retaining roads are an innovative urban road design scheme to alleviate urban waterlogging and other problems. In practical application and exploration, conducting a sustainability evaluation is conducive to its better development towards standardization and scale. This study focuses on prefabricated water-retaining roads, and constructs a sustainability evaluation index system from dimensions such as environmental impact, functional benefits, and social well-being. The decision-making laboratory analysis method and the entropy weight method are used to calculate the subjective and objective weights of the index. The game theory is applied to the combination weighting, and the grey system theory and cloud model are combined to evaluate its sustainability more accurately and objectively. Consequently, effective suggestions are proposed for the sustainable development of prefabricated water-retaining roads. These provide a scientific and rational decision-making basis for their standardized production and large-scale application, promoting urban infrastructure's green and low-carbon transformation.

**Keywords:** prefabricated water-retaining roads; sustainability evaluation; grey cloud model; combination weighting

随着全球城市化进程不断加速, 全球约 60% 的特大城市正面临暴雨内涝与水资源短缺的双重威胁, 而传统排水系统在极端气候条件下已显现出一定的局限性<sup>[1]</sup>。透水路面作为可持续城市排水系统(SUDS)的核心技术之一, 其渗透减排功能受到广泛关注<sup>[2]</sup>。在我国海绵城市试点中, 透水路面的应用已使城市下垫面的雨水径流系数降

低 40% ~ 60%, 表明该技术能有效削减洪峰流量<sup>[3]</sup>。但在实际应用中, 透水铺装与城市排水管网之间缺乏协同联动, 超过路面渗透能力的径流未能被有效存储和再利用<sup>[4]</sup>。此外, 透水路面的孔隙易受悬浮物堵塞, 导致其透水性能随使用时间下降, 难以满足韧性城市对基础设施全生命周期性能的要求<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 福建理工大学横向科研项目(GY-H-23113)

第一作者简介: 张杰辉(1967—), 男, 福建福州人, 教授, 博士, 研究方向: 智能建造、项目管理。

鉴于透水路面应对城市内涝及雨水资源利用方面存在的局限性,许多学者提出了装配式储水道路技术。装配式储水道路基层内置的储水系统能够有效收集并储存雨水,延缓暴雨径流,缓解内涝问题;同时,通过蒸发作用释放储存的雨水,还可实现路面降温,有助于改善城市微气候<sup>[6]</sup>。然而,该技术目前仍处于发展阶段,相关标准体系尚不完善,制约了其标准化与规模化推广。建立完善的装配式储水道路标准体系,不仅有助于提升生产效率、降低成本,也有利于进一步发挥其在缓解洪涝与热岛效应方面的协同效益,为城市基础设施的可持续发展提供支撑<sup>[7-8]</sup>。在相关评价体系研究方面,王向英等<sup>[9-12]</sup>主要侧重于临时性装配式路面在建设期的资源效率与施工效益,如材料损耗率控制、工期优化等指标。但目前仍缺乏针对装配式储水道路“渗-蓄-用”一体化特点的系统性评价体系,难以综合评估其在经济效益、环境影响与社会效益等方面的可持续性,从而限制了该技术的规模化应用。

综上,本研究以装配式储水道路为研究对象,借鉴现有标准构建相应的可持续性评价指标体系,并采用决策实验室分析法(DEMATEL)与熵权法分别计算指标的主、客观权重;基于博弈论对主客观权重进行组合赋权,再结合灰色系统理论

与云模型建立评价模型<sup>[13]</sup>,对装配式储水道路开展可持续性评价。最后,本研究通过蒙特卡洛模拟对评价模型进行验证,以确保其有效性与可行性。

## 1 装配式储水道路可持续性评价指标体系构建

本研究基于《绿色建材评价透水铺装材料》(T/CECS 10228-2022)等相关标准<sup>[14-15]</sup>,构建了包含环境、经济与社会 3 个维度的可持续性评价框架。在环境维度,借鉴文献<sup>[16~18]</sup>的研究,在现有装配式道路评价体系中新增“城市降温效益”“削减污染效益”“雨水再利用效益”等指标,以更全面反映其环境效益。在经济维度,补充了“施工能源消耗”“全生命周期成本”“施工区道路用户成本”等指标<sup>[19-20]</sup>,从而系统评估其经济绩效与运营效能。在社会维度,增设“社会可持续性”准则层,引入“提高居住舒适度”“居民节水意识培养”及“带动当地绿色发展”等社会健康类指标,响应联合国可持续发展目标(SDGs)中关于“健康福祉”与“可持续社区”的要求<sup>[16]</sup>。最终,本研究构建的装配式储水道路可持续性评价体系共包含 14 项二级指标,具体如下表 1 所示。

表 1 装配式储水道路可持续性评价指标体系

Tab.1 Sustainability evaluation index system for prefabricated water-retaining roads

一级指标	二级指标	释义	文献来源
环境 可持续性	A <sub>1</sub> 城市降温效益	每平米装配式储水道路通过水蒸发减缓热岛效应带来的效益。	[16-18]
	A <sub>2</sub> 削减污染收益	每平米装配式储水道路系统净化雨水所带来的效益。	[16]
	A <sub>3</sub> 雨水再利用效益	每平米装配式储水道路收集雨水在绿地浇灌、消防用水等方面回用节省自来水的效益。	[16-18]
	A <sub>4</sub> 施工能源消耗	装配式储水道路每平米施工各环节能源消耗之和,即由原材料生产、混合料生产、材料运输及铺筑施工各环节能耗总和。	[15,19]
	A <sub>5</sub> 碳排放强度	装配式储水道路每平米施工各环节碳排放之和,即由原材料生产、混合料生产、材料运输及铺筑施工各环节碳排放总和。	[15,19]
经济 可持续性	B <sub>1</sub> 全生命周期成本	每平米装配式储水道路全生命周期成本,包括施工、运营阶段。	[20-21]
	B <sub>2</sub> 施工区道路用户成本	因每平米装配式储水道路施工、维修等导致的车辆因绕行、拥堵或降速增加的居民通行时间成本。	[17,21]
	B <sub>3</sub> 节省城市管网运行费	每平米装配式储水道路提前收集流入市政管网的雨水,减轻管网排水压力而节省的运行费用。	[18,21]
	B <sub>4</sub> 装配式施工效率	每平米装配式储水道路采用装配式安装技术的工期。	[22]

表1(续)

一级指标	二级指标	释义	文献来源
社会 可持续性	$C_1$ 提高居住舒适度	通过装配式储水道路的设计与功能优化改善居民在道路周边生活时的物理环境体验和心理感受。	[17-18]
	$C_2$ 居民节水意识培养	道路的雨水收集与回用功能,引导公众形成主动节约水资源、参与水循环利用的行为习惯与价值观。	[16,18]
	$C_3$ 带动当地 绿色经济发展	通过装配式储水道路每平米建设推动区域绿色产业链发展,创造低碳就业岗位,促进经济结构转型。	[15,18]
	$C_4$ 降低周边噪声	利用装配式技术减少施工期间噪声对居民生活的干扰。	[15,22]
	$C_5$ 提高城市美化度	通过道路景观设计与功能性整合,提升城市的视觉美感和文化内涵。	[17-18]

## 2 装配式储水道路可持续性评价指标量化方法与权重计算

### 2.1 定量指标量化

结合现行标准及相关文献,本研究对各定量指标进行了计算。

城市降温效益  $A_1$  为:

$$A_1 = \frac{\varepsilon \times \tau \times A_w \times T \times \rho_w \times e \times \Delta \text{vapH} \times 10^{-3}}{\delta} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 为焦耳与千瓦时的转换系数,取 $3.6 \times 10^6$  J/(kW·h); $\tau$ 为当地夏季水面日平均蒸发量,mm; $A_w$ 为每平米道路储水面积, $\text{m}^2$ ;  $T$ 为当地夏季开空调天数; $\rho_w$ 为水的密度, $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $e$ 为当地的电费,元/kW·h; $\Delta \text{vapH}$ 为水的汽化热,kJ; $\delta$ 为空调能效比,取3.0。

削减污染收益  $A_2$  为:

$$A_2 = \sum F_w \times W_2 \quad (2)$$

式中, $F_w$ 为污水处理费用,元/t; $W_2$ 为每平米道路净化雨水量, $\text{m}^3$ 。

雨水再利用效益  $A_3$  为:

$$A_3 = \sum F_c \times W_3 \quad (3)$$

式中, $F_c$ 为自来水处理价格,元/t; $W_3$ 为每平米道路雨水蓄水量, $\text{m}^3$ 。

施工能源消耗  $A_4$  为:

$$A_4 = \sum_{g=1}^4 \sum_{j=1}^3 [X_{(g,j)} \times E_{(g,j)} \times k_{(g,j)}] \quad (4)$$

式中, $g$ 取值1、2、3、4分别代表原材料生产、混合料生产、运输环节、铺筑环节; $j$ 取值1、2、3分别代表不同能源类别,即燃油、天然气、电力能源;

$X_{(g,j)}$ 为第 $j$ 类能源在第 $g$ 种环节总能源所占比例; $E_{(g,j)}$ 为第 $j$ 类能源在第 $g$ 种环节的单位能耗值; $k_{(g,j)}$ 为第 $g$ 种环节 $j$ 类能源折标煤系数。

碳排放强度  $A_5$  为:

$$A_5 = \sum_{g=1}^4 \sum_{j=1}^3 [X_{(g,j)} \times E_{(g,j)} \times k_{(g,j)} \times C_{\text{EF}(g,j)}] \quad (5)$$

式中, $C_{\text{EF}(g,j)}$ 代表 $g$ 种环节、 $j$ 类能源的碳排放因子。

全生命周期成本  $B_1$  为:

$$B_1 = \sum_{i=1}^4 b_i \quad (6)$$

式中, $b_g$ 为第 $g$ 种环节每平米装配式储水道路的成本。

施工区道路用户成本  $B_2$  为:

$$B_2 = \mu \alpha T_1 P_1 \times (1+I)^{-t} \quad (7)$$

式中, $\mu$ 为居民用于生产目的的时间比例,取0.5; $\alpha$ 为研究区域居民的平均时间价值,人·h; $T_1$ 施工时延缓的通行时间,h; $P_1$ 为单位时间道路人流量,人/h; $I$ 为折现系数,暂不考虑,取0。

节省城市管网运行费  $B_3$  为:

$$B_3 = W_4 \times F_r \times r \quad (8)$$

式中, $F_r$ 为管网运行费,元/t; $W_4$ 为每平米道路雨水滞水量, $\text{m}^3$ ; $r$ 为价格指数,取2.1。

装配式施工效率  $B_4$  为:

$$B_4 = \frac{W_5}{D} \quad (9)$$

式中, $W_5$ 为项目工程量, $\text{m}^3$ ; $D$ 为道路施工天数。

带动当地绿色经济发展  $C_3$  为:

$$C_3 = \frac{\theta \times C_0}{N} \quad (10)$$

式中,  $C_0$  为项目投资成本, 元/ $m^3$ ;  $N$  为路面预计使用寿命, 年;  $\theta$  为投入产出利润率, 取 0.058 8。

## 2.2 定性指标量化

装配式储水道路的部分定性指标难以直接测量, 需依靠专家的专业知识和实践经验进行评价。为此, 本研究邀请了 120 位城市基础设施可持续发展领域的专家参与打分, 并借助云模型对定性指标进行量化处理。

首先, 确定定性指标的评语集。各定性指标的分值区间划分如表 2 所示, 指标得分越高, 代表其可持续性表现越好。

表 2 定性指标等级分值区间

Tab.2 Score ranges for qualitative index levels

可持续性等级	分值区间
可持续性差 I	[0, 0.2)
可持续性一般 II	(0.2, 0.4]
可持续性较好 III	(0.4, 0.7]
可持续性优 IV	(0.7, 1.0]

其次, 设定装配式储水道路共有  $n$  个定性指标, 则可持续性定性评价指标集合  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 其中, 指标  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的评价指标值记作  $x_i$ 。将可持续性划分为 4 个等级, 分别用  $C_j (j = 1, 2, 3, 4)$  表示第  $j$  级。  $L_{sj}$  与  $R_{sj} (j = 1, 2, 3, 4)$  分别代表第  $j$  级评价区间的左右界值。在此基础上, 构建评价矩阵  $(q_{ij})_{n \times 4}$ , 其中  $q_{ij} = q(x_{ij} \in C_j)$  表示第  $i$  个指标的评价值属于第  $j$  级可持续性的可能性程度。

$$(q_{ij})_{n \times 4} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $q_{ij} = q/Q$ ,  $q$  为判定指标  $X_i$  隶属于等级  $C_j$  的专家人数,  $Q$  为参加评估的专家总人数。

然后, 对矩阵中的数据进行去模糊化处理, 可得评价指标  $X_i$  的评价值:

$$X_i = \sum_{j=1}^4 q_{ij} \frac{L_{sj} + R_{sj}}{2} \quad (12)$$

式中,  $X_i$  表示为装配式储水道路可持续性评价指标值。

## 2.3 装配式储水道路可持续性指标权重确定

为了兼顾指标权重的主客观特性, 本研究采用 DEMATEL 法与熵权法分别计算主客观权重  $W_{si}$ 、 $W_{oi}$ , 再通过博弈论组合赋权法对主客观权重进行计算。

### 2.3.1 确定主、客观权重

首先根据式(13)~式(16)采用 DEMATEL 分析法计算指标主权重。

$$O = [O_{ij}]_{n \times n} \quad (13)$$

式中,  $O_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$  表示  $O_i$  对  $O_j$  的直接影晌程度。

影响度 ( $D_i$ )、被影响度 ( $C_i$ )、中心度 ( $M_i$ ) 可由式(14)与式(15)计算得出。

$$\begin{cases} D_i = \sum_{j=1}^n O_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \\ C_i = \sum_{i=1}^n O_{ji}, (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (14)$$

$$M_i = D_i + C_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

各项评价指标主权重  $W_{si} (i = 1, 2, \dots, n)$  由式(16)可得。

$$W_{si} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (16)$$

随后, 根据式(17)~式(19), 利用熵权法计算各指标的熵值与熵权, 得到客观权重; 并运用归一化方法对原始数据进行标准化处理, 得到标准化矩阵  $B$ 。其中,  $b_{oi}$  表示第  $o$  个对象在第  $i$  个指标下的评分值 ( $o = 1, 2, 3, \dots, m; i = 1, 2, 3, \dots, n$ )。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据式(18)计算第  $i$  个指标的信息熵  $E_i$ 。其中,  $p_{oi}$  表示第  $o$  个对象在第  $i$  个指标下的占比。

$$\begin{cases} E_i = -\alpha \sum_{o=1}^m (p_{oi} \ln p_{oi}) \\ p_{oi} = \frac{b_{oi}}{\sum_{i=1}^n b_{oi}} \\ \alpha = \frac{1}{\ln m} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(19)计算各指标客观权重  $W_{oi}$ 。

$$W_{oi} = \frac{1 - E_i}{n - \sum_{i=1}^n E_i} \quad (19)$$

2.3.2 评价指标组合权重计算

通过主客观权重之间离差平方和最小函数、综合评价价值最大函数求出其加权系数  $\mu$  和  $\lambda$ , 将指标的主客观权重代入组合公式, 最终得到各指标的组合权重  $\omega_i$ , 如表 3 所示。

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \sum_{o=1}^m \sum_{i=1}^n b_{oi} (W_{si} - W_{oi}) + \sum_{i=1}^n W_{oi} (W_{si} + \lambda W_{oi})}{\sum_{i=1}^n (W_{si} + W_{oi})^2} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n W_{si} (W_{si} + \lambda W_{oi}) - \frac{1}{2} \sum_{o=1}^m \sum_{i=1}^n b_{oi} (W_{si} - W_{oi})}{\sum_{i=1}^n (W_{si} + W_{oi})^2} \quad (21)$$

$$\omega_i = \mu W_{si} + \lambda W_{oi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

式中,  $\mu$  表示评价中主观权重的重要程度,  $\lambda$  表示评价中客观权重的重要程度。

表 3 指标组合权重计算结果

Tab.3 Results of combined indicator weights

指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标	主观权重	客观权重	组合权重
A <sub>1</sub>	0.046	0.073	0.062	B <sub>3</sub>	0.083	0.073	0.077
A <sub>2</sub>	0.086	0.070	0.077	B <sub>4</sub>	0.061	0.083	0.074
A <sub>3</sub>	0.072	0.077	0.075	C <sub>1</sub>	0.064	0.070	0.067
A <sub>4</sub>	0.044	0.070	0.060	C <sub>2</sub>	0.075	0.068	0.071
A <sub>5</sub>	0.077	0.069	0.072	C <sub>3</sub>	0.064	0.071	0.068
B <sub>1</sub>	0.087	0.073	0.079	C <sub>4</sub>	0.111	0.069	0.086
B <sub>2</sub>	0.052	0.063	0.059	C <sub>5</sub>	0.077	0.071	0.073

### 3 基于灰云模型的装配式储水道路可持续性评价

鉴于灰云模型能够在单案例条件下输出符合工程认知的评价结果, 且已在工程安全、灾害韧性等场景得到验证<sup>[9]</sup>, 本研究针对装配式储水道路数据积累不足的客观局限, 引入灰云模型进行可持续性评价, 以降低因数据匮乏导致的评价结果模糊性与随机性。此外, 通过敏感性分析对模型

进行验证, 进一步检验其有效性与可行性。

#### 3.1 实例概况和数据收集

##### 3.1.1 实例概况

本研究选取福州市左海公园的试验路段进行实证分析。该路段由装配式道路基层、试块内部储水系统和透水混凝土面层构成, 如图 1(a) 所示。其中, 面层采用透水混凝土, 能快速渗透雨水。装配式道路基层构件尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 450 mm, 内部配有混凝土、钢筋网及传力杆。每个基层模块中预埋有一套储水系统, 该系统由 12 个立管与 HDPE 管网组成。如图 1(b) 所示, 储水系统中的蓄水罐可暂存部分雨水, 从而延缓峰值径流形成, 有助于缓解城市内涝风险。同时, 储水系统的蒸发散热与植草沟的蒸腾作用相互协同, 使该路段在夏季的路面温度比传统沥青路面低 5~8 ℃, 有效缓解城市热岛效应。此外, 道路面层内嵌的 LED 灯光颜色随基层水位变化而变化, 可潜移默化引导公众培养节水意识。

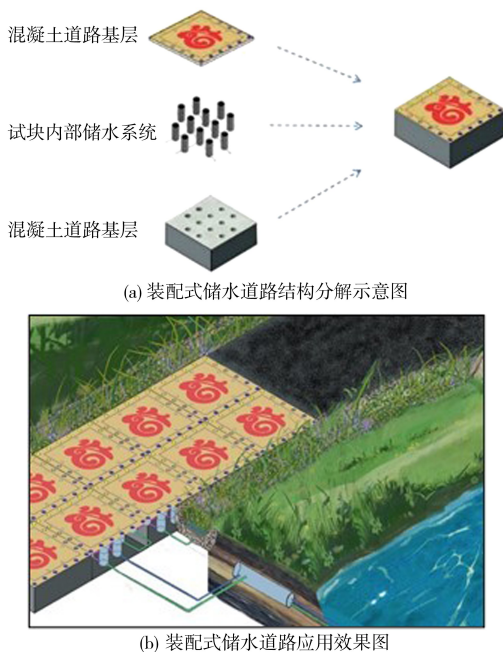


图 1 装配式储水道路应用示意图

Fig.1 Application diagram of prefabricated water-retaining roads

##### 3.1.2 数据收集

通过前期调研与现场检测, 本研究将相关定量指标的参数整理归纳至表 4。针对该试验路段, 基于其工程量清单和施工方案, 通过定额套价并汇总材料消耗量、机械台班等数据, 计算出施工能源消耗量与碳排放强度, 如式(1)~式(10)

所示。在专家评分环节,共发放线上问卷 120 份,有效回收率达 94.16%(回收 113 份)。参与专家构成如下:设计单位 22 人、施工单位 32 人、监理单位 23 人、咨询单位 28 人、科研单位 8 人。专家评分分布详见表 5。

表 4 装配式储水道路主要参数

Tab.4 Main parameters of prefabricated water-retaining roads

符号	取值	符号	取值
$r$	5 mm	$W_2$	0.41 m <sup>3</sup>
$W_4$	1.03 m <sup>3</sup>	$A_w$	0.094 2 m <sup>3</sup>
$F_c$	2.6 元/t	$F_r$	0.08 元/m
$T$	120 d	$W_3$	1.82 m <sup>3</sup>
$W_5$	35 m <sup>3</sup>	$e$	0.533 元/kW·h
$\alpha$	60 人·h	$D$	2 d
$\Delta\text{vapH}$	2 427 kJ	$T_1$	2 d
$C_o$	1 506.56 元/m <sup>3</sup>	$F_w$	1.4 元/t
$P_t$	20 人	$N$	30 a

表 5 专家评分分布

Tab.5 Expert rating distribution

定性指标	专家投票人数/人			
	可持续 性差 I	可持续性 一般 II	可持续性 较好 III	可持续性 优 IV
提高居住 舒适度 $C_1$	2	30	39	42
居民节水 意识培养 $C_2$	11	28	43	31
降低周边 噪声 $C_4$	5	49	28	31
提高城市 美化度 $C_5$	7	27	45	34

### 3.2 灰云模型构建

灰云模型的数字特征用峰值  $C_x$  表示,其左右界值( $L_x, R_x$ )表示,熵  $E_n$ ,超熵  $H_e$  等数值来表征。完整灰云的数字特征记为: $G=(L_x, R_x, C_x, E_n, H_e)$ 。在构建灰云模型的过程中,本研究基于多源数据<sup>[14-22]</sup>确定了灰云模型的左右界值( $L_x, R_x$ ),其中正向指标  $X_{\min}$  为左界值  $L_x, X_{\max}$  右界值  $R_x$ ,负向指标则反之。各指标左右界值如表 6 所示。

表 6 指标左右界值

Tab.6 Left/right boundary values of indexes

指标名称	指标属性	$X_{\max}$	$X_{\min}$
$A_1$ 城市降温效益	正向指标	11.508	3.596
$A_2$ 削减污染收益	正向指标	4.295	0.602
$A_3$ 雨水再利用效益	正向指标	4.758	0
$A_4$ 施工能源消耗	负向指标	64.72	25.963
$A_5$ 碳排放强度	负向指标	320	27.6
$B_1$ 全生命周期成本	负向指标	3780	2087.16
$B_2$ 施工区道路用户成本	负向指标	36	1
$B_3$ 节省城市管网运行费	正向指标	0.326	0.072
$B_4$ 装配式施工效率	正向指标	3.692	0.122
$C_1$ 提高居住舒适度	正向指标	92	82
$C_2$ 居民节水意识培养	正向指标	93	80
$C_3$ 带动当地绿色经济发展	正向指标	3528	0
$C_4$ 降低周边噪声	正向指标	92	80
$C_5$ 提高城市美化度	正向指标	93	72

以下是灰云模型各数字特征的关系:

$$C_x = \frac{L_x + R_x}{2} \quad (23)$$

$$E_n = \frac{R_x - L_x}{6} \quad (24)$$

$$H_e = \frac{E_n}{6} \quad (25)$$

式中,表示  $C_x$  表示峰值是隶属等级的中心,此处白化权等于 1。 $(L_x, R_x)$  为左右界值,表示区间的左右边界。 $E_n$  表示熵值,该值反映灰云边界是否模糊。 $H_e$  表示超熵,该值越大,灰云随机性越强。本研究采用  $[0, 1]$  区间对左右界值( $L_x, R_x$ )归一化处理,以消除量纲差异并实现多指标集成评价。然后依据装配式储水道路的可持续性指标及其属性,结合该道路的实际应用状况,确定可持续性评价等级,具体划分详见表 7。

表 7 可持续性指标灰云模型数字特征

Tab.7 Digital characteristics of sustainability index

grey cloud model				
可持续性等级	$[L_x, R_x]$	$C_x$	$E_n$	$H_e$
可持续性较差 I	$[0, 0.2]$	0.10	0.033	0.005
可持续性一般 II	$(0.2, 0.4)$	0.30	0.033	0.005
可持续性较好 III	$(0.4, 0.7)$	0.55	0.050	0.008
可持续性优秀 IV	$(0.7, 1]$	0.85	0.050	0.008

适度测度云模型:

$$f_{k1}(x_i) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x_i - C_x)^2}{2(E'_n)^2}\right], & x_i \in [L_x, R_x] \\ 0, & x_i \notin [L_x, R_x] \end{cases} \quad (26)$$

上限测度云模型:

$$f_{k2}(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \in [C_x, L_x] \\ \exp\left[-\frac{(x_i - C_x)^2}{2(E'_n)^2}\right], & x_i \in (L_x, C_x] \\ 0, & x_i \notin [L_x, R_x] \end{cases} \quad (27)$$

下限测度云模型:

$$f_{k3}(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \in [L_x, C_x] \\ \exp\left[-\frac{(x_i - C_x)^2}{2(E'_n)^2}\right], & x_i \in (C_x, R_x] \\ 0, & x_i \notin [L_x, R_x] \end{cases} \quad (28)$$

式中,  $E'_n$  服从以  $E_n$  为期望、 $H_e^2$  为方差的正态分布。

在对评价指标进行区间划分并确定左右界值后,本研究计算了各项指标的灰云数字特征,在确定评价指标具体的等级划分界限后,结合指标的灰云数字特征,进行 1 000 次白化权计算。利用 MATLAB 绘制的可持续性等级灰类图,如图 2 所示。

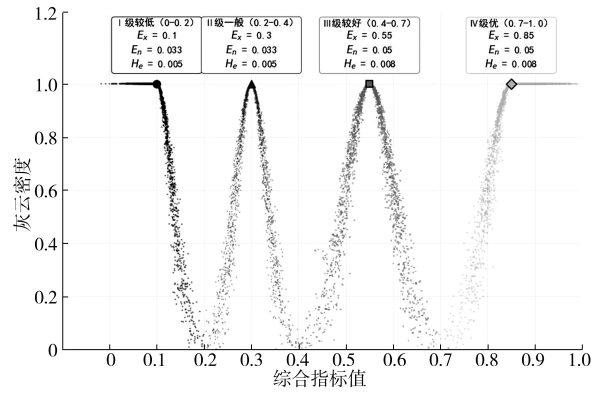


图 2 可持续性评价指标等级灰云模型

Fig.2 Grey cloud model of sustainability evaluation index levels

### 3.3 基于灰云模型的装配式储水道路可持续性评价结果

本研究将待评指标  $x_i$  相对于各可持续性等级的隶属度定义为灰云聚类系数。为得到最终评价结果,需计算综合灰云聚类系数。

#### 3.3.1 指标灰云聚类系数的计算

将各项指标的评价量化结果代入灰云聚类函数,求解各指标在第  $k$  个可持续性等级下的灰云白化值。为提高结果可信度,将重复计算后的白化权函数平均值作为最终的灰云聚类系数。各可持续性评价指标的灰云聚类系数计算结果见表 8。

表 8 装配式储水道路可持续性指标层灰云聚类系数

Tab.8 Grey cloud clustering coefficient of sustainability index layer of prefabricated water-retaining roads

指标名称	可持续性差 I	可持续性一般 II	可持续性较好 III	可持续性优 IV	评价结果
城市降温效益	0.002 4	0.018 1	0.037 6	0.003 8	III
削减污染效益	0.002 7	0.023 1	0.047 9	0.003 2	III
雨水再利用效益	0.003 4	0.021 4	0.045 0	0.005 0	III
施工能源消耗量	0.002 5	0.016 9	0.036 7	0.003 4	III
碳排放强度	0.001 4	0.011 2	0.044 3	0.015 3	III
全生命周期成本	0.003 4	0.026 6	0.044 1	0.004 6	III
施工区道路用户成本	0.002 5	0.019 2	0.033 3	0.003 8	III
节省城市管网运行费用	0.004 7	0.020 6	0.044 9	0.006 9	III
模块化施工	0.003 7	0.021 7	0.044 4	0.004 4	III
提高居住舒适度	0.003 3	0.020 5	0.039 0	0.004 6	III
居民节水意识培养	0.003 7	0.020 7	0.041 0	0.005 2	III
带动当地绿色经济发展	0.003 1	0.020 7	0.040 1	0.004 3	III
降低周边噪声	0.007 0	0.045 9	0.032 6	0.000 8	II
提高城市美化度	0.003 0	0.021 1	0.045 0	0.004 2	III

$$f_{\omega}^k(x_i) = \frac{1}{\omega} \sum_{\omega=1}^{1000} f_{\omega}^k(x_i) \quad (29)$$

$$\mu_i^k(x_i) = \frac{f_{\omega}^k(x_i)}{\sum_{k=1}^4 (f_{\omega}^k(x_i))} \quad (30)$$

式中,  $f_{\omega}^k(x_i)$  表示指标  $x_i$  在第  $k$  个可持续性等级下, 重复计算  $\omega$  次后的算数平均值,  $\omega$  取 1 000。  
 $\mu_i^k(x_i)$  表示指标  $x_i$  在第  $k$  个可持续性等级下的灰云聚类系数。

### 3.3.2 装配式储水道路可持续性评价等级的确定

将计算得到的灰云聚类系数与各安全评价指标的综合权重指标相结合, 即可得到待评目标的综合灰云聚类系数, 如式(31)所示。

$$\sigma_j^k = \sum_{i=1}^n \mu_i^k(x_i) \omega_i \quad (31)$$

式中,  $\sigma_j^k$  为待评目标相对第  $k$  个灰类的综合灰云聚类系数;  $\omega_i$  为第  $i$  项评价指标在评价体系中的组合权重。

根据上述步骤, 可计算出待评目标对应于各可持续性等级的综合灰云聚类系数, 并形成综合聚类向量  $\sigma_j = (\sigma_j^1, \sigma_j^2, \dots, \sigma_j^s)$ 。随后, 依据式(32)所示的最大灰云聚类系数原则, 判定待评对象所属的灰类等级  $k^*$ , 最终确定其可持续性等级。

$$\max_{1 \leq k \leq s} (\sigma_j^k) = \sigma_j^{k^*} \quad (32)$$

最后, 结合表 8 中各层指标的灰云聚类系数与对应组合权重, 计算出装配式储水道路的综合灰云聚类系数。

### 3.3.3 灰云模型评价结果分析

系统整体在可持续等级 III 上的灰云聚类系数最大, 表明其综合可持续性表现为“较好”, 如表 9 所示。评价结果显示, 该系统整体可持续性达到 III 级 (占比 81.8%)。其中, 环境可持续性的表现尤为突出, 每立方米装配式储水道路可产生 10.42 元的环境效益, 碳排放强度指标为 135.20 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 较传统现浇道路约降低 38%。但装配式储水道路也仍存在不足。一方面, 其功能主要集中于雨水储存, 未兼顾降噪等环境改善需求, 导致“降低周边噪声”指标仅达 II 级, 可持续性表现“一般”。另一方面, 该系统的全生命周期成本测算

值为 3 088.448 元/m<sup>2</sup>, 其中初期建造成本为 1 506.56 元/m<sup>3</sup>, 成本较高。这是由于装配式储水道路行业标准的制定与修订工作尚未完成, 生产、施工等环节缺乏统一规范, 进而增加了成本。

表 9 装配式储水道路可持续性评价层综合灰云聚类系数

Tab.9 Comprehensive grey cloud clustering coefficient of sustainability evaluation layer of prefabricated water-retaining roads

评价层	可持续 性差 I	可持续	可持续	可持续 性优 IV	评价 结果
		性一般 II	性较好 III		
环境可持续性 A	0.012 4	0.090 7	0.211 5	0.030 8	III
经济可持续性 B	0.014 3	0.088 1	0.166 7	0.019 7	III
社会可持续性 C	0.020 1	0.128 9	0.197 7	0.019 1	III
综合可持续性 D	0.046 8	0.307 7	0.575 9	0.069 6	III

### 3.4 蒙特卡洛模拟

该评价模型局限性主要源于技术新颖性, 但其框架可为后续多案例研究提供参考。为检验模型稳健性, 本研究采用蒙特卡洛模拟分析指标权重变动对评价结果稳定性的影响, 如图 3 所示。在模拟过程中, 随机抽取 30% 的评价指标, 对其组合权重施加 ±10% 至 ±20% 范围内的随机扰动, 并重复模拟 100 次迭代。

从图 3 可见, 环境、经济、社会可持续性隶属度数值基本重合, 表现出一定的稳定性。随着正向扰动从 10% 增至 20%, 环境可持续性在 III 级的隶属度从 0.59 升至 0.60, 经济可持续性在 III 级的隶属度从 0.61 微升至 0.62, 而社会可持续性则从 0.55 降至 0.54; 负向扰动下则呈现相反趋势。尽管隶属度随权重增减出现微小波动, 但 3 条曲线的峰值依旧在 III 级区域。此外, 各维度 III 级隶属度的最大偏离度均在 5% 以下。

结果表明, 当指标组合权重在 ±10% ~ ±20% 变动时, 环境、经济、社会各维度的可持续性隶属度在等级 III (较好) 区域仍保持较高稳定性, 表明模型对权重变化具有不敏感性。蒙特卡洛模拟结果验证了所构建评价体系具有较好的稳健性与适用性。

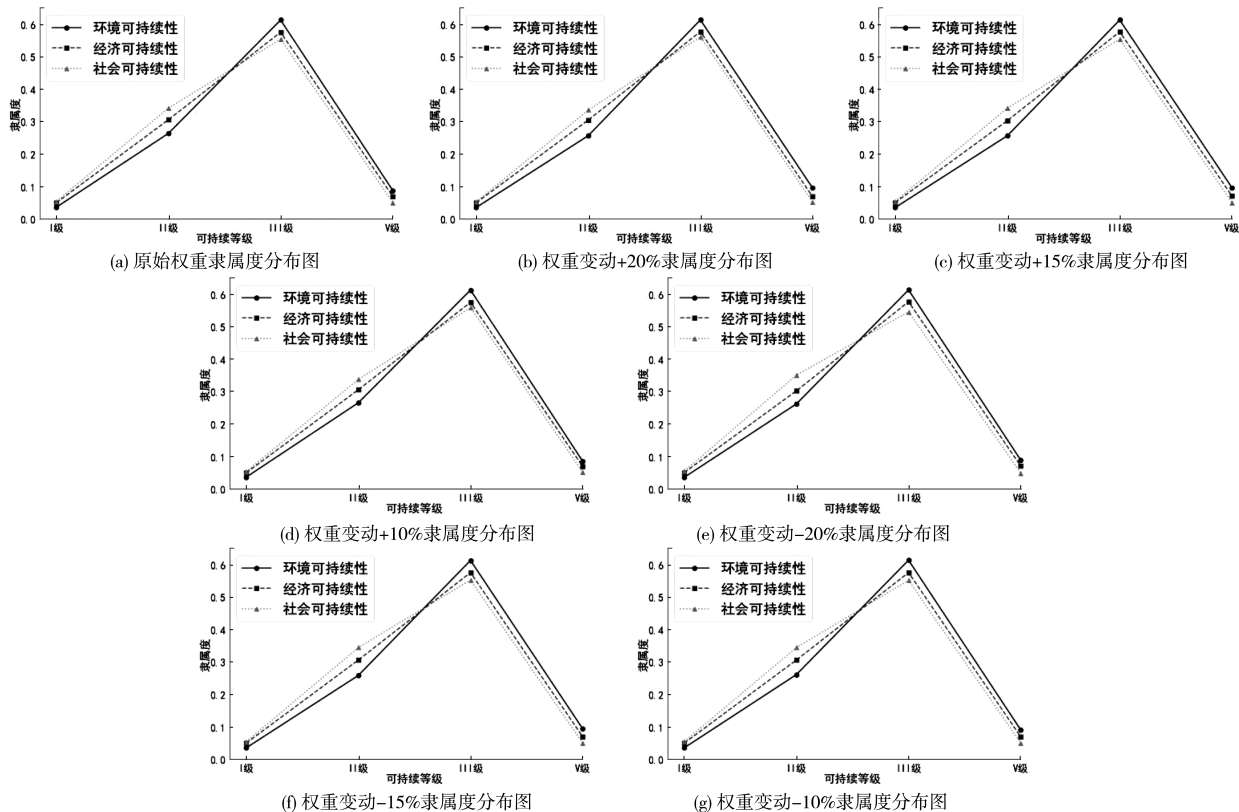


图3 指标权重变动隶属度变化

Fig.3 Membership variation under index weight perturbation

## 4 结束语

本研究构建了由环境、经济与社会3个可持续性准则层、共14项指标组成的装配式储水道路可持续性评价指标体系,并参照国内外现行标准,对各项指标进行了量化处理。将灰云模型理论引入装配式储水道路的可持续性评价中,建立了相应的可持续性评价模型。此外,通过蒙特卡洛模拟验证了所构建评价体系的稳健性:在随机抽取30%的指标并将其权重在 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 内扰动,重复迭代100次的条件下,各维度可持续性等级

均稳定维持在III级(较好),说明该模型对权重变化不敏感,具备稳健性和适用性,从而为装配式储水道路规模化、标准化发展奠定了基础。但装配式储水道路也仍存在不足之处,例如道路降噪等功能有待改善,在实现规模化与标准化之前建设成本较高等。后续研究在技术层面可探索路面降温、降噪等功能的复合设计,例如掺入吸声、降温等功能性材料制备路面板;在政策与行业管理层面,可积极推进相关行业标准的制定与完善,促进其规模化应用,为城市基础设施的绿色低碳转型提供系统性支撑。

## 参考文献:

- [1] 联合国环境规划署. 2022 年度报告[R]. 内罗毕: 联合国环境规划署, 2023.
- [2] 王俊岭, 张亚琦, 秦全城, 等. 一种新型透水铺装对雨水径流污染物的去除试验研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 643-652.
- [3] 于搏海, 施勇涛, 王贤萍, 等. 透水铺装透水性能的评价及养护技术研究[J]. 给水排水, 2020, 56(6): 102-106.
- [4] WU Y H, LI J Q, ZHANG X R, et al. A systematic field effectiveness evaluation of three maintenance measures for three permeable pavements[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 128821.
- [5] CHEN J Q, CHU R X, WANG H, et al. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117722.

- [6] BAO T, LIU Z, ZHANG X G, et al. A drainable water-retaining paver block for runoff reduction and evaporation cooling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228:418-424.
- [7] WANG J S, MENG Q L, ZOU Y, et al. Performance synergism of pervious pavement on stormwater management and urban heat island mitigation: a review of its benefits, key parameters, and co-benefits approach [J]. *Water Research*, 2022, 221:118755.
- [8] LIU Y, LI T, YU L. Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: a pilot-scale study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244:118938.
- [9] 王向英, 陈鹏飞, 杨超, 等. 装配式预制道路板性能的影响因素分析 [J]. *低温建筑技术*, 2019, 41(5):41-46.
- [10] 廖文清, 杨志, 王黎明, 等. 建筑工程现场装配式预制混凝土道路的构造与施工要点 [J]. *建筑技术*, 2019, 50(10):1252-1254.
- [11] 王世界, 陈炬. 混凝土预制道路创新施工方法研究 [J]. *产业科技创新*, 2024(4):63-66.
- [12] 仇荃, 王世举. 绿色可循环装配式道路面板的应用 [J]. *港工技术*, 2020, 57(6):88-91.
- [13] 黄建华, 张翔. 模糊熵与灰云模型在既有玻璃幕墙安全评价中的应用 [J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(4):1275-1283.
- [14] 中国工程建设标准化协会. 绿色建材评价 透水铺装材料: T/CECS 10228—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [15] 北京市规划和自然资源委员会. 海绵城市雨水控制与利用工程设计规范: DB11/ 685—2021 [S]. 北京: 北京市地方标准, 2022.
- [16] DINAH S. Stockholm Declaration (1972) and Rio Declaration (1992) [DB/OL]. (2008-07) [2025-12-19]. <https://opil.ouplaw.com/display/10.1093/law:epil/9780199231690/law-9780199231690-e1608?rskey=U4BTA5&result=1&prd=MPIL#>.
- [17] 李文英, 贾斌凯, 李怀恩, 等. 西安小寨商业区海绵城市改建效益货币化计算与分析 [J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 53(3):452-462.
- [18] 田敏, 任建民, 白亚军, 等. 海绵城市理念下兰州市雨水利用效益分析 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(8):49-53.
- [19] 仪明伟, 肖月, 林翔, 等. 沥青路面典型养护施工全过程直接能耗及碳排放量化分析 [J]. *材料导报*, 2024, 38(20):111-121.
- [20] 柯燕燕, 朱小珍, 彭东勤, 等. 全寿命周期视角下装配式建筑项目增量成本与增量收益研究 [J]. *建筑经济*, 2023, 44(12):41-46.
- [21] 何仁香, 王涌涛, 李劼, 等. 重庆市科学大道综合管廊建设经济效益分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(S2):536-542.
- [22] 刘霞光, 王振中, 吴宇翔, 等. 模块化与工期优化的再认识 [J]. *核科学与工程*, 2022, 42(3):570-578.

(责任编辑: 方素华)