

基于 IFS-TOPSIS 的预防性养护投资效益评价研究

郭旺达, 张金喜*, 张阳光, 王行, 牛亚男

(北京工业大学 城市交通学院 北京市交通工程重点实验室, 北京市 100124)

摘要:预防性养护投资效益评价对提高路面养护管理水平和优化养护决策机制,保障公路养护经济效益具有重要意义。为了探讨预防性养护投资效益分级评价,选取投资金额和养护干预前后路面技术状况评价指标变化值构成评价指标集合,综合考虑主观因素和客观因素组合赋权影响,提出基于直觉模糊集(IFS)和逼近理想解排序(TOPSIS)理论的预防性养护投资效益评价模型,并分析不同养护时机下投资效益的差异情况。该文以薄层罩面处治后的9个路段作为评价对象,研究结果表明:基于IFS-TOPSIS理论的评价方法通过贴近度相对大小准确给出预防性养护投资效益等级判定结果,并通过对比费效比评价结果验证了评价模型的可行性;确定预防性养护最佳时机是保障经济效益的关键。

关键词:道路工程;预防性养护;效益评价;直觉模糊集(IFS);逼近理想解排序评估方法(TOPSIS)

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

改革开放以来,中国交通基础设施建设成就世界瞩目。纵观近5年中国公路新建里程下降幅度显著,养护里程较公路总里程比重逐年上升,可见道路工程事业正处于由“建养并重”向“以养代建”的过渡阶段。根据交通运输部相关指示,推动建立现代公路养护管理体系是中国《“十三五”公路养护管理发展纲要》的重要战略目标,其重点在于能否通过路面技术状况进行公路养护预算申请和养护决策,寻求实现养护决策科学化和养护投资效益最大化^[1]。因此基于路面技术状况指标对养护投资效益进行量化评价,对路面养护管理工作的提质增效具有重要的现实意义。

预防性养护是一种在路面结构尚优而主动采取定期养护以维持路表功能的路面养护理念^[2]。对预防性养护后投资效益展开科学、客观、合理评价,将有助于养护决策者后续调整决策计划以及提高其管理水平,达到养护工程预期的经济效益。目前,国内外关于预防性养护投资效益评价研究方法大致可以分为确定型和概率型。其中确定型主要基于成本—效益^[3-4]、全生命周期^[5-6]等理论,通过建立路面性能衰变的经验方程,采用多目标规划等辅助手段对养护效益展开评价。但是实际工况中路面性能衰变^[7]情况往往不能通过线性方程准确表征,因此虞将苗等^[8]提出了基于生存模型的概率型评价方法,对设定的3种预防性养护

相关工况进行成本评价。上述研究虽然可取得预防性养护实质性经济评价结果,但是并未进一步给出相关评价等级的判定结果。

预防性养护效益评价过程中需要考虑多个指标和属性^[9],因此描述评价指标与评价等级关系的过程实质上可以理解为一种多属性决策问题。由于属性模糊性和指标不确定性,在实际决策过程中有可能干扰到最终的评价结果。直觉模糊集理论通过引入隶属度、非隶属度和犹豫度描述决策过程中产生的不确定性,反映了主观犹豫度水平^[10],因此直觉模糊理论被广泛引入多属性决策问题中^[11-13]。鉴于上述研究基础,该文针对效益评价中综合判定隶属不同等级评价指标存在模糊性,综合考虑主观、客观因素耦合影响,运用直觉模糊集(IFS)和逼近理想解排序(TOPSIS)理论相结合建立预防性养护投资效益评价模型,寻求通过投资效益优劣和等级判定指导路面养护决策。

1 评价体系及标准

预防性养护工程投资效益基于时间序列划分为短期效益与长期效益^[14]。如图1所示,短期效益甄别为采取预防性养护措施前后路面性能指标的变化情况,而长期效益评价还需要考虑在一定的寿命周期(Δt)

收稿日期:2020-11-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778027);北京市交通行业科技项目(编号:2018-kjc-01-213)

作者简介:郭旺达,男,硕士研究生, E-mail:591394510@qq.com

*通信作者:张金喜,男,教授,博士生导师, E-mail:zhangjinxi@bjut.edu.cn

视角下养护干预前后路况、交通荷载等变化产生的一系列社会效益和环境效益。但是实际工况中路面性能的非线性衰变和预养前后带来社会效益与环境效益的不确定性及其量化的准确性,都将对投资效益评价结果产生干扰。考虑到养护干预前后路面性能指标获取准确度较高,因此研究从短期效益角度出发对预防性养护投资效益展开评价。

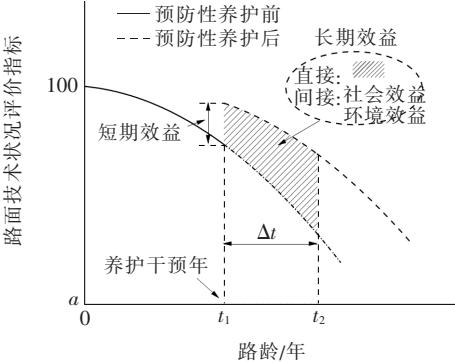


图1 预防性养护前后性能衰变曲线

1.1 评价体系

在评价体系建立过程中,充分考虑路面技术状况评定要求以及参考北京市沥青路面预防性养护技术指南,同时遵循指标易量化、能够客观反映预防性养护处治效果的基本原则,分别从投入、效益两个直接视角选取养护投资金额、养护干预前后表征路面技术状况、路面破损状况和路面行驶质量相关技术指标的变化值(ΔI_{PQI} 、 ΔI_{PCI} 和 ΔI_{RQI})4项评价指标组建预防性养护投资效益评价体系,如图2所示。

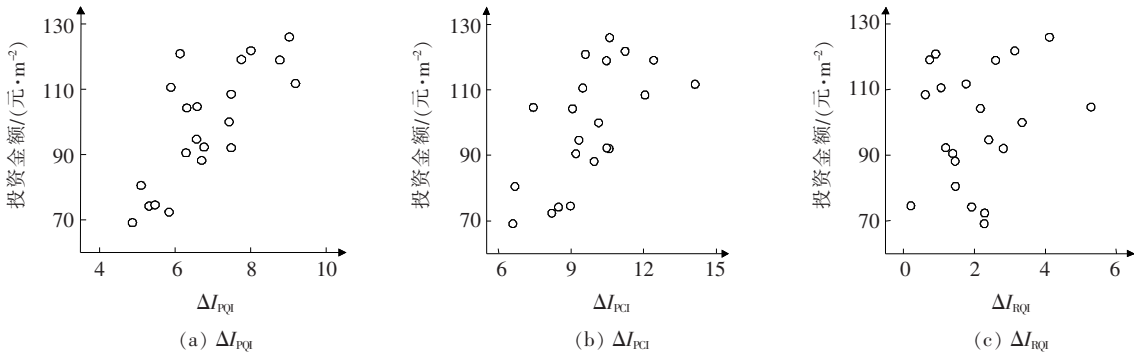


图3 不同评价指标分布情况

2 研究方法

2.1 直觉模糊集理论

设论域上非空集合 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 存在四维数组:

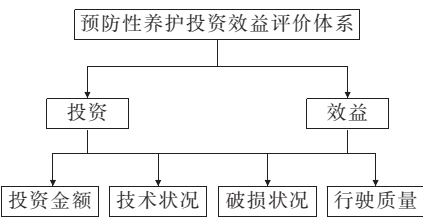


图2 预防性养护投资效益评价体系

1.2 评价等级划分标准

针对沥青路面不同病害类型和损坏程度,预防性养护具体处治措施可以分为微表处、薄层罩面、稀浆封层等^[14]。不同养护方式的投入资金以及养护效果不尽相同,因此该文仅针对薄层罩面处治措施的投资效益评价制定等级划分标准(后续“预防性养护”相关概念具体指薄层罩面养护措施)。通过整理相关建养历史数据,薄层罩面处治措施的投资金额以及处治前后各单项指标 ΔI_{PQI} 、 ΔI_{PCI} 和 ΔI_{RQI} 的分布情况见图3。根据图3将投资效益划分为I~Ⅲ三个等级。各个单项评价指标具体划分标准及对应等级描述如表1所示。

表1 投资效益分级标准

效益等级	投资金额/ (元·m ⁻²)	ΔI_{PQI}	ΔI_{PCI}	ΔI_{RQI}	说明
I	110~130	4~6	6~9	0~2	低
Ⅱ	90~110	6~8	9~12	2~4	中
Ⅲ	70~90	8~10	12~15	4~6	高

$$\tilde{A}=\{[x,\mu_{\tilde{A}}(x),v_{\tilde{A}}(x),\pi_{\tilde{A}}(x)]|x\in X\} \quad (1)$$
其中, x 对应映射 $\mu_{\tilde{A}}(x): \rightarrow [0,1], v_{\tilde{A}}(x): \rightarrow [0,1]$,使得: $x\in X|\mu_{\tilde{A}}(x): \rightarrow [0,1], x\in X|v_{\tilde{A}}(x): \rightarrow [0,1]$ (s. t. $0\leqslant \mu_{\tilde{A}}(x)+v_{\tilde{A}}(x)\leqslant 1$),则称 \tilde{A} 为 $\mu_{\tilde{A}}$ 和 $v_{\tilde{A}}$ 确定集合 X 上的一个直觉模糊集

(IFS)^[15]。 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 和 $v_{\tilde{A}}(x)$ 为 x 属于 \tilde{A} 的隶属度与非隶属度, $\pi_{\tilde{A}}(x)=1-\mu_{\tilde{A}}(x)-v_{\tilde{A}}(x)$ (s. t. $0\leq\pi_{\tilde{A}}(x)\leq 1$)为 IFS 的犹豫度,可以简单理解为支持、反对以及既不支持也不反对 x 属于 \tilde{A} 的 3 种观点。直觉模糊集一般简化表示为 $a=(\mu_a,v_a)$ (π_a 可省略),称二维数组 a 为直觉模糊数(IFN)。存在 IFN: $a=(\mu_a,v_a)$ 、 $b=(\mu_b,v_b)$,有和、积运算^[16]如式(2)、(3)所示:

$$a\oplus b=(\mu_a+\mu_b-\mu_a\mu_b,v_av_b) \tag{2}$$

$$a\otimes b=(\mu_a\mu_b,v_a+v_b-v_av_b) \tag{3}$$

2.2 IFS-TOPSIS 预防性养护投资效益评价模型构建

基于直觉模糊集与 TOPSIS 理论,针对预防性养护工程特点,提出一种 IFS-TOPSIS 方法对其投资效益按不同等级进行评价,评价流程如图 4 所示。

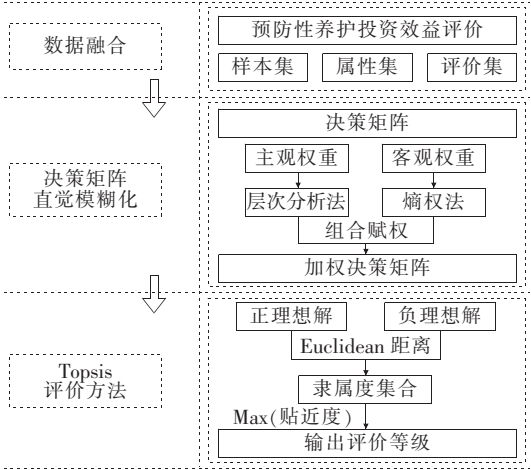


图 4 预防性养护投资效益评价流程

具体评价步骤如下:

(1) 数据整理与融合

确定用于预防性养护投资效益评价中的样本集 $P=\{p_k\}(k=1,2,\cdots,h)$,其评价属性 $X=\{x_m\}(m=1,2,\cdots,i)$ 对应的评价等级集合为 $S=\{s_n\}(n=1,2,\cdots,j)$ 。

(2) 建立直觉模糊化决策矩阵

根据式(4)、(5)计算样本 p_k 的评价指标 x_m 在等级 s_n 下的隶属度 μ_{mn} 和非隶属度 v_{mn} :

$$\mu_{mn}=\exp\left[-\frac{(x_m-c_{un})^2}{2\sigma_{\mu n}^2}\right] \tag{4}$$

$$v_{mn}=1-\exp\left[-\frac{(x_m-c_{\gamma n})^2}{2\sigma_{\gamma n}^2}\right] \tag{5}$$

式中: c_{un} 、 $c_{\gamma n}$ 、 $\sigma_{\mu n}^2$ 、 $\sigma_{\gamma n}^2$ 为计算所需的间接变量,其计算方式如表 2 所示。

表 2 间接变量计算公式

变量	满足条件		
	$\overline{s}_n=S_{\max}$	其他	$\underline{s}_n=S_{\min}$
c_{un} 、 $c_{\gamma n}$	\overline{s}_n	$\frac{\overline{s}_n+s_n}{2}$	\underline{s}_n
$\sigma_{\mu n}^2$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{un})^2}{2\ln\left(\frac{1-\pi}{2}\right)}$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{un})^2}{2\ln\left(\frac{1-\pi}{2}\right)}$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{un})^2}{2\ln\left(\frac{1-\pi}{2}\right)}$
$\sigma_{\gamma n}^2$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{\gamma n})^2}{2\ln\left(1-\frac{1-\pi}{2}\right)}$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{\gamma n})^2}{2\ln\left(1-\frac{1-\pi}{2}\right)}$	$-\frac{(\overline{s}_n-c_{\gamma n})^2}{2\ln\left(1-\frac{1-\pi}{2}\right)}$

注: S_{\max} 、 S_{\min} 为评价等级上、下边界值; \overline{s}_n 、 \underline{s}_n 为 s_n 对应区间的上、下界值。

则直觉模糊化的多属性决策矩阵表示为:

$$F_{i\times j}=\begin{bmatrix}(\mu_{11},v_{11}) & \cdots & (\mu_{1j},v_{1j}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (\mu_{i1},v_{i1}) & \cdots & (\mu_{ij},v_{ij}) \end{bmatrix} \tag{6}$$

(3) 确定评价属性权重

基于层次分析法和熵权法确定预防性养护效益评价中各个评价指标属性的主观权重 $\theta=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_i)^T$ 和客观权重 $\varphi=(\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_i)^T$,评价属性直觉模糊化的组合权重表示为:

$$w_m=\langle(\rho_m,\tau_m)\rangle=\langle\min(\theta_m,\varphi_m),1-\max(\theta_m,\varphi_m)\rangle \tag{7}$$

在满足 $0\leq\rho_m+\tau_m\leq 1$ 条件下, ρ_m 、 τ_m 分别为 $x_m\in X$ 的隶属度和非隶属度。

(4) 评价矩阵加权模糊化

将模糊化权重分配给投资效益评价矩阵 $F_{i\times j}$ 得到加权投资效益评价矩阵 $\overline{F}_{i\times j}$:

$$\overline{F}_{i\times j}=\omega\otimes F_{i\times j}=\langle(\overline{u}_{mn},\overline{v}_{mn})\rangle_{i\times j}=\langle(\rho_m\mu_{mn},v_{mn}+\tau_m-\tau_m v_{mn})\rangle_{i\times j} \tag{8}$$

(5) 确定养护投资效益正、负理想值

搜索加权多属性投资效益评价后将正、负理想解(A^+ 、 A^-)的直觉模糊集形式表示为:

$$\begin{cases} A^+=\langle(u_1^+,v_1^+),(u_2^+,v_2^+),\cdots,(u_i^+,v_i^+)\rangle^T \\ A^-=\langle(u_1^-,v_1^-),(u_2^-,v_2^-),\cdots,(u_i^-,v_i^-)\rangle^T \end{cases} \tag{9}$$

式中: u_m^+ 、 v_m^+ 、 u_m^- 、 v_m^- 分别取:

$$\begin{cases} u_m^+=\max(\overline{u}_{m1},\overline{u}_{m2},\cdots,\overline{u}_{mj}) \\ v_m^+=\min(\overline{v}_{m1},\overline{v}_{m2},\cdots,\overline{v}_{mj}) \\ u_m^-=\min(\overline{u}_{m1},\overline{u}_{m2},\cdots,\overline{u}_{mj}) \\ v_m^-=\max(\overline{v}_{m1},\overline{v}_{m2},\cdots,\overline{v}_{mj}) \end{cases} \tag{10}$$

(6) 计算贴近度

定义 Euclidean 距离为距离测度标准。根据模型设定测度按照式(11)计算样本 p_k 与不同等级投资效

益的正、负理想值距离,并按照式(12)确定相应的贴近度集合 $R = \{r_n\} (n = 1, 2, \cdots, j)$ 。

$$D_2(s_n, A^\pm) = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{m=1}^i [(\bar{u}_{mn} - u_m^\pm)^2 + (\bar{v}_{mn} - v_m^\pm)^2 + (\bar{\pi}_{mn} - \pi_m^\pm)^2]}$$

(11)

式中: $\bar{\pi}_{mn} = 1 - \bar{u}_{mn} - \bar{v}_{mn}$; $\pi_m^\pm = 1 - u_m^\pm - v_m^\pm$ 。

$$r_n = \frac{[D_2(s_n, A^-)]^2}{[D_2(s_n, A^+)]^2 + [D_2(s_n, A^-)]^2}$$

(12)

式中: r_n 为评价对象 p_k 在评价等级 s_n 上的贴近度。其中 $0 \leq r_n \leq 1$, r_n 值越大说明评价对象越接近该等级下的理想值,即确定评价对象隶属于该等级。

(7) 完成综合评价等级判定

选择 $(r_n)_{\max}$ 对应的等级 s_n 输出为评价对象 p_k 的等级评价结果。

素干扰,该研究所选待评项目由同一养护施工单位进行养护处治。由于研究样本数据的处治年份不在同一时间维度,需要考虑时间对人民币现值的影响^[17]。因此,按照式(13)将其余年份投资金额统一折现到 2011 年,分别对 9 个待评对象从 1~9 进行编号,相关指标数据集如表 3 所示。

$$M = N \times (1 + i_{dis})^{-n}$$

(13)

式中: M 为投资折现值; N 为投资金额; i_{dis} 为折现率(参考文献[13]中折现率取 2%); n 为年份间隔。

3 评价实例

3.2 评价实证

3.1 数据准备

研究选取北京市经过薄层罩面处治的 9 个二、三级公路工程项目作为评价对象进行预防性养护投资效益评价,其中路面使用性能数据检测由自动化检测设备 ARAN4900 型道路综合检测系统完成,养护数据来源于相关单位建养投资计划。为排除施工技术水平因

根据式(4)、(5)确定各评价指标的隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 与非隶属度 $v_{\tilde{A}}(x)$ 函数曲线见图 5。由图 5 可知:每个等级区间下均存在 3 条与之对应的隶属(非隶属)曲线,其中位置最高(低)者为该等级区间下的主曲线,位置较低(高)的 2 条曲线(分别作为另外 2 个等级区间的主曲线)为副曲线。因此每个单项指标均可确定 3 组由隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 与非隶属度 $v_{\tilde{A}}(x)$ 组成的直觉模糊数 $\tilde{A}_{mn} = (\mu_{mn}, v_{mn})$ 。

表 3 投资效益评价数据集

项目 编号	预养前路面性能指标值			预养后路面性能指标值			投资/(元·m ⁻²)		检测时 间/年	公路 等级
	I_{PQI}	I_{PCI}	I_{RQI}	I_{PQI}	I_{PCI}	I_{RQI}	实际	折现		
1	90.07	89.53	94.50	98.84	100.00	97.10	118.9	118.9	2011	二级
2	90.75	89.27	93.71	97.45	99.23	95.17	91.7	88.1	2013	三级
3	89.75	88.95	92.83	98.77	99.55	96.95	96.7	92.9	2013	二级
4	90.74	88.76	93.71	98.74	100.00	96.85	129.3	121.8	2014	三级
5	88.82	85.19	94.28	98.01	99.31	96.04	118.6	111.7	2014	二级
6	90.31	90.33	90.28	96.89	97.77	95.57	101.4	93.7	2015	二级
7	90.99	88.46	94.79	97.76	98.94	95.98	99.9	92.2	2015	二级
8	91.55	88.64	95.90	97.02	97.62	96.11	80.7	74.5	2015	二级
9	89.01	88.50	90.24	98.49	99.09	95.06	102.8	95.0	2015	二级

以项目编号 1 为算例,分别求出各单项评价指标对应 3 个等级下的直觉模糊数 $\tilde{A}_{mn} = (\mu_{mn}, v_{mn})$,组成相应的模糊决策矩阵 F_1 :

$$F_1 =$$

$$\begin{bmatrix} (0.755, 0.145) & (0.038, 0.840) & (0.004, 0.953) \\ (0.005, 0.945) & (0.057, 0.797) & (0.706, 0.176) \\ (0.000, 1.000) & (0.997, 0.002) & (0.471, 0.342) \\ (0.213, 0.578) & (0.864, 0.078) & (0.071, 0.772) \end{bmatrix}$$

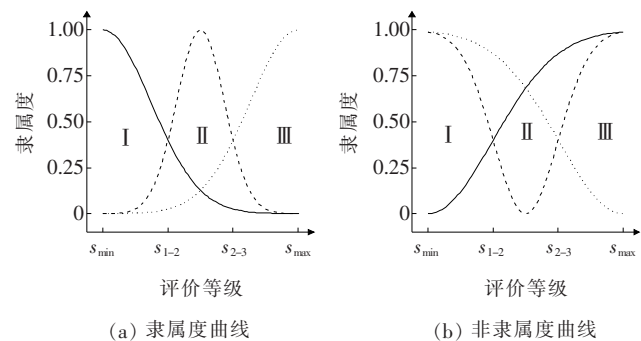


图 5 隶属度与非隶属度函数曲线图

基于熵权法计算出待评数据集的客观权重 $\theta = (0.416, 0.274, 0.168, 0.142)^T$, 结合层次分析法给出的主观权重 $\varphi = (0.375, 0.250, 0.250, 0.125)^T$, 确定组合赋权下直觉模糊集:

$$\tau_w = \begin{bmatrix} (0.375, 0.583) \\ (0.250, 0.726) \\ (0.168, 0.750) \\ (0.125, 0.858) \end{bmatrix}$$

确定项目 1 的加权直觉模糊评价矩阵 \bar{F}_1 并得到正理想解 A^+ 、负理想解 A^- 的直觉模糊集:

$$\bar{F}_1 = \begin{bmatrix} (0.283, 0.644) & (0.014, 0.933) & (0.002, 0.980) \\ (0.001, 0.985) & (0.014, 0.944) & (0.177, 0.774) \\ (0.000, 1.000) & (0.167, 0.750) & (0.079, 0.836) \\ (0.027, 0.940) & (0.108, 0.870) & (0.009, 0.968) \end{bmatrix}$$
$$A^+ = \begin{bmatrix} (0.283, 0.644) \\ (0.177, 0.774) \\ (0.167, 0.750) \\ (0.108, 0.870) \end{bmatrix} \quad A^- = \begin{bmatrix} (0.002, 0.980) \\ (0.001, 0.985) \\ (0.000, 1.000) \\ (0.009, 0.968) \end{bmatrix}$$

根据式(11)计算项目 1 不同等级下的正理想值距离 $D_2(s_n, A^+)$ 与负理想值距离 $D_2(s_n, A^-)$, 并由式(12)计算出不同等级对应的贴近度 r_n , 相关计算结果如表 4 所示。

表 4 项目 1 计算结果

评价等级	$D_2(s_n, A^+)$	$D_2(s_n, A^-)$	r_n	隶属等级
s_1	0.304	0.314	0.515	✓
s_2	0.326	0.248	0.366	
s_3	0.339	0.242	0.337	

参考项目 1 实证过程, 完成所有样本评价计算并将评价结果汇总如表 5 所示。由表 5 可知: 项目 1、4 预防性养护投资效益等级判定为低; 项目 2、6、7 的投

资效益评级为中等; 项目 3、5、8、9 在养护干预后获得效益等级为高。为验证 IFS-TOPSIS 评价模型的可行性, 将其评价结果与参考文献[3]中费效比评价法的评价结果进行对比, 结果见图 6。由图 6 可知: 除项目 5、6 的费效比计算结果略低外, IFS-TOPSIS 与费效比模型评价结果基本一致, 验证了 IFS-TOPSIS 评价法的可行性。

表 5 评价结果汇总

项目编号	s_1	s_2	s_3	隶属等级
1	0.515	0.366	0.337	I
2	0.094	0.889	0.548	II
3	0	0.723	0.811	III
4	0.704	0.202	0.234	I
5	0.319	0.178	0.681	III
6	0.161	0.856	0.142	II
7	0.078	0.948	0.362	II
8	0.234	0.016	0.766	III
9	0	0.648	0.691	III

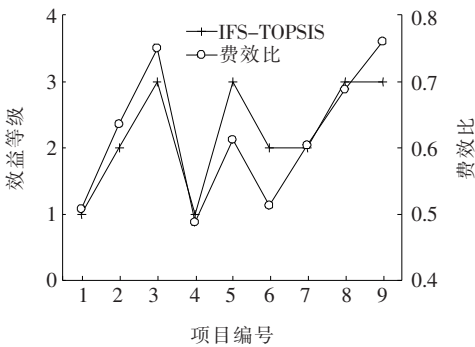


图 6 评价结果对比

根据北京市沥青路面预防性养护技术指南, 将 PCI 作为沥青路面预防性养护效果的主要评价指标进行如下分析: 对比项目 5 和项目 9 可知: 拥有近似相等隶属条件下项目 5 的投资金额比项目 9 增加 17.58%, 二者对应预养时机分别为 85.19、88.50, 说明推迟预防性养护时机后保持投资效益最佳平衡需要更多的资金投入; 项目 6 的预养处治时机(90.33)早于项目 9(88.5), 在投入资金相差不大的情况下项目 9 的投资效益评级反而优于项目 6, 表明养护时机过早会造成养护资金的浪费。上述分析说明评价结果符合实际工况, 过早或过晚地进行预防性养护干预都无法获取最佳投资效益, 确定最佳养护时机是保障公路预防性养护经济效益的关键。

4 结论

(1) 依据二、三级公路沥青路面评定标准及相关检测要求,确定投资金额、 ΔI_{PQI} 、 ΔI_{PCI} 及 ΔI_{RQI} 组建预防性养护投资效益的评价体系,并基于 IFS-TOPSIS 理论提出一种预防性养护投资效益的等级评价方法。该方法利用直觉模糊理论有效处理多指标评价体系在等级界定时产生的模糊性和不确定性,使得养护投资效益评价结果更加符合决策的思维过程。

(2) 通过利用熵权法计算出 4 个指标的权重大小为 0.416、0.274、0.168、0.142,说明养护投资金额多少对于预防性养护投资效益的评价结果影响最大,路面技术状况指标、路面破损指标变化大小对其影响次之,路面行驶质量指标变化值对评价结果的影响最弱。

(3) IFS-TOPSIS 模型考虑主观权重(层次分析法)和客观权重(熵权法)组合赋权的影响,基于不同等级区间下样本与最佳投资效益正、负理想解的贴近程度,准确识别出 9 个待评项目的隶属等级,并通过费效比计算结果验证模型的可行性。评价结果表明确定最佳养护时机是保障公路预防性养护经济效益的关键。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. “十三五”公路养护管理发展纲要[R/OL]. 2016;12—13[2020-2-26]. <http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/glj/201702/P020180117359018103459.pdf>
- [2] 吉增晖. 沥青路面预防性养护技术综述与探讨[J]. 公路, 2015,60(12):56—63.
- [3] 章静敏,薛文,陈立文. 费用效益模型在公路养护经济决策中的应用研究[J]. 河北工业大学学报, 2009,38(3):77—80.
- [4] Mamlouk M S, Dosa M. Verification of Effectiveness of Chip Seal as a Pavement Preventive Maintenance Treatment Using LTPP Data[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014,15(10):879—888.

- [5] 姚玉玲,任勇,陈拴发. 沥青路面的预防性养护时机[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006,26(6):34—38.
- [6] 陈文,黄能,何若夫,等. 基于寿命周期分析的项目级路面养护决策应用研究[J]. 中外公路, 2019,39(5):64—68.
- [7] 周育名,李金明,李平,等. 考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法[J]. 中外公路, 2019,39(1):34—39.
- [8] 虞将苗, Lee C, 陈磊磊. 基于生存模型的沥青路面预防性养护经济性评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012,40(11):133—137.
- [9] 凌天清,陈巧巧,崔立龙. 基于区间数 TOPSIS 法的路面最优预养护方案决策[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018,33(2):34—40.
- [10] 郭凯红,程锦云,牟有静. 基于知识测度的区间直觉模糊多属性群决策方法[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2019,46(4):365—380.
- [11] 尹鑫,王迎超,高杰,等. 基于直觉模糊集的膨胀土胀缩性评价[J]. 土木工程学报, 2018,51(5):103—111.
- [12] 张立彪,汪明武,李彪,等. 基于直觉-TOPSIS 理论的路面性能评价模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018,41(7):934—938.
- [13] NIE Mingxin, LI Yanglong. Application of Intuition-TPOSIS Model in Pavement Performance Evaluation [C]. Proceedings of 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019), 2019.
- [14] CHEN Xueqin, ZHU Hehua, DONG Qiao, et al. Optimal Thresholds for Pavement Preventive Maintenance Treatments Using LTPP Data[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2017,143(6):1—9.
- [15] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [16] 潘鹏程,王红倩. 基于直觉模糊集的公路 PPP 项目物有所值评价[J]. 公路交通科技, 2018,35(5):142—150.
- [17] 张敏,周博闻,张驰. 基于“成本—效益”指标的沥青路面大修技术评价体系[J]. 中国科技论文, 2013,8(11):1 100—1 104.