

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023070223081975

文章编号:1674-599X(2023)04-0009-08

引用格式:吴传海,杨艺,王旺,等.基于病害特征的湿热地区公路沥青路面破损状况评价研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):9-16.

Citation: WU Chuanhai, YANG Yi, WANG Wang, et al. Research on pavement surface condition index based on surface damage characteristics of asphalt pavements in hot and humid region[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 9-16.

# 基于病害特征的湿热地区公路沥青路面破损状况评价研究

吴传海<sup>1</sup>, 杨艺<sup>2</sup>, 王旺<sup>1</sup>, 蔡扬发<sup>1</sup>, 杨海明<sup>2</sup>

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广东交科技术研发有限公司, 广东 广州 510550)

**摘要:** 针对目前规范中的路面损坏状况指数PCI存在部分地区不适用、难以指导养护决策等问题, 该研究通过调研广东省公路沥青路面的损坏状况, 基于湿热地区公路沥青路面病害特征, 提出路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ , 其包括横向裂缝状况指数 $I_{PCI,t}$ 、纵向裂缝状况指数 $I_{PCI,l}$ 、坑槽修补状况指数 $I_{PCI,p}$ 和其余破损状况指数 $I_{PCI,a}$ ; 建立基于不同沥青路面基层类型的横向裂缝评价模型和基于不同成因的纵向裂缝评价模型; 分项指标权重采用包含动态客观权重和病害属性权重的组合权重, 并将这两种权重视为被加权项, 采用熵权理论计算组合权重; 最后基于实际项目, 对比 $I_{PCI,n}$ 和PCI的评价结果, 分析规范指标和 $I_{PCI,n}$ 推荐养护措施与实际养护措施的差别。研究结果表明: $I_{PCI,n}$ 评定结果符合实际路况, 其养护方案制定效率更高, 针对性更强。

**关键词:** 路面损坏状况综合指数; 横向裂缝状况指数; 纵向裂缝状况指数; 湿热地区; 组合权重; 养护决策

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

## Research on pavement surface condition index based on surface damage characteristics of asphalt pavements in hot and humid region

WU Chuanhai<sup>1</sup>, YANG Yi<sup>2</sup>, WANG Wang<sup>1</sup>, CAI Yangfa<sup>1</sup>, YANG Haiming<sup>2</sup>

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China;

2. Guangdong Jiaoke Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou 510550, China)

**Abstract:** To address the issues of inapplicability and difficulty in providing maintenance decisions using the pavement condition index (PCI) in the current specification, this study investigates the damage condition of asphalt pavements on highways in Guangdong Province. Based on the characteristics of the damaged asphalt pavements, several damage condition indices are proposed, including PCI for overall damage ( $I_{PCI,n}$ ) including PCI for transverse cracks ( $I_{PCI,t}$ ), PCI for longitudinal fissures ( $I_{PCI,l}$ ), PCI for pothole repair condition ( $I_{PCI,p}$ ), and other damage condition indices ( $I_{PCI,a}$ ). Additionally, evaluation models for transverse crack assessment based on different asphalt pavement base types and longitudinal crack assessment based on different causes are established. Sub-index weights are determined using a combination of dynamic objective weights and damage attribute weights. These two types of weights are then treated as weighted terms and computed using entropy weight theory. Finally, based on actual projects, a comparison is made between  $I_{PCI,n}$  and PCI evaluation results. The differences between the recommended maintenance measures of  $I_{PCI,n}$  and the actual maintenance measures are analyzed against the specification indices. This research demonstrates that the assessment results of  $I_{PCI,n}$  align with the actual road conditions, resulting in higher efficiency and greater specificity in formulating maintenance plans.

**Key words:** pavement surface condition comprehensive index; transverse cracks condition index; longitudinal cracks condition index; hot and humid region; combination weight; maintenance decisions

收稿日期: 2023-07-02

基金项目: 广东省交通集团有限公司项目“基于三维全息技术的路面结构与表面功能数字化养护研究及应用示范”(JT2023YB15); 广东省省级科技计划项目(2021B1111610002)

作者简介: 吴传海(1975—), 男, 广东华路交通科技有限公司教授级高级工程师, 博士。

路面性能评价体系是公路养护管理的基础,从决策单元划分、路面性能预测、养护时机判断到养护措施选择,都离不开一套科学合理的路面性能评价体系。中国当前采用路面损坏状况指数PCI对损坏情况作出综合评价,评价内容包括路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能、磨耗、跳车及路面结构强度<sup>[1]</sup>。其中,路面损坏状况指数PCI是路面损坏的综合性评价指标,但无法从该指标分值反映出病害类型。以广东省为代表的湿热地区,公路沥青路面病害多为横、纵向裂缝。当横、纵向裂缝经过修补,权重值将大幅下降,使得评价结果与实际路况不符。同时,横、纵向裂缝成因不同,修补后均计入条状修补,难以根据指标分值提出针对性养护措施。

目前,国内针对PCI评价模型的研究主要从2个层面出发:

1) 考虑路况等级边界模糊性的数学评价方法,如模糊数学方法<sup>[2]</sup>、灰色聚类方法<sup>[3]</sup>、集对分析方法<sup>[4]</sup>、未确知度理论<sup>[5]</sup>、神经网络算法<sup>[6]</sup>、支持向量机<sup>[7]</sup>等。此类方法用于路面性能评价时,其核心思想是对指标参数进行聚类分析。这种方法抛弃了既往固定的指标计算公式,通过概率判定指标的分

值和等级。这些方法在一定程度上提高了指标评定结果的合理性,但没有从根本上解决PCI难以因地制宜地制定养护方案的问题。

2) 修正现有指标评价体系的计算公式。倪富健等<sup>[8]</sup>研发的高速公路路面养护管理决策支持系统是基于江苏省高速公路重新建立的路面性能评价体系。李海莲<sup>[9]</sup>基于该指标体系,综合甘肃省高速公路路表病害特征,构建了西北寒旱地区的高速公路评价指标权重。另有部分学者研究认为现有指标评价体系的局限性主要源于PCI。因此,将PCI划分为横向裂缝、路面表面损坏和路面修补3个部分<sup>[10]</sup>。

部分地方的养护标准根据区域特性对路况评定标准进行了调整,具体地方标准和其调整内容见表1。此类研究多针对相应省份病害特征来建立或修正指标体系,提高了养护决策的便捷性。但各省份道路病害及其成因不同,对应的指标体系并不适用于湿热地区公路沥青路面路况评价。

因此,本研究基于湿热地区公路沥青路面病害,拟建立一套路面损坏状况指标体系,以期帮助路面管养人员快速、简便地制定路面养护方案。

表1 现行地方标准

Table 1 Local standards

地方标准	省份	调整内容
《高速公路沥青路面养护指南》 (DB34/T 2748—2016)	安徽省	① 新建PQI、PCI、RQI、RDI和PSSI的计算公式;PCI细化为横向裂缝、路面修补、路面表面损坏3项分项指标; ② 沥青路面路表破损类型增加唧浆病害;修补损坏权重根据轻重程度分别为0.1和0.2。
《内蒙古自治区公路沥青路面技术状况评定标准》 (DB15/T 1469—2018)	内蒙古自治区	① 沥青路面损坏类型新增拱胀,根据轻重程度权重分别为0.6和1.0; ② 修补权重降低为0.05; ③ PCI的计算公式中,各指标权重均采用动态权重。
《四川省高速公路沥青路面养护管理技术指南》 (2018)	四川省	养护决策参考方案中,新增指标:单车道网裂面积率、单车道修补面积率。
《高速公路沥青路面养护设计指南》 (DB51/T 2603—2019)	四川省	要求路面检测时,统计路面破损率、单车道网裂面积率、单车道修补面积率、纵向裂缝率和横向裂缝率等参数。
《广东省公路预防养护技术指南(试行)》(2020)	广东省	根据破损的种类和严重程度,将沥青路面损坏类型划分成4个部分: ① PCI-1:轻度纵向裂缝、横向裂缝; ② PCI-2:松散、修补、泛油; ③ PCI-3:轻度、中度龟裂; ④ PCI-4:重度龟裂、轻度块状裂缝、重度块状裂缝、重度纵向裂缝、坑槽、沉陷、波浪拥包。
《高速公路沥青路面预防养护技术规程》 (DB42/T 1765—2021)	湖北省	① 根据破损的种类,将沥青路面损坏类型划分成三个部分,分别为裂缝类病害、表面类病害和变形类病害; ② 修补权重提高为0.2。

# 1 湿热地区公路沥青路面病害特征分析

湿热地区是指中国光、热、水资源丰富的地区,雨热同季。受特殊气候及地质条件的影响,公路沥青路面易出现横向裂缝、纵向裂缝、坑槽等病害。本研究选取以广东省为代表的湿热地区的典型公路项目的31个路段,共计3 316 km。统计分析2022年三种典型路面结构的路表损坏信息,结果分别如图1~2所示。

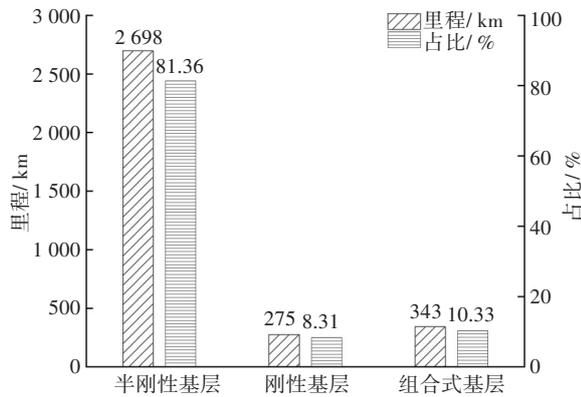
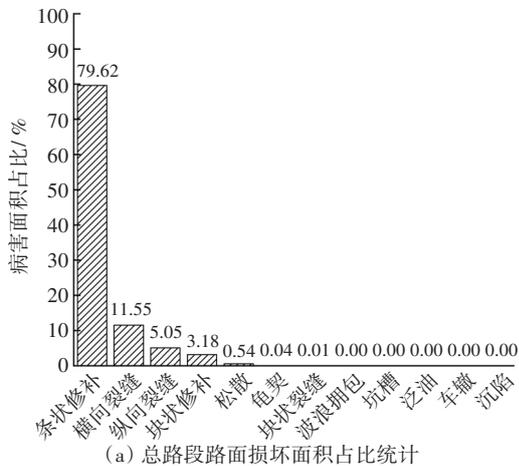
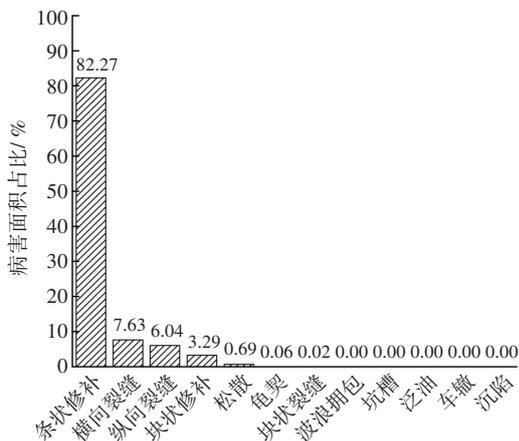


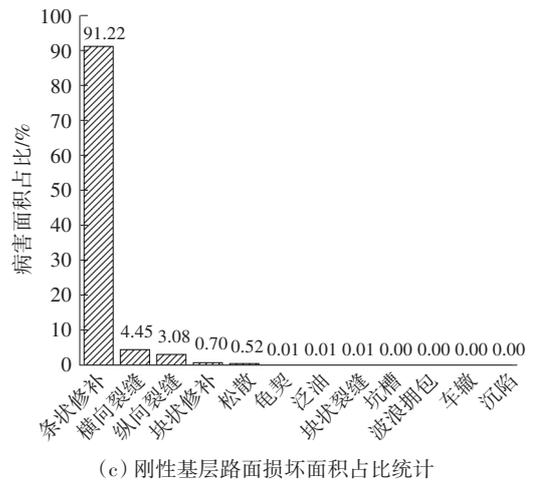
图1 路段里程统计



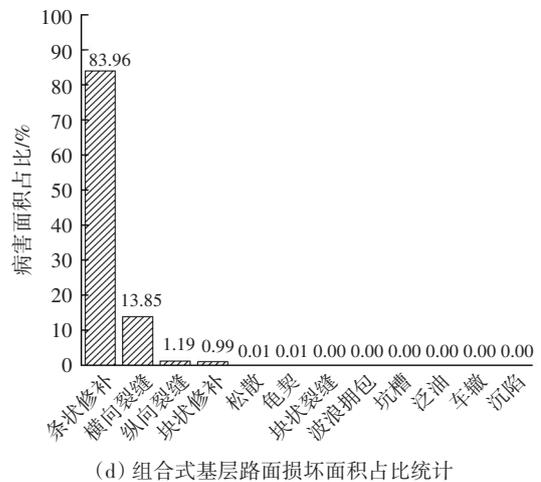
(a) 总路段路面损坏面积占比统计



(b) 半刚性基层路面损坏面积占比统计



(c) 刚性基层路面损坏面积占比统计



(d) 组合式基层路面损坏面积占比统计

图2 路面损坏面积占比统计

Fig. 2 Statistics of pavement damage area proportion

从图1~2可以看出:

1) 湿热地区公路沥青路面损坏类型以条状修补为主,占比高达79.62%,其次为横向裂缝、纵向裂缝、块状修补,三者占比合计99.40%,其余损坏占比低于1.00%。

2) 对比这三种典型路面结构的路表损坏类型,半刚性基层沥青路面损坏类型中以条状修补、横向裂缝、纵向裂缝三者占比最高,共占比为95.94%;刚性基层沥青路面的基层存在切缝,以条状修补和横向裂缝两者占比最高,两者共占比为95.67%;而组合式基层沥青路面,占比最高的损坏类型为条状修补和块状修补,两者共占比为97.81%。

## 2 路面损坏状况分项评价指标构建

### 2.1 现行规范PCI指标分析

在《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)<sup>[1]</sup>中,沥青路面损坏类型(包含损坏程度)共21

种,采用累计扣分法计算PCI。根据本研究沥青路面病害特征分析,发现湿热地区公路沥青路面损坏以块状修补和横、纵向裂缝为主,而修补权重仅为重度病害的0.1。因此,由PCI的评价结果并不能反映实际公路沥青路面的问题。假设某路段仅存在长度为3.75 m、间距为9.50 m的重度横向裂缝,路段修补后,PCI评价等级为优。

在该案例中,该路段的PCI为92.11。在《公路沥青路面养护技术规范》(JTG 5142—2019)中,当PCI大于90时,可采用含砂雾封层养护,但该路段横向裂缝密集,采用含砂雾封层并不适用。这表明通过PCI无法直接明确路段主导病害,也无法知道病害分布特征,更无法直接制定养护措施。

### 2.2 路面损坏状况分项评价指标

在养护决策过程中,若评价结果能直接体现路段主导病害,决策的烦琐程度将大大降低。从调研广东省公路沥青路面的损坏状况发现,湿热地区公路沥青路面损坏以条状修补、横向裂缝、纵向裂缝和块状修补为主;在雨季时,沥青路面存在坑槽病害暴发的可能性。因此,构建基于湿热地区沥青路面病害特征的路面损坏状况指标体系,该指标体系包括路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ 、横向裂缝状况指数 $I_{PCI,t}$ 、纵向裂缝状况指数 $I_{PCI,l}$ 、坑槽修补状况指数 $I_{PCI,p}$ 和其余破损状况指数 $I_{PCI,a}$ 。

德尔菲方法是一种对定量或定性问题作出定量评价的匿名调查方法,通常需要经过多轮的意见收集和反馈调整,方能使得专家意见收敛统一<sup>[11]</sup>。由于调查过程是匿名的,能够完全得到基于专家丰富经验知识的结果,因此,本研究采用德尔菲方法建立分项指标评价模型。

#### 2.2.1 横向裂缝状况指数

横向裂缝分布情况采用横向裂缝间距 $\alpha_{TCS}$ 来表征,其计算表达式为:

$$\alpha_{TCS} = \frac{L}{N} \quad (1)$$

$$N = \frac{l}{B} \quad (2)$$

式中: $\alpha_{TCS}$ 为横向裂缝间距,m/条; $L$ 为路段长度,m; $N$ 为横向裂缝数量; $l$ 为横向裂缝总长度,m; $B$ 为车道宽度,m。

在已有研究中,对裂缝的评定通常是建立在半刚性基层的裂缝。但不同基层类型的路面结构裂

缝发展速率存在差别,对于不同基层的路面结构,在裂缝率相同时,具有不同的评定分值,施加不同的养护措施。在湿热地区,目前应用里程较多的路面结构主要为半刚性基层、刚性基层和组合式基层路面结构。因此,本研究基于德尔菲方法,分别建立了这三种基层类型下的横向裂缝状况指数评价模型。

1) 半刚性基层。

$$I_{PCI,t} = \begin{cases} 100, & \text{无裂缝} \\ 0.0089 \times \alpha_{TCS} + 89.111, & 100 \leq \alpha_{TCS} \\ 0.125 \times \alpha_{TCS} + 77.5, & 20 \leq \alpha_{TCS} < 100 \\ \alpha_{TCS} + 60, & \alpha_{TCS} < 20 \end{cases} \quad (3)$$

2) 刚性基层。

$$I_{PCI,t} = \begin{cases} 100, & \text{无裂缝} \\ 0.0087 \times \alpha_{TCS} + 89.304, & 80 \leq \alpha_{TCS} \\ 0.1424 \times \alpha_{TCS} + 78.61, & 10 \leq \alpha_{TCS} < 80 \\ 2 \times \alpha_{TCS} + 60, & \alpha_{TCS} < 10 \end{cases} \quad (4)$$

3) 组合式基层。

$$I_{PCI,t} = \begin{cases} 100, & \text{无裂缝} \\ 0.0087 \times \alpha_{TCS} + 89.304, & 80 \leq \alpha_{TCS} \\ 0.1541 \times \alpha_{TCS} + 77.703, & 15 \leq \alpha_{TCS} < 80 \\ 2\alpha_{TCS} + 60, & \alpha_{TCS} < 15 \end{cases} \quad (5)$$

相应的横向裂缝养护标准见表2。

表2 横向裂缝养护标准

Table 2 Maintenance standard of transverse crack

养护类型	日常养护	预防养护	修复养护
指标区间	$I_{PCI,t} \in [90, 100]$	$I_{PCI,t} \in [80, 90)$	$I_{PCI,t} \in [0, 80)$

#### 2.2.2 纵向裂缝状况指数

纵向裂缝分布情况采用纵向裂缝密度 $\alpha_{LCD}$ 表征,其计算表达式为:

$$\alpha_{LCD} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{L,i}}{L} \quad (6)$$

式中: $l_{L,i}$ 为纵向裂缝长度,m; $L$ 为路段长度,m。

以广东省为代表的湿热地区,软土分布广泛,局部路段的路基在运营期内易出现沉降。辖区内路面纵向裂缝可分为两种:①由于路基横向不均匀沉降产生的纵向裂缝;②由于路面疲劳开裂产生的纵向裂缝。对于不同成因的纵向裂缝,处治措施有明显区别。因此,针对这两种成因建立纵向裂缝状

况指数评定公式,其计算表达式为:

1) 路基不均匀沉降。

$$I_{PCI,1} = \begin{cases} -100 \times \alpha_{LCD} + 100, & \alpha_{LCD} \leq 10\% \\ -100 \times \alpha_{LCD} + 90, & 10\% < \alpha_{LCD} \leq 20\% \\ -0.125 \times 100 \times \alpha_{LCD} + 72.5, & 20\% < \alpha_{LCD} \leq 100\% \end{cases} \quad (7)$$

2) 路面疲劳开裂。

$$I_{PCI,1} = \begin{cases} -2.5 \times 100 \times \alpha_{LCD} + 100, & \alpha_{LCD} \leq 4\% \\ -1.667 \times 100 \times \alpha_{LCD} + 96.667, & 4\% < \alpha_{LCD} \leq 10\% \\ -100 \times \alpha_{LCD} + 90, & 10\% < \alpha_{LCD} \end{cases} \quad (8)$$

相应的纵向裂缝养护标准见表3。

表3 纵向裂缝养护标准

Table 5 Maintenance standard of longitudinal crack

养护类型	日常养护	预防养护	修复养护
指标区间	$I_{PCI,1} \in [90, 100]$	$I_{PCI,1} \in [80, 90)$	$I_{PCI,1} \in [0, 80)$

2.2.3 坑槽修补状况指数

坑槽面积能够以相对直观的方式来反映路表坑槽信息。因此,参考规范[1]的评价方式,以坑槽修补率来计算坑槽修补状况指数 $I_{PCI,P}$ 。

坑槽修补率 $\alpha_{PR}$ 的计算表达式为:

$$\alpha_{PR} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \quad (9)$$

式中: $A_i$ 为坑槽修补面积, $m^2$ ;  $A$ 为调查路段面积, $m^2$ 。

坑槽修补状况指数评价模型如式(10)所示,养护标准见表4。

$$I_{PCI,P} = \begin{cases} -75 \times 100 \times \alpha_{PR} + 100, & \alpha_{PR} \leq 0.13\% \\ -150 \times 100 \times \alpha_{PR} + 110, & 0.13\% < \alpha_{PR} \leq 0.20\% \\ -42.568 \times 100 \times \alpha_{PR} + 87.973, & 0.20\% < \alpha_{PR} \end{cases} \quad (10)$$

表4 坑槽修补养护标准

Table 4 Maintenance standard of potholes patching

养护类型	日常养护	预防养护	修复养护
指标区间	$I_{PCI,P} \in [90, 100]$	$I_{PCI,P} \in [80, 90)$	$I_{PCI,P} \in [0, 80)$

2.2.4 其余破损状况指数

根据统计数据发现,其余破损病害面积占比低于1%,在各路段作为主导病害的概率相对偏小。因此,其余破损状况指数 $I_{PCI,a}$ 采用规范[1]的评价方

式,以破损率 $\alpha_{DR,a}$ 来计算,其表达式为:

$$I_{PCI,a} = 100 - 15\alpha_{DR,a}^{0.412} \quad (11)$$

$$\alpha_{DR,a} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i A_i}{A} \quad (12)$$

式中: $A_i$ 为第*i*类路面破损面积, $m^2$ ;  $A$ 为调查路面面积, $m^2$ ;  $\omega_i$ 为第*i*类路面损坏的权重;  $n$ 为包含损坏程度的损坏类型总数。

3 路面损坏状况综合评价指标

权重和单项指标值是影响多项指标综合评价结果的重要因素。在多项指标综合评价中,当某一项指标分数显著低于其余指标时,固定权重是无法体现评价要求的,此时权重应随单项指标分值的变化而变化。因此,在路面损坏的多项指标综合评价中,指标权重应为单项指标的属性权重和基于病害数量的客观权重的组合权重。

3.1 组合权重

组合权重从病害属性和病害数量对路面损坏程度作出综合判断。属性权重和客观权重的组合,也可视为一种权重的求取过程,即将属性权重和客观权重视为两组被加权对象。病害属性和病害数量存在的关系为:若是病害数量相近,则组合权重应接近属性权重;若是病害数量相差较大,则组合权重应提高病害数量较大的指标权重。因此,组合权重的建立可基于两组权重的信息量来确定。均方差法、主成分分析法、熵值赋权法和粗糙集方法的本质都是对信息量区分度的计算,根据评价对象的分辨信息量数量差异,信息量越大,则权重越高<sup>[12]</sup>。本研究选用成熟的熵值赋权法计算组合权重。

计算的具体流程为:

1) 结合层次分析法和德尔菲法,求取属性权重,各指标属性权重见表5。

表5 属性权重

Table 5 Attribute weights

指标	$I_{PCI,t}$	$I_{PCI,l}$	$I_{PCI,P}$	$I_{PCI,a}$
权重	0.114	0.342	0.139	0.405

2) 采用熵值赋权法,求取客观权重。

客观权重具体计算流程包括<sup>[13]</sup>:① 病害数量无

量纲化;② 计算分项指标对应路段的各路段占比;  
③ 计算分项指标熵值及熵权值。

3) 将属性权重和客观权重视为被加权项,以熵值赋权法来计算属性权重和客观权重的加权系数。

$$w_k = a_1 w_{k,1} + a_2 w_{k,2} \quad (13)$$

式中: $w_k$ 为第 $k$ 个指标组合权重; $a_1$ 、 $a_2$ 分别为属性权重和客观权重的加权系数; $w_{k,1}$ 、 $w_{k,2}$ 分别为第 $k$ 个指标的属性权重和客观权重。

### 3.2 路面损坏状况综合指数

综合性评价通常采用加权算术平均法或加权几何平均法,当各指标间需要进行补偿时,采用加权算术平均法;当需要严惩落后指标时,采用加权几何平均法<sup>[12]</sup>。假设路段指标评价结果和组合权重,其结果见表6。当单项指标相近时,采用加权几何平均法和加权算术平均法计算的结果差异较小,加权几何平均法的计算结果略低于加权算术平均法的;当存在指标显著低于其他指标时,则加权几何平均法的计算结果明显低于加权算术平均法的。

表6 加权方法对比表

Table 6 Comparison of weighting method

项目	$I_{PCI,t}$	$I_{PCI,l}$	$I_{PCI,p}$	$I_{PCI,a}$	$I_{PCI,n}$	
					加权几何平均法	加权算术平均法
组合权重	0.3	0.4	0.2	0.1	-	-
路段1	90	85	95	100	89.86	90.00
路段2	90	50	95	100	72.68	76.00

当前,建立指标体系以指导养护为目标,要求凸显落后指标,突出问题路段。因此,采用加权几何平均法,计算路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ ,其表达式为:

$$I_{PCI,n} = I_{PCI,t}^{w,1} \times I_{PCI,l}^{w,2} \times I_{PCI,p}^{w,3} \times I_{PCI,a}^{w,4} \quad (14)$$

## 4 应用效果分析

通过典型路段路面损坏状况的检测结果,对比分析PCI和 $I_{PCI,n}$ 及其分项指标的计算结果在路面养护决策中的应用效果。

路段评价结果见表7,各路段分项指标组合权重值见表8,基于养护类型筛选路段见表9。

由表7~9可知:

1) 路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ 相较于路面损

坏状况指数PCI更为严格。在案例路段中,计算出的 $I_{PCI,n}$ 分值均低于PCI分值。根据表9中养护类型路段长度占比分布,发现新建指标的评价结果中,预防养护及修复养护路段长度有所增加,表明增大了新建指标判定的路段区分度。

表7 三个典型路段PCI、 $I_{PCI,n}$ 评价分值对比

Table 7 Comparison of PCI and  $I_{PCI,n}$  evaluation scores of three typical sections

项目	路段A		路段B		路段C	
	PCI	$I_{PCI,n}$	PCI	$I_{PCI,n}$	PCI	$I_{PCI,n}$
评价分值	94.51	90.55	96.68	95.22	95.63	94.48

表8 三个典型路段 $I_{PCI,n}$ 分项指标权重对比

Table 8 Comparison of  $I_{PCI,n}$  sub-index weights of three typical sections

路段	$I_{PCI,t}$	$I_{PCI,l}$	$I_{PCI,p}$	$I_{PCI,a}$
路段A	0.473	0.205	0.140	0.182
路段B	0.411	0.350	0.109	0.130
路段C	0.390	0.312	0.107	0.190

表9 三个典型路段养护类型实施里程对比

Table 9 Mileage comparison of three typical sections maintenance types

路段	养护类型	路段长度占比/%		
		《公路沥青路面养护设计规范》	$I_{PCI,n}$ 评价 体系	2023年实施 养护计划
路段A	日常养护	81.34	53.05	67.13
	预防养护	18.66	18.00	9.98
	修复养护	0.00	28.95	22.89
路段B	日常养护	99.29	68.42	85.76
	预防养护	0.71	23.72	10.88
	修复养护	0.00	7.86	3.36
路段C	日常养护	95.11	41.62	71.27
	预防养护	4.89	40.23	14.92
	修复养护	0.00	18.15	13.80

2) 在各案例路段的分项指标组合权重值中,路段A以横向裂缝为主导病害,路段B和路段C以横向裂缝和纵向裂缝为主导病害,坑槽和其余病害权重均偏低,这与本研究路面病害调研的结果相符。

3) 新建指标决策结果相较于《公路沥青路面养护设计规范》(JTG 5421—2018),更贴近实际实施方

案,以新建指标的判定要求养护的路段占比,与实际实施方案的匹配度高。取具体路段单元进行分析,如路段A某路段单元横向裂缝及横向条状修补的长度达375.62 m/km,纵向裂缝及纵向条状修补的长度达428.16 m/km。此时,采用超薄罩面或封层已无法解决该问题。而《公路沥青路面养护设计规范》(JTG 5421—2018)推荐该路段单元采取预防养护措施,新建指标推荐修复养护措施,实际实施方案采取铣刨重铺。

4)  $I_{PCI,n}$ 由分项指标组成,与PCI相比,对养护措施的选取更为便利。基于分值判定出路段单元的养护类型后,对于PCI,仍需要对路面损坏具体情况进行溯源分析,才能决定具体养护措施;对于 $I_{PCI,n}$ ,可以直接由分项指标制定具体养护措施,提高决策流程自动化、智能化的准确度。

## 5 结论

1) 通过调查湿热地区公路沥青路面的损坏状况,发现湿热地区公路沥青路面损坏类型主要为条状修补、横向裂缝、纵向裂缝和块状修补。其中,半刚性基层沥青路面以条状修补、横向裂缝和纵向裂缝为主;刚性基层沥青路面以条状修补和横向裂缝为主;而组合式基层沥青路面以条状修补和块状修补为主。

2) 基于湿热地区公路沥青路面损坏类型调研结果,采用德尔菲方法构建了路面损坏状况指标评价体系,该评价体系包含路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ 、横向裂缝状况指数 $I_{PCI,l}$ 、纵向裂缝状况指数 $I_{PCI,l}$ 、坑槽修补状况指数 $I_{PCI,p}$ 和其余破损状况指数 $I_{PCI,a}$ ,并提出了基于沥青路面基层类型的横向裂缝评价模型和基于成因的纵向裂缝评价模型,使得指标评价结果不受日常养护影响,从指标层面反映出路面病害特征,便于提出针对性养护措施。

3) 基于熵值理论,建立了属性权重和客观权重的组合权重,实现不同路段路面损坏状况综合指数的变权综合,突出项目主导病害和问题路段。

4) 将指标应用于3个案例路段的路面损坏状况评价,并与规范PCI的计算结果、实际养护方案进行对比。该结果表明,相较于路面损坏状况指数PCI,路面损坏状况综合指数 $I_{PCI,n}$ 评价结果的路段区

分度更高,更贴近湿热地区公路沥青路面实际养护方案,可以简化养护决策流程,提高制定养护方案的效率。

## 参考文献(References):

- [1] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG 5210—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [2] 凌建明,官盛飞,赵鸿铎,等.公路沥青路面预养护多层次模糊决策模型[J].公路交通科技,2008,25(6): 25-29,34. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2008.06.006.  
LING Jianming, GUAN Shengfei, ZHAO Hongduo, et al. Multi-hierarchy fuzzy decision-making model for PPM treatment selection of highway asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (6) : 25-29, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2008.06.006.
- [3] 资建民,江滔.路面状况综合评价的灰色方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2002,30(3): 62-64. DOI: 10.13245/j.hust.2002.03.020.  
ZI Jianmin, JIANG Tao. Gray method of the comprehensive evaluation for road surface condition [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002, 30 (3) : 62-64. DOI: 10.13245/j.hust.2002.03.020.
- [4] 陈继光.基于集对分析的路面使用性能评价方法[J].数学的实践与认识,2013,43(17): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2013.17.011.  
CHEN Jiguang. Based on set pair analysis of pavement performance evaluation method [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43 (17) : 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2013.17.011.
- [5] 马士宾,孙敬福,王清洲,等.未确知测度理论在高速公路沥青路面损坏状况评价中的应用[J].公路工程,2017,42(1): 178-181,275. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.01.040.  
MA Shibin, SUN Jingfu, WANG Qingzhou, et al. Application of unascertained measurement theory to the evaluation for damaged condition of expressway asphalt pavement [J]. Highway Engineering, 2017, 42(1): 178-181, 275. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.01.040.
- [6] 王小凤,高攀科,王进玺.基于混合遗传神经网络的高速公路沥青路面使用性能评价方法研究[J].公路工

- 程, 2017, 42(4): 219-222. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.04.043.
- WANG Xiaofeng, GAO Panke, WANG Jinxi. Study on evaluation method of expressway asphalt pavement performance based on hybrid genetic neural network[J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 219-222. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.04.043.
- [7] 赵静, 王选仓, 樊振阳, 等. 基于支持向量机的沥青路面性能评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 116-123. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190841.
- ZHAO Jing, WANG Xuancang, FAN Zhenyang, et al. Evaluation on performance of asphalt pavement based on support vector machine [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 116-123. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190841.
- [8] 周岚. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- ZHOU Lan. Research of performance evaluation and prediction method of asphalt pavements for highway[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] 李海莲. 西北寒旱地区高速公路沥青路面技术状况分析及养护决策方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019. DOI: 10.27205/d.cnki.glttc.2019.001159.
- LI Hailian. Study on expressway asphalt pavement technical conditions analysis and maintenance decision method for cold and arid areas in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. DOI: 10.27205/d.cnki.glttc.2019.001159.
- [10] 吕锡平. 湖南省高速公路沥青路面养护决策技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- LYU Xiping. Study on a technique of maintenance decision for highway asphalt pavement in Hunan Province [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [11] 王少娜, 董瑞, 谢晖, 等. 德尔菲法及其构建指标体系的应用进展[J]. 蚌埠医学院学报, 2016, 41(5): 695-698. DOI: 10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2016.05.048.
- WANG Shaona, DONG Rui, XIE Hui, et al. Application progress of Delphi method and its construction index system [J]. Journal of Bengbu Medical College, 2016, 41(5): 695-698. DOI: 10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2016.05.048.
- [12] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
- SU Weihua. Research on theory and method of multi-index comprehensive evaluation [D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- [13] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题, 2015(3): 115-119. DOI: 10.16011/j.cnki.jjw.2015.03.023.
- YANG Li, SUN Zhichun. The development of western new-type urbanization level evaluation based on entropy method [J]. On Economic Problems, 2015(3): 115-119. DOI: 10.16011/j.cnki.jjw.2015.03.023.

(责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 李岳林)