文章编号：1671-8496-(2026)-04-0001-05

基于裂缝双指标的沥青路面养护时机阈值量化研究

刘谋智
（广东交科检测有限公司，广东 广州 510500）

摘　要：为破解公路养护决策“经验化、一刀切、资金低效”的顽疾，基于路面技术状况检测数据，构建“路面裂缝率（CR）+路面裂缝修补率（RR）”双指标评价体系。通过理论推导与数据验证，量化提出以PCI为主控参数的沥青路面关键养护阈值，其资金节约效果更显著：①80≤PCI<90、0.4%<CR<2.0%时，RR≥90%可使PCI达到优等水平；②70≤PCI<80、CR<2.0%时，RR≥40%可使PCI达到良等水平。研究成果为公路管养部门实现“精准养护、经济养护”提供量化支撑，显著提升路网养护的精准性与经济性。

关键词：沥青路面；养护决策；裂缝检测；养护时机阈值；CICS检测系统；路面养护
中图分类号：U416.217　　**文献标识码**：A

Quantitative Study on Threshold Quantification of Asphalt Pavement Maintenance Timing Based on Dual Crack Indicators

LIU Mouzhi
(Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510500, Guangdong, China)

Abstract: To address the persistent problems of "experience-based, one-size-fits-all, and inefficient funding" in highway maintenance decision-making, based on pavement technical condition detection data, a dual-index evaluation system of "pavement crack rate CR + pavement crack repair rate RR" was constructed. Through theoretical derivation and data validation, the key maintenance threshold for asphalt pavement with PCI as the main control parameter is quantitatively proposed, and the effect of cost savings is more significant: ① When 80≤PCI<90 and 0.4%<CR<2.0%, if RR≥90%, PCI can reach an excellent level; ② When 70≤PCI<80 and CR<2.0%, if RR≥40%, PCI can reach a good level. The research results provide quantitative support for the highway management department to achieve "precise maintenance and economic maintenance", significantly improving the accuracy and economy of road network maintenance.

Key words: asphalt pavement; maintenance decision-making; crack detection; maintenance timing threshold; CICS detection system; road maintenance

随着国家基础设施建设力度不断加强，公路养护里程不断增加，养护任务不断加重，养护优先将是公路管理长期坚持的发展方向[1]。在长期的行车荷载和光热共同作用下，路面容易出现车辙、疲劳开裂、抗滑性能下降等病害[2]，直接影响行车安全与舒适性。广东高温多雨的气候特征，导致沥青路面早期开裂问题尤为突出，养护任务呈现出“量级激增、精准化需求凸显”的特征，同时，养护资金缺口与刚性需求的矛盾日益尖锐。《公路技术状况评定标准》（JTG 5210—2018）[3]明确路面破损状况指数PCI（以下简称PCI）是路面技术状况指数（PQI）计算公式中权重占比最大的分项指标，其数值是判定养护优先级的关键依据。因此，基于路面技术状况检测大数据，建立PCI主导型养护决策模型，量化养护时机阈值，成为行业亟待解决的关键问题。

收稿日期：2026-01-20
作者简介：刘谋智，工程师，本科，研究方向为公路工程试验检测

现有研究多聚焦单一裂缝指标与PCI的相关性分析，或侧重养护方案的经济性对比，存在两大不足：①缺乏兼顾裂缝发育程度与修补效果的综合评价指标；②未明确不同PCI等级下裂缝处治的临界条件，导致养护决策缺乏量化依据。因此，亟需构建多维度评价体系，揭示裂缝修补对PCI的提升规律，量化不同PCI等级下的养护时机阈值。

交通运输部门发布的相关信息显示，国省干线大部分的路面为沥青混凝土路面，大部分养护工程围绕沥青路面形式开展[4]。因此，本文基于路面技术状况检测大数据进行统计分析，创新构建“路面裂缝率（CR）+路面裂缝修补率（RR）”双指标裂缝评价体系，研究并提出PCI指标在沥青路面养护决策方案中的使用临界条件，突破传统养护阈值“经验化”局限，实现裂缝养护时机的量化决策，从而为公路管养部门在沥青路面的科学养护决策提供可靠的数据支撑。

1 研究基础与方法

1.1 计算模型

目前我国地方公路养护经费缺口较大，一定程度上影响了路面的使用状况，制约了地方公路养护事业的发展，开发低成本路面养护技术迫在眉睫[5]。在公路养护决策过程中，要合理应用路面技术状况检测评定数据，根据实际条件选择相适应的方法，以科学的技术手段做好病害处理工作，使病害路面恢复至正常使用的状态[6]。根据《公路技术状况评定标准》的规定，采用自动化检测设备对公路进行路面技术状况检测评定时，一级公路沥青路面PCI的计算公式如下：

$$PCI = 100 - 15 \times DR^{0.412} \tag{1}$$

$$DR = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{i_0} \omega_i A_i}{A} \tag{2}$$

式中：DR为路面破损率（%）；i_0为损坏类型总数；i为路面损坏类型；ω_i为第i类路面损坏的换算系数；A_i为第i类路面损坏的累计面积（m^2）；A为路面检测面积（m^2）。

由《公路技术状况评定标准》可知，采用自动化检测时，修补类病害在破损率计算中的权重占比相对偏低，未处治病害的权重等效于对应修补病害的10倍。具体来看，长度维度一致时，10条条状修补病害产生的影响权重与1条纵向或横向裂缝病害产生的影响权重基本持平；面积维度相同时，10个块状修补病害的影响权重与1个龟裂或块状裂缝病害的影响权重保持一致。

1.2 双指标评价体系构建

沥青路面在其服役过程中，受设计、建设、荷载耦合、温度等方面因素的影响，会产生不同类型和程度的病害，如纵向裂缝、横向裂缝、车辙、拥包等[7]。公路养护在资金有限的情况下，不可能对路面进行全方位病害处治，部分地方财政配套资金到位率低，养护管理部门需要考虑在现有资金或资源限制情况下，决定现有路网中各路段养护的优先顺序[8]。为有效保障公路路面使用性能，建立科学、经济的养护决策体系尤为重要，养护决策者应以养护资金为主要导向，关注路网养护投资经济性和路况稳定；养护管理者应以养护需求为主要导向，关注路段养护方案的效益最优[9]。而在现有的各类养护方案中，路面裂缝处治是资金投入相对较低，且可有效提升路面技术状况水平的优选方案之一。根据PCI和DR计算模型可知，在路面裂缝病害得到有效处治后，对应路面裂缝损坏类型的破损率的换算系数会降低至原数值的1/10，同时测算路段的PCI值将获得一定幅度的提升。当路面仍处于良好状态时，维护成本会大大降低，同时也节省了时间，确保道路更安全[10]。因此，在沥青路面日常养护工作中，可结合路面实际破损状况，针对性地开展裂缝处治工作，在提升PCI的基础上实现养护资金的高效配置，最终达成养护资金效益最大化的目标。根据上述公式可得出每车道每千米的沥青路面裂缝修补效果对比分析情况，见表1。

表1 沥青路面裂缝修补效果对比分析

病害发展程度/（车道/km）	未处治（开裂）	已处治（修补）	PCI值提升	PCI提升率/%
横向裂缝38 m	DR=0.4%，PCI=90	DR=0.04%，PCI=96	6	6.7
纵向裂缝190 m	DR=2.0%，PCI=80	DR=0.2%，PCI=92	12	15.0
横向裂缝520 m	DR=5.5%，PCI=70	DR=0.55%，PCI=88	18	25.7
纵向裂缝1 030 m	DR=11.0%，PCI=60	DR=1.1%，PCI=84	24	40.0

对比不同病害发展程度下裂缝处治前后的PCI变化（表1），发现：科学有效的路面裂缝处治措施，可大幅提升PCI，且路面初始破损率越高，经规范处治后的PCI提升幅度越大。因此，基于上述分析结论，结合沥青路面裂缝病害的分布特征与发育规律，构建路面裂缝率（CR）与

路面裂缝修补率（RR）两项核心评价指标。

（1）CR：指路面开裂裂缝面积 A_r 与检测路面面积 A 的百分比。

$$CR = \frac{A_r}{A} \times 100\% \tag{4}$$

（2）RR：指路面裂缝已修补面积 A_m 与路面裂缝已修补面积 A_m 与开裂裂缝面积 A_r 之和的百分比。

$$RR = \frac{A_m}{A_m + A_r} \times 100\% \tag{5}$$

从数理逻辑层面分析，CR 与 RR 并非独立的个体变量，而是构成“病害 - 处治”闭环评价体系的耦合参数。CR 表征了裂缝病害的发育程度，反映结构劣化风险，是 PCI 下降的核心驱动因子；而 RR 则反映了养护干预的覆盖程度，反映处治效能。CR 决定养护需求的紧迫性，RR 决定养护效果的实现度。由于条状修补（已处治的裂缝）在破损率 DR 计算模型中的权重系数仅为未处治裂缝的 1/10，因此 RR 的提升本质上是通过降低有效破损面积来抑制 PCI 衰减，二者通过 PCI 与 DR 的计算模型形成耦合机制：当 CR 较低时，RR 提升对 PCI 的增幅影响较弱；当 CR 较高时，RR 提升对 PCI 的增幅影响较强。建立“CR + RR”双指标评价体系，是为了在路面“破损程度”与“养护程度”两个维度上实现精准画像，为养护阈值的设定提供理论依据，从而指导差异化养护决策。

1.3 数据来源

为精准把控干线公路路面服务品质，实现路面技术状况的快速定量化评定，本研究采用 CICS 路况快速检测系统，对广东省茂名市普通国道干线一级公路沥青路面展开全断面检测，并对其进行 PCI 评定分析，基于 CICS 实测成果，构建科学量化、高效适配的路面技术状况评价体系。该体系可针对路面使用性能开展动态评价与趋势预测，为路面管理决策层科学测算养护资金需求规模、优化资金分配方案，提升路面养护决策的精细化与科学化水平，提供坚实的技术支撑和量化决策依据。

2 实证分析与模型验证

2.1 裂缝病害特征统计分析

沥青是路面工程中常用的筑路材料之一，被广泛应用于公路工程中。在路面服役过程中，沥青材料会出现硬化、变脆等老化现象，显著影响了路面的营运品质及服役寿命[11]。沥青路面病害中，裂缝是高发且典型的早期病害，更是路面结构退化的早期显性特征。若未及时干预，裂缝会加速路面结构劣化进程，诱发沉陷、坑槽等连锁破损，若路面裂缝未及时处理，长此以往会缩短路面的使用寿命[12]。通过专业试验检测手段判定其发展程度，是制定科学养护方案的关键依据。根据路面裂缝的不同走向，常见的路面裂缝可分为纵向裂缝和横向裂缝。本研究在对茂名市普通国道干线一级公路沥青路面进行的路面技术状况检测与评估中，共识别出横向裂缝、纵向裂缝、龟裂、松散、坑槽、块状修补和条状修补等 7 种主要的路面病害损坏类型。在这些病害类型中，重点提取了横向裂缝、纵向裂缝和条状修补的病害明细数据作为样本单元，并基于此开展针对性的养护决策分析，见表 2。

表 2　茂名市普通国道干线一级公路沥青路面裂缝病害明细

PCI 评定区间	PCI 均值	CR/%	RR/%	检测评定里程/km	横向裂缝/m	纵向裂缝/m	条状修补/m
［90，100］	94.16	0.06	21.36	107.457	924.7	426.95	957.92
［80，90）	85.03	0.46	12.31	204.323	10 950.8	6 638.9	3 836.64
［70，80）	76.57	1.42	2.88	118.823	14 709	16 750.8	1 301.2
［60，70）	66.41	3.25	1.62	23.486	6 169.4	7 999.1	321.36
（0，60）	54.86	6.76	0.95	16.078	7 534.1	12 635.3	204.14

2.2 裂缝修补对 PCI 的影响规律验证

运用大数据统计分析的技术手段，基于样本数据，代入 CR、RR 计算模型，同时验证裂缝参数与 PCI 的相关性。在对裂缝处治后的 PCI 进行量化计算时，需针对裂缝类病害换算系数进行针对性校准。具体而言，对于经条状修补技术处治的横向裂缝与纵向裂缝，应将其原有换算系数调整为条状修补对应的标准换算系数（0.2），该调整可客观反映裂缝处治对路面结构完整性与使用功能的改善效应，使调整后 PCI 值的变化特征能够精准表征裂缝处治工程的实际技术效能，见表 3。

表3 茂名市普通国道干线一级公路沥青路面裂缝修补前后PCI分析

PCI评定区间	现状（修补前）				修补后			PCI值提升	PCI提升率/%
	PCI均值	CR/%	RR/%	裂缝病害占比/%	PCI均值	CR/%	RR/%		
[90，+∞)	94.16	0.06	21.36	44.70	96.73	0	100	2.57	2.73
[80，90)	85.03	0.46	12.31	60.75	92.39	0	100	7.36	8.66
[70，80)	76.57	1.42	2.88	79.57	89.48	0	100	12.91	16.86
[60，70)	66.41	3.25	1.62	79.46	79.91	0	100	13.50	20.33
(0，60)	54.86	6.76	0.95	82.53	78.69	0	100	23.83	43.44

由表3可看出：随着CR上升，PCI呈下降趋势，且当CR处于较高水平时，PCI衰减程度更为明显，表明CR与PCI呈负相关关系，裂缝发育是PCI衰减的核心驱动因素。因此，对路面裂缝实施精准有效的处治后，能够显著改善PCI的整体表现。这一规律在不同裂缝率路段中呈现明显关联性：路段裂缝率越高，采用适配性裂缝修补技术进行靶向处治后，PCI值的提升幅度越大，且处治效果的稳定性更优。

此外，对比传统单一裂缝率的养护决策模式，“CR+RR”双评价指标的优势在于能够有效识别潜在可高效提升PCI值的路段。若仅以CR阈值决策，易对较高RR的路段造成过度养护；而通过“CR+RR”双评价指标分析，可精准锁定“高CR、低RR”的路段，此类路段仅需投入少量裂缝处治资金即可获得显著的PCI回升效益，规避了单指标决策的盲目性。

因此，路面养护决策需以病害特征为核心导向，结合路面技术状况专项检测的详细数据，制订差异化、针对性的养护方案。当裂缝为路面主导病害时，可采用裂缝专项处治养护技术，通过精准靶向处治提升路面PCI值，实现养护资金的高效配置，保障养护决策的科学性与合理性。

3 裂缝修补对PCI的影响机制与养护阈值

3.1 统计方法

基于前文构建的评价体系，本研究通过权重赋值优化实现路面结构开裂严重程度的精准量化。考虑到条状修补措施对裂缝处治效果的核心影响，当设定条状修补权重为1时，可计算得到所有裂缝均未实施处治状态下的原始路面PCI基准值。同时，为系统揭示裂缝修补率与路面技术状况的量化关联，采用控制变量法设定RR梯度为10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%及100%，通过PCI计算模型分别求得各梯度对应的PCI特征值（图1），不仅可直观反映不同修补程度下路面技术状况的提升规律，更能为养护决策中修补率阈值的确定及养护效益评估提供数据支撑，弥补了传统评价方法中忽视修补程度动态影响的不足。

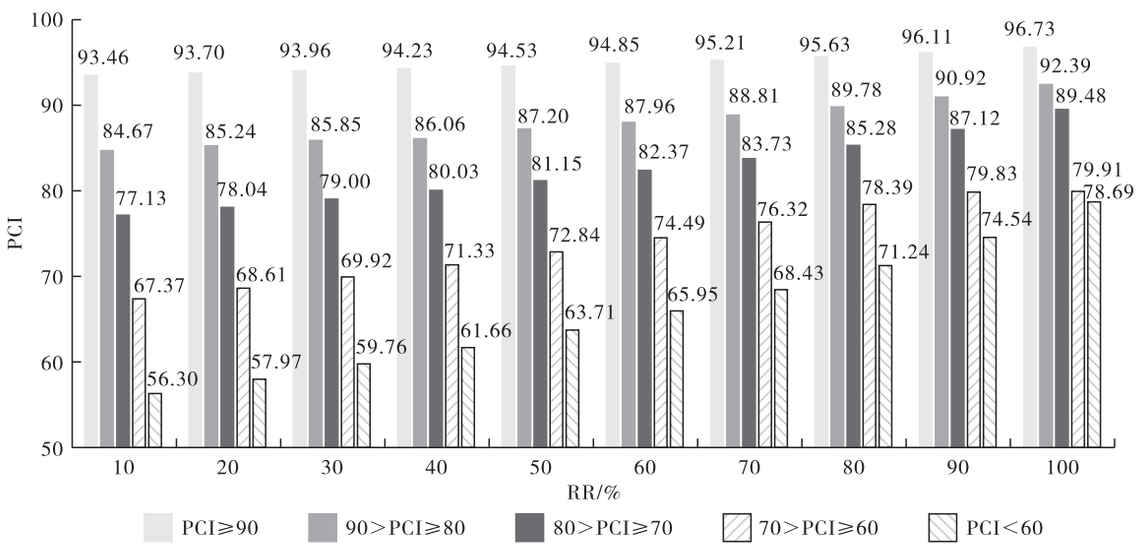

图1 各评定区间不同RR梯度下的路面PCI情况对比图

3.2 结果分析

结合路面裂缝病害情况，通过对各阈值路段不同 RR 梯度下的路面 PCI 值进行对比分析（图 1），发现有效的裂缝处治措施能够显著提升 PCI 值。具体分析如下。

（1）优等路段，即 PCI≥90 时，此时 CR < 0.04%，路面裂缝病害数量较少，即使全部路面裂缝病害均不进行处治，其 PCI 值也能达到优等水平。但裂缝处治后，PCI 值仍有一定提升空间，可进一步优化路面状况。因此，对于该类路段，维持正常的日常养护工作即可，无须专项处治，避免“过度养护”。

（2）良等路段，即 80≤PCI < 90 时，此时 0.4% < CR≤2.0%，即使全部路面裂缝病害均不进行处治，其 PCI 值也能达到良等水平。但若该路网现有路面裂缝修补率达到 90% 时，可将路面 PCI 值提高到优等水平。因此，对于该类路段，优先安排裂缝小修，目标 RR≥90%，实现“低成本提升至优等”。

（3）中等路段，即 70≤PCI < 80 时，此时路面裂缝病害数量较多，占比高达 79.57%，即使全部路面裂缝病害均得到有效处治，也无法将路面 PCI 指标提高到优等水平，但当路面裂缝修补率达到 40% 时，可将 PCI 指标提升到良等水平。因此，对于该类路段，需开展路面裂缝病害的专项处治养护工作，目标 RR≥40%，优先将 PCI 恢复至良等水平，在养护资金充足的条件下，可采取整体性处治措施。

（4）次等路段，即 60≤PCI < 70 时，此时路面裂缝病害数量较多，占比高达 79.46%，即使全部裂缝均得到有效处治，也无法将路面 PCI 指标提高到良等水平。因此，对于该类路段，应采取罩面中修措施，在资金充足的情况下，甚至可采取路面大修的养护方案。

（5）差等路段，即 PCI < 60 时，此时路面裂缝病害较多，占比高达 82.53%，即使全部路面裂缝均得到有效处治，也无法将路面 PCI 值提高到良等水平。因此，对于该类路段，应采取罩面中修措施，在资金充足的情况下，甚至可采取路面大修的养护方案。

3.3 养护成本分析

从路面养护成本角度分析，裂缝处治属于典型的“低成本、高效益”预防性养护措施。根据广东省干线公路养护预算定额，每 100 m 石油沥青直接灌缝基价是 339 元，而每 1 000 m^2 的机拌机铺沥青混合料罩面 1.5 cm 压实厚度基价是 16 514 元。结合上述分析结果，选取中等路段，即评定区间为 70≤PCI < 80 的路网路段进行成本分析，见表 4。

表 4　70≤PCI < 80 评定区间不同养护方式的基价成本对比分析

PCI 评定区间	均值	检测评定里程/km	裂缝病害/m	目标 RR = 40%		目标 RR = 100%		沥青混合料罩面成本/元
				PCI 值	直接灌缝/元	PCI 值	直接灌缝/元	
[70，80）	76.57	118.823	31 459.9	80.03	45 135.4	89.48	106 649.1	7 358 411.3

由表 4 可知，当目标 RR = 40% 时，路网 PCI 值由原来的 76.57 提升至 80.03，达到良等水平，石油沥青直接灌缝基价成本是 RR = 100% 时的 42.3%；当 RR = 100% 时，PCI 值为 89.48，PCI 提升值达 12.91，总体评价等级接近优等水平，此时的路网石油沥青直接灌缝基价成本仅为机拌机铺沥青混合料罩面 1.5 cm 压实厚度基价成本的 1.4%。因此，相对于直接采用罩面措施恢复至良等水平，采取裂缝专项处治措施，资金节约效果更显著。

4 结论与建议

基于路面技术状况检测大数据统计分析，构建“CR + RR”双指标评价体系，揭示了裂缝修补对 PCI 的非线性提升规律，实现了裂缝病害的精准量化，从而将 PCI 值恢复至优良水平，且资金节约效果更显著的关键养护阈值：①在 80≤PCI < 90、0.4% < CR < 2.0% 时，通过裂缝处治，RR≥90% 时，可使 PCI 达到优等水平。②在 70≤PCI < 80、CR≤2% 时，通过裂缝处治，RR≥40% 时，可使 PCI 达到良等水平。

本研究依托数据来源于广东省茂名市普通国道干线一级公路沥青路面，该地区属典型的高温多雨亚热带季风气候。因此，文中提出的量化阈值主要适用于类似华南高温多雨亚热带季风气候区域、以沥青面层疲劳开裂为主导病害，且结构相对完好的一级公路沥青路面养护决策。对于重载交通比例过高，或已出现明显结构性破坏的路段，建议结合弯沉检测结果综合判定，不宜仅依赖裂缝指标进行决策。

（下转第 12 页）

6 结论

本文以BF高速公路为研究对象，基于2025年度交通事故台账数据，构建了包含事故总数、夜间事故占比、月均事故数波动系数和事故空间集聚指数4项指标的高速公路交通事故风险路段评价指标体系，并运用熵权法－TOPSIS模型对10个路段进行了综合评价。研究结论如下：

（1）熵权法能够根据指标数据的离散程度实现客观赋权，TOPSIS法能够有效实现路段风险排序，二者结合适用于高速公路交通事故风险路段识别，具有较强的可操作性。

（2）从指标权重看，事故总数和事故空间集聚指数的权重最高，分别为32.59%和32.46%，是影响高速公路路段事故风险水平的关键因素；夜间事故占比22.91%，表明夜间运行风险同样应受到重视；月均事故数波动系数权重相对较低，但对反映风险稳定性仍具有一定参考意义。

（3）从综合评价结果看，BF高速公路事故风险具有明显空间异质性。下行K421～K441、上行K401～K421等路段综合风险较高，应作为重点管控对象；部分事故总数不高但空间集聚性较强的路段也表现出较高的风险水平，表明高速公路风险路段识别不能仅依据事故规模进行判断。

总体来看，基于熵权法－TOPSIS的评价模型能较客观地识别高速公路交通事故高风险路段，可为运营管理单位实施分级分类治理提供方法支撑。本文主要基于BF高速公路2025年度事故台账数据开展分析，后续研究可进一步整合交通流量、气象条件、道路几何线形等多源数据，构建多因素耦合的事故风险评价模型，并引入机器学习方法实现风险的动态预测与提前预警，为高速公路安全管理提供更精细化的技术支撑。

参考文献：

[1]齐慧.人享其行、物畅其流 加快实现[N].经济日报，2025-08-04(001).

[2]国家统计局.中国统计年鉴2025[M].北京：中国统计出版社，2025.

[3]郭元.高速公路安全风险评估及分级方法研究[D].石家庄：石家庄铁道大学，2025.

[4]张立宪，方留杨，李晓燕，等.基于公里路段的公路自然灾害风险评估方法研究[J].地理空间信息，2025，23(8)：18-22.

[5]何家瑄.道路交通事故空间分布特征及其影响因素分析[D].北京：中国人民公安大学，2024.

[6]崔鹏飞.基于多源数据的城市交通事故时空特征建模与风险评估研究[D].北京：北京交通大学，2025.

[7]吴梵，钱良辉，安树科，等.高原山区高速公路交通事故时空分布特征及安全对策研究[J].科技创新与应用，2026，16(6)：97-100.

[8]于跃.道路交通事故多发点识别与严重程度预测研究[D].北京：北方工业大学，2025.

[9]杨灿，安阳，吴明哲，等.基于熵权－TOPSIS的高原高速公路路段安全评价研究[J].高原科学研究，2025，9(3)：100-107.

（上接第5页）

参考文献：

[1]张妍，李露，马壮林，等.公路养护组织方案优化与效益评估[J].中外公路，2021，41(S2)：227-239.

[2]王钱兴，李智.UTAC薄层罩面在广惠高速公路养护工程中的应用[J].广东公路交通，2021，47(6)：13-17.

[3]JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].

[4]张倩，华子全，裴晓梅，等.国省干线沥青路面不同养护类型的碳排放核算与分析[J].公路工程，2025，50(4)：213-222.

[5]吴愈建，胡凯丰，任毅.低成本路面养护技术在地方公路的应用研究[J].湖南交通科技，2023，49(2)：90-93.

[6]朱奋鹏.公路沥青路面病害特征与养护技术[J].交通世界，2022(Z2)：117-118.

[7]李霖，江睿南.基于等距测定的弯沉对沥青路面裂缝影响范围的研究[J].公路交通科技，2021，38(7)：17-21.

[8]蔡海泉.考虑环境影响的路网级养护决策优化方法及应用[J].湖南交通科技，2024，50(3)：19-23.

[9]傅丹华，李向峁，陶继进，等.基于双层规划的路面养护决策优化研究[J].公路与汽运，2024，40(5)：164-167，171.

[10]刘凤云，朱国强.基于低碳环保的路面养护工程应用研究[J].交通节能与环保，2024，20(3)：110-113.

[11]屈鑫，丁鹤洋，汪海年.道路沥青老化评价方法研究进展[J].中国公路学报，2022，35(6)：205-220.

[12]庞炜辰，王富玉，杨旭.路面裂缝自动化修补中路径规划研究的进展概述与展望[J].中外公路，2022，42(2)：68-72.