

煤区农村公路沥青路面时空损坏特征及指标关联性分析

赵 滕*, 刘 勇#, 林九龙, 于瑞祥

山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月23日

摘 要

为深入揭示煤区重载交通环境下农村公路沥青路面的特殊损坏规律与时空演化机制, 本研究以山东省煤区4条典型公路为工程依托, 基于2022年至2024年连续三年的多功能路况快速检测数据, 对路面状况指数(PCI)与车辙深度指数(RDI)的衰变特征进行了系统分析。研究综合运用Spearman秩相关系数与时空统计方法, 定量探究了路面病害间的伴生关系, 重点剖析了PCI与RDI在多维尺度上的耦合机理。研究结果表明: 1) 路面性能呈非均匀加速衰减特征。煤区道路PCI与RDI均值呈同步下降趋势, 但重载路段表现出显著的“优级路段消退”与“中次级路段积压”现象, 路况衰变具有明显的荷载敏感性。2) 揭示了“荷载主导型”病害的聚类规律。车辙、龟裂、坑槽三者之间存在极强的正相关性, 构成了由重载驱动伴生病害簇; 而横向裂缝表现出相对独立的环境相关特征。3) 证实了“车辙主导、结构先行”的破坏模式。PCI与RDI在时间序列与空间分布上均表现出极强的正相关性, 且重载路段的RDI值相对于PCI值存在显著的“负向偏移”, 表明车辙是制约路网服务水平的短板指标与先行破坏形式。本研究厘清了煤区道路PCI与RDI协同衰变的内在机制, 为构建基于时空特征工程的多指标协同预测模型提供了坚实的理论依据, 对指导煤区农村公路养护策略由“被动修复”向“主动防控”转变、实现养护资源精准配置具有重要工程价值。

关键词

煤区农村公路, 沥青路面, PCI, RDI, 时空演化, 相关性分析, 协同衰变

Spatiotemporal Damage Characteristics and Indicator Correlation Analysis of Asphalt Pavements on Rural Roads in Coal Mining Areas

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 赵滕, 刘勇, 林九龙, 于瑞祥. 煤区农村公路沥青路面时空损坏特征及指标关联性分析[J]. 土木工程, 2026, 15(1): 115-126. DOI: 10.12677/hjce.2026.151014

Teng Zhao*, Yong Liu#, Jiulong Lin, Ruixiang Yu

School of Transportation Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: December 22, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

To deeply reveal the specific damage patterns and spatiotemporal evolution mechanisms of rural asphalt pavements under heavily loaded traffic in coal areas, this study is based on four typical roads in the coal region of Shandong Province. Using multi-functional rapid pavement condition detection data collected continuously from 2022 to 2024, the decay characteristics of the Pavement Condition Index (PCI) and Rut Depth Index (RDI) were systematically analyzed. The study comprehensively applied Spearman's rank correlation coefficient and spatiotemporal statistical methods to explore the co-occurrence relationships among pavement quantitatively distresses, with a focus on analyzing the coupling mechanism between PCI and RDI at multidimensional scales. The results indicate that: 1) pavement performance exhibits non-uniform accelerated decay. Both the mean PCI and RDI of coal region roads show a synchronous downward trend, but heavily loaded sections show significant phenomena of "premium sections declining" and "secondary sections accumulating damage", indicating obvious load sensitivity in pavement deterioration. 2) The clustering pattern of "load-dominated" distress is revealed. Rutting, cracking, and potholes are highly positively correlated, forming a distress cluster driven by heavy loads; meanwhile, transverse cracks show a relatively independent environment-related characteristic. 3) The "rut-dominated, structure-leading" failure pattern is confirmed. PCI and RDI show a strong positive correlation both temporally and spatially, and the RDI values in heavily loaded sections show a significant "negative offset" relative to PCI values, indicating that rutting is a critical limiting factor and the leading form of pavement deterioration. This study clarifies the intrinsic mechanism of coordinated PCI and RDI decay for coal region roads, providing a solid theoretical basis for constructing multi-index collaborative prediction models based on spatiotemporal features. It has important engineering value in guiding the transition of rural road maintenance strategies in coal areas from "passive repair" to "active prevention", achieving precise allocation of maintenance resources.

Keywords

Rural Roads in Coal Mining Areas, Asphalt Pavement, PCI, RDI, Spatiotemporal Evolution, Correlation Analysis, Synergistic Deterioration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农村公路不仅是保障农业农村现代化的基础设施网络，更是推进乡村振兴战略与“四好农村路”高质量发展的关键支撑。近年来，我国农村公路建设取得了历史性成就，路网规模持续扩大，通达深度显著提升。据交通运输部统计，截至2024年末，全国农村公路总里程已达464.37万公里，占公路总里程的比例超过84.58%，基本形成了“外通内联、通村畅乡”的交通网络体系[1]。

然而，对于主要承担能源运输任务的煤矿区农村公路而言，其服役环境显著区别于一般干线公路。

作为国家能源安全运输的“毛细血管”，该类道路长期承受着高频次、大轴载、渠化严重的交通荷载作用[2]。这种极端的力学负荷环境导致沥青路面结构性能加速劣化，呈现出早期疲劳开裂与结构性变形并存的特殊损坏模式，给属地化的养护管理带来了严峻的资金与技术挑战[3]。

在现行的路面养护评价体系中，路面状况指数(PCI)是衡量路面损坏状况的通用指标。然而，由于 PCI 是基于多种病害的加权累计值，其评价结果往往侧重于反映路面表面的功能性破损，容易产生“均值掩盖效应”，即在综合评分尚可的情况下，忽视了局部关键结构性病害的严重程度[4]。特别是在煤区重载道路中，由沥青混合料剪切流变引起的车辙往往先于大面积裂缝出现，成为导致路面服务水平丧失的主控因素，而表征该病害的车辙深度指数(RDI)在传统评价中常被视为单一指标[5]。现有研究在构建路面性能预测模型时，多将 PCI 与 RDI 作为相互独立的变量进行处理，忽视了二者在重载耦合作用下协同恶化的内在机理。这种割裂式的研究范式难以捕捉病害演化的非线性特征，导致预测模型精度受限，无法为“分级分类”的精准养护决策提供科学依据[6]。

因此，本研究依托山东省煤区典型农村公路工程，基于 2022 年至 2024 年的连续多功能快速检测数据，旨在系统揭示重载交通环境下沥青路面性能的时空演化规律。本研究将重点量化 PCI、RDI 及典型病害之间的 Spearman 相关性，从统计学与工程机理层面证实其协同衰变机制，以期为后续构建高精度的多指标协同预测模型奠定坚实的理论与数据基础。

2. 研究区域概况与数据采集

2.1. 研究区域路网概况

本研究选取山东省某煤区内的 4 条主要农村公路作为研究对象，总里程约 140 公里。该区域属温带季风气候，具有四季分明、雨热同期、年际波动大的典型特征，其气候条件对沥青混凝土路面的损坏状况产生了多方面的、显著的影响。交通状况调查显示，研究路段的重型卡车比例高，交通荷载特征极其显著。路面结构主要为 12 cm 沥青混凝土面层 + 40 cm 半刚性基层的典型结构，路龄均在 6~8 年之间，已进入性能加速衰减期。

2.2. 路面损坏数据采集与评定

2.2.1. 数据来源与检测方法

本文所研究的煤区农村公路采用自动化检测车对路面破损进行分类检查，并对病害位置及照片进行采集，通过高速、高精度图像采集传感器和高性能并行图像处理卡实时采集和存储路面图像。系统采用自动识别技术或人工阅读判断病害类型、圈定病害范围的方式，于 2022 年、2023 年、2024 年同一时期对 4 条公路进行全覆盖检测。该设备可同步采集高清单幅路面图像、三维激光数据等，自动识别并量化裂缝、坑槽、龟裂、车辙等病害数据，使用的道路破损图像分析软件和沥青路面病害数据管理系统以 1000 米为基本评定单元输出检测结果。

2.2.2. 路面状况指数(PCI)的计算与评定

依据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018) [7]和《农村公路技术状况评定标准》(JTG 5211-2024) [8]，PCI 取值范围为 0~100，100 为最佳。本研究采用扣分法，根据检测车识别的裂缝、坑槽、龟裂等 10 余种病害的类型、严重程度和密度，计算各病害的扣分值并进行修正，最终得到各评定单元的 PCI 值。评定标准分为优、良、中、次、差五个等级。具体的划分标准见表 1。

2.2.3. 车辙深度指数(RDI)的计算与评定

RDI 同样依据 JTG 5210-2018、JTG 5211-2024 标准，取值范围 0~100，100 为最佳。该指标根据检测

设备测得的 100 米单元内的平均车辙深度(RD)，通过公式或查表换算得到。RDI 直观反映了路面的结构性变形程度，其评定等级划分与 PCI 相同。具体的划分标准见表 2。

Table 1. PCI assessment grades and classification criteria
表 1. PCI 评定等级和划分标准

| 评价等级 | 优 | 良 | 中 | 次 | 差 |
|------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| PCI | ≥ 90 | $\geq 80, < 90$ | $\geq 70, < 80$ | $\geq 60, < 70$ | < 60 |

Table 2. RDI assessment grades and classification criteria
表 2. RDI 评定等级和划分标准

| 评价等级 | 优 | 良 | 中 | 次 | 差 |
|------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| RDI | ≥ 90 | $\geq 80, < 90$ | $\geq 70, < 80$ | $\geq 60, < 70$ | < 60 |

2.3. 相关系数法原理介绍

在农村公路的运营过程中，由于温度变化、降雨侵蚀、车辆荷载及材料老化的作用，沥青路面会出现不同程度的病害。与高速公路相比，农村公路的病害发展还受到养护不及时、基层强度不足、排水条件较差等因素的显著影响，导致裂缝、车辙、坑槽等病害更易发生并加速恶化。根据公路技术状况评定标准，共有 11 种类型的沥青路面病害存在龟裂、块状裂缝、纵向裂缝、横向裂缝、沉陷、波浪、车辙、坑槽、泛油、松散、修补等。为了揭示各病害之间的耦合原理，本文基于不同地区的路面病害数据集，对路面病害及其之间的相关性进行了分析。常用的相关性分析方法有 Pearson 相关系数、Kendall 相关系数和 Spearman 相关系数。皮尔逊相关系数具有良好的捕捉线性相关性的能力，但在非线性相关噪声中表现较差。Kendall 相关系数作为一种非参数统计量，用于衡量两个有序序列之间的对应程度。高斯噪声 Kendall 相关系数用来衡量两个有序非参数统计量序列之间的对应程度，高斯噪声相对保守。斯皮尔曼相关系数不需要变量数据的分布，对错误数据和极端值不敏感，因此选用斯皮尔曼相关系数进行路面破损之间的相关性分析。

Spearman 相关系数计算公式为：

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=0}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

式中： R_i 和 S_i 为两个排序好的变量的观测值秩次； \bar{R} 和 \bar{S} 为两个变量的平均秩次； N 为每种变量的总数量。

Spearman 相关系数 ρ 的计算结果范围在 $[-1, 1]$ ，当 $\rho > 0$ 时表示两个指标呈正相关， $\rho < 0$ 时表示两个指标呈负相关， $\rho = 0$ 时表示两个指标完全不相关，相关性强弱一般按照式(1)计算结果的绝对值划分为五级表征，具体各个等级[9]如表 3 所示。

Table 3. Correlation degree of Spearman correlation coefficient
表 3. Spearman 相关系数的相关程度

| ρ | 相关程度 |
|-------------------------|------|
| $0 < \rho \leq 0.3$ | 轻微相关 |
| $0.3 < \rho \leq 0.5$ | 中度相关 |

续表

| | |
|-------------------------|------|
| $0.5 < \rho \leq 0.8$ | 显著相关 |
| $0.8 < \rho < 1$ | 高度相关 |
| $ \rho = 1$ | 完全相关 |

3. 结果与分析

3.1. 路面损坏状况总体演变规律

为掌握路网性能的宏观衰变趋势，统计了 4 条公路连续三年的 PCI 和 RDI 均值及其等级占比，如表 4 和表 5 所示。

Table 4. Percentage of each grade of the damage condition index for Routes 1~4 from 2022 to 2024
表 4. 2022 年至 2024 年路线 1~4 损坏状况指数各等级所占百分率

| 路线 | 年份 | PCI (%) | 优(%) | 良(%) | 中(%) | 次(%) | 差(%) |
|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| 路线 1 | 2022 | 90.7 | 72 | 23 | 5 | 0 | 0 |
| | 2023 | 88.5 | 52 | 43 | 5 | 0 | 0 |
| | 2024 | 86.4 | 35 | 58 | 7 | 0 | 0 |
| 路线 2 | 2022 | 91.5 | 75 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| | 2023 | 87.9 | 45 | 50 | 5 | 0 | 0 |
| | 2024 | 83.6 | 18 | 62 | 20 | 0 | 0 |
| 路线 3 | 2022 | 93.3 | 88 | 10 | 2 | 0 | 0 |
| | 2023 | 92.1 | 82 | 16 | 2 | 0 | 0 |
| | 2024 | 90.8 | 75 | 22 | 3 | 0 | 0 |
| 路线 4 | 2022 | 92.6 | 81 | 19 | 0 | 0 | 0 |
| | 2023 | 90.5 | 65 | 30 | 5 | 0 | 0 |
| | 2024 | 88.2 | 48 | 47 | 5 | 0 | 0 |

表 4 的数据清晰地揭示了研究路网综合性能(PCI)的逐年衰变规律。首先，从均值上看，所有 4 条路线的 PCI 均值在 2022 年至 2024 年的观测期内，均呈现出持续的逐年下降趋势。这表明路网的整体服务水平正在普遍劣化。其中，路线 3 的性能衰退最为缓慢，三年间均值仅下降 2.5；而路线 2 的衰退最为严重，均值下降高达 7.9，表明不同路段的劣化速率存在显著差异。其次，从等级占比的迁移变化来看，揭示了更深层次的衰变模式：所有路线的“优”等级占比均大幅下降。以衰退最快的路线 2 为例，“优”等级占比从 2022 年的 75%骤降至 2024 年的 18%，这说明大量的高性能路段在短期内发生了性能“降级”。与“优”等级相反，“良”等级路段占比在多条路线上均呈现显著增长。这并非路况改善，而是“优”等级路段劣化后跌入“良”等级的结果，使得“良”等级路段成为了性能衰变过程中的一个“蓄水池”。2024 年，路线 2 中开始出现 20%的“中”等级路段。虽然未出现“次、差”路段，但这 20%的“中”级路段是未来 1~2 年内可能发生结构性破坏的风险点，也是养护决策需要关注的重点。综上所述，PCI 数据分析表明：煤矿区路网在观测期内正经历着“优转良”的主导性迁移。重载交通虽然加速了这一过程，但路面整体结构尚属稳定，目前正处于预防性养护的最佳窗口期。

Table 5. Percentage of rutting conditions index for Routes 1~4 from 2022 to 2024
表 5. 2022 年至 2024 年路线 1~4 车辙状况指数各等级所占百分率

| 路线 | 年份 | RDI (%) | 优(%) | 良(%) | 中(%) | 次(%) | 差(%) |
|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| 路线 1 | 2022 | 93.6 | 86 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| | 2023 | 89.8 | 55 | 40 | 5 | 0 | 0 |
| | 2024 | 86.5 | 30 | 60 | 10 | 0 | 0 |
| 路线 2 | 2022 | 92.4 | 74 | 26 | 0 | 0 | 0 |
| | 2023 | 86.2 | 30 | 55 | 15 | 0 | 0 |
| | 2024 | 80.5 | 10 | 50 | 35 | 5 | 0 |
| 路线 3 | 2022 | 93.8 | 90 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| | 2023 | 92.0 | 78 | 20 | 2 | 0 | 0 |
| | 2024 | 90.2 | 65 | 32 | 3 | 0 | 0 |
| 路线 4 | 2022 | 91.8 | 70 | 28 | 2 | 0 | 0 |
| | 2023 | 88.5 | 45 | 50 | 5 | 0 | 0 |
| | 2024 | 85.8 | 28 | 60 | 12 | 0 | 0 |

表 5 的数据则从路面结构性变形的角度，揭示了更为严峻的衰变特征。首先，从均值上看，RDI 均值的下降趋势与 PCI 保持了高度一致。衰退最快的路线 2 下降 11.9 和最慢的路线 3 下降 3.6 完全吻合，证实了路网的结构性性能正在同步劣化。其次，从等级占比的演变分析中，可以发现 RDI 的劣化速度比 PCI 更为迅猛，RDI 的“优”等级占比下降幅度远超 PCI。除路线 3 外，其余三条路线的“优”等级占比在三年内均跌至 30%或以下。这说明路面抗车辙性能的衰退是导致路况劣化的首要因素。RDI 的“中、次”等级路段增长迅猛，成为吸纳“优、良”等级路段的主要去向。以路线 2 为典型代表，其“中、次”等级路段占比总和从 2022 年的 0%激增至 2024 年的 40%。这表明该路段的变形积累已接近临界值。此外，RDI 数据中已出现“次”等级路段，而同期的 PCI 数据中尚未出现“次”等级。这表明在重载作用下，结构性病害先于表面病害出现，是路面破坏的先行指标。综上所述，RDI 数据分析有力地证明，在煤区重载交通作用下，路面结构性变形是该路网当前最主要、衰变速度最快的损坏模式。路面抗车辙能力的急剧丧失，是导致路网整体性能 PCI 同步下降的核心驱动力。这一发现清晰地指向了以抗车辙为核心的养护策略的必要性。

3.2. 典型病害分布与成因

3.2.1. 主要病害类型统计

在对路面损坏与车辙详细数据的全面统计与整合之后，选取典型路线 2 作以下研究获得了关于所有调查路段病害分布情况的直观数据，如图 1 所示。

路线 2 的病害总数从 2022 年的 955 处激增至 2024 年的 2205 处，两年增长率高达 130.9%。这是所有路线中最快的老化速度，与其承受的极端交通压力存在极高的联系，表明路面结构已接近或达到其设计寿命的临界点。2024 年，其病害构成被荷载型病害完全主导：龟裂、纵向裂缝和车辙。这三类病害直接指向路面结构承载力不足的问题。特别是大量的龟裂，是路面结构即将发生大范围破坏的严重预警。通过对检测数据进行病害统计，选取典型路线 2 作以下研究，研究区域最主要的病害类型为：车辙、龟裂、纵向裂缝、横向裂缝。其中前三种均是典型的荷载关联型病害，与煤区道路的服役条件高度吻合。

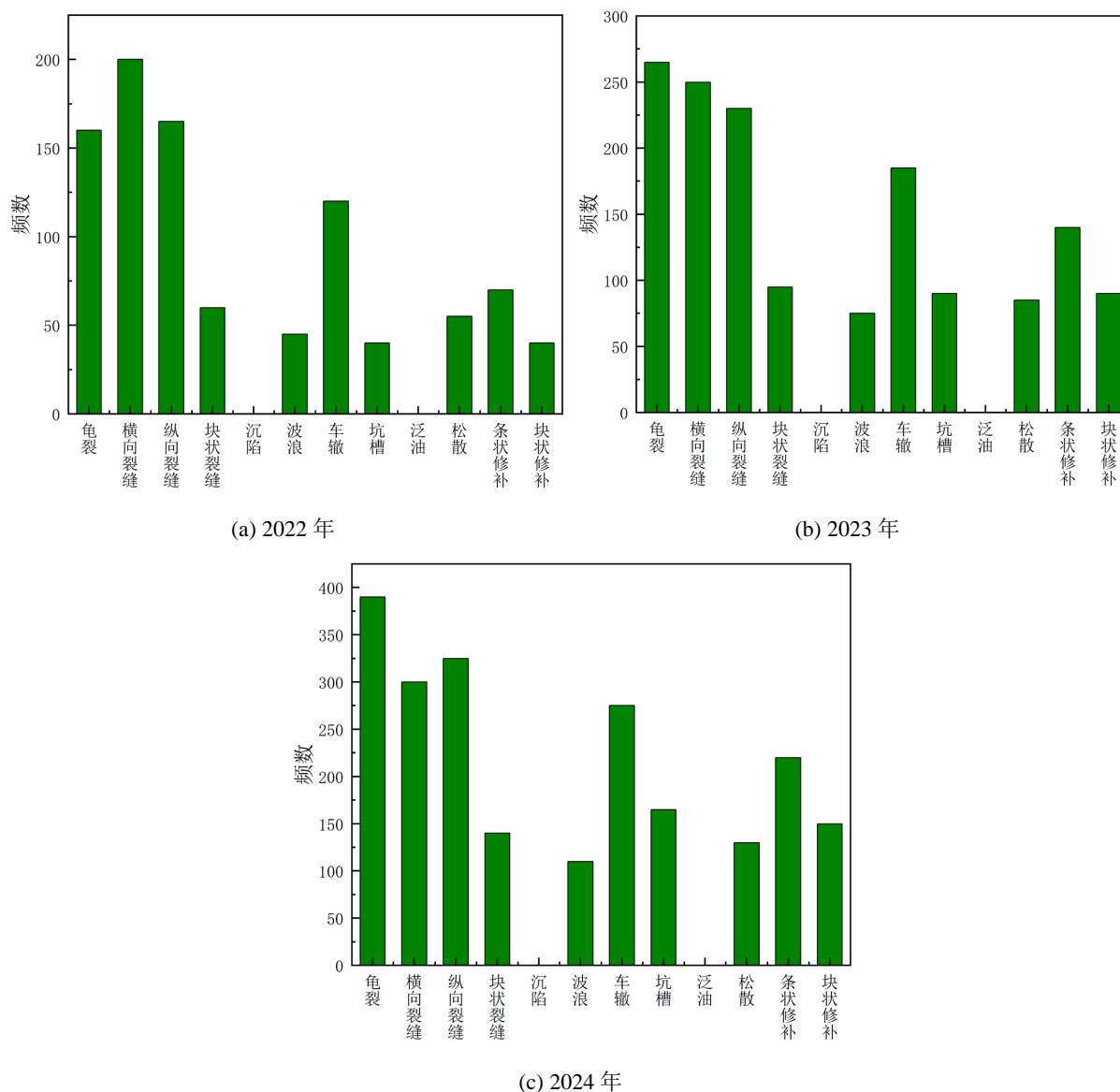


Figure 1. Statistical chart of various types of diseases in Route 2

图 1. 路线 2 各类型病害统计图

3.2.2. 典型病害形成机理

裂缝是造成沥青路面破坏的主要因素之一[10], 车辙是路面结构在荷载作用下发生的永久变形累积。以下将对各种主要病害类型开展详细的成因分析。

1) 车辙

在行车轮迹带位置, 路面出现纵向带状凹陷。在雨后, 车辙内会积水。它是影响行车舒适性和安全性的严重病害。车辙是路面结构在荷载作用下发生的永久变形累积。车辙的产生并非单一原因, 而是材料、结构、荷载、环境等多种因素综合作用的结果。车辙通常分为两类[11]: 一类为结构无关型车辙, 另一类为结构相关型车辙, 前者车辙的病根在于沥青混合料本身, 与下方的基层、土基等结构层关系不大。变形主要发生在沥青面层内部。后者车辙的病根在于路面结构承载力不足, 即下方的支撑层发生了永久变形。

2) 龟裂

龟裂由一系列相互连接的裂缝构成，形成许多小尺寸、多边形的不规则块状，外观酷似鳄鱼皮或鸡笼网。这种病害几乎总是出现在行车轮迹带范围内。它是路面结构性损坏中最典型、最危险的信号之一。龟裂的根本原因是疲劳破坏，行车荷载的作用使基层材料失去承载力[12]，即路面结构在车辆荷载的反复作用下，应力/应变超过了其承受极限。

3) 纵向裂缝

纵向裂缝方向大致平行于道路中心线。可能出现在轮迹带内，也可能出现在两条施工车道的接缝处。纵向裂缝的成因较为复杂，可能是多种因素作用的结果[13]。两条相邻的摊铺带之间的接缝没有很好地粘结和压实，是导致路中纵向裂缝最常见的原因。出现在轮迹带的纵向裂缝，可能是龟裂的早期形式，即疲劳裂缝尚未相互连接成网状。与横向裂缝类似，纵向裂缝同样会因温度收缩应力而产生。路基或路肩不均匀沉降，使得路面被拉伸开裂。

4) 横向裂缝

横向裂缝方向大致垂直于道路中心线。裂缝通常较为平直，间距可能规则也可能不规则。横向裂缝主要是由温度变化引起的，属于非荷载型裂缝[14]。沥青材料在低温环境下会收缩，当收缩产生的拉应力超过了沥青混合料当时的抗拉强度时，路面就会被“拉开”形成裂缝。随着使用年限增加，沥青会变硬变脆，其在低温下的变形能力大大降低，更容易因温度收缩而开裂。且施工时选用了不适合当地气候条件的沥青标号也会产生裂缝，沥青混合料摊铺或压实不均匀，在薄弱处形成应力集中导致裂缝的产生。

3.3. PCI、RDI 及主要病害间的相关性分析

为定量验证上述病害及指标间的内在关联，本研究采用 Spearman 相关系数法进行分析。

3.3.1. 主要病害间的相关性

选取 2023 年路线 2 病害相关性分析结果为例，相关性分析热图如图 2 所示，图中红色深浅代表两病害之间的相关性程度绝对值的大小，红色越深表示相关性越大，数字表示的是横纵坐标病害间的 Spearman 相关系数，正数表示正相关，负数表示负相关。由上述的统计分析得出研究路网的主要病害为龟裂、纵向裂缝、横向裂缝、车辙和坑槽。

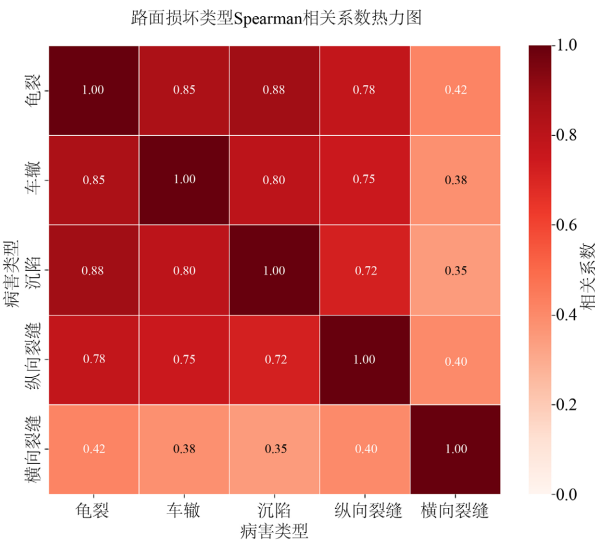


Figure 2. Heat map of road surface damage types
图 2. 路面损坏类型热力图

图2展示了煤矿区公路五种主要病害类型的 Spearman 相关系数热力图,揭示了路面破损在重载交通与环境因素共同作用下的典型耦合特征。首先,龟裂、车辙、坑槽与纵向裂缝四者之间高度正相关,其相关系数均维持在 0.72 以上。其中,龟裂与坑槽的相关性高达 0.88,位居所有组合之首,这印证了重载疲劳致裂、水入渗软化、动水压力致坑槽的典型水损害演化链条;同时,龟裂与车辙的相关系数达到 0.85,表明在煤车的高轴载剪切作用下,路面的结构性变形(车辙)与疲劳开裂(龟裂)往往呈现出极高的时空同步性,具有显著的伴生特征。相比之下,横向裂缝表现出明显的独立性,其与其他四种病害的相关系数均分布在 0.35 至 0.42 的低区间。这一弱相关性有力地说明,横向裂缝主要受气温骤降及半刚性基层收缩等环境因素控制,而非受交通荷载主导。综上所述,该路网病害可划分为以“龟裂-车辙-坑槽”为核心的重载伴生病害簇,以及以横向裂缝为主的环境独立病害,这也为后续构建针对性的协同预测模型与差异化养护策略提供了坚实的数据支撑。

3.3.2. PCI 与 RDI 的时空相关性

本研究的重点在于量化 PCI 与 RDI 的耦合关系。

1) 时间序列上的相关性

为揭示单个路段的衰变同步性,对路线 2 的 40 个路段以 1 公里为单元逐一计算了其 2022~2024 年 PCI 时间序列与 RDI 时间序列的 Spearman 相关系数,结果如图 3 所示。

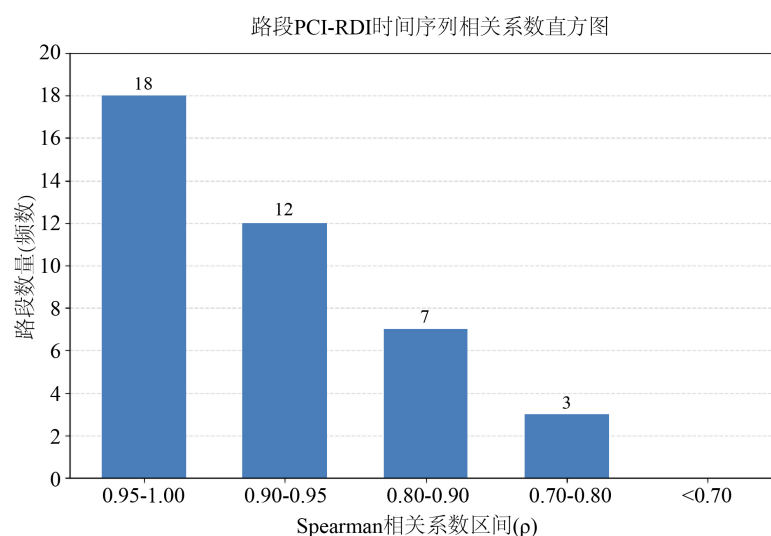


Figure 3. Correlation coefficient graph between PCI and RDI time series

图 3. PCI 与 RDI 时间序列相关系数图

图3直观展示了全线 40 个评定单元 PCI 与 RDI 时间序列 Spearman 相关系数的频数分布特征。统计结果显示,数据分布重心显著向高相关区间偏移。具体而言,相关系数落在 0.95~1.00 极强相关区间的路段多达 18 个,占比 45%,落在 0.90~0.95 强相关区间的路段为 12 个,占比 30%;两者合计,全路网中有 75% 的路段相关系数超过 0.90,而相关系数大于 0.80 的路段累计占比更是高达 92.5% 的有 37 个。这一压倒性的高相关比例定量证实了:在煤矿区重载交通环境中,路面结构性变形(RDI)与综合性能衰退(PCI)在时间维度上具有高度的同步性。仅有极少数路段的相关系数落在 0.70~0.80 区间,且无任何路段低于 0.70,这表明“强耦合”是该路网病害演化的普遍规律。这种时间序列上的高度一致性,为预防性养护提供了坚实的统计学依据。

2) 空间分布上的相关性

为从路网宏观层面量化 PCI 与 RDI 的空间一致性，我们对 2024 年路线 2 所有评定单元的 PCI 值序列和 RDI 值序列进行了 Spearman 相关性计算，结果如图 4 所示。

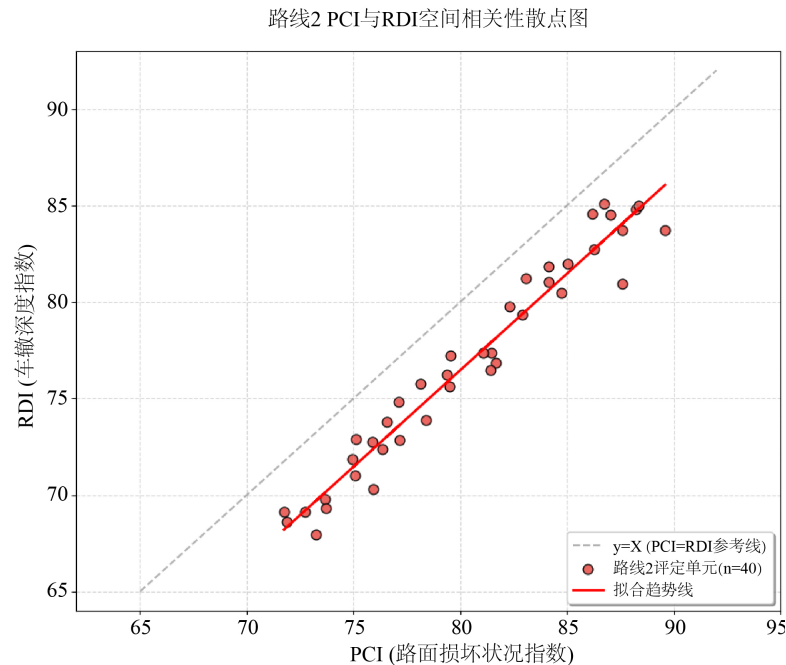


Figure 4. Scatter plot of spatial correlation between PCI and RDI
图 4. PCI 与 RDI 空间相关性散点图

图 4 直观展示了路线 2 全线 40 个评定单元 PCI 与 RDI 值的空间对应关系。统计结果显示，所有数据点紧密收敛于线性拟合趋势线周围，呈现出极强的空间正相关性，表明在该重载路段，路面综合破损与车辙病害的劣化过程在空间分布上具有高度的同步性。更为关键的是，图中拟合趋势线整体位于 $y=x$ 参考线的下方，且两者之间存在约 3.0~4.0 分值的“负向偏移”。这一显著的几何特征定量证实了重载交通对路面结构的“偏向性破坏”机制：即在同一评定单元内，反映车辙深度的 RDI 值始终低于反映综合路况的 PCI 值，说明车辙病害的严重程度高于其他病害。此外，数据点在坐标轴上较大的跨度也反映了路面病害分布显著的空间异质性，暗示了重载车辆在爬坡或制动等特定路段造成了更为集中的结构性损伤。综上所述，在空间维度上路线 2 具有典型的“车辙主导、结构先行”的破坏模式，RDI 已成为制约该路段服务水平的决定性短板。

3.4. PCI 与 RDI 经验性转换模型的构建与应用

3.4.1. PCI 与 RDI 的经验转换模型构建

基于前文对重载路段 PCI 与 RDI 空间相关性的分析，两者表现出极强的线性依赖关系。为了将这一理论发现转化为工程实践中可用的快速评估工具，本研究构建了适用于该煤矿区重载道路的 PCI-RDI 经验性转换模型。利用最小二乘法对路线 2 的 40 个评定单元数据进行线性回归拟合，得到如下经验公式：

$$PCI_{pred} = \alpha \times RDI + \beta \quad (2)$$

其中： PCI_{pred} 为基于车辙深度预测的路面状况指数；RDI 为实测车辙深度指数； α 为协同衰变系数，反映了两种指标随荷载恶化的同步速率； β 为结构性偏移常数，反映了该类路面在无车辙或轻微车辙状态下

的基础破损水平。

根据本研究实测数据拟合, 建议该煤矿区重载路段的参数取值为 $\alpha = 0.98$, $\beta = 4.31$ 。

即:

$$PCI_{pred} = 0.98 \times RDI + 4.31 (R^2 = 0.976) \quad (3)$$

3.4.2. 模型的工程意义与应用价值

在缺乏多功能检测车、仅能人工测量车辙深度的简易巡检场景下, 养护工程师可利用该公式快速反推路面的综合状况, 实现对路况的初步筛查。该经验模型代表了重载路段的“常规衰变模态”。在实际应用中, 若某路段的实测 PCI 显著低于该模型的预测值, 则提示该路段可能存在非荷载因素导致的异常破坏, 需启动专项排查。虽然该线性模型较为简化, 但它确立了 PCI 与 RDI 之间的基准映射关系。这为构建多指标协同预测模型提供了重要的基线模型, 有助于量化复杂模型在预测精度上的提升幅度。

4. 结论与展望

4.1. 主要结论

本研究基于 2022 至 2024 年的多维检测数据, 对煤区典型农村公路沥青路面的性能衰变规律进行了深入分析, 揭示了 PCI 与 RDI 的时空演化特征及其内在耦合机制。主要结论如下:

1) 煤矿区路网呈现显著的非均匀衰变特征, 重载交通是加速劣化的决定性因素。观测期内, 路网整体性能呈单调下降趋势, 但空间异质性极强。以重载运煤专线(路线 2)为代表的重交通路段, 其衰减速率显著高于轻交通对照路段(路线 3)。数据表明, 重载路段正经历着从“优”等级向“良、中”等级的快速迁移, 主要表现为高性能路段占比的锐减以及中等路况的积压, 路面已进入功能性衰减向结构性破坏过渡的关键阶段。

2) 揭示了“车辙主导、结构先行”的重载路面破坏模式。对比分析发现, 重载路段的抗变形性能 RDI 衰减速度显著快于综合抗破损性能 PCI。在空间分布上, RDI 值普遍低于同位置的 PCI 值, 呈现出约 3.0~4.0 分的负向偏移。在 RDI 数据中先于 PCI 出现了次等级路段, 证明在煤矿重载车辆的高轴载剪切作用下, 路面结构性深度变形是制约路网服务寿命的短板指标和先行破坏形式。

3) 量化了路面综合性能与结构变形的时空强耦合机制。Spearman 相关性分析显示, 全网 PCI 与 RDI 在时间序列演化和空间分布上均表现出极强的正相关性。病害关联性热力图进一步证实, 龟裂、车辙与坑槽之间存在高强度的伴生关系, 形成了由重载驱动的“荷载主导型病害簇”; 而横向裂缝则表现出相对独立的环境相关特征。

4.2. 展望与局限性

尽管本研究揭示了煤矿区农村公路沥青路面 PCI 与 RDI 的协同演化规律, 并证实了重载交通对路面结构的特异性破坏机制, 但受限于客观条件与研究范围, 本工作仍存在以下局限性, 有待在后续研究中进一步拓展:

1) 地域与气候的特定性: 本研究的观测数据仅来源于山东省某典型煤矿区。考虑到沥青路面性能对环境温度及水文地质条件的高度敏感性, 得出的具体衰变参数在我国北方严寒矿区或南方多雨矿区的适用性仍需进一步验证。

2) 观测周期的有限性: 本研究基于 2022 年至 2024 年连续三年的检测数据。虽然该周期成功捕捉到了重载路段从“优”向“良、中”快速衰变的加速期特征, 但未能覆盖路面从新建到完全破坏的全寿命周期, 可能导致对路面初期压密阶段或后期结构性崩溃阶段的演化规律认知不够全面。

3) 路面结构类型的单一性: 本研究主要聚焦于典型的柔性基层沥青路面。然而, 农村公路网络中还广泛存在水泥混凝土路面及半刚性基层沥青路面, 不同结构形式在重载作用下的力学响应与病害演化模式存在显著差异, 因此本研究结论的推广需谨慎结合路面结构特征。

参考文献

- [1] 交通运输部发布《2024年交通运输行业发展统计公报》[J]. 交通企业管理, 2025, 40(4): 42.
- [2] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- [3] 张涛, 李明. 重载交通下农村公路沥青路面典型病害成因及对策研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2021, 17(4): 12-14.
- [4] 王旭东. 沥青路面破损评价标准与维修对策研究[J]. 公路, 2018(9): 1-6.
- [5] Pais, J.C., Amorim, S.I.R. and Minhoto, M.J.C. (2013) Impact of Traffic Overload on Road Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, **139**, 873-879. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000571)
- [6] 李强, 王维. 基于数据挖掘的沥青路面多指标性能衰变预测模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2):55-64.
- [7] 交通运输部公路科学研究院. JTG 5210-2018 公路技术状况评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG 5211-2024 农村公路技术状况评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
- [9] 田剑刚, 张沛, 彭春华, 等. 基于分时长短期记忆神经网络的光伏发电超短期功率预测[J]. 现代电力, 2020, 37(6): 629-638.
- [10] 吴成彬. 西藏地区沥青路面裂缝类病害分析及处治措施研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [11] Eisenmann, J. and Hilmer, A. (1987) Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements—Experimental and Theoretical Investigations. *Proceedings of the 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 13-17 July 1987, 392-403.
- [12] 杨露. 伊犁地区省道219线特殊土路基及沥青路面病害处治措施应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [13] 王志强. 浅谈沥青混凝土路面产生纵向裂缝的原因[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(8): 6.
- [14] 牟德清. 沥青道路主要病害及对策分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 70-72+11.