

文章编号:1673-2049(2019)03-0046-09

# 基于 PQI 检测数据的一般路面、桥面和隧道路面性能差异性研究

史小丽<sup>1</sup>, 王亚琼<sup>1</sup>, 张明<sup>1</sup>, 王锋<sup>2</sup>, 张平<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通建设集团公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:**以路龄在5年以上的6条高速公路历史路面使用性能指标(PQI)检测数据为分析对象,从PQI绝对值对比分析和差异值对比分析两方面开展研究。结果表明:绝对值对比分析得出,一般路面与300~500 m的大桥面、500~1 000 m的大桥面性能表现出相同的变化趋势,PQI值相差均在 $\pm 1$ 以内,大于1 000 m特大桥面的PQI与一般路面具有完全不同的变化趋势,最大相差3.54;一般路面与短隧道路面、中隧道路面性能表现出相同的变化趋势,PQI值相差在 $\pm 1.5$ 以内,长隧道路面的PQI与一般路面具有完全不同的变化趋势,最大相差7.48;差异值对比分析得出,随着桥梁长度和隧道长度的增加,一般路面与桥面PQI的差值有由一般差异向较大差异转移的倾向,一般路面与隧道路面PQI的差值有由一般差异向显著性差异转移的倾向;在制定路面小修保养方案或计划时,应将大于1 000 m特大桥面、长和特长隧道路面与其他路面区别对待;在编制路面小修预算清单时,单独编列“大于1 000 m特大桥面”、“长和特长隧道路面”细目,并分别进行小修工程量预测及费用计算,提高路面小修预算的精细化和精确化程度。

**关键词:**路面工程;路面使用性能指标;PQI检测数据;PQI差异程度;路面小修预算

**中图分类号:**U416 **文献标志码:**A

## Differences Among General Pavement, Bridge Deck and Tunnel Pavement Based on PQI Inspection Data

SHI Xiao-li<sup>1</sup>, WANG Ya-qiong<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, ZHANG Ping<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** The historical pavement quality index(PQI) test data taken from six highways that were over five years old, were analyzed by comparative analysis of the absolute values and the different values of PQI. The analysis of absolute values demonstrates that the general pavement has the same variation tendency with the 300-500 m and 500-1 000 m bridge decks, and the difference of PQI is within  $\pm 1$ . A completely different tendency is present within the big bridge decks and general pavement, where the maximum PQI difference is 3.54. The same variation tendency is found within the general pavement, short and medium tunnel pavement, where the PQI is within  $\pm 1.5$ . The PQI of the long tunnel pavement has a completely different trend from that of the general pavement, with the maximum difference of 7.48. The analysis of different values shows that as the bridge length and the tunnel length increase, the PQI difference of

收稿日期:2018-09-28

基金项目:陕西省交通运输厅科技项目(16-34K);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102218112)

作者简介:史小丽(1979-),女,山西永济人,副教授,工学博士,E-mail:glxl@gl.chd.edu.cn。

general pavement and bridge decks varies from a general difference to a large difference. The PQI difference of the general road pavement and the tunnel pavement shifts from a general difference to a significant difference. The big bridge decks, long tunnel pavement, and super-long tunnel pavements need to be treated differently from other pavements when forming a pavement routine maintenance scheme. In compiling the budget list for minor repairs of pavement, separate details of “super-large bridge deck”, “long and super-long tunnel pavement” should be compiled, and the work amount of minor repairs and cost calculation should be carried out respectively, and the precision and accuracy of pavement repair budget can be improved.

**Key words:** pavement project; pavement quality index; PQI inspection data; difference of PQI; budget for road routine maintenance

## 0 引言

公路路面使用性能是决定路面养护方案制定及养护费用大小的关键因素之一,且路面小修保养费用占比在公路各构造物小修工程费用支出中是最高的。公路路面铺装在地基、桥梁和隧道 3 种构造物上<sup>[1-2]</sup>,因 3 种构造物上的路面具有不同的工作环境,中国相关设计规范<sup>[3-6]</sup>对 3 种路面的结构设计有具体的规定,但在对路面使用过程中的性能分析时,未见将一般路面(铺装在地基上的路面)、桥面和隧道路面性能分别研究报道的文献信息。国内外对路面使用性能预测的模型和方法<sup>[7-8]</sup>有力学-经验型模型、概率型模型和人工智能技术,这些方法的确可以用于 3 种路面特别是一般路面性能的预测。力学-经验型模型因路面使用性能变化的影响因素较多,其适用范围有限<sup>[9]</sup>;概率型模型和人工智能技术(如人工神经网络、模糊综合评价)因较抽象,可操作性不强,并未得到广泛使用<sup>[10-13]</sup>;关于桥面和隧道路面性能的研究更多是从材料角度研究如何满足桥梁和隧道的工作环境要求,未见涉及桥面和隧道路面使用性能预测的报道<sup>[14-17]</sup>;根据使用性能决策养护方案或养护费用计划时,公路小修工程预算编制有专门的路面小修内容,也未将 3 种路面分别对待。本文通过对某集团公司管理(同一管理公司可以保证在各条路上的养护策略是相同的)的高速公路自通车以来的路面使用性能检测数据进行分析<sup>[19-21]</sup>,研究一般路面、不同长度的钢筋混凝土梁桥桥面、不同长度的隧道路面性能变化规律,界定并分析 3 种路面性能变化的差异程度,旨在为提高路面小修计划制定的精确性提供理论依据。

## 1 研究方法

本文对路面性能的研究以沥青路面为主,研究

对象是陕西省某交通集团公司管理的高速公路,该公司采用市场化模式对所管辖的高速公路进行管理,每年定期对所管辖的高速公路路面性能进行检测,积累了大量的路面性能检测数据,包括反映路面损坏状况的指标  $P_{CI}$ 、反映行驶质量的指标  $R_{QI}$ 、反映抗滑性能的指标  $S_{RI}$  和反映车辙深度的指标  $R_{DI}$ ,以及反映四者综合性能的指标,本文将以路面使用性能指标 PQI 作为分析研究的基础,包括对一般路面、桥面和隧道路面的 PQI 绝对值对比分析和差异性分析两方面内容。绝对值对比分析将针对通车年限在 5 年以上的 6 条高速公路路面性能随路龄的变化情况分别进行分析,这样可以确保这种分析是建立在具有相同交通量和自然环境基础上,增加了绝对值对比的可比性;差异性分析是通过计算同一个高速公路项目中的一般路面与桥面 PQI 的差值、一般路面与隧道路面 PQI 差值,统计差值的分布状况,确定 3 种路面使用性能的差异程度。

由于养护水平、材料性能、荷载和环境都是影响路面使用性能的因素,本文对这些影响因素作以下处理<sup>[22]</sup>:

(1)以同一公司管理的高速公路作为对象进行研究可以确保研究对象接受的养护管理水平和策略是相同的。

(2)对一般路面、桥面和隧道路面性能的分析是建立在同一公司管理的高速公路并且具有相同路面类型的基础,即路面面层都是沥青路面或者面层都为水泥路面(隧道内)<sup>[23]</sup>。

(3)对于荷载和环境 2 个因素,本文在开展路面性能绝对值分析时是以具有相同交通量和自然环境的高速公路项目为对象进行的,而差异性分析时则不需考虑荷载和自然环境的影响<sup>[24]</sup>。

(4)实体工程中,PQI 检测数据是按上行线和下行线分别检测的,本文将相同里程桩号的上、下行检

测数据进行合并,即一个里程桩号处仅有一个 PQI 值。一条公路路面被分为一般路面、桥面和隧道路面 3 种类型,每种路面的 PQI 值采用加权平均的方法将不同桩号处的检测值进行综合。

(5)研究对象中的桥梁结构均为钢筋混凝土桥,由于同一条公路上桥梁规模大小不同,且数量较多,将钢筋混凝土桥面按桥长分为 3 类,分别为 300~500 m 的大桥面、500~1 000 m 的大桥面和大于 1 000 m 的特大桥面。

(6)对于研究对象中不同长度隧道中的路面,分为短隧道路面(隧道长度  $L\leq 500$  m)、中隧道路面( $500\text{ m}<L<1\,000$  m)和长隧道路面( $1\,000\text{ m}\leq L\leq 3\,000$  m)3 类。

## 2 相同交通量和自然环境下的 4 种 PQI 对比分析

### 2.1 不同长度桥面与一般路面 PQI 对比分析

为更好地对比一般路面、300~500 m 的大桥面、500~1 000 m 的大桥面和大于 1 000 m 的特大桥面 4 种路面在运营期间的使用性能变化状况,选择该公司路龄在 5 年以上的公路项目为分析对象,分别为绕北高速、绕南高速、西镇高速、西长高速、商漫高速和吴靖高速,各项目中包含的不同规模桥面数量及路面结构形式如表 1 所示。将 4 类路面的

PQI 值随路龄的变化情况以折线图的形式表示,如图 1~6 所示,图中纵轴数值统一取 90~100,横轴为路龄,绕南和绕北 2 个项目个别年份数据缺失,缺失数据没在图中显示。

由图 1~6 可知:

(1)在公路运营期间,6 个项目的路面性能指数整体趋向于下降趋势,但均保持在 92 以上,这是对路面进行小修保养的效果体现,反映出该交通公司较高的养护管理水平。

(2)通车前 2 年 PQI 值下降较快,第 3 年之后由于及时小修,PQI 值降幅趋于平缓;当折线出现尖锐的峰值时,一定是实施了预防性养护措施,如图 1,3,6 的第 7 年和图 5 的第 8 年。

(3)4 种路面的 PQI 值确实有一定的差异,特别是大于 1 000 m 的特大桥面各年度 PQI 值均低于其他 3 种路面的 PQI 值,最大差值是 3.54,反映出桥面铺装与普通铺装层表面由于其结构及所处的地理环境不同(桥面铺装位于悬空的钢筋混凝土梁上,而一般路面铺装 in 坚实的路基上),从而出现破损的类型和损坏程度完全不同,这一差异在大于 1 000 m 特大桥面上表现得比较突出<sup>[25]</sup>。

(4)2 种不同长度的大桥面 PQI 值呈现相同的变化趋势,PQI 的绝对值虽然有一定的差异,但二者最大差值仅为 1.66;二者与一般路面 PQI 的最大差

表 1 不同长度桥的路面结构

Tab. 1 Pavement Structures with Different Lengths of Bridges

公路项目		300~500 m 的大桥面	500~1 000 m 的大桥面	大于 1 000 m 的特大桥面
绕北高速	桥梁数量/座	1	5	2
	路面结构	4 cm(AK-16A)+5 cm(AC-20I)+6 cm(AC-25I)		
	一般路面结构	4 cm(AK-16A)+5 cm(AC-20I)+6 cm(AC-25I)+33 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥石灰稳定土)		
绕南高速	桥梁数量/座	0	4	1
	路面结构	4 cm(AK-16A)+5 cm(AC-20I)+6 cm(AC-25I)		
	一般路面结构	4 cm(AK-16A)+5 cm(AC-20I)+6 cm(AC-25I)+33 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥石灰稳定土)		
西镇高速	桥梁数量/座	35	20	6
	路面结构	5 cmAC+7 cmAC		
	一般路面结构	4 cm(AC-13)+5 cm(AC-20)+6 cm(AC-25)+32 cm(石灰粉煤灰稳定碎石)+20 cm(石灰粉煤灰稳定土)		
西长高速	桥梁数量/座	9	9	3
	路面结构	4 cm(SMA-13)+6 cm(AC-20C)		
	一般路面结构	5 cm(SMA-16)+7 cm(AC-25)+10 cm(沥青碎石)+42 cm(石灰粉煤灰稳定碎石)+20 cm(石灰粉煤灰稳定土)		
商漫高速	桥梁数量/座	18	20	8
	路面结构	5 cm(AC-16)+6 cm(AC-20)		
	一般路面结构	5 cm(AC-16)+6 cm(AC-20)+9 cm(ATB-25 沥青稳定碎石)+38 cm(水泥粉煤灰稳定碎石)+20 cm(水泥粉煤灰稳定碎石)		
吴靖高速	桥梁数量/座	19	13	4
	路面结构	4 cm(AC-13)+6 cm(AC-20)+8 cm(AC-25)		
	一般路面结构	4 cm(AC-13)+5 cm(AC-20)+6 cm(AC-25)+34 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥石灰土)		

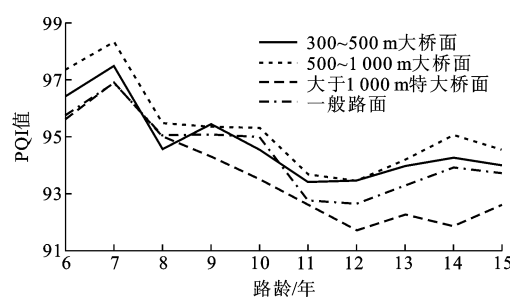


图 1 绕北高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 1 PQI Comparison of Raobei Highway Bridge Pavement and General Pavement

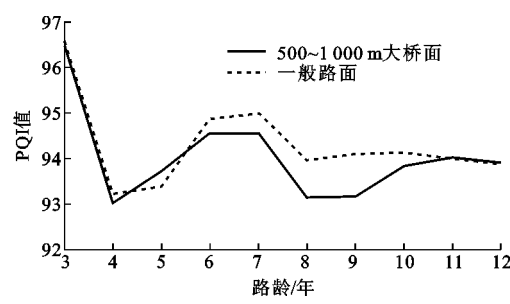


图 2 绕南高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 2 PQI Comparison of Raonan Highway Bridge Pavement and General Pavement

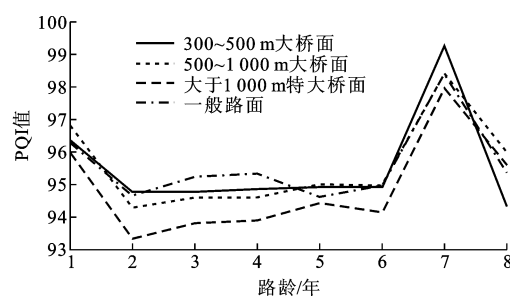


图 3 商漫高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 3 PQI Comparison of Shangman Highway Bridge Pavement and General Pavement

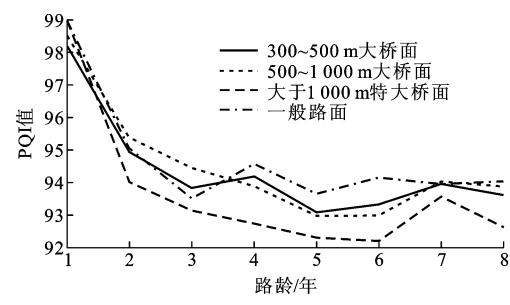


图 4 吴靖高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 4 PQI Comparison of Wujing Highway Bridge Pavement and General Pavement

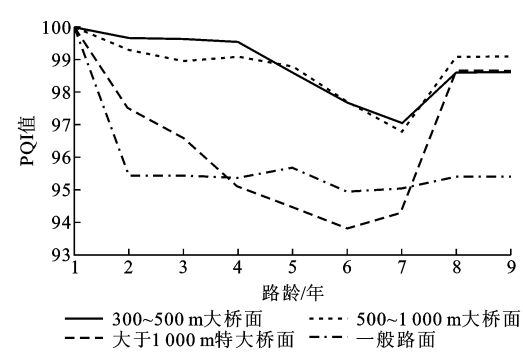


图 5 西长高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 5 PQI Comparison of Xichang Highway Bridge Pavement and General Pavement

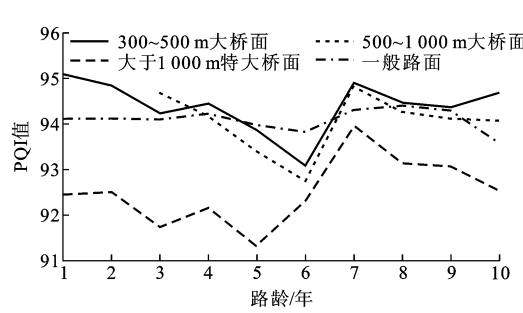


图 6 西镇高速桥面与一般路面 PQI 对比  
Fig. 6 PQI Comparison of Xizhen Highway Bridge Pavement and General Pavement

仅 1 座特大桥,因此图中未示出。

(6)一般路面的 PQI 值并非一定大于大桥面的 PQI 值,但一定大于 1 000 m 特大桥面的 PQI 值,这是由于公路路面在使用期内每年都有不同程度的小修保养,而 PQI 值仅仅反映检测当时的路面性能,如果某个项目检测前桥面刚刚被小修处理过,其 PQI 值高于一般路面是完全有可能的。

上述分析表明,2 类大桥面的使用性能与一般路面的使用性能表现出相同的变化趋势;大于 1 000 m 特大桥面的使用性能比一般路面的使用性能低,且下降的幅度更快一些,反映出大于 1 000 m 特大桥面的破损出现更早更快些。

## 2.2 不同长度隧道路面与一般路面 PQI 对比分析

不同长度隧道路面与一般路面 PQI 的对比分析采用与上述桥面相同的分析思路,由于上述 6 个项目中绕北高速和绕南高速中没有隧道,故仅以其余的 4 个项目为对象进行分析,4 个项目的不同长度隧道数量及路面结构见表 2,一般路面结构与表 1 相同,表 2 中没有再列出。将 4 种路面的 PQI 值随路龄的变化情况以折线图的形式表示,如图 7~10 所示。

由图 7~10 可知:

值分别为 3.85,4.21。  
(5)由于图 2 中大于 1 000 m 特大桥面的 PQI 值没有像其他 5 个图非常显著的差异,且这个项目

表 2 不同长度隧道路面结构

Tab. 2 Pavement Structures with Different Lengths of Tunnels

公路项目		短隧道路面	中隧道路面	长隧道路面
西镇高速	隧道数量/座	12	5	8
	路面结构	27 cm(水泥混凝土)+20 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥稳定碎石)		
西长高速	隧道数量/座	0	1	2
	路面结构	5 cm(SMA-16)+5 cm(AC-20)+26 cm(AC-35)+18 cm(水泥处置排水基层)		
商漫高速	隧道数量/座	5	3	5
	路面结构	25 cm(水泥混凝土)+40 cm(厚水泥稳定碎石)+20 cm(厚水泥粉煤灰稳定碎石)	5 cm(AC-16)+6 cm(AC-20)+9 cm(ATB-25 沥青稳定碎石)+38 cm(水泥粉煤灰稳定碎石)	
吴靖高速	隧道数量/座	11	8	4
	路面结构	4 cm(AC-13)+6 cm(AC-20)+8 cm(AC-25)+40 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥稳定碎石)	4 cm(AC-13)+14 cm(水泥混凝土)+40 cm(水泥稳定碎石)+20 cm(水泥稳定碎石)	

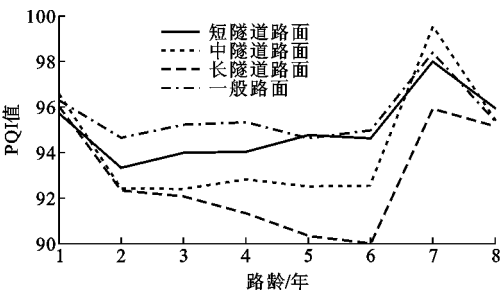


图 7 商漫高速隧道路面与一般路面 PQI 对比

Fig. 7 PQI Comparison of Shangman Highway Tunnel Pavement and General Pavement

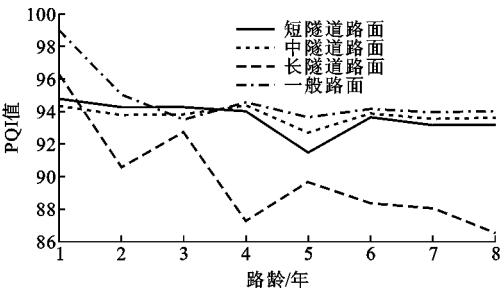


图 8 吴靖高速隧道路面与一般路面 PQI 对比

Fig. 8 PQI Comparison of Wujing Highway Tunnel Pavement and General Pavement

(1)在公路运营期间,4 个项目的路面性能指数整体呈现出下降趋势。短、中隧道路面和一般路面的下降趋势较一致,都比较平缓,PQI 平均保持在 90 以上;长隧道路面的下降趋势则更急促些,PQI 最小值下降到 90 以下,说明在相同的面层结构、交通量和自然环境下,中、短、长隧道路面的确呈现不同的使用性能变化状况。

(2)图 7~10 波动的折线反映了小修保养及预防性养护的实施效果,如图 7,9 的第 7 年、图 8 的第

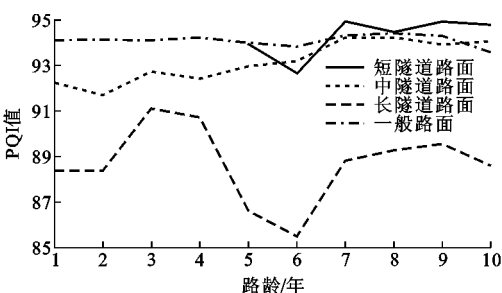


图 9 西镇高速隧道路面与一般路面 PQI 对比

Fig. 9 PQI Comparison of Xizhen Highway Tunnel Pavement and General Pavement

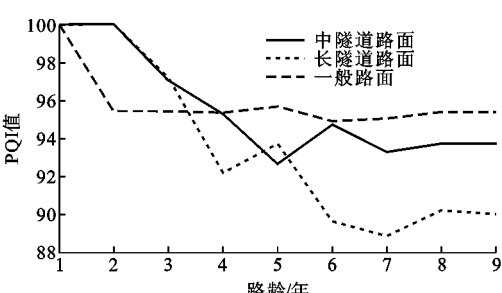


图 10 西长高速隧道路面与一般路面 PQI 对比

Fig. 10 PQI Comparison of in Xichang Highway Tunnel Pavement and General Pavement

4 年。

(3)4 种路面的 PQI 值确实有一定的差异,特别是长隧道路面各年度 PQI 值均低于其他 3 种路面的 PQI 值,最大差值为 7.48,反映出长隧道路面与一般路面由于所处的地理环境不同(承载隧道路面的路基处于山体中,地下水对路面的影响较洞外大<sup>[26]</sup>;隧道路面处于管状构造物内,车辆废气、油烟、粉尘在路表面的黏附比洞外大,且得不到天然降雨的冲洗,长期影响路面的性能),从而出现破损的

时间早晚、损坏程度和类型完全不同,这一差异在长隧道路面上表现得尤为突出。

短隧道和中隧道路面使用性能呈现相同的变化趋势,PQI 的绝对值也有一定的差异。图 7 和图 9 中一般路面为沥青路面,中、短隧道路面是水泥路面,中、短隧道路面 PQI 的最大差值为 2.25,二者与一般路面的 PQI 最大差值分别为 2.83,2.42;图 8 和图 10 中隧道路面与一般路面均为沥青路面,中、短隧道路面 PQI 的最大差值为 1.22,二者与一般路面的 PQI 最大差值分别为 4.62,4.19;中、短隧道的沥青路面比水泥路面对环境更敏感。

图 9 的长隧道路面 PQI 值与一般路面 PQI 值的差异最大,这是因为该项目的隧道路面为水泥路面,其他 3 个项目的长隧道路面为沥青路面,这 2 种路面在长隧道内使用过程中小修处理的难易程度及处理后的效果不同。

一般路面的 PQI 值较隧道路面的 PQI 值大,即使每年都有针对性的小修保养,但隧道内的封闭环境的确对其路面的性能产生了很大的影响。

上述分析表明:中、短隧道路面的使用性能与一般路面的使用性能表现出相同的变化趋势;长隧道路面的使用性能比一般路面的使用性能低,且下降速度更快一些,反映出长隧道路面的破损出现更早更快;隧道的沥青路面受环境因素的影响比水泥路面更敏感。

3 路面性能的差异性分析

本文对 3 种路面性能差异性研究的目的是确定这 3 种路面是否需要分别进行路面性能预测,进而制定养护方案及确定相应的养护费用。差异性分析采用 2 种不同类型路面同一年度 PQI 的差值作为分析指标。根据《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007)中对于 PQI 的定义为

$$P_{PQI}=0.35P_{CI}+0.40R_{QI}+0.10S_{RI}+0.15R_{DI} \quad (1)$$

式中: $P_{PQI}$ 为路面使用性能指标 PQI 的取值。

对 PQI 做单因素敏感性分析(固定公式中其他 3 个指标不变,仅变动其中 1 项指标),结果见表 3;根据敏感性分析结果,将  $\Delta P_{PQI}$  做如表 4 所示的定义。

对同一个高速公路项目中同一检测年度的一般路面与不同长度的桥面 PQI 差值记为  $\Delta P_{PQI(G-B_i)}$  ( $G$  表示一般路面, $B_i$  中  $i=1,2,3$ , $B_1$  表示 300~500 m 大桥面, $B_2$  表示 500~1 000 m 大桥面, $B_3$  表示大于 1 000 m 特大桥面),一般路面与不同长度的隧道路面 PQI 差值记为  $\Delta P_{PQI(G-T_i)}$  ( $G$  表示一般路

表 3 单因素敏感性分析结果

Tab. 3 Single Factor Sensitivity Analysis Results

$\Delta P_{PQI}$	$\Delta P_{CI}$	$\Delta R_{QI}$	$\Delta S_{RI}$	$\Delta R_{DI}$
0.3	0.86	0.75	3	2.00
0.5	1.43	1.25	5	3.33
1.0	2.86	2.50	10	6.67
2.0	5.71	5.00	20	13.30

表 4 差异性程度分类

Tab. 4 Classification of Difference Degree

差异性程度	$\Delta P_{PQI}$
无显著差异	$\leq 0.3$
轻微差异	$(0.3, 0.5]$
一般差异	$(0.5, 1.0]$
较大差异	$(1.0, 2.0]$
显著性差异	$> 2$

面, $T_1$  表示短隧道路面, $T_2$  表示中隧道路面, $T_3$  表示长隧道路面),将各高速公路项目不同年度的 PQI 差值作为统计样本,对样本从小到大进行排序,按表 4 统计各差异性程度的样本数量(频数)及占总样本数的比例。

一般路面与大桥面性能差异性如图 11~13 所示,一般路面与隧道路面差异性如图 14~16 所示。

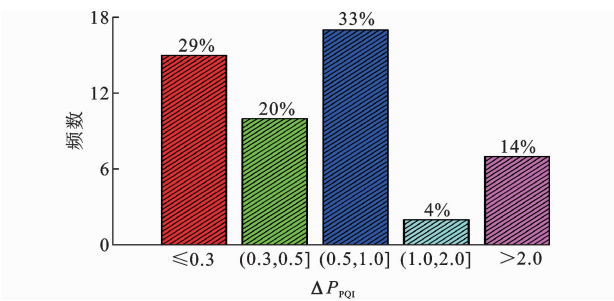


图 11 300~500 m 大桥面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 11 PQI Difference Distribution of 300-500 m Large Bridge Pavement and General Pavement

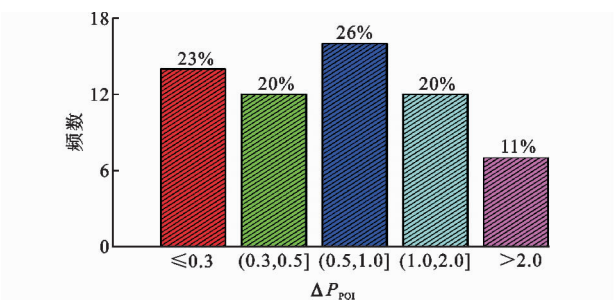


图 12 500~1 000 m 大桥面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 12 PQI Difference Distribution of 500-1 000 m Large Bridge Pavement and General Pavement

由图 11~13 可知:

(1)3 种不同长度桥面在使用过程中与一般路



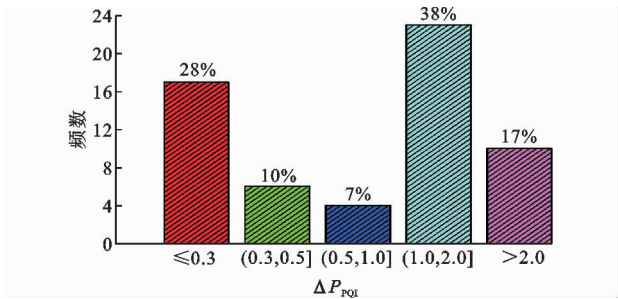


图 13 特大桥面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 13 PQI Difference Distribution of Super Large Bridge Pavement and General Pavement

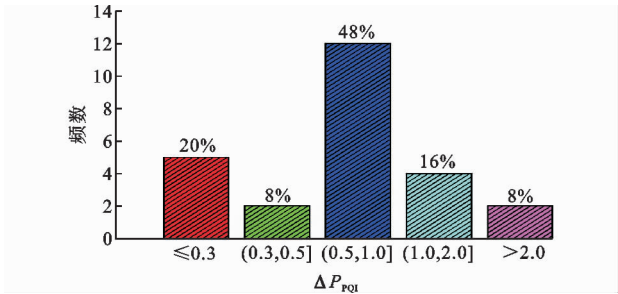


图 14 短隧道路面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 14 PQI Difference Distribution of Short Tunnel Pavement and General Pavement

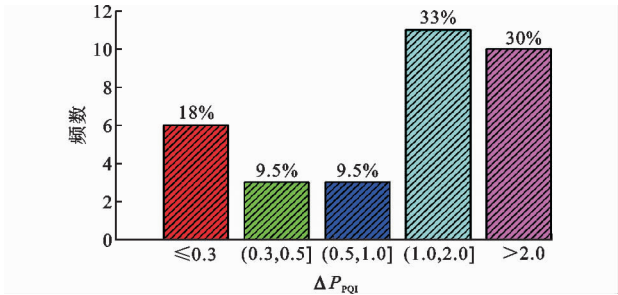


图 15 中隧道路面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 15 PQI Difference Distribution of Middle Tunnel Pavement and General Pavement

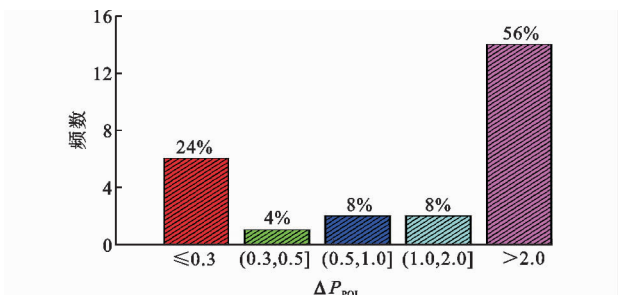


图 16 长隧道路面与一般路面 PQI 差值分布

Fig. 16 PQI Difference Distribution of Long Tunnel Pavement and General Pavement

面使用性能的无显著性差异样本占比分别为 29%，23%，28%，差异较小，这是由于路面通车时间短(2

年)且经过预防性养护。

(2)300~500 m 大桥面、500~1 000 m 大桥面与一般路面性能差异的最大占比出现在一般差异部分,占比分别为 33%和 26%,而大于 1 000 m 特大桥面与一般路面性能差异的最大占比出现在较大差异部分,占比为 38%。这表明随着桥长的增加,桥面使用性能与一般路面性能的差异有由一般差异向较大差异转移的倾向。

(3)统计样本中,3 种桥面使用性能与一般路面存在较大差异和显著性差异的样本数所占比例分别为 18%,31%和 55%。这表明随着桥长的增加,不同长度的桥面  $P_{QI}$  表现出不同的下降趋势。

由上述分析可知,300~500 m 大桥面、500~1 000 m 大桥面与一般路面性能差异较小,而大于 1 000 m 特大桥面与一般路面性能差异较大,反映出桥面长度对路面性能变化的影响。大于 1 000 m 特大桥面性能下降较快,300~500 m 大桥面与 500~1 000 m 大桥面性能变化大致一致。

由图 14~16 可知:

(1)3 种不同长度隧道路面在使用过程中与一般路面使用性能的无显著性差异样本占比分别为 20%,18%,24%。

(2)短隧道路面与一般路面性能差异的最大占比出现在一般差异部分,比例为 48%,中隧道路面与一般路面性能差异的最大占比出现在较大差异部分,比例为 33%,长隧道路面与一般路面性能差异的最大占比出现在显著性差异部分,比例为 56%。这表明随着隧道长度的增加,隧道路面与一般路面的使用性能差异有由一般差异向显著性差异转移的倾向。

(3)3 种隧道路面与一般路面使用性能差异程度在较大差异及以上占比分别为 24%,63%和 64%,中、长隧道路面与一般路面使用性能差异程度为显著性差异部分占比分别为 30%,56%,说明 3 种长度的隧道路面使用性能表现出不同的下降趋势。

上述分析表明,短隧道路面和一般路面性能差异较小,中、长隧道路面和一般路面性能差异较大,并且中、长隧道路面性能差异也较大,反映了隧道长度对路面性能的影响,短隧道路面和一般路面性能差异几乎一致,中、长隧道路面性能分别表现出不同的下降趋势。

## 4 结 语

(1)通过绝对值对比分析和差异值对比分析,对

178座不同长度的钢筋混凝土梁桥桥面、64座不同长度的隧道路面和修建在路基上的一般路面在运营过程中的PQI进行比较,结果表明在相同的路面结构与材料、自然环境、交通组成边界条件下,由于桥面、隧道路面和一般路面所处的工作环境存在较大差异,其PQI表现出完全不同的变化趋势,特别是大于1 000 m的桥面和大于1 000 m的隧道路面,未来路面使用性能的预测中需要对不同长度的路面进行分别预测。

(2)由于路面使用性能进一步影响到路面维修方案及投资计划的制定,因此在路面维护保养过程中,需针对路基段的路面、大于1 000 m特大桥面和中、长隧道路面单独编列工程量清单,这样可达到单独考虑不同种类路面使用性能及病害数量的目的,使路面小修预算更精细化和精确化。本文分析的实例中无特长隧道,但长隧道路面的分析结论同样适用于特长隧道路面。

## 参考文献:

## References:

- [1] LAI J X, WANG K Y, QIU J L, et al. Vibration Response Characteristics of the Cross Tunnel Structure [J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 9524206.
- [2] LAI J X, MAO S, QIU J L, et al. Investigation Progresses and Applications of Fractional Derivative Model in Geotechnical Engineering [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 9183296.
- [3] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范[S]. JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement[S].
- [4] JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. JTG D40—2011, Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement[S].
- [5] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S]. JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [6] JTG D70—2004, 公路隧道设计规范[S]. JTG D70—2004, Code for Design of Road Tunnel [S].
- [7] MAO M, YU X. A Method of Expressway Pavement Performance Prediction[C]// PENG Q. Proceedings of the Second International Conference on Transportation Engineering. New York: ASCE, 2009: 433-438.
- [8] LAI J X, QIU J L, FAN H B, et al. Fiber Bragg Grating Sensors-based in Situ Monitoring and Safety Assessment of Loess Tunnel [J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 8658290.

- [9] CAO W, NOROUZI A, KIM Y R. Application of Viscoelastic Continuum Damage Approach to Predict Fatigue Performance of Binzhou Perpetual Pavements [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2016, 3(2): 104-115.
- [10] 纪红燕, 王 钢, 俞长青, 等. 基于决策树的沥青路面使用性能评价与预测研究[J]. 公路, 2016(4): 18-22. JI Hong-yan, WANG Gang, YU Chang-qing, et al. Study on the Evaluation and Prediction of Asphalt Pavement Performance Based on the Decision Tree [J]. Highway, 2016(4): 18-22.
- [11] 潘怀兵. 基于主成分分析法的沥青路面使用性能评价[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(6): 888-890. PAN Huai-bing. Evaluation of Asphalt Pavement Performance Based on Principal Component Analysis Method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(6): 888-890.
- [12] 李清富, 胡群芳, 刘 文, 等. 基于灰色聚类决策的沥青路面使用性能评价[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2003, 24(2): 44-47. LI Qing-fu, HU Qun-fang, LIU Wen, et al. Asphalt Pavement Performance Evaluation Based on Gray-clustering Decision [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2003, 24(2): 44-47.
- [13] 谢 峰. 基于BP神经网络的高速公路路面性能预测[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015(9): 73-75. XIE Feng. Prediction of Expressway Pavement Performance Based on BP Neural Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technology Edition, 2015(9): 73-75.
- [14] 郭玲玲. 基于遗传神经网络的路面使用性能评价预测[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 223-227, 236. GUO Ling-ling. Pavement Performance Evaluation and Prediction Based on Genetic Neural Network [J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 223-227, 236.
- [15] 何铁军, 黄 卫. 模糊神经网络在沥青路面使用性能评价中的应用[J]. 公路交通科技, 2000, 17(4): 15-18. HE Tie-jun, HUANG Wei. Application of Fuzzy Neural Network in Bitumen Pavement Performance Assessment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(4): 15-18.
- [16] 刘 苏. 混凝土桥沥青混凝土桥面铺装层间稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2017. LIU Su. Stability Analysis of Asphalt Concrete Bridge Deck Pavement for Concrete Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.



- [17] SHI C X, GUO Z Y. Mechanical Properties of Asphalt Pavement Structure in Highway Tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2008, 13(2): 206-210.
- [18] 许新权, 吴传海, 李善强, 等. 基于大样本数据的广东省公路隧道路面安全性能调查研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2016, 40(6): 1116-1119, 1124.  
XU Xin-quan, WU Chuan-hai, LI Shan-qiang, et al. Investigation on Safety Performance of Highway Tunnel Pavement Based on Large Sample Data in Guangdong Province[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2016, 40(6): 1116-1119, 1124.
- [19] 刘慧敏. 高速公路沥青混凝土路面使用性能评价及养护决策研究[J]. 公路, 2006(8): 325-327.  
LIU Hui-Min. Study on Evaluation and Maintenance Decision of Expressway Asphalt Concrete Pavement Performance[J]. Highway, 2006(8): 325-327.
- [20] 李巧茹, 郭知洋, 王耀军, 等. 基于 PCA-SVM 的高速公路沥青路面使用性能评价[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(2): 283-288.  
LI Qiao-ru, GUO Zhi-yang, WANG Yao-jun, et al. Evaluation of Freeway Asphalt Pavement Performance Based on PCA-SVM[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(2): 283-288.
- [21] 卢纯洁. 高速公路沥青路面养护技术及路面状况评价研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
LU Chun-jie. Research on Pavement Maintenance Technology and Pavement Condition Evaluation of Expressway Asphalt Pavement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [22] 张 亮. 沥青路面性能预测及预防性养护技术方案选择分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
ZHANG Liang. Asphalt Pavement Performance Prediction and Analysis of Selecting Preventive Maintenance Schemes[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [23] ABULIZI N, KAWAMURA A, TOMIYAMA K, et al. Measuring and Evaluating of Road Roughness Conditions with a Compact Road Profiler and ArcGIS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2016, 3(5): 398-411.
- [24] HONG F, PROZZI J A, PROZZI J. A New Approach for Allocating Highway Costs[J]. Journal of the Transportation Research Forum, 2007, 46(2): 5-19.
- [25] 何亚斌, 童申家, 温 娟. 混凝土连续梁桥沥青铺装有限元分析[J]. 交通科技与经济, 2009, 11(4): 39-41.  
HE Ya-bin, TONG Shen-jia, WEN Juan. The Stress Analysis of Continuous Concrete Bridge Deck Pavement[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2009, 11(4): 39-41.
- [26] RYE S W, PARK J Y, KIM H B, et al. Behavior and Performance Evaluation of a Concrete Pavement Considering the Temperature Condition in a Tunnel[J]. International Journal of Highway Engineering, 2016, 18(2): 11-18.