

国道109线白银段路面早期破坏特征及影响因素分析

石福周¹, 韩飞^{1,2*}, 汤丹丹³, 刘务文⁴, 张晋源¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 山西农业大学 城乡建设学院, 山西 晋中 030801;
3. 甘肃交通科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 甘肃省交通工程建设监理有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要:为了分析甘肃白银地区公路沥青路面产生早期破坏的原因,该文分析了影响沥青路面使用性能的主要因素,分别对该地区沥青路面的使用状况、气候环境、交通情况进行了调研,以国道109线白银段为例,对其具体数据进行了深入分析。基于路面使用状况的调研,分析了当地沥青路面使用性能的具体情况及其衰变规律;基于气候环境的调研,分析了太阳辐射、温差等条件对当地沥青路面使用性能的影响;基于交通状况的调研,分析了特大货车比例、交通荷载等级对当地沥青路面使用性能的影响。结果表明:自然气候环境、交通荷载等级、路面面层厚度及养护方法的合理性为影响该段路面早期破坏的主要原因。

关键词:路面使用性能;大温差;交通状况;路面病害

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

目前,中国公路总里程不断增长,截止到2021年底中国公路总里程已经达到528.07万km,二级及以上等级的公路达到72.36万km^[1]。庞大的公路里程和中国养护资金尚不充足的矛盾,给中国当前的路面养护事业提出了新的挑战^[2]。分析沥青路面使用状况和影响因素不仅可以为制定合理的道路养护规划提供建议,而且能为路面设计提供参考^[3]。由于公路沥青路面早期破坏形成机理比较复杂,因此分析其破坏原因时不能一概而论^[4-7]。中国国土面积大,不同地区气候环境特点差异较大,甘肃省白银地区地处中国西北黄土高原地区,具有海拔较高、太阳辐射强烈、年温差大、昼夜温差大的特点^[8],使得沥青路面极易出现早期破坏。另外,近年来由于公路交通运输事业的迅猛发展,该地区大型、重型车辆的比例不断加大,也加重了公路沥青路面的早期破坏。

针对性地对甘肃省黄土高原地区沥青路面病害进行研究,不仅可以明确当地沥青路面早期病害的原因与解决办法,还可以为大温差地区沥青路面的设计、施工和养护提供依据和参考。该文主要以国道109线白银段的调研数据为例,具体分析影响其路

面早期破坏的主要因素,为该公路路段日后路面的养护及设计方案的选取提供依据。

1 路面使用性能及影响因素

1.1 路面使用性能指标

路面使用性能是用相应的性能指标来评价的,目前各个国家都基本建成了其路面性能评价体系^[9]。中国的路面使用性能评价指标包括路面使用性能指数(I_{PQI})、路面行驶质量指数(I_{RQI})、路面车辙指数(I_{RDI})、路面破损指数(I_{PCI})、路面抗滑性能指数(I_{SRI})和路面结构强度指数(I_{PSSI})^[10]。对于二级及以下等级公路,通常主要检测其路面行驶质量指数(I_{RQI})和路面破损指数(I_{PCI})。其中 I_{PQI} 的具体计算公式如下:

$$I_{PQI} = w_{PCI} I_{PCI} + w_{RQI} I_{RQI} \quad (1)$$

式中: w_{PCI} 和 w_{RQI} 为各指数权重,分别取0.60和0.40。

根据沥青路面各项指标的评定结果^[11],将路面技术状况划分为优、良、中、次、差5个等级,相关评价标准以及检测和评价指标之间的对应关系如表1所示。

收稿日期:2022-11-03(修改稿)

基金项目:甘肃省住房和城乡建设厅项目(编号:JK2022-22)

作者简介:石福周,男,博士,副教授.E-mail:sfz562236220@163.com

*通信作者:韩飞,男,硕士.E-mail:1196536316@qq.com

1.2 影响因素

路面使用性能受诸多因素的影响,其主要因素可分为路面类型、气候条件、路龄、公路等级、交通量、养护水平、路面材料和其他因素等^[12]。表2为路面使用性能影响因素的具体类型。

表1 路面技术状况评价等级和标准

评价等级	I_{PQI}	I_{PCI}	I_{RQI}
优	≥ 90	≥ 90	≥ 90
良	$80 \sim < 90$	$80 \sim < 90$	$80 \sim < 90$
中	$70 \sim < 80$	$70 \sim < 80$	$70 \sim < 80$
次	$60 \sim < 70$	$60 \sim < 70$	$60 \sim < 70$
差	< 60	< 60	< 60

表2 路面使用性能影响因素

影响因素	具体类型
路面类型	面层类型及厚度、基层类型及厚度
气候条件	温度、湿度和海拔等
路龄	一般为现在到路面新建、改建或最后一次大修的时间
公路等级	不同公路技术等级和行政等级主要影响路面的结构层位和厚度
交通量	尤其指大型车交通量是引起路面疲劳损坏的主要因素
养护水平	较好较合理的路面养护能有效延长路面的使用寿命
路面材料	沥青及石料的种类和性质
其他因素	排水、植被、施工工艺等因素

2 公路路况调查及分析

2.1 公路基本资料

经过现场调研和查阅相关文献资料^[13]发现,白银地区二级公路沥青路面病害多以裂缝类(横向裂缝、纵向裂缝、龟裂)和修补类为主,车辙类病害相对较少。国道109线白银段设计等级为双向两车道二级公路,路面类型为半刚性基层沥青路面,初建时间为2005年,改建时间为2010年,设计速度为60 km/h。该路路基宽度为12 m,路面宽度为9 m,面层为7 cm厚的沥青混凝土材料,沥青材料为韩国SK90[#]沥青,集料为石灰岩集料。半刚性基层沥青路面的一个显著特点是容易产生温缩裂缝和反射裂缝,从而导致沥青路面发生早期破坏。

2.2 路况历史数据分析

收集了国道109线白银段近5年内的路面检测资料,其中桩号K1471+000~K1517+000(路段1)和K1517+000~K1525+000(路段2)分别在2015年、2014年进行了重铺,桩号K1563+000~K1568+000(路段3)和K1579+000~K1589+000(路段4)在2014年进行了碎石封层养护,现对该线路2015—2019年间的路况资料进行分析,具体结果如表3所示。

由表3可知:①路面行驶质量指数 I_{RQI} 整体上处于较高水平,且衰变速率较低,路面破损指数 I_{PCI} 逐年下降,且下降趋势明显。重铺路段在近5年内的路面状况指数都较高,平均值基本都达到良好以上,且优良率很高,在重铺后4年内优良率基本都达到100%;碎石封层养护的路段,路面状况指数普遍偏低,路面 I_{PCI} 值的差次率较高。路面在达到一定的使用年限后,路面病害已很明显,达到路面预防性养护的最低红线值时^[14],碎石封层养护对路面性能的改良效果并不明显,路面养护应结合实际病害情况选择合适的养护措施。个别路段的路面 I_{PCI} 值有突然下降的趋势,可能是重载交通作用下路面已有的裂缝发展为网裂、坑槽等更严重的病害,导致了路面破损值的骤降;②路面使用性能指数良好时, I_{PQI} 、 I_{PCI} 、 I_{RQI} 三者之间的数值较为接近;随着使用性能的下降,其三者之间的差距增大;③比较表3中4个路段的 I_{PCI} 和 I_{RQI} 的标准差数据发现,路面性能状况越好,其标准差越小,标准差呈现出随使用年限逐年增加的趋势。 I_{PCI} 值的标准差整体上要大于 I_{RQI} 值的标准差,尤其在重铺路段使用4~5年后路面 I_{PCI} 值的标准差远大于 I_{RQI} 值的标准差。标准差越大表明数据的离散程度越大,说明随着使用年限的增加同一线路不同桩号之间的路面性能差距就越大。碎石封层养护路段的各项性能指数的标准差都整体大于重铺路段的标准差,说明路面性能指数越低其标准差越高。

由标准差可以求出变异系数,分别计算上述路面破损指数 I_{PCI} 和路面行驶质量指数 I_{RQI} 的变异系数,可以发现路面 I_{PCI} 的变异系数远大于 I_{RQI} 的变异系数,相关文献指出变异系数越大在计算时所取的权重越大,即在路面性能评价时 I_{PCI} 将取较大的权重值,所以 I_{PCI} 为影响该段路面养护决策的主要因素。

2.3 路面性能预测

近几年的路面破损指数 I_{PCI} 进行预测,结果如表 4

对重铺路段(路段 1、2)应用灰色理论建模对其

所示。

表 3 国道 109 线白银段使用性能评定分析汇总

路段	年份	I_{PQI}				I_{PCI}				I_{RQI}			
		平均值	标准差	优良率/%	差次率/%	平均值	标准差	优良率/%	差次率/%	平均值	标准差	优良率/%	差次率/%
1	2015	98.20	0.598	100	0	99.42	0.908	100	0	96.37	0.545	100	0
	2016	97.11	1.950	100	0	97.72	3.213	100	0	96.09	0.672	100	0
	2017	92.23	2.939	100	0	89.71	4.809	100	0	96.03	0.446	100	0
	2018	91.75	2.476	100	0	89.20	3.818	97.8	0	95.56	0.711	100	0
	2019	88.41	3.712	100	0	83.94	5.870	73.9	0	95.11	1.178	100	0
2	2015	96.50	1.043	100	0	96.34	1.806	100	0	96.78	1.082	100	0
	2016	95.45	0.853	100	0	94.65	1.796	100	0	96.65	0.906	100	0
	2017	90.19	1.112	100	0	86.45	1.756	100	0	95.82	0.373	100	0
	2018	89.12	1.768	100	0	84.75	2.677	100	0	95.67	0.712	100	0
	2019	85.94	4.202	87.5	0	80.55	7.286	50.0	12.5	94.03	1.538	100	0
3	2015	82.71	10.279	69.2	23.1	77.86	12.377	46.2	23.1	89.95	9.806	69.2	0
	2016	85.68	11.304	69.2	7.6	81.70	19.173	69.2	30.8	93.54	3.809	100	0
	2017	64.92	6.816	0	76.9	51.34	12.059	0	100	85.29	6.346	84.6	0
	2018	65.82	9.261	15.3	76.9	54.05	12.378	0	84.6	83.46	6.723	76.9	7.6
	2019	77.67	17.176	46.2	46.2	70.44	23.687	46.2	53.8	88.51	8.759	76.9	0
4	2015	91.12	3.710	100	0	87.21	6.128	80.0	0	96.95	0.506	100	0
	2016	92.08	2.680	100	0	88.76	4.348	90.0	0	97.06	0.403	100	0
	2017	64.04	6.121	10.0	90.0	50.11	9.608	0	90.0	84.92	5.103	80.0	0
	2018	66.89	7.838	10.0	80.0	55.69	11.861	10.0	90.0	83.69	5.519	80.0	0
	2019	73.11	16.585	54.5	36.3	66.31	21.162	36.3	45.5	83.32	11.967	81.8	18.2

表 4 重铺路段性能预测

项目	不同年份(年)路段 1 的 I_{PCI}							不同年份(年)路段 2 的 I_{PCI}						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
实测值	99.42	97.72	89.71	89.20	83.94	—	—	96.34	94.65	86.45	84.75	80.55	—	—
预测值	99.42	96.53	92.13	87.93	83.91	80.09	76.43	96.34	93.35	88.68	84.25	80.04	76.04	72.24
相对误差/%	0	-1.42	2.69	-1.42	-0.04	—	—	0	-1.37	2.58	-0.58	-0.63	—	—

由于路段 1 路面的重铺时间较路段 2 的重铺时间晚 1 年,从表 4 可以看出路段 2 路面的 I_{PCI} 预测值整体比路段 1 路面的低 4 左右,大约为 1 年内 I_{PCI} 值的下降量。重铺路段在 6 年后路面使用性能就会出现明显降低,路面破损指数 I_{PCI} 平均值将降到中等及以下,此时路面将需要中修,重铺寿命一般为 6~7 年。

3 甘肃省白银地区气候环境特点分析

3.1 气候环境基本资料

白银地区地处中国西北黄土高原地带,平均海拔在 1 900 m 以上,年平均气温 7℃左右,日极端最高气温为 37℃,最低气温为-26℃。其中年温差大、昼

夜温差大是该地区气候的主要特点,图1为2019年白银市1月和7月的气温变化图。由图1可知:1月平均最低气温在 -11°C 以下,7月平均最高气温在 28°C 以上,年温差达到近 40°C ;1月平均日温差为 12°C ,7

月平均日温差为 13°C 。另外,在春季和秋季的某些月份温差还可能更大,近些年常常出现“一秒入夏”和“一秒入冬”的现象。

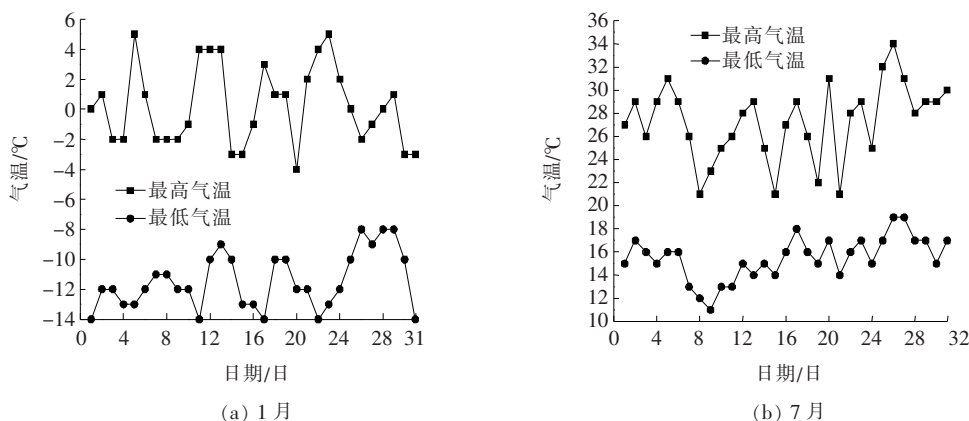


图1 白银市气温变化图

3.2 气候环境特点分析

大温差是该地区气候的主要特点,在太阳辐射作用下路面日温差可达近 50°C ,年温差可达近 80°C 。沥青路面在此昼夜温差和年温差的作用下,会长期经受反复的膨胀和收缩作用,从而使沥青混凝土物质内部的组织结构发生变化,沥青混凝土材料的抗变形能力将会降低。随着气温的降低,沥青的黏滞度增高,强度增大,变形能力降低,此时在车辆荷载作用下极易出现脆性破坏。在气温下降,特别是急骤降温时,沥青层受基层的约束而不能迅速收缩就会产生很大的温度应力,若累计温度应力超过沥青混合料的极限抗拉强度时路面即会开裂。同时,当降温幅度大时,轴载对路面的影响会很大,降温幅度小时,轴载对路面的影响较小^[15],此类气候条件也加重了路面轴载型裂缝的产生。

一般情况下,海拔越高,日照时间越长,紫外线辐射就越强烈,在强烈的太阳紫外线作用下,极易造

成沥青的老化,使沥青黏塑性降低,路面变得脆硬、抗磨耗性降低,在车辆荷载作用下沥青路面极易出现剥落、裂缝和龟裂等病害。此外,由于冬季降雪的影响,路面除雪除冰等会给公路带来严重的盐腐蚀,盐损坏^[16],这也加重了沥青路面的早期破坏。

4 历年交通量情况分析

4.1 交通量数据分析

交通量作为路面设计时的主要因素,不同类型和种类的交通量组成对路面性能的影响不同。同时行车荷载作为影响路面使用性能的主要动态因素,路面上的许多病害都直接或间接与行车荷载有关。收集国道109线白银段2015—2018年的交通量资料,具体如表5、6所示(道路交通调查时,将不同车型分为表5、6中的6类)。

表5 国道109线白银段2015—2018年的交通量信息

年份/ 年	交通量/(辆·d ⁻¹)								T_{AADT}
	中小客	大客	小货	中货	大货	特大货	自然数	当量数	
2015	2 933	169	553	408	279	1 510	5 852	11 229	2 366
2016	3 031	176	535	386	271	2 150	6 549	13 822	2 983
2017	2 983	174	562	367	243	2 346	6 675	14 470	3 130
2018	2 635	130	534	330	211	2 466	6 306	14 356	3 137

注: T_{AADT} 为两轴六轮及以上车辆的双向年平均日交通量(辆/d)。

表6 国道109线白银段2015—2018年的交通量构成比例

年份/ 年	交通量组成/%					
	中小客	大客	小货	中货	大货	特大货
2015	50.11	2.88	9.44	6.97	4.76	25.80
2016	46.28	2.68	8.16	5.89	4.14	32.83
2017	44.69	2.61	8.42	5.50	3.64	35.15
2018	41.79	2.06	8.47	5.23	3.35	39.11
年平均增 长率/%	-2.08	-0.20	-0.24	-0.44	-0.35	3.33

由表5可知:此段路上的主要车型为中小客车和特大货车,而且在近4年间只有特大型货车明显增加,4年间累计增加达到63%以上,其余车辆4年间没有明显的变化。由表6可知:在2015—2018年4年间的交通量构成比例变化中,只有特大货车的比例在不断增加,从25.80%增加到39.11%,增速迅猛,说明为了节约运输成本,货车在朝着大型化的趋势发展。在2018年,特大货车占到货车总量的69.6%,表明现阶段公路货物运输主要以特大货车运输为主。

由规范及相关文献可得^[15-19]:路面破坏主要是由大型货车的疲劳作用造成,在进行车辆轴载换算时,车型越大,满载比例越高,车辆的轴载换算系数就越大,更大的换算系数将算出更大的累计当量轴次。目前,道路超载运输是中国普遍存在的现象,超载问题不仅是总重超载,轴重超载问题也非常严重,特别是持续重型货车排队通行,反复起步停车致使局部路面很快出现网裂、变形等病害,大大缩短其使用寿命。另外,当重交通轴载作用在有温缩内应力的路面上时会加重面层和基层的开裂,使得路面出现早期开裂,甚至损坏。

经计算,国道109线白银段的设计年限内累计大型客车和货车交通量为9 013 651辆,交通荷载等级达到重交通等级,而面层为7 cm的沥青混凝土层根本不能满足此交通量的需求。同时,一般重型车辆的行驶速度较慢,也加重了沥青路面的损坏。在此交通状况和路面厚度不匹配的条件下,沥青路面极易出现早期破坏,缩短其使用寿命。

4.2 路面性能衰减与交通量增长关系分析

对上述重铺路段利用路面性能典型方程(孙立军方程)^[20],具体方程如式(2)所示。以累计轴载作用次数为自变量,路面 I_{PCI} 指数为因变量建立回归模

型^[21-22],具体结果如图2所示。

$$I_{PCI}=I_{PCI_0}\left[1-e^{\left(-\frac{\alpha}{y}\right)^{\beta}}\right]$$

式中: I_{PCI_0} 为路面破坏指数初始值; y 为累计轴载作用次数; α 、 β 为回归系数。

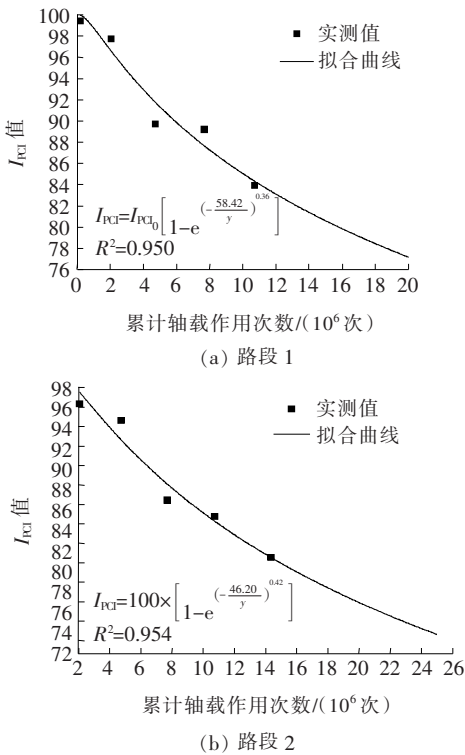


图2 拟合曲线

由图2可知:两段路的拟合效果良好,且相关系数 R^2 都在0.95以上,说明路面 I_{PCI} 值和累计轴载作用次数具有良好的相关性,交通轴载是造成路面破坏的主要动态因素。

5 结论

(1) 历年公路技术状况分析表明,该路段路面 I_{PCI} 值衰减速率较快,重铺使用寿命一般为6~7年,路面破损指数 I_{PCI} 是影响该路段路面养护决策的主要因素。在公路使用时间较长且病害较明显时采用碎石封层养护对路面的整体使用性能提高不明显,路面养护应结合实际的路况选择合理的养护方案。

(2) 白银地区气候环境分析表明:由于太阳辐射强烈、大温差、降雪等自然气候特点造成了沥青及沥青混凝土内部结构发生变化,使得沥青路面抗变形能力降低,在车辆荷载的作用下极易形成裂缝等

病害,造成了沥青路面的早期破坏,所以在路面养护和设计时应考虑气候环境的影响,合理选择沥青材料。

(3) 历年交通量资料分析表明:该路段交通组成主要以中小客车和特大货车为主,且特大货车的数量和所占比例逐年增加。交通等级重是造成路面损坏的主要动态因素,在重载交通路面,可适当增加路面沥青层厚度以减小路面损坏程度。

(4) 国道 109 线白银段路面破坏的主要原因是交通荷载作用和气候环境作用,这两种因素的共同作用是造成其路面早期破坏的重要因素,路面养护和大修时应该充分考虑这两种因素的影响,选择合适的养护维修方案。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2021 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2022-05-25)[2022-09-06].http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content_5692174.htm.
- [2] 周辉.高速公路沥青路面大修养护时机研究[D].合肥:合肥工业大学,2018.
- [3] 王静,李波,马伟中,等.甘肃省河西走廊地区高速公路沥青路面养护对策[J].中外公路,2018,38(1):67-72.
- [4] 苏凯,武建民,陈忠达,等.山区公路沥青路面基层层滑移破坏研究[J].中国公路学报,2005,18(3):56-60.
- [5] YANG Qingguo, NING Jincheng. The environmental influence of asphalt pavement and countermeasures[J]. Energy Procedia, 2011, 5:2 432-2 436.
- [6] ZHANG Chen, WANG Hainian, YANG Xu, et al. A combinational prediction model for transverse crack of asphalt pavement[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(6):2 109-2 117.
- [7] LI Li, TONG Shen Jia. Laboratory evaluation of ultraviolet radiation for asphalt pavement performance in desert regions[J]. Materials Science Forum, 2011, 695: 481-484.
- [8] 陈柯柯.甘肃省典型地区沥青路面高温温度场与车辙预估研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.
- [9] 武建民.路面养护管理系统[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [10] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面养护技术规范:JTG 5142—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [11] 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:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [12] 敬超,张金喜.沥青路面性能预测研究综述[J].中外公路,2017,37(5):31-35.
- [13] 王静.甘肃省高速公路沥青路面使用性能评价与预测决策研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [14] 钟彪,王向峰,李燕.水泥混凝土路面预防性养护路况标准与时机决策[J].公路,2020,65(2):283-287.
- [15] 张云涛.北京市公路沥青路面预防性养护决策方法研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
- [16] 中交公路规划设计院.公路沥青路面设计规范:JTGD 50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [17] 叶俊杰.高等级公路车辆轴载特性研究[D].西安:长安大学,2007.
- [18] 张碧琴,马亚坤,张强,等.重载作用下沥青路面结构验算方法[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(1):1-6.
- [19] 聂奎.轴载与温度耦合应力对路面初始裂缝影响分析[J].河北工业大学学报,2011,40(3):98-101.
- [20] 孙立军,刘喜平.路面使用性能的标准衰变方程[J].同济大学学报(自然科学版),1995,23(5):512-518.
- [21] 张金喜.道路路面性能评价理论及其应用[M].北京:科学出版社,2014.
- [22] 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.