

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.014

引用格式:戴明,于小洋,何焕全,等.极端大温差条件下京新高速公路梧木段温变型病害风险区划研究[J].公路与汽运,2024,40(5):82-88.

Citation:DAI Ming,YU Xiaoyang,HE Huanquan,et al.Study on disease risk regionalization induced by temperature variation under extreme temperature difference in Wutong Daquan—Mulei section of Beijing—Urumqi Expressway[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(5):82-88.

极端大温差条件下京新高速公路梧木段温变型病害风险区划研究^{*}

戴明¹,于小洋²,何焕全³,刘志云³,熊广为⁴

(1.中国铁建投资集团有限公司,广东 珠海 519000;2.陕西建工基础建设集团有限公司,陕西 西安 710082;

3.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;2.湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:受极端气温及强辐射条件循环作用的影响,新疆东天山地区高速公路路面结构层极易诱发高温车辙、低温开裂等温变型病害。为揭示极端大温差作用下京新(北京—乌鲁木齐)高速公路梧木(梧桐大泉—木垒)段路面结构温变型病害风险分布特征,通过数值方法反演地表温度与路面结构层温度的定量关系,提出研究地区高温车辙、沥青层低温开裂病害风险分级方法;建立基于地表温度高精度遥感数据的京新高速公路梧木段温变型病害风险预测模型,研究路面结构温变型病害风险的空间分布规律。结果表明,梧桐大泉—境儿泉段、境儿泉—下马崖段为京新高速公路梧木段高温车辙风险严重路段,一级高温车辙风险里程占比分别为51.58%、66.48%,高发位置集中于SK110—SK120、SK45—SK64、SK20—SK30、SK2—SK10区段;前山—奎苏段、奎苏—巴里坤段、骆驼井子—下涝坝段为沿线沥青上面层低温开裂病害高发路段,一级低温开裂风险里程占比分别为40.62%、18.12%、20.16%,集中于K10—K22、K64—K74、K185—K195区段。

关键词:公路;高温车辙;低温开裂;风险区划;极端大温差

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0082-07

京新(北京—乌鲁木齐)高速公路路线全长约2 800 km,是世界上穿越沙漠最长的高速公路,也是连接新疆东天山地区与内地、助力“一带一路”中亚走廊建设发展的重要经济与战略通道^[1]。其中梧木(梧桐大泉—木垒)段是京新高速公路建设的最后“卡脖子”路段。已有研究表明,极端温度是车辙、开裂等路面结构非荷载型裂缝形成的重要诱因。考虑到京新高速公路梧木段所处地理位置及冷暖季节大温差、强辐射气候特点,该路段沥青路面结构层将极易发生温变型病害。依据前期野外调查结果,受复杂地质条件与极端大温差影响,梧木段建成未通车前即发现路面表层有大量裂缝发育^[2]。因此,开展温变型病害风险等级及区划研究对京新高速公路梧

木段病害防治与科学养护具有重要意义。

国内外学者对路面结构温变型病害的产生机制与参数影响规律开展了大量研究。Norouzi A.等开发临界应力条件下分层黏弹性路面分析程序进行路面模拟,结果表明,面层类型、基层厚度和基层材料类型会影响路面的抗车辙性能,增加底基层厚度,抗疲劳性或永久变形没有显著变化,与实地观测结果一致^[3]。Li Q.等进行改进重复荷载永久变形试验,结果表明,对于3层沥青路面结构,中间沥青层产生的变形最大,其次是顶部和底部沥青层;对于2层沥青路面结构,底部沥青层发生的永久性变形更大^[4]。Coleri E.等的研究表明,黏结剂类型、聚合物改性和层厚是影响沥青层车辙的主要因素,公称最大骨料

^{*} 基金项目:中铁建投资集团科技研发项目(ZTJ2021WBXKYKT);陕西省自然科学基金资助项目(2022JM143);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102262104)

尺寸是次要因素^[5]。李文良通过室内试验获取沥青混合料黏弹性参数,以 Burgers 模型为基础建立山西大新(大同—新广武)高速公路有限元数值模型,分析了研究区域气温与沥青路面车辙的相关关系^[6]。付军等研究不同气候条件下沥青路面车辙变形量,结果表明高温条件下沥青面层的弹性模量降幅超过 30%^[7]。Lei X.等通过对试验路段的长期监测,统计分析了沥青路面温度与车辙深度的依变关系,提出了温度-车辙深度经验公式^[8]。

沥青面层在长时间低温作用下内部收缩应力在特定时刻会超越其抗拉强度,进而在沥青层底部产生低温开裂。Behnia B.等采用基于声发射的方法对沥青材料的低温抗裂性能进行了评估^[9]。Li X. J.等采用带有 8 个压电传感器的声学系统,监测了 7 种沥青混合物在带有不同深度初始裂纹情况下的半圆弯曲(SCB)试验断裂过程,结果显示试验温度对沥青混合料性能影响显著,且较低温度下断裂发展区比较高温下的长,但宽度没有显著差异^[10]。张敏江等将辽宁省划分为 5 个气温分区,研究了不同气温分区沥青路面的蠕变劲度,结果表明沥青路面的抗低温开裂性能在不同温变区间有显著区别^[11]。王晓英从沥青混合料组成和温缩系数分析沥青路面的低温抗裂性能,通过 SCB 试验获取沥青混合料的低温开裂参数,并基于黏结开裂模型研究了沥青面层的温度应力分布规律^[12]。周雪艳等分别对不同种类、不同级配沥青混合料进行低温弯曲试验,通过控制变量方差分析法分析了沥青混合料的低温抗裂性能,发现具有密实型骨架结构的沥青混合料的低温抗裂性能较强,AC-13 的低温抗裂性能强于 AC-20、AC-25^[13]。

极端温度是路面结构病害产生的主要驱动力之一,而已有关于极端温度环境诱发沥青路面结构病害的研究集中于病害机制与参数影响规律分析,缺乏基于遥感数据的病害风险区划研究。本文通过数值方法反演地表温度与路面结构层温度的定量关系,提出研究地区高温车辙、沥青层低温开裂病害风险分级方法,建立基于地表温度高精度遥感数据的京新高速公路梧木段温变型病害风险预测模型,分析路面结构温变型病害风险的空间分布规律,为该路段运营期风险预测与病害防治提供理论参考。

1 路面结构层温变型病害风险区划方法

鉴于京新高速公路梧木段的通车要求,无法在

梧木段沿线路面结构层布置温度传感器直接获取温度监测数据,通过建立京新高速公路典型路基断面地-气耦合传热数值模型^[14],采用数值方法反演路面、沥青层极端温度与地表温度的定量关系式,将根据遥感数据获得的地表温度代入关系式求得路面各结构层温度。

1.1 工程概况

京新高速公路梧木段位于新疆维吾尔自治区东部哈密市东北部巴里坤县,地处东天山北麓、准噶尔盆地东南缘,北邻大红柳峡乡,西毗木垒哈萨克自治县,南部与哈密市七角井镇隔山相望。起于梧桐大泉,途经新疆北部大荒漠地区,终于木垒,路线全长 514.952 km,起讫桩号为 SK2+100.000—K259+806.552,地理坐标为东经 90°74′~95°84′、北纬 42°11′~43°90′(见图 1)。

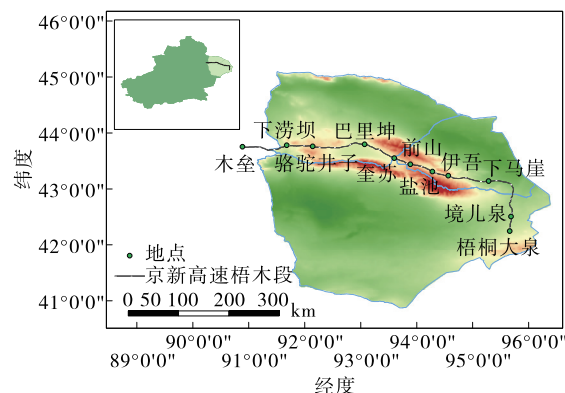


图 1 京新高速公路梧木段线路图

1.2 路面结构层温度数值反演方法

依据京新高速公路伊吾至巴里坤段公路工程施工图建立数值计算物理模型(见图 2),模型由大气区、公路工程天然土层构成,路基高度、宽度分别为 3 m、27 m,坡比为 1:1.5。路基上面层采用 0.05 m AC-16(SBS 改性)沥青,下面层采用 0.07 m AC-25C 沥青,水稳碎石层厚度为 0.53 m。天然土

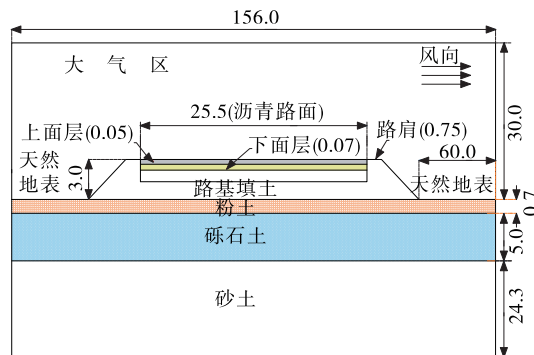


图 2 路基模型示意图(单位:m)

层从上至下依次为粉土、砾石、砂土,厚度分别为 0.7 m、5.0 m、24.3 m。为避免入口效应,路基两侧天然地表宽度取为路基高度的 20 倍。为减少数值模型顶部壁面边界条件对计算结果的影响,大气区总高度取 30 m。空气的热物性参数取 0 °C 时的值^[15],密度 $\rho=1.254\ 1\ \text{kg/m}^3$,比热容 $c_p=1\ 005\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数 $\lambda=0.058\ 6\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。固体模型的热物性参数均取为定值,参数值见表 1^[16]。

表 1 热物性参数值

层位	$\lambda/$ [W·(m·K) ⁻¹]	$c_p/$ [J·(kg·K) ⁻¹]	$\rho/$ (kg·m ⁻³)
面层	上面层	1 300 0	2 300
	下面层	2 492 5	2 300
水稳碎石层	1 200 0	800	2 200
粉土	1 260 0	1 500	1 920
砾石	0 900 0	800	2 000
砂土	2 690 0	730	1 700
路基填土	1 630 0	1 098	1 980

数值计算采用二维非定常隐式求解方法,湍流方程采用标准 κ - ϵ 方程。连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (1)$$

式中: x_i 为不同方向的 x 轴坐标值; ρ 为空气密度; u_i 为各方向的速度分量。

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) \quad (2)$$

式中: p 为空气压力; η 为空气的动力黏度。

能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) + S_T \quad (3)$$

式中: T 为空气温度; S_T 为地层表面的耦合源项。

κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\kappa}\right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i}\right] + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (4)$$

式中: κ 为湍流脉动动能; η_t 为湍流脉动造成的动力黏度; σ_κ 为脉动动能的普朗特数; G_κ 为湍流脉动动能产生项; ϵ 为湍流耗散率。

ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}\right] + \frac{\epsilon}{\lambda}(c_1 G_\kappa - c_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

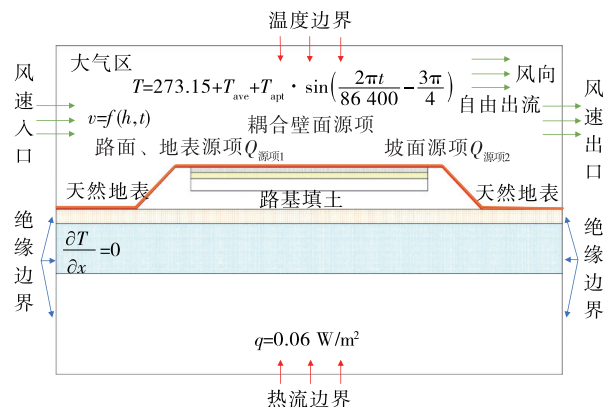
式中: σ_ϵ 为湍流耗散的普朗特数; c_1 、 c_2 为经验常数。

路基体和天然土层内主要通过热传导的方式进行热量传递,控制方程如下^[17]:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (6)$$

式中: c 为定压比热容。

数值计算模型各边界条件设置见图 3,采用 Fluent UDF 程序将温度、风速、地表源项等复杂边界条件导入计算模型。地气耦合数值计算模型中的太阳辐射强度、气温、风速等边界条件数据均取自中国气象数据网。数值计算总时长为 365 d,时间步长为 20 min,残差收敛标准为 10^{-5} 。数值模型的验证参考文献[18]。



T 为大气上部温度(°C); T_{ave} 为年平均气温(°C); T_{apl} 为正弦函数的振幅,即年内气温的振幅(°C); t 为计算时间所处的天数,规定路基建成日期为 $t=0$ 时刻; v 为入口风速; h 为距离地面的高度(m); $Q_{源项1}$ 为路面及地表耦合换热面的源项值即地表所获得的净能量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), $Q_{源项1} = \alpha Q_{\text{太阳辐射}} - Q_{\text{辐射}} - Q_{\text{蒸发}}$; α 为吸收系数; $Q_{\text{太阳辐射}}$ 为投射到地表的总太阳辐射; $Q_{\text{辐射}}$ 为地表对环境的长波辐射热损失; $Q_{\text{蒸发}}$ 为地表通过水分蒸发带走的热量; $Q_{源项2}$ 为坡面耦合换热面的源项值, $Q_{源项2} = \alpha k Q_{\text{太阳辐射}} - X Q_{\text{辐射}} - Q_{\text{蒸发}}$; k 为坡面系数; X 为坡面角系数,其值为 0.85。

图 3 数值计算模型的边界条件设置

1.3 路面结构层温变型病害风险分级

1.3.1 高温车辙风险等级划分

文献[19]的研究表明,温度是高速公路沥青面层动态模量参数的主要控制因素之一,动态模量则反映沥青面层抵抗车辙变形的响应敏感性与严重性。结合试验数据,参考车辙变形过程的典型阶段

特征(快速发展阶段、稳定增长阶段、破坏阶段),根据京新高速公路梧木段路面结构层所用沥青混合料 AC-16(SBS 改性)动态模量在各温度下的变化规律(见图 4),对京新高速公路梧木段高温车辙风险等级进行划分,结果见表 2。

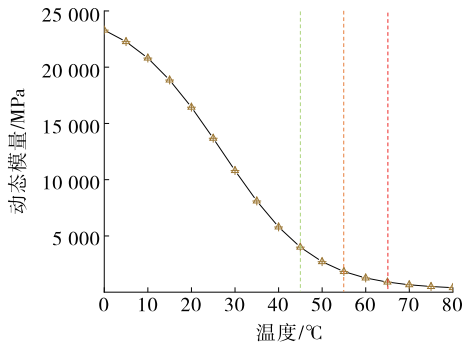


图 4 不同温度下 AC-16 SBS 改性沥青混合料的动态模量

表 2 AC-16 SBS 改性沥青混合料高温车辙风险等级划分

风险等级	温度区间/℃	风险等级	温度区间/℃
一级风险	>65	三级风险	>45~55
二级风险	>55~65		

由图 4 可知:温度小于 45 ℃时,动态模量呈线性降低,沥青混合料处于稳定状态;温度超过 45 ℃时,动态模量增长量降低,下降速度降低,沥青混合料仍处于弹性阶段;温度升至 55 ℃时,沥青混合料的动态模量及增长量曲线均到达拐点温度,沥青混合料开始软化;温度超过 65 ℃时,动态模量基本不变,完全超过沥青混合料的软化点,材料具有很强的黏性特性。

1.3.2 低温开裂风险等级划分

低温下沥青混合料会产生温度收缩应力,在特定温变速率下会产生冻断现象。文献[20]对 AC 型沥青混合料进行冻断试验,设置从 20 ℃到-40 ℃进行降温,降温速率分别为 0.1 ℃/h、0.5 ℃/h、1.0 ℃/h、5.0 ℃/h、10.0 ℃/h、15.0 ℃/h、20.0 ℃/h。文献[21]在-10 ℃的低温条件下采用间接拉伸试验测试沥青混合料的低温性能,并计算其劈裂强度。上述两文献的试验结果见图 5。

根据京新高速公路梧木段路面结构监测数据^[2],沥青上面层底部冬季日温差约为 15.75 ℃,平均温变速率为 1~5 ℃/h。由图 5 可知:温度高于 0 ℃时,沥青混合料的温度收缩应力极低;降至-8 ℃左右时,沥青混合料的温度收缩应力呈线性

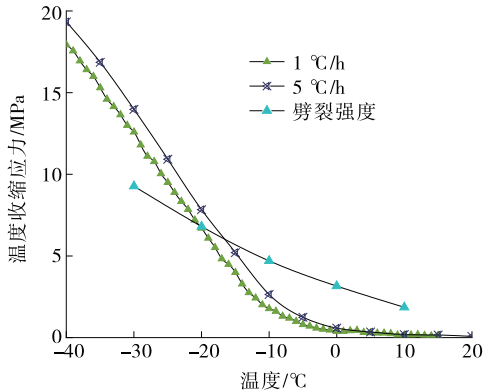


图 5 温变速率为 1 ℃/h、5 ℃/h 时 AC 型沥青混合料的温度收缩应力变化^[20-21]

增长。将沥青混合料的劈裂强度曲线与沥青混合料温度收缩应力曲线交点的横坐标作为沥青混合料低温开裂起始温度,温度变化速率为 1~5 ℃/h 时,开裂温度为-16 ℃左右。

根据文献[20-21]的试验结果,结合京新高速公路梧木段沥青层温变速率,对沥青层低温开裂风险等级进行划分,结果见表 3。

表 3 京新高速公路梧木段沥青层低温开裂风险等级划分

沥青混合料类型	风险等级	温度区间/℃
AC-16(SBS 改性) AC-25C	一级风险	<-16
	二级风险	≥-16~-8
	三级风险	≥-8~0

1.4 基于遥感数据的温变型病害风险预测模型

利用全球尺度地球科学数据在线可视化计算和分析云平台,选取 Landsat 卫星遥感数据集作为数据来源,获取京新高速公路梧木段沿线 2 km 缓冲区地表温度均值合成数据。Landsat 数据集为 16 d 地表温度数据,空间分辨率为 30 m×30 m,过境时间为北京时间凌晨 4:00—5:00。统计研究区域 2013—2022 年 1 月、7 月地表平均温度,并将其代入数值模型计算所得各结构层温度线性回归方程,得到路面与沥青层的极端温度,依据病害风险等级预测京新高速公路梧木段沿线风险区划。预测流程见图 6。

2 结果分析

2.1 地表温度分布特征

图 7、图 8 分别为 2013—2022 年京新高速公路梧木段沿线缓冲区 7 月、1 月的地表温度平均值。由图 7、图 8 可知:1) 地表温度在不同时间存在显著差异,7 月的平均地表温度为 1.73~44.27 ℃,1 月

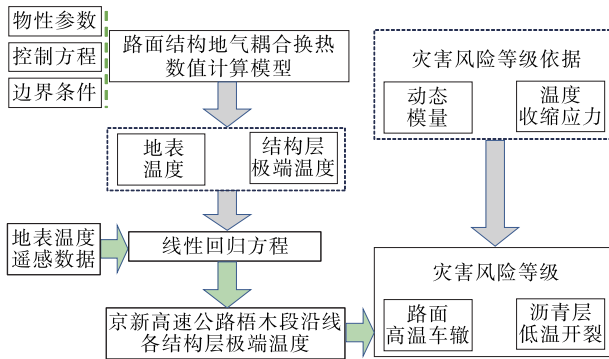


图 6 基于遥感数据的温变型病害风险预测模型

的平均地表温度为 $-21.15 \sim 1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2) 地表温度与海拔存在相关性。高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地表温度主要出现在梧桐大泉一下马崖段;在伊吾地区,随着海拔升高,地表温度降低;在巴里坤地区,随着海拔降低,地表温度升高。在1月,地表温度小于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端低温主要出现在前山—巴里坤段、骆驼井子—木垒段,且负温区间占比较高、地表温度整体较低。

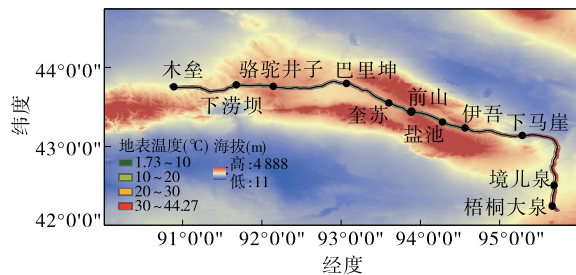
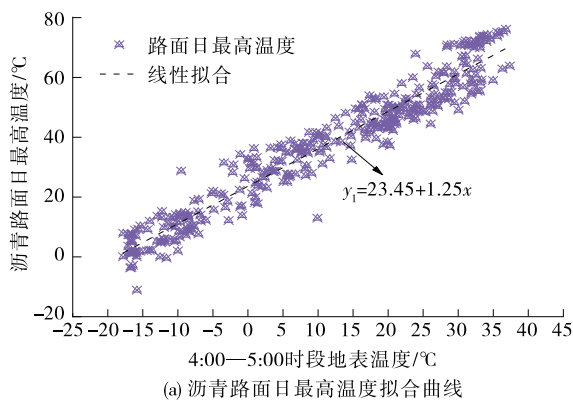


图 7 2013—2022 年京新高速公路梧木段沿线缓冲区 7 月平均地表温度



(a) 沥青路面日最高温度拟合曲线

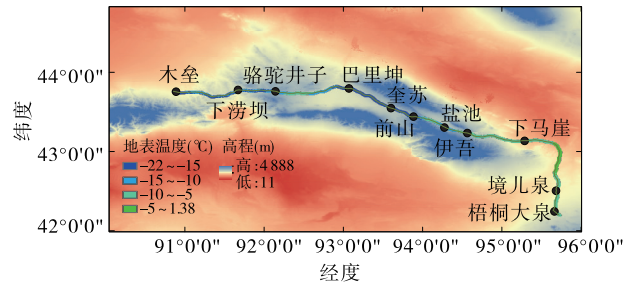


图 8 2013—2022 年京新高速公路梧木段沿线缓冲区 1 月平均地表温度

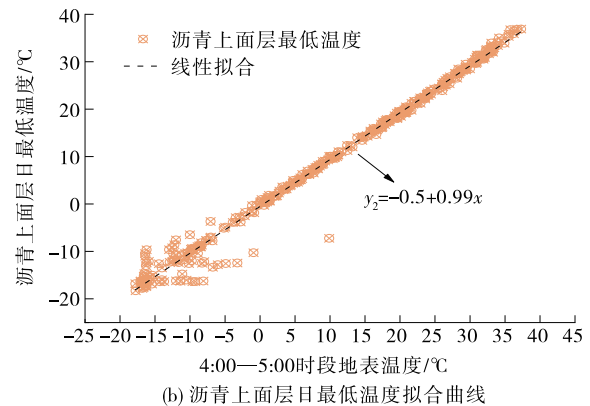
2.2 路面结构层温度特征反演

本文主要研究极端温度条件下路面结构的病害特征。为此,分别分析 7 月地表温度与沥青路面日最高温度的相关性,1 月地表温度与沥青上面层(5 cm)日最低温度的相关性。以每日凌晨 4:00—5:00(与引入地表温度卫星遥感数据的过境时间相对应)时段的平均地表温度为自变量、路面各结构层极端温度为因变量建立回归方程,地表温度与路面各结构层极端温度均为线性相关(见图 9),代入地表遥感温度,得到极端温度 y_1 、 y_2 ,分别用于路面高温车辙和沥青层低温开裂风险等级判别。线性回归模型为:

$$y_1 = 23.45 + 1.25x \quad (7)$$

$$y_2 = -0.5 + 0.99x \quad (8)$$

式中: y_1 、 y_2 分别为路面日最高温度、沥青上面层(5 cm)日最低温度; x 为地表温度(4:00—5:00 时段的平均温度)。



(b) 沥青上面层日最低温度拟合曲线

图 9 数值模拟路面结构日极端温度与地表温度的相关性线性拟合曲线

2.3 温变型病害分布特征分析

2.3.1 高温车辙风险区划

提取京新高速公路所在像元(30 m)和上下各一个像元的地表温度平均值作为预估路面结构层温度的基准地表温度,将其代入上述线性回归模型,得

到京新高速公路梧木段路面各结构层的极端温度分布。对该路段高温车辙、低温开裂病害风险概率进行分析,京新高速公路梧木段沿线各路段高温车辙风险统计结果见图 10。由图 10 可知:梧桐大泉—境儿泉段、境儿泉—下马崖段、巴里坤—骆驼井

子段存在一级高温车辙风险,其中梧桐大泉—境儿泉段、境儿泉—下马崖段产生高温车辙的概率较大,发生一级高温车辙的概率分别为 51.58%、66.48%;下马崖—伊吾段、奎苏—巴里坤段、下涝坝—木垒段存在二级高温车辙风险和三级高温车辙风险,且二级高温车辙风险的占比较高,分别为 70.65%、50.35%、45.69%;其他路段三级高温车辙风险的占比较高,发生高温车辙的概率相对较低。

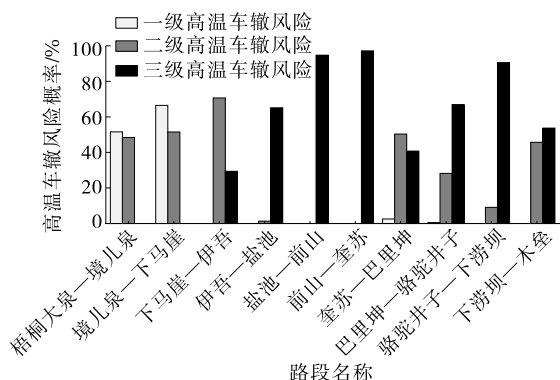


图 10 京新高速公路梧木段各路段路面高温车辙风险概率

发生一级高温车辙风险的主要位置见图 11。由图 11 可知:梧桐大泉—下马崖段一级高温车辙风险区分布呈现多而散的特征,主要出现在 SK110—SK120、SK45—SK64、SK20—SK30、SK2—SK10 区段。夏季应及时对上述路段采取人工降温等措施以防出现车辙病害。



图 11 京新高速公路梧木段发生一级高温车辙风险的位置

2.3.2 低温开裂风险区划

图 12 为京新高速公路梧木段沿线各路段沥青上面层(5 cm)低温开裂风险统计结果。由图 12 可

知:前山—木垒段存在一级低温开裂风险,其中前山—奎苏段沥青上面层发生一级低温开裂的概率最大,达 40.62%,其次为奎苏—巴里坤段、骆驼井子—下涝坝段,发生一级低温开裂风险的概率分别为 18.12%、20.16%;伊吾—木垒段二级低温开裂风险分布均匀且占比较高,均超过 50%,沥青层发生低温开裂的概率较高;境儿泉—下马崖段三级低温开裂风险占 92.89%,沥青层发生低温开裂的风险最低。

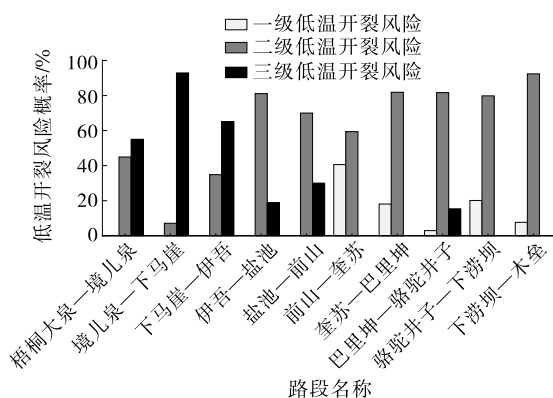


图 12 京新高速公路梧木段各路段沥青上面层低温开裂风险概率

前山—木垒段沥青层发生一级低温开裂风险的主要位置见图 13。由图 13 可知:京新高速公路梧木段沥青层一级低温开裂风险主要出现在奎苏、巴里坤、下涝坝附近,桩号为 K10—K22、K64—K74、K185—K195。应重点关注上述路段沥青层的养护。

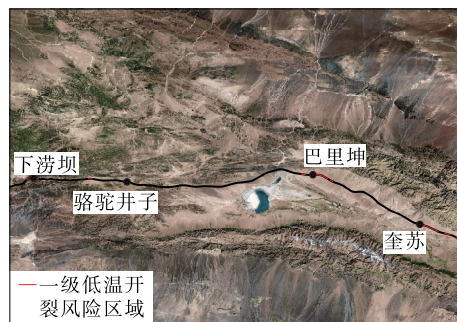


图 13 京新高速公路梧木段发生一级低温开裂风险的位置

3 结论

本文通过数值方法反演京新高速公路梧木段地表温度与路面结构层温度的定量关系,提出该地区高温车辙、沥青层低温开裂病害风险分级方法,并建立基于地表温度高精度遥感数据的温变型病害风险预测模型分析路面结构温变型病害风险的空间分布规律,主要结论如下:

(1) 京新高速公路梧桐木段南北走向的梧桐大泉一下马崖段夏季将面临一级高温车辙风险,其中梧桐大泉—境儿泉段、境儿泉一下马崖段发生一级高温车辙的概率分别为 51.58%、66.48%,需采取针对性的路面降温措施;东西走向的下马崖—木垒段夏季高温车辙风险相对较低,主要为二级和三级高温车辙风险,其中下马崖—伊吾段、奎苏—巴里坤段、下涝坝—木垒段发生二级高温车辙风险的占比比较高,分别为 70.65%、50.35%、45.69%。

(2) 受冬季低温影响,京新高速公路梧桐木段部分路段沥青上面层存在一定低温开裂风险,其中前山—奎苏段沥青上面层发生一级低温开裂的概率高达 40.62%,奎苏—巴里坤段、骆驼井子—下涝坝段发生一级低温开裂风险的概率分别为 18.12%、20.16%,应重点关注上述路段沥青层的养护。

参考文献:

- [1] 彭文顺.京新高速公路内蒙沙漠段综合防沙体系设计[J].公路,2021,66(3):314-318.
- [2] 蒋向阳,潘佳,唐华安,等.京新高速梧桐木段路面温缩裂缝形成机理及处置技术[J].公路,2022,67(10):89-98.
- [3] NOROUZI A, KIM D, KIM Y R. Numerical evaluation of pavement design parameters for the fatigue cracking and rutting performance of asphalt pavements [J]. Materials and Structures, 2016, 49(9): 3619-3634.
- [4] LI Q, YANG H H, NI F J, et al. Cause analysis on permanent deformation for asphalt pavements using field cores [J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 40-51.
- [5] COLERI E, HARVEY J T, YANG K, et al. Micromechanical investigation of open-graded asphalt friction courses' rutting mechanisms [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 25-34.
- [6] 李文良.基于 Burgers 模型的沥青路面车辙预估模型研究[J].公路,2019,64(8):16-22.
- [7] 付军,刘智鸿,左雪娜,等.区域气候变化对沥青路面夏季温度效应的影响分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(2):87-94.
- [8] LEI X, JIANG H W, WANG J, et al. Pavement rut depth prediction for a three-span suspension steel box girder bridge based on two-year temperature monitoring data [J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(3): 04020035.1-04020035.10.
- [9] BEHNIA B, BUTTLAR W, REIS H. Evaluation of low-temperature cracking performance of asphalt pavements using acoustic emission: a review [J]. Applied Sciences, 2018, 8(2): 306.
- [10] LI X J, MARASTEANU M. The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(7): 1175-1190.
- [11] 张敏江,韩梦迪.辽宁省公路沥青结合料低温性能设计参数研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(5):873-880.
- [12] 王晓英.半刚性基层沥青路面低温开裂机理的研究[D].济南:山东建筑大学,2016.
- [13] 周雪艳,马磊,田宇翔,等.青藏高寒地区沥青混合料低温抗裂性能的灰关联分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(5):597-603.
- [14] 汪双杰,崔福庆,陈建兵,等.基于地气耦合模型的多年冻土区宽幅路基温度场数值模拟[J].中国公路学报,2016,29(6):169-178.
- [15] ZHANG M Y, MIN K H, WU Q B, et al. A new method to determine the upper boundary condition for a permafrost thermal model: an example from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(4): 301-311.
- [16] LONG X, YU X Y, JING K, et al. Study on the temperature characteristic and high temperature risk of asphalt layer of Beijing—Xinjiang Expressway Wutong Daquan to Yiwu Section [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2022, 14(3): 173-181.
- [17] NIU F J, LIU X F, MA W, et al. Monitoring study on the boundary thermal conditions of duct-ventilated embankment in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 305-316.
- [18] LIU Z Y, CHEN J B, JIN L, et al. Roadbed temperature study based on earth-atmosphere coupled system in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 167-176.
- [19] 张垚.基于多尺度分析的沥青混合料永久变形预估[D].南京:东南大学,2020.
- [20] 李赫.动静荷载作用下沥青混合料及沥青路面黏弹性力学响应分析[D].长春:吉林大学,2021.
- [21] LUO H, ZHU H P, CHEN C Y. Analysis of thermal stress in asphalt overlay based on thermal-viscoelasticity theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2008, 3(2): 12-17.