

宁夏地区公路病害特征及其成因分析

张雪莹¹, 胡川¹, 武立波^{1,2*}, 丁蓉蓉¹, 马悦¹, 海一帆¹

¹宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

²宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心, 宁夏 银川

收稿日期: 2022年3月24日; 录用日期: 2022年4月13日; 发布日期: 2022年4月22日

摘要

宁夏属于典型的季节冻土区, 季节冻土区的公路因受气候、环境及周期性冻融循环作用的影响, 极易产生路基路面病害, 给公路运营带来严重影响。因季节冻土表现出很强的地域性, 宁夏地区独特的自然与地理条件使该地区的公路病害也具有地域性特征。专门针对宁夏地区公路病害特征的研究既紧迫又势在必行, 通过对宁夏地区北部、中部及南部部分市区内道路、部分国道及省道典型路段的路面病害特征进行调查, 并对病害的成因进行分析, 以期对宁夏地区的公路建设以及病害防治提供借鉴和参考。

关键词

季节冻土区, 宁夏地区, 公路病害特征, 公路病害成因

The Characteristics of Road Diseases and the Analysis of Their Causes in Ningxia Region

Xueying Zhang¹, Chuan Hu¹, Libo Wu^{1,2*}, Rongrong Ding¹, Yue Ma¹, Yifan Hai¹

¹School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

²Ningxia Civil Engineering Technology Research Center for Seismic Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan Ningxia

Received: Mar. 24th, 2022; accepted: Apr. 13th, 2022; published: Apr. 22nd, 2022

Abstract

Ningxia is a typical seasonal permafrost area, and the roads in the seasonal permafrost area are susceptible to roadbed and pavement diseases due to the influence of climate, environmental and periodic freeze-thaw cycles, which bring a serious impact to the road operation. As seasonal permafrost shows strong regional characteristics, the unique natural and geographical conditions of Ningxia region make the road diseases in this region also have regional characteristics. It is urgent

and imperative to study the characteristics of highway diseases in Ningxia region. By investigating the characteristics of pavement diseases in some urban roads, some national highways and provincial roads in the north, central and south Ningxia region, and analyzing the causes of the diseases, we aim to provide a reference for the construction of highways and disease prevention and control in Ningxia region.

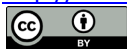
Keywords

Seasonal Permafrost Area, Ningxia Region, Road Disease Characteristics, Causes of Road Diseases

Copyright © 2022 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

我国是世界上第三冻土大国，多年冻土和季节冻土在我国分布广泛，其中季节冻土约占全国陆地面积的 53.5% [1]。季节冻土区的公路因受气候、环境及周期性冻融循环作用的影响，极易产生路基路面病害，给公路运营带来严重影响[2]-[8]。据统计，在国外，如瑞典、芬兰和挪威等国冻害发生期间每年的道路维护费用在 1000 万~3500 万美元[9]，在国内，每年因公路冻害造成的损失更是高达数十亿元[10] [11] [12] [13]。并且已有研究表明无论是冬季的冻胀，还是春夏的翻浆，都会造成基床表面或路面平整度的降低甚至破坏，不但给公路的正常运行造成了安全隐患，而且还需耗费大量资金进行养护，并对这些地区的经济发展及城市面貌造成损害。

鉴于道路冻害的严重危害，许多单位对冻害的类型、产生原因、机理及具体防治措施进行了大量的研究工作，取得了不少有益的成果，对解决实际的工程冻害问题起到了积极的指导作用。研究资料表明，沥青路面裂缝病害类型与裂缝破损率有一定的相关性，随着路面病害增多和裂缝形式趋于复杂，路面病害率值不断增大[14]。宁夏回族自治区位于我国西北内陆，地处黄河水系，地形分为北部引黄灌区、中部干旱带、南部丘陵山区三大板块，1962~2015 年全区年平均气温 8.19℃[15]，极端最低气温为-25.2℃，极端最高气温为 36.7℃[16]。近 50 a 来的气象资料表明宁夏各地最大冻深为 0.83 m~1.59 m [17]，属于典型的季节冻土区，在五中运输方式中，公路交通居主导地位。但是，因季节冻土表现出很强的地域性，国内季节冻土区公路病害的相关研究鲜见宁夏地区的报道，尤其缺乏专门针对宁夏地区公路路面病害特征及其成因的系统研究。因此，本文依照《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018) [18]沥青路面病害损坏分级指标，对宁夏地区北部、中部及南部部分市区内道路、部分国道及省道典型路段开展实地调查研究，总结出宁夏地区公路路面病害的特征，并对病害的成因进行分区域分析，这对于季节冻土区工程实践中的正确应用和合理设计均具有重要的借鉴作用，并对宁夏地区的公路建设以及病害防治具有重要意义。

2. 研究方法

《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018)将沥青路面损坏分为以下 11 种：龟裂、块状裂缝、纵向裂缝、横向裂缝、坑槽、松散、沉陷、车辙、波浪拥包、泛油和修补。根据《季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》(JTG/T D31-06-2017)中“3.4 既有工程冻害资料调查”指出的“对沥青路面重点调查冻胀和开裂、松散、坑槽和沉陷等”，课题组对穿越宁夏地区中北部的 G109 国道宁夏境内路段开展全线

调查研究, 结果表明季节冻土区宁夏地区公路沥青路面病害以横向裂缝、纵向裂缝、修补、网状裂缝与车辙为主, 其影响路段分别占调查路段总里程的 43%、24%、11%、10%与 7%, 可以看出, 横向裂缝与纵向裂缝病害影响路段明显高于其他类型病害。裂缝类病害发展初期对道路安全运营影响较小, 在外部环境水分渗入、车辆荷载及冻融循环等作用下, 裂缝持续发育会对路基路面强度造成严重影响, 缩短道路使用寿命, 危害行车安全。因此, 依据《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018)分别选取宁夏地区北部银川地区、中部中卫地区及南部固原地区裂缝损坏程度为“重”的部分典型路段开展现场调查, 结合道路状况及区域环境因素对冻害特征及成因进行分析与研究。《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018)沥青路面裂缝病害类型及损坏程度等级划分见表 1。

Table 1. Damage type and degree of asphalt pavement crack diseases

表 1. 沥青路面裂缝病害类型及损坏程度

裂缝病害类型	分级	损坏程度分级	分级指标
网状裂缝	轻	缝细、裂缝区无散落, 裂缝块度较大	块度: >1 m
	重	缝宽、裂缝区有散落, 裂缝块度小	块度: 0.5~1 m
纵向裂缝	轻	缝壁无散落或轻微散落, 无或少量支缝	缝宽: ≤5 mm
	重	缝壁散落重, 支缝多	缝宽: >5 mm
横向裂缝	轻	缝壁无散落或轻微散落, 无或少量支缝	缝宽: ≤5 mm
	重	缝壁散落重, 支缝多	缝宽: >5 mm

3. 宁夏地区公路冻害破坏特征

3.1. 北部地区

对银川市贺兰山路、北京路、上海路及凤凰街开展道路病害调查研究, 银川地区各公路线路病害形式及规模如表 2 所示, 典型病害如图 1 所示, 可以看出, 贺兰山路与上海路病害多以横向裂缝为主, 缝宽 10~20 mm, 纵向裂缝少; 凤凰街横向裂缝、纵向裂缝均有分布, 缝宽均为 10~20 mm, 且较为密集; 北京路病害较为严重, 与贺兰山路及上海路相比, 多为贯通的横向裂缝, 缝宽 10~20 mm, 路肩部位处纵向裂缝分布多且密集, 同时普遍分布网状裂缝, 碎裂形成坑槽, 严重影响道路正常运行。

Table 2. Ningxia Yinchuan area research road line and its disease damage form and scale

表 2. 宁夏银川地区调研公路线路及其病害破坏形式与规模

公路线路	冻害破坏形式以及规模
贺兰山路	(1) 横向裂缝, 多、缝宽 10~20 mm; (2) 纵向裂缝, 少
北京路	(1) 贯通的横向裂缝, 多、缝宽 10~20 mm; (2) 纵向裂缝, 分布在路肩部位、多、密; (3) 网状裂缝, 普遍分布、路肩部位的网状裂缝碎裂、形成坑槽
上海路	(1) 横向裂缝, 多、缝宽 10~20 mm; (2) 纵向裂缝, 少
凤凰街	(1) 横向裂缝, 多、缝宽 10~20 mm; (2) 纵向裂缝, 多、缝宽 10~20 mm

3.2. 中部地区

对宁夏中卫地区市区内团结街、G338、G109、G344 国道及 S101 省道开展道路病害调查研究, 中卫地区各公路线路病害形式及规模如表 3 所示, 典型病害如图 2 所示, G338 国道、G344 国道、S101 省道



Figure 1. Typical section of pavement damage in Yinchuan
图 1. 银川市典型路段病害情况

均有横向裂缝分布，部分纵向裂缝发展为小范围网状裂缝；S101 省道、G344 国道及 G109 国道存在贯通的横向裂缝；中宁县团结街存在长纵向裂缝，且缝宽较大，支缝较多。

Table 3. Ningxia Zhongwei area research road line and its disease damage form and scale
表 3. 宁夏中卫地区调研公路线路及其病害破坏形式与规模

公路线路	病害破坏形式与规模
国道 G338	(1) 横向裂缝长度 1 m，宽度为 10~20 mm；(2) 网状裂缝
省道 S101	(1) 贯通的横向裂缝长度 3~4 m，宽度为 30~40 mm；(2) 网状裂缝
国道 G344	(1) 贯通的横向裂缝长度 6~7 m，宽度为 25~40 mm；(2) 网状裂缝
中宁县团结街	(1) 横向裂缝长度 2~4 m，宽度为 20~30 mm；(2) 纵向裂缝长度 6~10 m，宽度为 20~40 mm
国道 G109	(1) 贯通的横向裂缝长度 4~5 m，宽度为 10~15 mm



(a) G338 国道

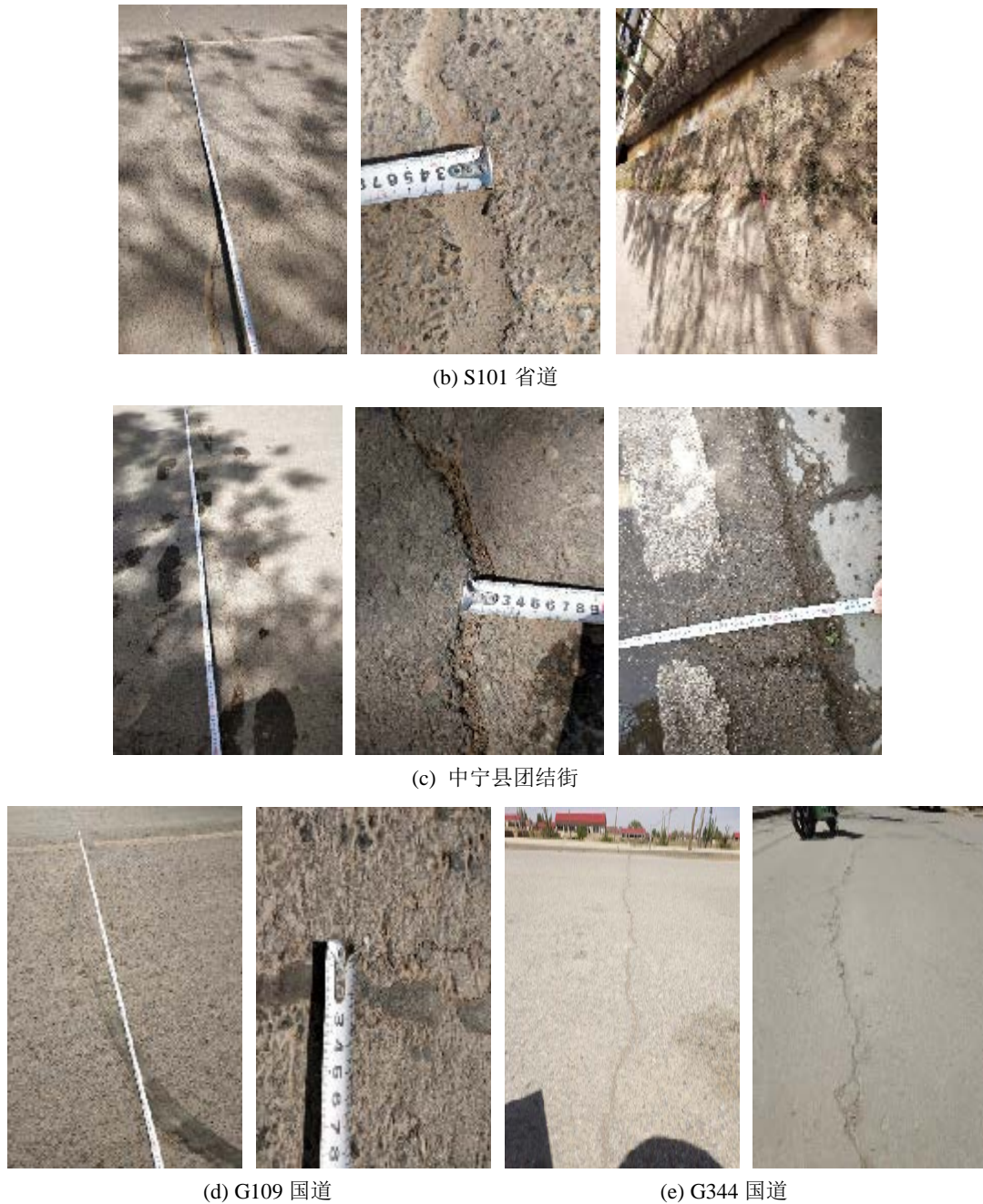


Figure 2. Typical section of pavement damage in Zhongwei
图 2. 中卫市典型路段病害情况

3.3. 南部地区

对宁夏固原地区市区内兴彭大街、茹河街、安定路、栖凤街、萧关路典型病害路段开展调查研究，固原地区各公路线路病害形式及规模如表 4 所示，典型病害如图 3 所示，兴彭大街及茹河街裂缝病害主要表现为较长的横向裂缝，伴有轻微纵向裂缝或网状裂缝。栖凤街横向裂缝与纵向裂缝影响长度均较长，横向裂缝最长达 6 m，纵向裂缝最长达 8 m。萧关路、安定路为近几年翻新线路，道路整体路况较好、裂缝病害较少。

Table 4. Ningxia Guyuan area research road line and its disease damage form and scale
表 4. 宁夏固原地区调研公路线路及其病害破坏形式与规模

公路线路	病害破坏形式与规模
兴彭大街	(1) 横向裂缝长度 4~5 m, 宽度为 10~30 mm; (2) 纵向裂缝; (3) 网状裂缝
茹河街	(1) 横向裂缝长度 3~5 m, 宽度为 20~30 mm; (2) 纵向裂缝
安定路	(1) 横向裂缝; (2) 纵向裂缝
栖凤街	(1) 横向裂缝长度 4~6 m, 宽度为 30~40 mm; (2) 纵向裂缝长度 5~8 m, 宽度为 30~40 mm
萧关路	(1) 横向裂缝; (2) 纵向裂缝



Figure 3. Typical section of pavement damage in Guyuan
图 3. 固原地区典型路段病害情况

4. 宁夏地区公路冻害成因分析

宁夏地区属于典型季节冻土区,地表层图土及公路工程路基土受冻融循环作用,极易产生道路病害,年平均日照时数 2800 小时~3000 小时,是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一[19],充分的日照时长与辐射强度加剧了阴阳坡效应,使道路走向、市区内建筑物遮挡及山体遮挡对道路阴阳坡侧路基土体温度造成了较大差异,促进道路病害的产生。宁夏地区不同板块气候、环境差异较大,因此,针对道路走向、山体遮挡等季节冻土区道路病害环境影响因素对北部引黄灌区、中部干旱带及南部丘陵山区典型路段分别进行研究与分析。

4.1. 北部地区

宁夏北部地区属于我国中纬度干旱、半干旱气候区,东临毛乌素沙漠南缘,西部、北部分别为腾格里沙漠及巴丹吉林沙漠,是典型的农牧交错区和生态脆弱带[20]。宁夏银川市及其所属各县(市)地处温带大陆性气候,具有四季分明、春迟夏短、秋早冬长、昼夜温差大、雨雪稀少、蒸发强烈、气候干燥、风大沙多等气候特点。年平均气温 8.5℃左右,夏季最高气温有时可达 35℃以上。最冷的 1 月平均气温在 -8℃以下,极端最低气温在-22℃以下,气候分区同属于冬寒区。

宁夏北部银川地区各路段地域环境情况如表 5 所示。四条市区内公路线路均无山体遮挡,且车流量大,易对公路运营造成较大压力,加快道路病害的产生;凤凰街线路为南北走向,其余均为东西走向,受阴阳坡效应影响较大;而上海路穿唐徕渠而过,渠道流水渗漏同样会对路基、路面产生冲刷、侵蚀,减少道路使用寿命。

冬寒区的道路裂缝主要是由冻害引起。公路路面在周期性冻融循环及反复的交通荷载作用下会产生冻胀裂缝。初步的调研结果表明宁夏银川地区所调研的公路病害破坏特征主要为沿道路横向的贯通横向裂缝以及较多分布的公路路面网状裂缝,尤其是东西走向的公路路肩网状裂缝完全碎裂的分布较多,如北京路。公路贯通的横向裂缝与路肩碎裂的网状裂缝主要是由路基横向的不均匀冻胀作用引起,受气候条件的影响,尤其是东西走向的道路,一年四季公路的南北两侧路肩均存在较大的温差,路基横向地温的不均匀分布导致公路产生明显的阴阳坡效应,表现为在道路的一侧(尤其是阴坡侧)产生较严重的网状裂缝破坏,进而产生较多的坑槽。同时,对于路基宽度较宽的北京路、上海路等存在较明显且分布较多的横向贯通裂缝。因此,银川地区公路的主要破坏特征表现为普遍分布的贯通横向裂缝与破裂严重的网状裂缝,阴坡侧路肩坑槽分布较多。并且,车流量越大、路面宽度越宽的公路,由阴阳坡效应导致的不均匀冻胀破坏特征越明显。

Table 5. Researching the geographical environment of road routes in the Yinchuan area of Ningxia

表 5. 宁夏银川地区调研公路线路的地域环境情况

公路线路地域环境	公路走向	道路周围山体遮挡	车流量	道路附近是否有河流(渠道)
贺兰山路	东西	无	大	无
北京路	东西	无	大	无
上海路	东西	无	大	从唐徕渠穿过
凤凰街	南北	无	大	无

4.2. 中部地区

宁夏中部中卫地区,大陆性季风气候明显,气候特征主要表现为春暖迟、夏热段、秋凉早、冬寒长。

常年少雨, 风大沙多, 降水量受地形影响, 雨季集中。全年平均气温在 7.0℃ 左右, 昼夜温差大, 极端最低气温在 -26.0℃, 最冷月平均气温在 -6.5℃ 左右。气候分区同属于冬寒区。

宁夏中部中卫地区各路段地域环境情况如表 6 所示。调研路段车流量较大, 周围无山体遮挡。G338 国道、G344 国道及 S101 省道调研路段为东西走向, 其中 G338 与 S101 段附近有渠道; G109 国道、G344 国道调研路段为南北走向。

冬季路基冻结, 路基中水变成冰体积膨胀, 从而导致路面开裂。调研结果表明宁夏中卫地区所调研的公路病害破坏特征主要为沿道路横向的贯通横向裂缝, 并且横向裂缝的宽度较宽, 而且公路路面网状裂缝分布较多, 与银川地区相同, 东西走向的公路路肩存在较多完全碎裂的网状裂缝。东西走向的道路公路阴阳坡效应明显, 道路阴阳坡效应典型的破坏特征就是在道路的一侧产生纵向裂缝以及产生横向的贯通裂缝。在中卫地区调研的公路主要是公路等级较高的国道和省道, 公路等级越高, 公路的路基及路面设计要求越高, 公路的养护工作也越完善, 但国道和省道一方面由于公路路基宽度较宽, 另一方面交通荷载更大更频繁, 在冻融循环、交通荷载等综合因素影响下仍不可避免地产生了明显的不均匀冻胀变形, 尤其以贯通的横向裂缝与路肩碎裂的网状裂缝为主。而调研的中宁县团结街属于次干路, 与国道和省道相比, 公路等级较低, 因而公路主要破坏特征表现为较长的纵向裂缝和横向裂缝, 并且裂缝宽度较宽。

同时, 其他环境因素对公路的变形也有影响。例如, 对于省道 S101 路段, 道路两侧有渠道, 地表水或水渠对路面、路基材料的长期侵蚀下, 会导致路面层抗剪能力减弱, 在车载作用下一方面产生不均匀沉降, 另一方面路面会开裂。对于国道 G338 部分路段, 大型工程车辆数量多, 不均匀的碾压和道路一侧的水渠会抬升地下水位、在地表水以及地下水的共同作用下, 公路极易发生冻胀, 进而产生冻胀裂缝。同时, 雨水和地下水的共同作用也引起了路基一侧的沉降, 路基的冻融导致另一边路面抬高, 两者共同作用, 产生了路面的横向贯通开裂。这些都是典型的公路阴阳坡效应导致的公路破坏。

Table 6. Researching the geographical environment of road routes in the Zhongwei area of Ningxia

表 6. 宁夏中卫地区调研公路线路的地域环境情况

公路线路 地域环境	公路走向	道路周围山体遮挡	车流量	道路附近是否有河流(渠道)
国道 G338	东西	无	大	有
省道 S101	东西	无	大	有
国道 G344	东西	无	大	无
中宁县团结街	南北	无	大	无
国道 G109	南北	无	中等	无

4.3. 南部地区

固原地区地处六盘山区, 气候属中温带季风区半湿润向半干旱过渡性气候, 表现为冬季寒冷漫长, 春季低温少雨, 夏季雨多短暂, 秋季降雨集中(集中于每年的 7~9 月)且秋季降温快, 全年平均气温低, 昼夜温差大, 极端最低气温在 -32.0℃ 以下, 气候分区属于典型的冬寒区。

各路段地域环境情况如表 7 所示。安定路、萧关路车流量与兴彭大街、栖凤街、茹河街相比较小; 栖凤街、安定路周围有山体遮挡, 萧关路、茹河街位于茹河南部; 安定路与萧关路为南北走向, 其余公路线路为东西走向。

宁夏固原地区所调研的公路病害破坏特征主要为纵向裂缝与横向裂缝, 公路裂缝数量较多, 且局部

较宽，尤其是部分路段纵向裂缝明显且缝宽较宽。同时，路基路面的冻胀作用也会使道路路面产生网状裂缝，尤其是当路面整体强度不足，在车辆荷载反复作用下，路面面层在气候、环境等综合因素影响下极易开裂。病害较严重的栖凤街为东西走向且南部靠山，山体遮挡对太阳辐射造成的差异对路面温度产生较大的影响，加剧了该路段道路阴阳坡效应，路基温度场的不均匀分布使水分迁移的聚流量和冻胀量差异增大，从而导致线路产生冻害；茹河街北临茹河且车流量较大，充分的水分补给与车辆荷载为冻害产生创造了条件。

Table 7. Researching the geographical environment of road routes in the Guyuan area of Ningxia

表 7. 宁夏固原地区调研公路线路的地域环境情况

公路线路地域环境	公路走向	道路周围山体遮挡	车流量	道路附近是否有河流(渠道)
兴彭大街(主干道)	东西	无	大	无
茹河街(次干道)	东西	无	大	有
安定路	南北	有	中等	无
栖凤街(次干道)	东西	有	大	无
萧关路	南北	无	中等	有

5. 结论与展望

1) 宁夏北部、中部、南部地区的公路病害特征都表现出明显的冻害特征，受周期性冻融循环及太阳辐射差异引起路基温度场不均匀分布的影响。

2) 宁夏中北部地区调研路段地势平坦，公路的主要破坏特征表现为普遍分布的贯通横向裂缝与破裂严重的网状裂缝，东西走向道路阴坡侧路肩坑槽分布较多。高等级公路受阴阳坡效应导致的不均匀冻胀破坏特征较明显。

3) 与宁夏中北部地区相比，宁夏南部固原地区调研道路由于山体遮挡、靠近河流等环境因素差异，体现出不同的公路病害特征，山体遮挡对太阳辐射造成的差异及邻近河流对路基水分的补给加剧了道路的阴阳坡效应，进一步导致公路冻害的产生。

4) 宁夏地区公路病害主要是由冻害引起，后续需深入研究宁夏地区公路的冻害问题，联系宁夏地区特有的地域特征对病害特征及成因进行定量分析，并结合地质勘察勘探、遥感数据等技术手段进一步对宁夏地区的公路冻害问题开展深入的研究。

基金项目

宁夏重点研发计划(引才专项)项目(2019BEB04010)；宁夏回族自治区区级大学生创新创业训练计划项目(S202110749059)。

参考文献

- [1] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] Lai, Y.M., Zhang, S.M. and Yu, W.B. (2012) A New Structure to Control Frost Boiling and Frost Heave of Embankments in cold Regions. *Cold Regions Science and Technology*, **79-80**, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.04.002>
- [3] Hermansson, A. and Spencer, G. (2005) Frost Heave and Water Uptake Rates in Silty Soil Subject to Variable Water table Height during Freezing. *Cold Regions Science and Technology*, **43**, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.03.003>

- [4] Li, Y., Ling, X.Z., Su, L., An, L., Li, P. and Zhao, Y. (2018) Tensile Strength of Fiber Reinforced Soil under Freeze-Thaw Condition. *Cold Regions Science and Technology*, **146**, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.010>
- [5] Li, G.Y., Ma, W., Mu, Y.H., Wang, F., Fan, S.-Z. and Wu, Y.-H. (2017) Effects of Freeze-Thaw Cycle on Engineering Properties of Loess Used as Road Fills in Seasonally Frozen Ground Regions, North China. *Journal of Mountain Science*, **14**, 356-368. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4005-4>
- [6] 牛富俊, 林战举, 吴旭阳, 商允虎, 李肖伦, 邵珠杰. 兰新客运专线浩门区间路基温度、水分及冻胀变形特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1074-1082.
- [7] Wu, L., Niu, F., Lin, Z. and Luo, J. (2019) Field Study on the Use of Gravelly Tunnel Muck for Frost Heave and Thaw Settlement Prevention in Soft Subgrades, Northwest China. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**, Article No. 652. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4794-1>
- [8] 房建宏, 李东庆, 周家作, 张坤. 季节性冻土路基防冻胀技术研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 9-14.
- [9] Sheng, D.C. (1994) *Thermodynamics of Freezing Soils Theory and Application*. Luleå University, Luleå.
- [10] 武立波, 祁伟, 牛富俊, 牛永红. 我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1283-1293.
- [11] 程培峰, 范勇强, 张志华. 哈尔滨城市道路损害调查与分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(6): 28-30.
- [12] 中交第二公路勘察设计研究院, 主编. JTG D30-2015. 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [13] 梁武星, 李小刚. 陕西省高速公路沥青混凝土路面区域典型病害及产生原因分析[J]. 公路, 2013(3): 25-29.
- [14] 周志刚, 刘宇, 姚新宇. 南友高速公路沥青路面裂缝病害特征分析[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 67-69.
- [15] 刘学智, 李王成, 苏振娟, 王帅, 李晨, 王霞. 1962-2015年宁夏平均气温和极端气温的变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1173-1180.
- [16] 纳丽, 陈晓光, 郑广芬, 胡文东, 孙银川. 宁夏近40年极端气温变化特征分析[J]. 宁夏工程技术, 2006(1): 4-7+12.
- [17] 冯瑞萍, 张学艺, 舒志亮, 等. 宁夏季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 314-318.
- [18] 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.
- [19] 霍华丽, 刘普幸, 张克新. 宁夏日照时数的时空变化特征分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 521-524.
- [20] 杨建玲, 冯建民, 郑广芬, 王素艳. 宁夏中南部地区干旱变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 842-851.