

任丽媛,张希帆,孙玫玲,等,2024.天津高铁沿线风致轻漂浮物入侵灾害气象风险分析及应用[J].气象,50(6):756-769. Ren L Y,Zhang X F,Sun M L,et al,2024. Meteorological risk analysis and application of wind-induced light floating objects invasion disaster along the Tianjin High-Speed Railway[J]. Meteor Mon,50(6):756-769(in Chinese).

天津高铁沿线风致轻漂浮物入侵灾害气象 风险分析及应用^{*}

任丽媛¹ 张希帆¹ 孙玫玲² 梁冬坡³ 苗 芮² 章志豪⁴

¹ 天津市气象服务中心,天津 300074

² 天津市气象科学研究所,天津 300074

³ 天津市气候中心,天津 300074

⁴ 中国铁路北京局集团有限公司供电部,北京 100038

提 要: 为确定高铁沿线风灾隐患路段,减少大风引起的漂浮物入侵灾害发生,基于天津地区高铁沿线气象站观测资料、高分系列卫星遥感影像数据、高铁历史灾情、基础地理信息等,分析了大风对轻漂浮物入侵灾害的影响,给出天津不同区域路段灾害发生的风速阈值范围和主导风向,并基于自然灾害风险评估理论建立了高铁风致轻漂浮物入侵灾害气象风险分析模型,形成风险区划。研究表明:高铁沿线轻漂浮物入侵灾害主要出现在春季和冬季,占全年总量的 73.75%,午后 12—15 时是发生的最集中时段,且在天津中部和东部区域发生最多,西北区域其次,西南区域最少。灾害主要发生在最大风速为 $8\sim 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和极大风速为 $13\sim 21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速区间,当风向为偏西风到偏北风,风向与线路呈 45° 以上夹角时,更易引发灾害。运用卫星遥感技术手段,能够较好地识别高铁沿线隐患物分布情况,最高识别准确率可达 72.7%。综合风速风向特征、隐患分布情况等,建立高铁风灾气象风险分析模型,区划结果显示,京沪高铁和京津城际风险较高,津秦高铁次之,津霸客专最低。高风险路段主要集中在京沪高铁武清区段北部、北辰区段、西青区段,京津城际的北辰区段、东丽区段东部和滨海新区段以及津秦高铁的东丽区段东部。

关键词: 高铁,大风,轻漂浮物,风险分析,天津

中图分类号: P49,U298

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.040802

Meteorological Risk Analysis and Application of Wind-Induced Light Floating Objects Invasion Disaster Along the Tianjin High-Speed Railway

REN Liyuan¹ ZHANG Xifan¹ SUN Meiling² LIANG Dongpo³ MIAO Rui² ZHANG Zhihao⁴

¹ Tianjin Meteorological Service Center, Tianjin 300074

² Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074

³ Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

⁴ Power Supply Department of China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100038

Abstract: In order to determine the sections with potential wind disasters along the high-speed railway and reduce the occurrence of floating objects invasion disasters caused by strong winds, based on the observation data of meteorological stations along the high-speed railway in Tianjin, high-resolution series of satellite remote sensing image data, historical disaster of high-speed railway and basic geographic information, this article analyzes the impact of strong wind on the invasion disaster of light floating objects and proposes

^{*} 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2023T007)资助

2023 年 5 月 6 日收稿; 2024 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者:任丽媛,主要从事应用气象服务技术研究. E-mail:398188448@qq.com

the wind speed threshold range and dominant wind direction of disasters in different regional sections of the Tianjin High-Speed Railway. Then, based the risk assessment theory of natural disasters, the meteorological risk analysis model of the wind-induced light floating objects invasion disaster of high-speed railway is established, and the risk zoning is formed. The results show that the invasion disasters of light floating objects along the high-speed railway mainly occur in spring and winter, accounting for 73.75% of the total invasion disasters of the whole year. The most concentrated occurrence time is from 12:00 BT to 15:00 BT in the afternoon, with most seen in the central and eastern parts of Tianjin and then in the northwestern and the southwestern parts in order. Disasters mainly occur in the wind speed range with the maximum wind speed of $8-17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and extreme wind speed of $13-21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When the wind direction is from west to north and the wind direction is at the angle of more than 45° with the line, disasters are more likely to occur. By means of satellite remote sensing technology, the distribution of hidden dangers along the Tianjin High-Speed Railway could be well identified, and the highest identification accuracy could reach 72.7%. Based on the characteristics of wind speed and wind direction and the distribution of hidden dangers, the meteorological risk analysis model of the Tianjin High-Speed Railway wind disaster is established, and the zoning results show that the Beijing-Shanghai High-Speed Railway and the Beijing-Tianjin Intercity Railway have higher risks, followed by the Tianjin-Qinhuangdao High-Speed Railway, and the Tianjin-Bazhou Passenger Dedicated-Line has the lowest risk. High risk sections are mainly concentrated in first, the north of the Wuqing District, Beichen District and Xiqing District of the Beijing-Shanghai High-Speed Railway, second, the Beichen District, the east of the Dongli District and the Binhai New Area section of the Beijing-Tianjin Intercity, and third, the east of the Dongli District of the Tianjin-Qinhuangdao High-Speed Railway.

Key words: high-speed railway, strong wind, light floating object, risk analysis, Tianjin

引言

高速铁路因其具有运行速度快、运输能力大、能源消耗小的特点而得到快速发展,截至2021年底,天津境内共有津秦高铁、京沪高铁、京津城际、津霸客专四条高铁线路,总里程317 km。随着高铁列车运行速度的不断提升,大风灾害对于高铁安全运行的影响越来越显著,一方面可以直接影响列车车体稳定性,甚至会引发列车脱轨事故,另一方面还容易造成“异物”侵扰,导致接触网短路跳闸或动车组停电(崔新强等,2016;代娟等,2016;Burlando et al, 2010;冯蕾等,2012;张强等,2003;钱征宇,2009)。兰新线曾发生大风吹翻行驶中的列车事故10多起(王富章,2013)。近年来,京津冀地区由大风引发的高铁事故时有发生,2018年8月12日,京沪高铁受到大风刮起的彩钢板撞击而发生故障,受其影响,北京南站共有46趟到发列车停运。2021年5月1日,受大风天气影响,京广高铁定州东至保定东间接触网挂异物,导致京广高铁上下行部分列车晚点,北

京西站站前广场出现大面积拥堵,数万旅客滞留,引发社会高度关注。高铁外部安全隐患存在广泛且易变动,人工巡视工作量大、覆盖率低、重点不明确等特点,是长期以来困扰铁路部门的问题,因此亟需明确高铁沿线大风灾害隐患路段,并提供针对性的风险预警,以防范和减少大风灾害引发的事故,这对于提升铁路防灾减灾能力,保障高铁运行安全是非常必要的。

国内学者围绕铁路沿线大风灾害开展了一系列研究。马韞娟等(2009)将我国铁路沿线大风类型分为台风大风、寒潮大风和短时雷雨大风等。马淑红和马韞娟(2009)将最大瞬时风速、大风主导风向列为影响高速列车的重要指标,并指出横风对列车安全运行的影响程度较大。众多学者利用气象站观测资料统计、数值模式模拟、风资源评估技术等对铁路沿线大风特征进行了分析,给出大风发生频率峰值及强横风高发时段,识别风灾危险较严重的路段(孙玫玲等,2019;巩灿灿等,2021;李伟等,2021)。西北地区因为常年风速较大,是研究的重点地区,白虎志等(2005)、孟祥连等(2018)等、夏祎萌(2012)、程龙

(2021)在研究青藏铁路、兰新铁路、东疆铁路强风区的同时,提出高铁安全行车、防风设计及站点布局优化建议,讨论了列车安全限速问题。

IPCC 第五次评估报告中进一步强调自然灾害风险源于天气或气候事件与载体(暴露度和脆弱性)的相互作用(IPCC,2014),自然灾害风险分析就是对灾害风险区不同强度灾害的可能性及其可能造成的后果进行定量分析和评估(章国材,2014;黄崇福,2005)。近年来,这一理论被越来越广泛地应用于地质灾害气象风险分析(李宇梅等,2020;狄靖月等,2022)及交通气象领域(王志等,2017)。李葛恂等(2018)建立了我国主要公路低能见度灾害风险分析的指标体系和权重,开展了公路低能见度灾害风险区划研究。扈海波等(2010)选择危险性、脆弱性和易损性三项指标,开展了北京市交通大雾灾害风险分析的研究。宋建洋等(2018)利用自然灾害风险指数法计算综合风险指数,并结合 GIS 空间分析技术开展我国高速公路大风灾害风险区划研究。此外,一些学者从气象灾害对高速铁路的影响机理入手,阐述大风对铁路基础设施、列车运行、铁路运维的影响,探讨高速铁路气象灾害风险分析方法,构建风险区划方案,给出高铁沿线大风灾害风险区划图(马淑红和马韞娟,2013a;2023b;张子曰,1998;包云等,2021)。

在铁路环境安全管控方面,全超(2021)指出漂浮物是威胁铁路安全畅通的主要隐患,行人上道、轻漂浮物侵限是主要风险事件,并运用数理统计和复杂网络理论分析了风险事件的发生规律,构建风险评价体系。谢晨娟(2018)指出雷雨、风沙、冰雪、高温(温差大)是造成铁路接触网故障的主要天气因素,并对接触网各零部件进行了天气因素影响下的可靠性评估。于胜利等(2018)的研究表明利用卫星遥感技术手段可以有效判断铁路沿线危害隐患,从而保障铁路运营安全。

在目前已开展的高铁大风灾害影响研究中,有关大风对漂浮物入侵灾害的影响分析较少,建立的高铁大风灾害风险分析模型也未将此项考虑在内,因子不够全面。本文聚焦大风对漂浮物入侵灾害的影响,首先分析灾害发生的时空特征,确定其发生的风速阈值和主导风向,然后利用高分系列卫星遥感影像数据对高铁沿线周边环境特征进行识别,构建融合气象、高铁、环境等综合因素的高铁大风灾害风险分析模型,最终形成高铁沿线大风灾害风险区划。

研究成果可为铁路部门合理规划建设线路、设立风屏障、科学运用气象预报或采用其他措施规避风灾带来的不利影响提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究资料

所用资料包括:(1)气象观测资料:距离天津高铁线路直线距离 3 km 以内的 36 个气象观测站(包括国家级地面观测站和区域自动站)的逐小时最大风风速及风向、极大风风速及风向数据,资料长度为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 5 月 31 日。数据来自全国综合气象信息共享平台(CIMISS),经过 MDOS 初步质量控制和时间一致性、内部一致性、空间一致性等方面的检查,剔除了数据中的异常极值,去除了时间序列不完整的数据。(2)高速铁路历史灾情资料:天津地区高速铁路沿线发生的轻漂浮物入侵灾害资料,其长度为 2019 年 1 月至 2021 年 5 月,主要包括灾害发生时间、发生位置、引发灾害的漂浮物类型等信息,由天津市铁路部门提供。(3)高铁沿线隐患物现场拍摄图片,由天津市铁路部门提供。(4)天津地区高速铁路网地理信息矢量数据,来源于国家基础地理信息中心和 Open Street Map,分辨率为 1:100 万。(5)高分 1 号、2 号、6 号卫星遥感影像数据,资料长度为 2020 年 1 月至 2021 年 5 月,来自高分辨率对地观测系统天津数据与应用中心。

1.2 研究方法

基于卫星遥感技术的高铁沿线隐患物监测识别方法,由于高分系列卫星遥感影像数据分辨率高而幅宽小,因此要搜集不同时次卫星数据才能完整覆盖一次高铁沿线,关键技术步骤如下:

(1)图像几何校正:对坡度数字高程模型和高程与高分卫星图像进行图像对图像的地理位置几何校正,统一到同样大小、分辨率和相同位置下。

(2)选择训练样本:确定高铁沿线不同类型隐患点的样本特征,采用真彩色合成、假彩色突出显示等手段获取绿织网、塑料薄膜等风险隐患点样本数据。

(3)最大似然法分类:基于参数化密度分布函数判别的最大似然法(MLC)是遥感影像监督分类最常用的统计方法之一(Richards and Jia,1999;Stein et al,1999)。MLC 是基于贝叶斯准则提出的,假定

各类分布函数为正态分布,并选择训练区,根据已知训练样本计算各类统计特征值,建立多维正态分布模型,再计算各待分类样区属于各类的归属概率,找出各像元概率最大的一类,就把这个像元归为该类。

(4)识别结果处理:主要是基于真彩色合成图像,以目视人工解译修正为主,对修正后的图像再进行杂点、孤立点、错误识别点剔除等过程。

2 结果分析

2.1 天津高铁沿线轻漂浮物入侵灾害的时空特征

2.1.1 时间变化特征

2019年1月至2021年5月期间,天津地区高铁沿线共发生99起轻漂浮物入侵灾害,2019年、2020年灾害发生频次分别为22起、34起,2021年1—5月43起,呈现出逐年上升的趋势。从灾害发生频次的月变化(图1a)可以看出,上半年发生量总体多于下半年,春季最多,平均19起,冬季次之,平均10起,春季和冬季平均发生量占全年的73.75%,夏季平均8起,秋季最少,平均2.5起。具体来看,灾害发生频次最高的月份为4月,平均高达8起,1、3、5月次之,为5~7起,10月发生次数最少,灾害量为零。除此之外,冬季1月相比12月和2月灾害量明显偏多,夏季7—8月相比6月灾害量明显偏多,这一方面与大风天气的发生时段相吻合,另一方面也

与致灾物的变化有关。统计最大风大于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或极大风大于 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 出现的时数,12月、1月、2月分别为64、145、105 h,相应时段的灾害发生频次为1、6、2起,二者具有较好的对应关系,高值均出现在1月。7—8月正值天津地区的主汛期,雷雨大风天气频发,同时农业温室闷棚结束后进行揭膜换膜造成致灾物增多,在一定程度上导致这一时期灾害相对偏多。

灾害发生具有明显的日变化(图1b),表现为单峰分布形势,12—15时(北京时,下同)是灾害发生的最集中时段,平均超过10起。从08—15时,灾害数量呈波动上升趋势,在15时达到顶峰,单时次发生量可达16起,之后开始下降。入夜后,灾害量总体维持在较低水平。灾害的整体日变化特征与人类日常的生产活动时间相吻合,这可能与夜间车次减少,造成影响灾害发生率较低有关。

2.1.2 空间分布特征

按照高铁线路空间位置和线路走势,将天津分为四个区域(图2),探讨不同区域灾害发生的特征。经统计,西南、西北、中部、东部区域灾害发生频次分别为13、20、33和33起。即中部和东部区域灾害发生最多,西北区域其次,西南区域最少。

2.2 天津高铁沿线大风对轻漂浮物入侵灾害的影响

2.2.1 轻漂浮物入侵灾害与风速的关系

为确定引发灾害的风速阈值,分别统计了天津

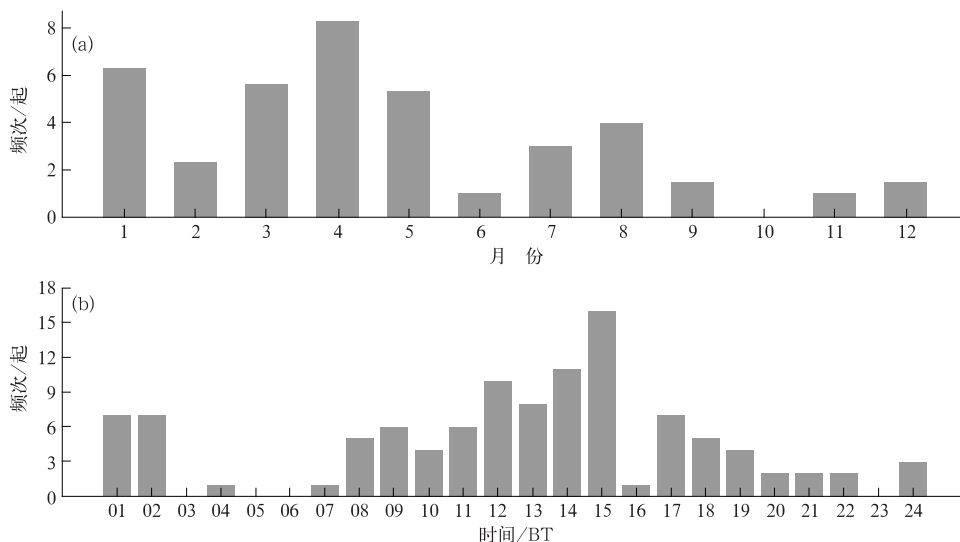
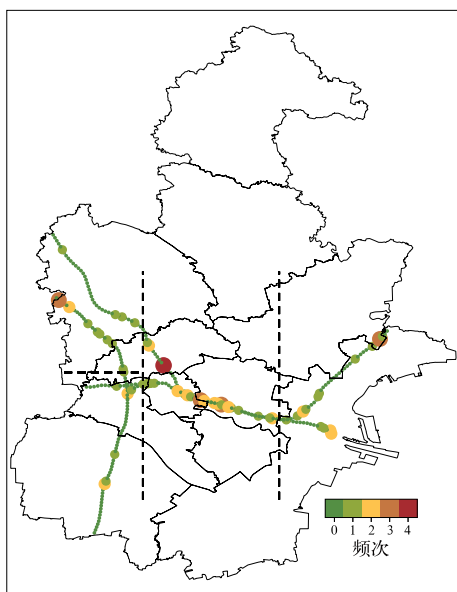


图1 2019—2021年天津高铁沿线轻漂浮物入侵灾害发生频次的(a)月变化,(b)日变化

Fig.1 (a) Monthly variation, (b) daily variation of occurrence frequency of light floating objects invasion disaster along the Tianjin High-Speed Railway from 2019 to 2021



注:散点代表灾害发生位置及频次,
虚线代表线路分区。

图 2 2019—2021 年天津高铁线路分区
及灾害发生频次的空间分布

Fig. 2 Zoning and spatial distribution of
occurrence frequency of disasters along the
Tianjin High-Speed Railway from 2019 to 2021

地区整体以及四个区域的高铁路段在不同风速条件下灾害发生的概率,即某一风速条件下灾害发生频次与该风速出现总站次的比值(图 3 和表 1)。从图 3a 和表 1 中最大风速的统计情况可以看出,低于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速引发灾害的概率较小,仅有不足 3%,当风速超过 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,灾害发生率明显增加。对于整体区域而言,高灾害发生率的最大风风速主要集中在 $8 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $8 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率在 10% 左右, $11 \sim 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率有所下降, $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始,灾害发生率随着风速增大迅速增加,在 $16 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围时达到最高,为 50%。

不同空间区域灾害发生率的变化规律存在明显差异,东部区域路段发生灾害时,对应的风速最大,西北区域路段次之,中部和西南区域相对较小。其中,东部区域与整体区域的规律较为相似,且最大风超过 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 引发的灾害均出现在东部路段。对于中部、西北、西南区域,高灾害发生率的最大风风速均主要集中在 $8 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同的是,中部、西南区域各风速段的灾害发生率变化不大,为 10% 及以下,而西北区域在 $9 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围的灾害发生率明显较大,说明西北区域的灾害发生风速范围

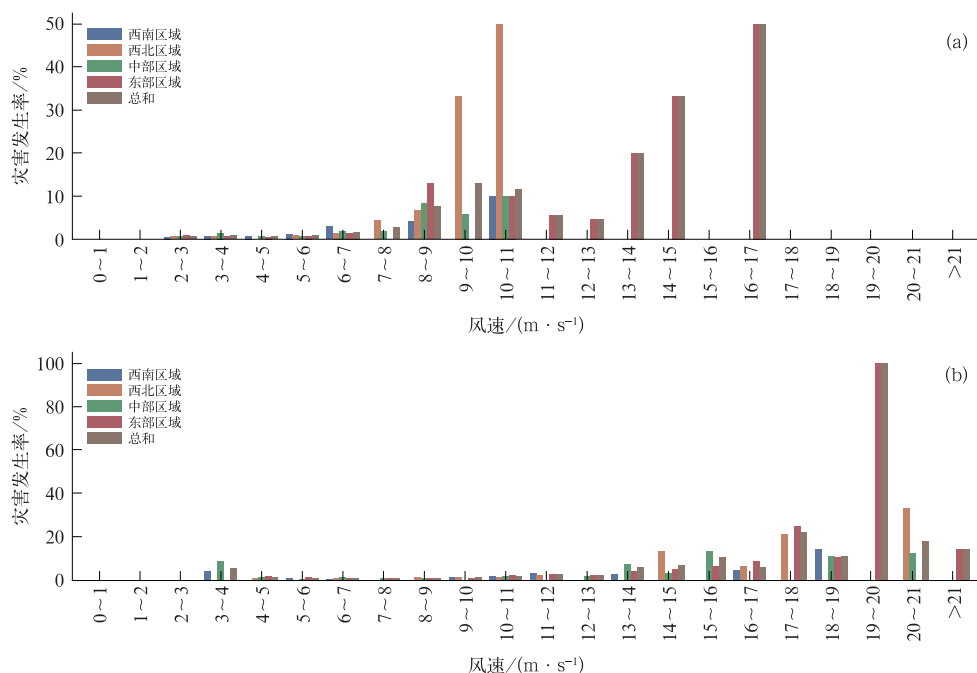


图 3 2019—2021 年天津高铁沿线(a)最大风,(b)极大风风速区间的灾害发生率

Fig. 3 Disaster rate in (a) maximum wind speed and (b) maximum instantaneous wind speed
along the Tianjing High-Speed Railway from 2019 to 2021

表 1 2019—2021 年天津高铁沿线不同风速区间的灾害发生率

Table 1 Disaster rate in different wind speed sections along the Tianjin High-Speed Railway from 2019 to 2021						
	风速区间/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	西南区域/%	西北区域/%	中部区域/%	东部区域/%	四区总和/%
最大风	[2,3)	0.56	0.60	0.61	0.93	0.63
	[3,4)	0.71	0.60	1.41	0.67	0.83
	[4,5)	0.81	—	0.69	0.57	0.68
	[5,6)	1.19	0.92	0.65	0.77	0.83
	[6,7)	2.94	1.51	1.98	1.47	1.68
	[7,8)	—	4.35	1.77	—	2.75
	[8,9)	4.08	6.67	8.33	12.90	7.56
	[9,10)	—	33.33	5.88	—	13.04
	[10,11)	10.00	50.00	10.00	10.00	11.54
	[11,12)	—	—	—	5.66	5.66
	[12,13)	—	—	—	4.76	4.76
	[13,14)	—	—	—	20.00	20.00
	[14,15)	—	—	—	33.33	33.33
	[15,16)	—	—	—	—	—
	[16,17)	—	—	—	50.00	50.00
极大风	[2,3)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	[3,4)	4.17	—	9.09	—	5.71
	[4,5)	—	1.04	1.69	1.96	1.46
	[5,6)	1.18	—	0.89	1.41	1.02
	[6,7)	0.86	1.20	1.42	0.95	1.14
	[7,8)	—	—	1.01	1.20	1.13
	[8,9)	—	1.52	1.34	1.22	1.31
	[9,10)	1.59	1.44	—	1.37	1.45
	[10,11)	1.94	1.77	2.02	2.42	2.05
	[11,12)	3.64	2.63	—	3.03	3.17
	[12,13)	—	—	2.15	2.70	2.31
	[13,14)	3.13	—	7.53	4.35	6.08
	[14,15)	—	13.79	3.33	5.41	7.29
	[15,16)	—	—	13.64	6.67	10.81
	[16,17)	4.76	6.67	—	9.09	6.38
	[17,18)	—	21.43	—	25.00	22.22
	[18,19)	14.29	—	11.11	10.81	11.32
	[19,20)	—	—	—	100.00	100.00
	[20,21)	—	33.33	12.50	—	18.18

注:“—”代表无数据。

较为集中。 $16 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 两个风速段最易引发灾害,有 50%的概率分别造成东部区域和西北区域高铁沿线灾害的发生。

分析极大风风速与灾害发生的关系,从图 3b 和表 1 来看,极大风风速 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是灾害发生率的一个临界指标。对于整体区域,高灾害发生率的极大风风速主要集中在 $13 \sim 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区间。 $13 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率在 10%左右及以下; $17 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现一个小高峰,灾害发生率约为 22%; $19 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率为 100%;当超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,灾害发生率快速下降至 18%,这可能是由于当极大风超过 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9 级),气象部门及时发布大风黄色预警信号,铁路部门也会随之响应,采取一系列应急措施,起到了一定的防范

作用。

类似地,东部区域路段发生灾害对应的极大风风速最大,西北区域路段次之,中部和西南区路段相对较小。中部区域灾害发生率在 $13 \sim 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的分布大致均衡,集中在 10%上下,而其他区域均有明显的灾害高发风速段。西南区域灾害高发的极大风风速主要集中在 $18 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率约为 14%;西北区域主要集中在 $17 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $20 \sim 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,灾害发生率分别约为 21%和 33%;东部区域则主要集中在 $17 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,特别是在 $19 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,灾害发生率高达 100%。

2.2.2 轻漂浮物入侵灾害与风向的关系

轻漂浮物入侵灾害的发生在气象条件上不仅与

风速大小有关,还与风向密切相关。考虑到不同区域高铁线路的走向不同,做不同区域路段灾害发生时风向与灾害发生点所在线路的切线夹角统计(图 4)。为便于直观分析,将高铁线路的千米标数字增大方向作为线路的行进方向,即 K0 表示千米标数字小的一侧,K1 表示千米标数字大的一侧,且风向与线路夹角用锐角表示。四个区域的共同特点是,当风向与线路夹角为 45° 及以上时,更容易造成灾害发生,这一特征在中部和东部区域表现的更加明显。西南、西北、中部、东部区域路段灾害发生时,最大风风向与线路夹角为 45° 及以上的情况分别占 50%、40%、77%、95%,极大风风向与线路夹角为 45° 及以上的情况分别占 42%、30%、75%、89%。此外,对于西南和西北两个区域,风向与线路近乎重合的比例也较高,最大风为 23%、极大风为 38%。进一步考虑高铁线路走向,得到如下结论:西北区域路段以西北—东南向为主,灾害主要由西北风和西南风引起;西南区域路段以南北向为主,灾害主要由西北风到北风引起,也有部分东北风;中部区域路段以东西向为主,灾害主要由西北风到北风和东南风引起,东部区域路段以西南—东北向为主,灾害主要由西北风到北风和部分南风、东南风引起。

综上所述,灾害发生的风向体现出较为一致的偏西风到偏北风特征,这一方面符合天津地区冬春季盛行西北风,而灾害多发于冬春季的规律;另一方面也符合当风向与线路夹角较大时,大风更容易将漂浮物吹入轨道进而引发灾害这一常识。

2.3 基于卫星遥感技术的高铁沿线隐患识别

获取天津地区高分 1 号、2 号、6 号卫星遥感影像数据并进行预处理,将坡度、高程、卫星影像等进行地理位置几何校正,统一其大小、位置和分辨率。结合铁路部门提供的隐患现场照片,确定高铁沿线不同类型隐患点的样本特征,采用真彩色合成、假彩色突出显示等手段获取绿织网、塑料薄膜等风险隐患点样本数据(图 5)。利用 GIS 空间分析技术,以天津地区各条高铁线路为基准,建立 1 km 的缓冲区,基于可获取的高分卫星资料和已知隐患点样本特征,对 2020 年和 2021 年高铁沿线隐患物进行识别,得到隐患点信息和分布情况(图 6)。隐患物识别效果统计见表 2,其中,实测隐患点用灾害发生点代替。2020 年识别命中率为 72.7%,2021 年识别命中率为 57.1%,平均为 64.9%,可见,综合利用 GIS 空间分析技术和卫星遥感技术可以在一定程度

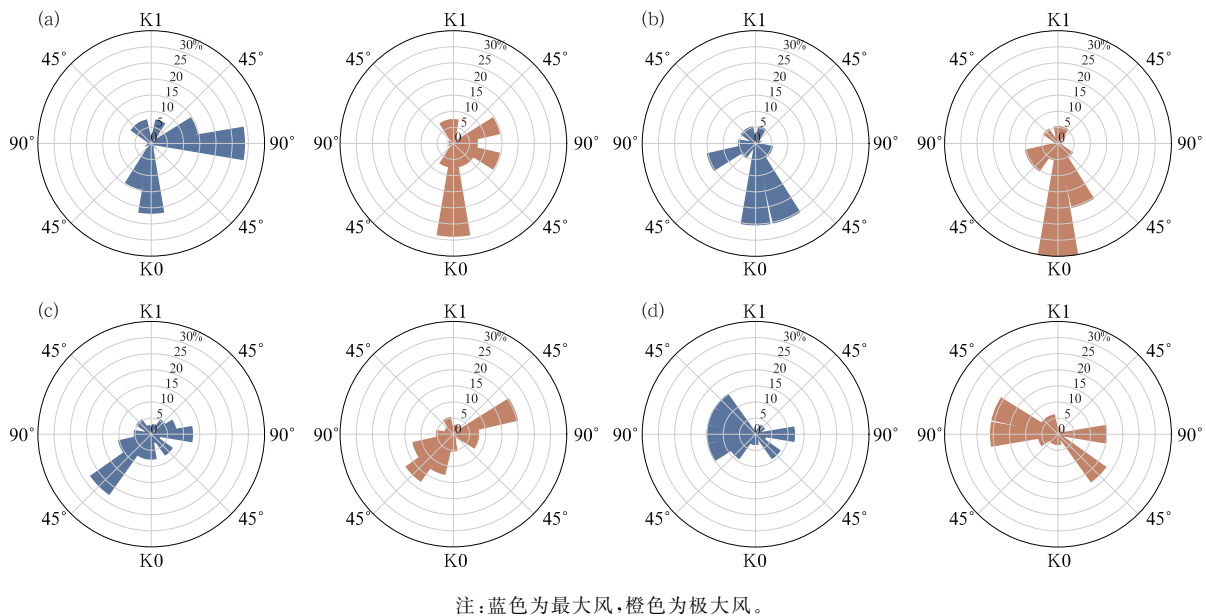


图 4 2019—2021 年天津高铁沿线灾害发生时风向与线路的夹角

(a) 西南区域, (b) 西北区域, (c) 中部区域, (d) 东部区域

Fig. 4 Included angle between the wind direction and the railway line in case of disasters along the Tianjin High-Speed Railway from 2019 to 2021

(a) southwest region, (b) northwest region, (c) central region, (d) eastern region

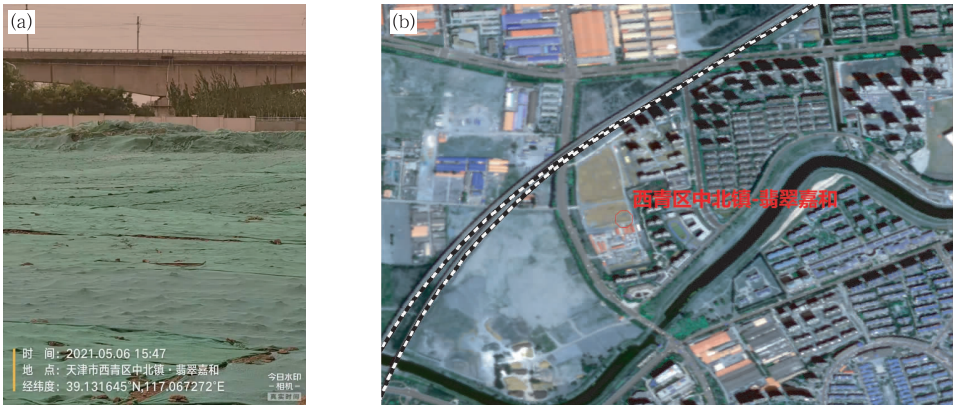


图 5 2021 年 5 月天津高铁沿线(a)隐患物现场拍摄与(b)卫星遥感技术识别结果对比
Fig. 5 Comparison between (a) live photo of hidden danger and (b) identification result with satellite remote sensing technology along the Tianjin High-Speed Railway in May 2021

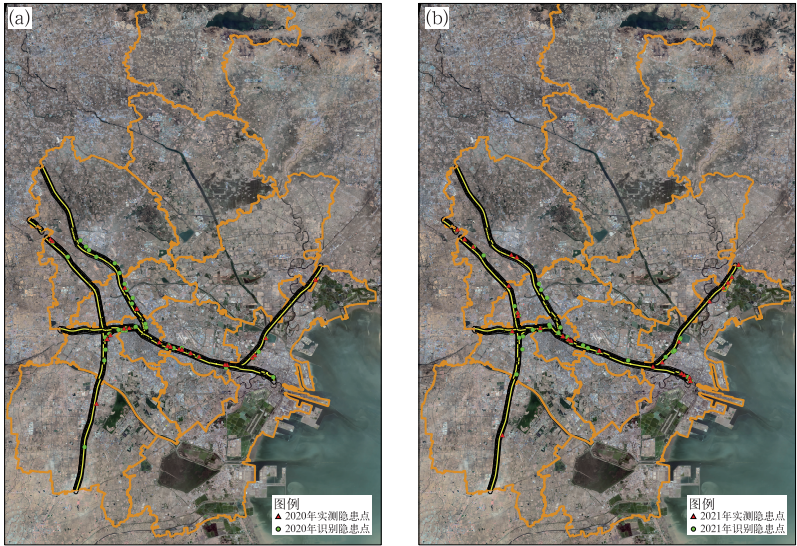


图 6 (a)2020 年,(b)2021 年天津高铁沿线实测隐患点与卫星遥感技术识别结果对比
Fig. 6 Comparison between actual hidden dangers location and identification results with satellite remote sensing technology along the Tianjin High-Speed Railway in (a) 2020 and (b) 2021

表 2 2020—2021 年基于卫星遥感技术的隐患物识别效果统计
Table 2 Statistics of hidden dangers identification effect based on satellite remote sensing technology from 2020 to 2021

年份	实测隐患数	识别隐患数	识别命中数	识别命中率
2020 年	22	34	16	72.7%
2021 年	28	36	16	57.1%
平均				64.9%

上反映高铁沿线隐患物的分布情况。进一步分析误差来源,由于资料所限,所采用的卫星数据是多时次拼接而成,并不能完全代表灾害发生时刻的情况,且实测隐患点用灾害发生点近似代替,存在隐患但未发生灾害的隐患点没有统计在实测隐患点中,因此导致识别结果有一定的误差。由此可见,采用不同时空分辨率的多源卫星资料进行融合研究从而提升

卫星资料的时效性,有利于提升识别命中率,同时加强与铁路部门数据共享,获取真实排查的隐患数据来进行识别效果检验是非常必要的。

2.4 天津高铁沿线大风灾害风险分析模型构建

基于自然灾害风险评估理论,气象灾害风险是由气象致灾因子的危险性及其对承灾体造成的影响

和损失,以及与孕灾环境敏感性、风险区域的防灾减灾能力相互作用所决定的(张继权和吕军,2005;陆亚龙和肖功建,2001)。其中防灾减灾能力是指受灾区域抵御灾害以及灾后重建和恢复的能力,包括应急能力、减灾投入资源准备等,考虑到高铁途经区域面积、经济等因素,将各条高铁的防灾减灾能力近似看作无差别,因此不作考虑。综合引发灾害的风速、风向以及高铁路网、周边环境特征等的空间关系,结合 2.2 节中结论,将符合一定条件的风速、风向日数作为致灾因子危险性因子,将沿线隐患物数量、面积作为孕灾环境敏感性因子,将高铁运营密度作为承灾体暴露度因子,建立如下大风灾害风险分析模型[式(1)],各个分指标采用归一化方法进行无量纲化处理[式(2)]。

$$R = a \sum_{i=1}^{i=n_1} a_i L_{si} \times b \sum_{j=1}^{j=n_2} b_j L_{dj} \times cY \times dN \quad (1)$$

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: R 表示高铁大风灾害风险指数, L_{si} 表示各风速等级出现频次, L_{dj} 表示各风向等级出现频次, Y

表示隐患大小, N 表示高铁运营密度, $a \sim d$ 为各指标的权重系数; x_i 和 X_i 分别为归一化前后的数值, x_{\min} 和 x_{\max} 分别为样本数据中的最小和最大值。考虑到风险预报预警服务产品最终以等级的形式展示,为方便业务化,且为对不同区域的风险情况进行统一评价,采用赋值法对各区域中风速、风向因子进行取值,即 n_1 和 n_2 均取值为 5, $a_1 \sim a_5$ 分别代表风速 L_s 取值 1~5 对应的权重系数, $b_1 \sim b_5$ 分别代表风向 L_d 取值 1~5 对应的权重系数。隐患大小 Y 用隐患数量和面积的归一化乘积表示,运营密度 N 用列车日通行量表示。根据 2.2 节中结论,按照各区域中风速、风向与灾害发生的关系确定式(1)中 L_{si} 、 L_{dj} 的取值规则,即最大风风速灾害发生率为 10% 以下、10%~20%、20%~30%、30%~40%、40% 以上,极大风风速灾害发生率为 20% 以下、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80% 以上, L_{si} 对应取值为 1~5;最大风和极大风风向灾害发生率为 1% 以下、1%~1.5%、1.5%~2%、2%~2.5%、2.5% 以上, L_{dj} 对应取值为 1~5。具体见表 3、表 4。

表 3 基于 2019—2021 年数据的天津高铁沿线大风灾害风险分析模型最大风风速和风向等级取值规则
Table 3 Rules for maximum wind speed and wind direction grade of gale disaster risk analysis model along the Tianjin High-Speed Railway based on data from 2019 to 2021

项目	等级	西南区域	西北区域	中部区域	东部区域
风速等级 取值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	$0 \leq V < 10$	$0 \leq V < 9$	$0 \leq V < 10$	$0 \leq V < 8$
	2	$V \geq 10$		$V \geq 10$	$8 \leq V < 13$
	3				$13 \leq V < 16$
	4		$9 \leq V < 10$		
	5		$V \geq 10$		$V \geq 16$
风向等级 取值	1	N、E、SE、S、SW	E、S、SW、W	NE、E、SE、SW、W	SE、W
	2	W、NW	N、NE、SE		NE、SW
	3	NE	NW	S	E、S
	4			N	
	5			NW	N、NW

表 4 基于 2019—2021 年数据的天津高铁沿线大风灾害风险分析模型极大风风速和风向等级取值规则
Table 4 Rules for maximum instantaneous wind speed and wind direction grade of gale disaster risk analysis model along the Tianjin High-Speed Railway based on data from 2019 to 2021

项目	等级	西南区域	西北区域	中部区域	东部区域
风速等级 取值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	$V \geq 0$	$0 \leq V < 17$	$V \geq 0$	$0 \leq V < 17$
	2		$V \geq 17$		$17 \leq V < 19$
	3				
	4				
	5				$V \geq 19$
风向等级 取值	1	N、E、SE、S、SW、W	NE、E、S、SW、W	SW	SW
	2		N、SE	NE、E、W	NE、E、SE、W
	3	NE	NW	SE、E	
	4			N	N、NW
	5	NW		NW	S

构建高铁沿线大风灾害风险分析指标体系,分为目标层(A)、准则层(B)和指标层(C)三层,准则层(B)对指标层(C)起支配作用,同时受目标层(A)的支配。其中,目标层(A)为高铁沿线大风灾害风险;准则层(B)分为致灾因子危险性(B1)、孕灾环境敏感性(B2)、承灾体暴露度(B3);指标层分为风速(C1)、风向(C2)、隐患物数量(C3)、隐患物面积(C4)以及列车运营密度(C5),其中风速(C1)、风向(C2)又细化为 5 个等级(C11~C15)。准则层和指

标层各评估因子的权重系数由层次分析法(Saaty, 1990;郭金玉等,2008;崔新强等,2018)和专家打分法相结合确定,首先采用专家打分法对模型中各因子进行两两比较,运用层次分析法构建成对比较矩阵,计算各矩阵的最大特征值和特征向量,并进行一致性检验,将通过检验的矩阵特征向量作为模型对应指标的权重系数。高铁沿线大风灾害风险分析指标体系及权重见表 5。

表 5 基于 2019—2021 年数据的天津高铁沿线大风灾害风险分析指标体系及权重系数
Table 5 Index system and weight coefficient for risk analysis of gale disasters along the Tianjin High-Speed Railway based on data from 2019 to 2021

目标层(A)	准则层(B)/权重	指标层(C)
高铁沿线大风 灾害风险	致灾因子危险性 (B1)/0.5356	一级发生频率(C11)/0.0318
		二级发生频率(C12)/0.0596
		三级发生频率(C13)/0.1067
		四级发生频率(C14)/0.2799
		五级发生频率(C15)/0.5220
	孕灾环境敏感性 (B2)/0.3103	隐患物数量(C3)/0.5 隐患物面积(C4)/0.5
	承灾体暴露度 (B3)/0.1541	列车运营密度(C5)/1

2.5 高铁沿线大风灾害风险区划

基于上述风险分析模型,分别计算致灾因子危险性指数、孕灾环境敏感性指数、承灾体暴露度指数和综合灾害风险指数。采用标准差分类法,将分指数和综合指数从小到大划分为四个等级,分别为:四级(较低)、三级(较高)、二级(高)、一级(极高),进而得到天津地区高铁沿线大风灾害致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度及综合风险区划图,确定需要重点关注的风灾易发路段,实现天津高铁沿线大风灾害风险等级评价。

图 7a,7b 给出了天津高铁沿线大风灾害风险致灾因子危险性区划结果,可以看到,致灾危险性大体表现为西部区域偏低而中部、东部区域偏高的趋势,高风险(二级及以上,下同)路段主要分布在中心城区、北辰区、东丽区、滨海新区及宁河区与滨海新区交界处。以高铁线路为基准,建立 1 km 的缓冲区,作为孕灾环境敏感性分析区域,以 10 km 的间隔将天津区域内的主要高铁线路做等分处理,分别统计落在每个间隔区的风险隐患点个数和面积大小,而后将风险隐患点数量和面积进行归一化相乘,二者权重均设为 0.5,从而得出天津高铁沿线大风灾害

风险孕灾环境敏感性的空间分布结果(图 7c)。结果显示,高风险路段主要分布在中心城区、武清区、北辰区、西青区、东丽区和滨海新区。按照各条线路每日列车通行量进行计算,得到天津高铁沿线大风灾害风险承灾体暴露度区划(图 7d),可以看到,京津城际承灾体暴露度最高,京沪高铁次之,津秦高铁和津霸客专最小。

将以上三个分指标单独进行归一化处理,并进行图形的叠加、划分和合并等拓扑操作(Chen et al, 2010;Feizizadeh et al,2014;王平,2001),再根据各自的权重计算得到天津高铁沿线大风灾害综合风险区划结果(图 7e,7f)。从区划结果来看,风险等级分布具有明显的空间变化,整体上京沪高铁和京津城际风险较高,津秦高铁次之,津霸客专最低,且京沪高铁的最大风和极大风风险差异表现最为明显,结合京沪高铁和京津城际列车通行量较大的特点可知,承灾体暴露度因子对综合风险的贡献不容忽视。京津城际最大风和极大风高风险路段主要集中在北辰区段、东丽区段东部、滨海新区段;津秦高铁高风险路段主要位于东丽区段东部;对于京沪高铁,最大风高风险路段主要集中在武清区段北部和北辰区段,而极大风高风险路段主要集中在西青区段。取

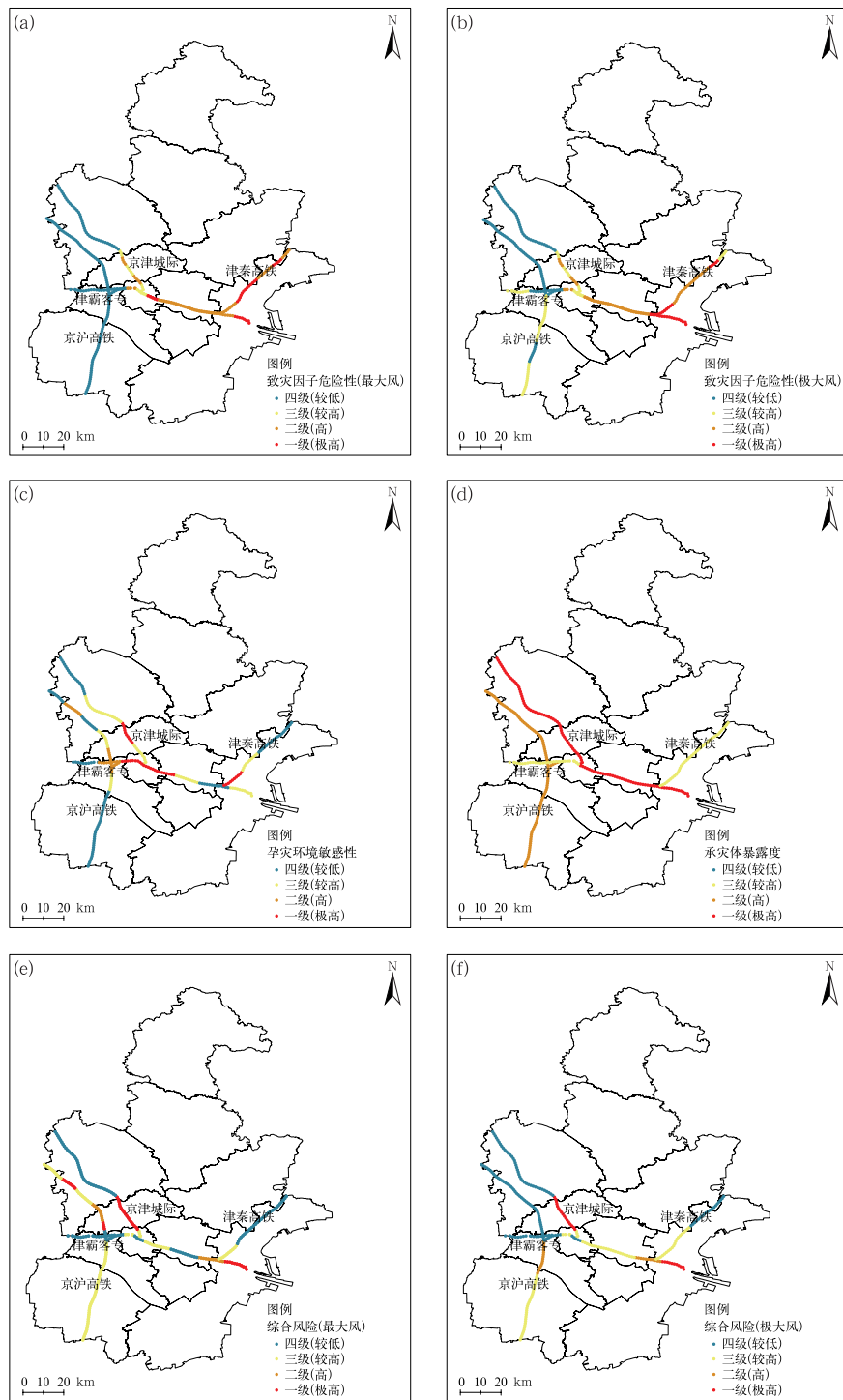


图 7 基于 2019—2021 年数据的天津高铁沿线大风灾害风险区划

(a) 致灾因子危险性(最大风), (b) 致灾因子危险性(极大风), (c) 孕灾环境敏感性, (d) 承灾体暴露度, (e) 综合风险(最大风), (f) 综合风险(极大风)

Fig. 7 Risk zoning of gale disasters along the Tianjin High-Speed Railway based on data from 2019 to 2021

(a) hazard-inducing factors (maximum wind speed), (b) hazard-inducing factors (maximum instantaneous wind speed), (c) hazard-inducing environment sensitivity, (d) hazard bearing-body exposure, (e) comprehensive risk (maximum wind speed), (f) comprehensive risk (maximum instantaneous wind speed)

每个路段最大风、极大风风险区划等级结果的较高者,得到天津高铁大风灾害风险区划汇总表(表 6)。

显而易见,灾害发生较多的区域对应的灾害风险较大,灾害发生较少的区域对应的灾害风险较小。通过对比图 2 和图 7e,7f 的一致性来直观评估风险分析模型构建的科学性。可以看到,大部分路段的

风险区划结果和历史灾害发生情况较为一致,但在津秦高铁滨海新区段北部二者的吻合度较低。分析其原因,主要是由于这部分高铁路段沿线隐患卫星识别结果存在一定误差,识别结果较实际存在的隐患点数量明显较少,因此导致风险等级偏低。

表 6 基于 2019—2021 年数据的天津高铁大风灾害风险区划汇总表

Table 6 Summary of the Tianjin High-Speed Railway gale disaster risk zoning based on data from 2019 to 2021			
风险等级	高铁名称	所属区域	具体路段
一级	京沪高铁	武清区、北辰区	K85~K92,K113~K116
	京津城际	武清区、北辰区、市区、滨海新区	K96~K115,K153~K166
二级	京沪高铁	武清区、北辰区、西青区、静海区	K103~K112,K122~K137
	京津城际	市区、东丽区、滨海新区	K144~K152
	津秦高铁	东丽区、滨海新区	K28~K35
三级	京沪高铁	武清区、静海区	K74~K84,K93~K102,K138~K169
	京津城际	市区、东丽区	K116~K120,K124~K143
	津秦高铁	市区、东丽区、滨海新区	K5~K27,K36~K55
	津霸客专	市区	K0~K3
四级	京沪高铁	静海区	K117~K121
	京津城际	市区、东丽区	K51~K95,K121~K123
	津秦高铁	市区、东丽区、滨海新区	K0~K4,K56~K74
	津霸客专	市区、西青区	K4~K26

3 结论与讨论

(1)高铁沿线轻漂浮物入侵灾害具有明显的时间变化特征和空间分布差异。冬春季灾害发生较多,占全年的 73.75%,且白天多于夜间,12—15 时是灾害发生的最集中时段,15 时达到峰值。天津中部和东部区域灾害发生最多,西北区域其次,西南区域最少。

(2)统计轻漂浮物入侵灾害与其发生时的风速、风向之间的关系,结果显示,轻漂浮物入侵灾害主要发生在最大风风速为 $8\sim 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和极大风风速为 $13\sim 21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间内,且东部区域路段发生灾害对应的风速最大,西北区域路段次之,中部和西南区域路段相对较小。当风向为偏西风到偏北风,风向与线路夹角为 45° 及以上时,更易造成灾害发生,这一特征在中部和东部区域表现的最为明显。综合来看,在冬春季午后的偏西到偏北风影响下,高铁沿线最易发生轻漂浮物入侵灾害。

(3)基于高分系列卫星遥感影像数据,对高铁线路周边 1 km 缓冲区内 的隐患物进行识别,2020 年和 2021 年识别命中率分别为 72.7%、57.1%,平均 64.9%。采用时效性更强的卫星影像数据,同时获

取同一时间维度隐患分布的真实情况,有助于提升隐患识别的准确性。

(4)构建融合气象、高铁、环境等因素的高铁大风灾害风险分析模型,风险区划结果显示,整体上京沪高铁和京津城际风险较高,津秦高铁次之,津霸客专最低,这也反映出承灾体暴露度因子对综合风险的贡献不容忽视。高风险(二级及以上)路段主要集中在京沪高铁武清区段北部、北辰区段、西青区段,京津城际北辰区段、东丽区段东部和滨海新区段以及津秦高铁的东丽区段东部。

由于研究时段较短,历史灾情数量偏少,同时受获取的高分系列卫星遥感影像数据所限,基于卫星遥感技术的隐患监测识别准确率有待提升,所建立的高铁沿线大风灾害风险分析模型尚不能完全准确地反映风险的特征和结果。在后续研究中,将收集更加丰富的灾情资料,对引发灾害的风况特征进行更深层次挖掘分析,同时开展多尺度卫星资料融合应用,提升灾害风险分析模型的科学性和准确性。此外,由于铁路具有特殊的行业属性,防灾减灾能力更多依赖行业内部管理及资源调配,因此,构建模型时未将防灾减灾能力考虑在内,下一步考虑从两个方面进行改进,一是强化气象与铁路部门合作交流,获取各线路灾害监测点建设数量、挡风墙设置、灾害

应急响应能力等相关数据;二是开展气象服务效益评估,科学分析气象灾害预警信息、铁路气象服务等对防灾减灾能力的贡献,作为防灾减灾能力因子加以考虑,保证风险分析模型的完整性。

参考文献

- 白虎志,李栋梁,董安祥,等,2005. 青藏铁路沿线的大风特征及风压研究[J]. 冰川冻土,27(1):111-116. Bai H Z, Li D L, Dong A X, et al, 2005. Strong wind and wind pressure along the Qinghai-Tibet Railway[J]. J Glaciol Geocryol, 27(1): 111-116 (in Chinese).
- 包云,李亚群,马祯,等,2021. 基于监测数据挖掘的高速铁路大风危险性评估研究[J]. 铁道运输与经济,43(9):82-87. Bao Y, Li Y Q, Ma Z, et al, 2021. Research on wind risk assessment for high speed railways based on monitoring data mining[J]. Railway Transport Economy, 43(9): 82-87 (in Chinese).
- 程龙,2021. 基于 WSN 的兰新高铁沿线风速监测与列车风致安全预警研究[D]. 兰州:兰州大学. Cheng L, 2021. Research on WSN based wind speed monitoring and train wind induced safety warning along Lanzhou-Wulumuqi High-Speed Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).
- 崔新强,付佳,代娟,等,2018. 基于 GIS 的沪汉蓉高铁线路暴雨灾害风险区划[J]. 气象科学,38(1):113-120. Cui X Q, Fu J, Dai J, et al, 2018. GIS-based rainstorm disaster risk zoning over Shanghai-Wuhan-Chengdu High-Speed Railway [J]. J Meteor Sci, 38(1): 113-120 (in Chinese).
- 崔新强,周小兰,付佳,等,2016. 高速铁路安全运行高影响天气条件等级标准研究[J]. 灾害学,31(3):26-30. Cui X Q, Zhou X L, Fu J, et al, 2016. Research on level standards of high-impact weather over high-speed railway safety operation[J]. J Catastrophol, 31(3): 26-30 (in Chinese).
- 代娟,崔新强,刘文清,等,2016. 高速铁路气象灾害风险分析与区划方法探讨[J]. 灾害学,31(4):33-36. Dai J, Cui X Q, Liu W Q, et al, 2016. Research on meteorological disaster risk analysis and regionalization in high speed railway[J]. J Catastrophol, 31(4): 33-36 (in Chinese).
- 狄靖月,许凤雯,李焕连,等,2022. 暴雨诱发恩施州地质灾害成因分析[J]. 气象,48(10):1321-1332. Di J Y, Xu F W, Li H L, et al, 2022. Cause of the geological hazards induced by rainstorm in Enshi Autonomous Prefecture[J]. Meteor Mon, 48(10): 1321-1332 (in Chinese).
- 冯蕾,陈辉,田华,2012. 影响我国高速铁路运行的灾害性天气时空分布规律[C]//强化科技基础 推进气象现代化—第 29 届中国气象学会年会论文集. 沈阳:中国气象学会. Feng L, Chen H, Tian H, 2012. Temporal and spatial distribution of disastrous weather affecting high-speed railway operation in China [C] // Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Shenyang: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 巩灿灿,叶小岭,熊雄,等,2021. 高铁沿线某区段最大风速时空分布特征分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),35(5):177-184. Gong C C, Ye X L, Xiong X, et al, 2021. Analysis of space-time distribution characteristics of maximum wind speed in a section along high-speed railway [J]. J Chongqing Univ Technol (Nat Sci), 35(5): 177-184 (in Chinese).
- 郭金玉,张忠彬,孙庆云,2008. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报,18(5):148-153. Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y, 2008. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Saf Sci J, 18(5): 148-153 (in Chinese).
- 扈海波,熊亚军,张姝丽,2010. 基于城市交通脆弱性核算的大雾灾害风险评估[J]. 应用气象学报,21(6):732-738. Hu H B, Xiong Y J, Zhang S L, 2010. The risk assessment of the fog disaster based on vulnerability calculating related to the urban transportation network [J]. J Appl Meteor Sci, 21(6): 732-738 (in Chinese).
- 黄崇福,2005. 自然灾害风险评估:理论与实践[M]. 北京:科学出版社. Huang C F, 2005. Theory and Practice of Natural Disaster Risk Assessment [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 李嵩恂,吴昊,柳艳香,等,2018. 我国公路低能见度灾害风险评估与区划研究[J]. 气象,44(5):676-683. Li A X, Wu H, Liu Y X, et al, 2018. Risk assessment and region partition of low visibility disasters on highway in China [J]. Meteor Mon, 44(5): 676-683 (in Chinese).
- 李伟,张颖超,熊雄,等,2021. 京沪高铁沿线江苏段风况研究[J]. 铁道科学与工程学报,18(10):2506-2516. Li W, Zhang Y C, Xiong X, et al, 2021. Research on wind conditions of Jiangsu section along Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. J Railway Sci Eng, 18(10): 2506-2516 (in Chinese).
- 李宇梅,杨寅,狄靖月,等,2020. 全国地质灾害气象风险精细化网格预报方法及其应用[J]. 气象,46(10):1310-1319. Li Y M, Yang Y, Di J Y, et al, 2020. Meteorological risk assessment method of geological disaster in China and its mesh refinement application [J]. Meteor Mon, 46(10): 1310-1319 (in Chinese).
- 陆亚龙,肖功建,2001. 气象灾害及其防御[M]. 北京:气象出版社. Lu Y L, Xiao G J, 2001. Meteorological Disasters and Their Prevention [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 马淑红,马韞娟,2009. 瞬时风速对高速列车安全运行的影响及其控制[J]. 铁道工程学报,26(1):11-16. Ma S H, Ma Y J, 2009. Effects of maximum instantaneous wind velocity on the safety of high-speed train and its control [J]. J Railway Eng Soc, 26(1): 11-16 (in Chinese).
- 马淑红,马韞娟,2013a. 我国高铁强风灾风险评估与区划方法研究[J]. 轨道交通, (6): 94-96. Ma S H, Ma Y J, 2013a. Strong hurricane risk assessment and zoning methods of high-speed rail [J]. Rail Transit, (6): 94-96 (in Chinese).
- 马淑红,马韞娟,2013b. 我国高铁强风灾害对策研究[J]. 中国科技信息, (4): 97-99. Ma S H, Ma Y J, 2013b. Countermeasure research on national high-speed railway strong wind disasters [J]. China Sci Technol Inform, (4): 97-99 (in Chinese).
- 马韞娟,马淑红,李振山,等,2009. 我国客运专线高速列车安全运行大风预警系统研究[J]. 铁道工程学报,26(7):43-47. Ma Y J, Ma S H, Li Z S, et al, 2009. Research on the strong wind alarm

- system for safe running of high-speed train on passenger dedicated line[J]. *J Railway Eng Soc*, 26(7): 43-47 (in Chinese).
- 孟祥连, 李鲲, 谢胜波, 等, 2018. 兰新高铁大风区风况特征及防风工程设计分区[J]. *中国沙漠*, 38(5): 972-977. Meng X L, Li K, Xie S B, et al, 2018. Strong wind environmental characteristics and countermeasures according to engineering divisions along a high-speed railway[J]. *J Desert Res*, 38(5): 972-977 (in Chinese).
- 钱征宇, 2009. 西北地区铁路大风灾害及其防治对策[J]. *中国铁路*, (3): 1-4, 14. Qian Z Y, 2009. Wind disaster and its countermeasure in northwestern railways[J]. *China Railways*, (3): 1-4, 14 (in Chinese).
- 全超, 2021. 铁路沿线外部环境安全风险识别与评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学. Quan C, 2021. Research on identification and evaluation method of external environmental safety risk along railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University (in Chinese).
- 宋建洋, 柳艳香, 田华, 等, 2018. 我国高速公路大风灾害风险评估与区划研究[J]. *公路*, 63(12): 182-187. Song J Y, Liu Y X, Tian H, et al, 2018. Risk assessment and zoning of gale disasters on expressway in China[J]. *Highway*, 63(12): 182-187 (in Chinese).
- 孙玖玲, 张赛, 马京津, 2019. 津秦高速铁路沿线风况特征[J]. *生态学杂志*, 38(11): 3487-3495. Sun M L, Zhang S, Ma J J, 2019. Characterization of the wind regime along Tianjin-Qinhuangdao High-Speed Railway[J]. *Chin J Ecol*, 38(11): 3487-3495 (in Chinese).
- 王富章, 2013. 铁路灾害风险评估与应急救援策略研究[D]. 北京: 北京交通大学. Wang F Z, 2013. Research on disaster risk evaluation and emergency rescue strategy of railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University (in Chinese).
- 王平, 2001. 基于GIS的自然灾害区划方法研究[J]. *地学前缘*, 8(4): 321-322. Wang P, 2001. Study on the method of natural disaster zoning based on GIS[J]. *Earth Sci Front*, 8(4): 321-322 (in Chinese).
- 王志, 韩焱红, 李嵩恂, 2017. 我国公路交通气象研究与业务进展[J]. *气象科技进展*, 7(1): 85-89. Wang Z, Han Y H, Li A X, 2017. Advance in research and operation in traffic meteorological service in China[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 7(1): 85-89 (in Chinese).
- 夏伟萌, 2012. 东疆铁路沿线大风灾害风险评估及应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学. Xia Y M, 2012. The evaluation and application of gale disaster along railway in East Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University (in Chinese).
- 谢晨娟, 2018. 计及天气因素的接触网可靠性评估[D]. 成都: 西南交通大学. Xie C J, 2018. Operation reliability assessment of catenary with weather[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University (in Chinese).
- 于胜利, 李茂, 王保江, 等, 2018. 卫星遥感技术在铁路沿线环境保护中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 28(S2): 88-92. Yu S L, Li M, Wang B J, et al, 2018. Application of satellite remote sensing technology in environmental protection along railway lines[J]. *China Saf Sci J*, 28(S2): 88-92 (in Chinese).
- 章国材, 2014. 自然灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社. Zhang G C, 2014. Principles and Methods of Natural Disaster risk Assessment and Zoning[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 张继权, 吕军, 2005. 实用气象学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社. Zhang J Q, Lü J, 2005. Practical Meteorology[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press (in Chinese).
- 张强, 杨贤为, 张永山, 等, 2003. 京沪沿线强降水频率及大风频率分布特征[J]. *气象科技*, 31(1): 45-49. Zhang Q, Yang X W, Zhang Y S, et al, 2003. The analysis of the distribution characteristics of severe precipitation frequency and strong wind frequency along the high speed railway from Beijing to Shanghai[J]. *Meteor Sci Technol*, 31(1): 45-49 (in Chinese).
- 张子曰, 1998. 川藏铁路沿线气象风险特征分析[D]. 兰州: 兰州大学. Zhang Z Y, 1998. The research on the meteorological risk of railway system over the Sichuan-Tibet Region[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).
- Burlando M, Freda A, Ratto C F, et al, 2010. A pilot study of the wind speed along the Rome-Naples HS/HC railway line. Part 1- Numerical modelling and wind simulations[J]. *J Wind Eng Ind Aerodynam*, 98(8-9): 392-403.
- Chen Y, Yu J, Khan S, 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation[J]. *Environ Model Softw*, 25(12): 1582-1591.
- Feizizadeh B, Jankowski P, Blaschke T, 2014. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis[J]. *Comput Geosci*, 64: 81-95.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability part a: global and sectoral aspects[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Richards J A, Jia X P, 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction[M]. Berlin: Springer.
- Saaty T L, 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. *European J Oper Res*, 48(1): 9-26.
- Stein A, Van Der Meer F, Gorte B, 1999. Spatial Statistics for Remote Sensing[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

(本文责编: 俞卫平)