

基于 WRF 模式的康定地区风吹雪易发性判断

周 雪¹, 杨伟栋^{1,2,3}, 张 珍^{1,2,3}, 刘庆宽^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043)

摘要:为给通过地形复杂, 缺少气象资料的西南艰险山区的铁路研究风吹雪易发性提供方法, 以位于该区域的四川省康定市为例, 采用中尺度数值天气预报模式(The Weather Research and Forecasting Mode, WRF)对该区域气象要素的时空分布进行模拟。基于 WRF 模式中各种参数的特点, 设计 4 种参数方案进行计算, 采用双层网格嵌套达到降尺度模拟, 为了高精度解析大气边界层过程, 在竖直方向、近地面 1.5 km 高度内加密为 15 层, 提取康定站计算结果与观测结果进行比较。结果表明, WRF 模式的计算结果符合康定市气候特征, 气象要素的相关系数均高于 0.5; 风吹雪发生概率从高到低的区域依次为康定市东部和南部边缘的贡嘎山区, 内部的大雪山段, 以及位于 101.7°E~102.0°E 位置处的铁路线路, 概率分别为 19%、14% 和 12%, 其他区域的概率低于 4%。

关键词:铁路灾害防治; 风吹雪; 易发性判断; 数值模拟; WRF 模式; 参数化方案

中图分类号: U216.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0087-07

0 引言

风吹雪是一种由气流挟带起分散的雪粒在近地面运行的多相流天气现象, 会降低能见度、造成道路积雪甚至引发严重的交通事故, 许多学者对其进行了研究。

关于风吹雪的物理性质, NISHIMURA et al^[1]采用雪粒子计数器观测雪质量通量, 发现雪通量随高度变化明显, 变化趋势呈幂数定律减少。HUANG et al^[2]研究了不同形状雪粒子对风吹雪现象的影响, 发现在风吹雪发生过程中, 球形、椭球型以及圆柱形雪粒子的滞空雪粒数和输雪率比星型和六棱柱形粒子高 2 个数量级, 所以当雪粒形状为前 3 种时, 风吹雪造成的灾害后果比后 2 种形状更严重, 且在数值模拟的时候不能简单的将雪颗粒假设为圆形。这些观测结果以及经验模型, 可以为风吹雪的数值模拟和风洞实验中关键参数的选取提供参考依据。关于风吹雪的防治, 最开始主要利用风洞实验, KIND et al^[3]使用不同密度的粒子代替雪颗粒进行风洞实验, 发现实验时采用高密度粒子能够更好地模拟积雪现象。由于低温风洞实验的特殊性, 实验前需要进行大量的复杂准备工作, 随着计算机性能的提升, 一些学者开始采用数值模拟进行风吹雪防护研究。丁录胜等^[4]采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件分析风吹雪作用与路基形式的关系。

研究区域的气象信息^[5]、地形地貌^[6]以及路基断面形式^[7]对风吹雪灾害有重要影响, 其中气象信息是预防其发生的基础条件, 交通线路应尽量避免冬季降雪较多区域或针对危险路段加强防护。中国多条铁路经过高寒地区, 这些地区风吹雪研究的困难之一为缺少气象资料。中尺度数值模拟的研究在近几十年内得到了迅速发展, 其中以天气研究和预报(Weather Research Forecast, WRF)应用最为广泛。模拟

收稿日期: 2023-09-20 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230243

基金项目: 河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2022210078); 河北省高层次人才项目(冀办[2019]63号); 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5410G); 河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2023093)

作者简介: 周雪(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风吹雪易发性的判断。E-mail: stillwaterszx@163.com

周雪, 杨伟栋, 张珍, 等. 基于 WRF 模式的康定地区风吹雪易发性判断[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 87-93.

和实时预报试验表明,WRF 模式系统在预报各种天气时都具有较好的性能和广阔的应用前景。薛羽君等^[8]用 WRF 模式成功模拟出了四川盆地的降水落区及强降水中心位置。郭新春等^[9]将四川地区的 WRF 模拟风速和气象站观测风速进行对比,发现风速变化趋势基本一致,WRF 模拟的高分辨率风速基本可靠。以上研究证明,WRF 模式可以在一定程度上弥补气象资料匮乏的问题。

康定市曾发生过多次重大雪灾事件^[10],由于该区域地形复杂,缺少气象观测信息,因此将 WRF 模式应用到康定地区,对其气象要素进行模拟并与气象站观测结果进行对比,根据计算结果得到康定地区气象要素时空分布规律,并结合风吹雪发生判断依据,对康定市以及其内部铁路的风吹雪易发性做出评判,为铁路风吹雪防护提供理论依据和指导建议。

1 方法与数据

1.1 研究区域概况

康定市地处四川盆地到青藏高原与云贵高原过渡带,地形复杂,东侧为大渡河区域,山高谷深,沟谷纵横;西侧为折多山区域,沟壑密集,地势起伏;南侧为贡嘎山区域,西南侧为雅砻江流域;大雪山从其中部由北向南纵贯全市将康定市分为东西两大部分,东部为高山峡谷,西部为丘状高原,图 1 展示了康定市的主要地貌。



图 1 康定地形分布

1.2 WRF 模拟

1.2.1 模拟区域设置

采用 WRF(ARW) 4.1.2 版本的次中尺度天气数值模式,选取 NCEP 提供的再分析资料($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)作为模式的初始场和侧边界条件,以 30.05°N , 101.97°E 为中心,模拟包含康定市全部以及雅江县大部分地区的 2016-12-01 到 2017-02-28 冬季 3 个月气象信息。计算采用如图 2 所示的双层网格嵌套,外层网格标记为 d01,分辨率为 9 km,内层网格标记为 d02,分辨率为 3 km,网格数量分别为 100×100 和 88×88 ,为了更准确地模拟大气边界层,竖直方向分层在近地面 1.5 km 高度内加密为 15 层。

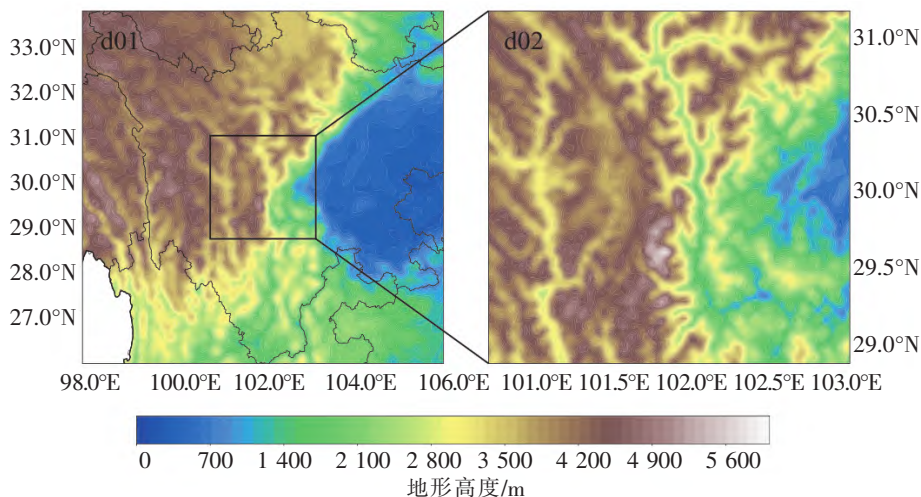


图 2 WRF 计算区域

WRF 模式将各种物理过程参数化,通过对不同参数方案的组合,实现最佳效果。各种方案中,对风雪模拟结果有重要影响的为微物理过程以及行星边界层过程。微物理过程中 Purdue-Lin 方案与 Thompson 方案是 WRF 模式中 2 种较为复杂的计算方案,更适合于高分辨率模拟;行星边界层方案中,YSU 方案包含了对边界层顶夹卷层的显示处理,ACM2 方案可以模拟出由大尺度的湍流涡旋产生的输送过程和网格小尺度的湍流混合过程,该方案能真实模拟边界层热通量和位温廓线。基于各种方案的特点,设计了 4 种模拟方案,具体如表 1 所示。

表 1 WRF 模拟物理参数方案设置

参数化方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
微物理过程方案	Thompson	Purdue-Lin	Purdue-Lin	Thompson
行星边界层方案	YSU	ACM2	YSU	ACM2
长波和短波辐射方案	RRTM 和 Dudhia	RRTM 和 Dudhia	RRTM 和 Dudhia	RRTM 和 Dudhia
陆面方案	Noah	Noah	Noah	Noah
近地面层方案	MM5	MM5	MM5	MM5
积云方案	—	—	—	—

注:—表示不采用积云方案。

1.2.2 评价指标选择

对于模拟结果的评价指标,采用皮尔逊相关系数 R (Pearson Correlation Coefficient) 来衡量模拟序列与观测序列的线性相关程度, R 越接近 1, 二者的相关程度越高; 采用平均偏差 MBE (Mean Bias Error) 来验证模拟序列与观测序列之间的偏差情况, 结果越接近 0, 偏差越小; 采用均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 来验证模拟序列与观测序列偏差的平均, 结果越接近 0, 模拟效果越好。相关的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(X_0 - \bar{X}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 \sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)^2}} \quad (1)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0) \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2} \quad (3)$$

式中, X_i 为模拟序列值; X_0 为观测序列值; $\bar{X}_i$ 为模拟序列的平均值; $\bar{X}_0$ 为观测序列的平均值; n 为数据的总个数。

2 模拟结果分析

2.1 模拟结果验证

提取 d02 中康定气象站 (30.05°N、101.97°E) 的降雨量以及 10 m/s 风速的计算结果与观测结果进行比较, 表 2 和表 3 展示了评价指标的结果。对于降雨的模拟, 方案 2、方案 3 的相关系数和均方根误差优于方案 1、方案 4, 但平均偏差更大; 对风速的模拟, 方案 1、方案 3 的评价指标结果均优于方案 2、方案 4。

表 2 不同方案模拟降雨结果

方案名称	相关系数 R	平均偏差 MBE	均方根误差 RMSE
方案 1	0.27	0.01	1.41
方案 2	0.40	0.15	1.42
方案 3	0.51	0.10	1.07
方案 4	0.34	0.63	3.02

表 3 不同方案模拟风速结果

方案名称	相关系数 R	平均偏差 MBE	均方根误差 RMSE
方案 1	0.51	1.21	1.71
方案 2	0.45	2.38	3.20
方案 3	0.54	1.32	1.80
方案 4	0.33	0.90	0.62

图 3 展示了 2 种气象要素模拟与观测的实际数值。4 种方案都准确计算出了模拟时段内的 7 场主要降雨,但降雨起止时间普遍提前且降雨量偏高;对于风速 4 种方案都准确模拟出了其变化趋势但风速的最大最小值高于实际结果。综合认为方案 3 为最优方案,后续分析基于方案 3 的内层网格计算结果。

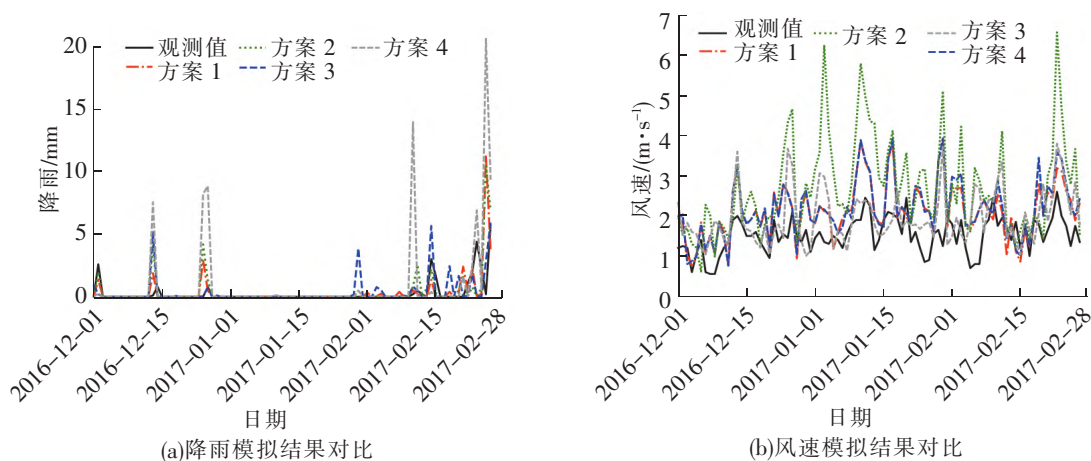


图 3 降雨风速模拟结果

2.2 模拟区域温度

图 4 中展示了模拟区域内各月最低温度的分布情况。从图 4 可以看出,康定市整个区域在冬季普遍寒冷,月最低温度为 -20.56°C ,1 月份温度值低于其他 2 个月温度值,东北部的大渡河谷地与西南部的雅砻江谷地比其他山区温度高,中部的大雪山和南部的贡嘎山区最为寒冷。

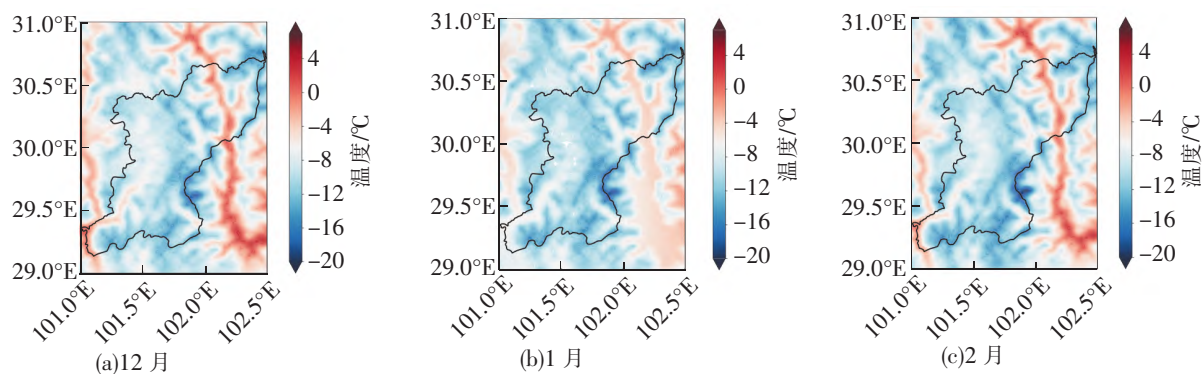


图 4 康定市逐月最低温度

连续日平均温度小于 0°C 的天数,是影响风吹雪发生的重要因素,连续时间越长,风吹雪发生概率越高。图 5 展示了康定气象站模拟的日平均温度值随时间变化情况,模拟时段内大多数温度值都小于 0,最高值为 2016-12-13 的 2.39°C ;2016-12-10—2017-12-14 和 2016-12-22—2016-12-25 分别出现了 5 d 和 4 d 连续平均温度大于 0 的情况,其余连续时间最高为 2 d;温度持续低于 0°C 的最长时间为 2016-12-26 到 2016-1-26 的 32 d,若这些日期内有降雪事件发生,则出现风吹雪现象的可能性较高。

2.3 模拟区域降水

图 6 展示了康定市月累积降水量,整个冬季降水量逐渐增加,2 月份的降水范围和降水量达到最高,约 400 mm。康定市中部的的大雪山和南部的贡嘎山区因较为寒冷,降水量高于其他区域,东北地区的大渡河谷地及西南地区的雅砻江谷地因气温高于其他地区,降水量较周围低,进一步验证了降水受温度影响。

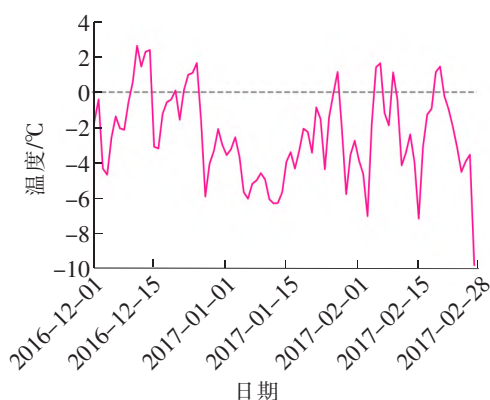


图 5 康定站日平均温度随时间变化图

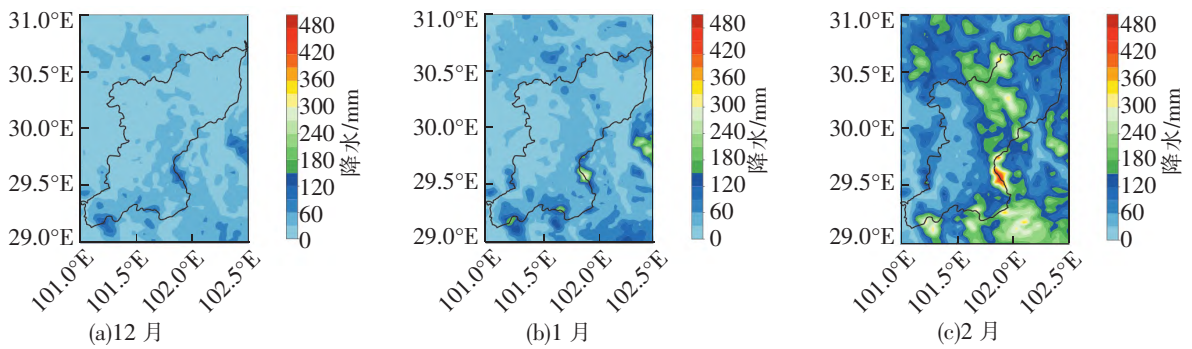


图 6 康定市逐月累积降水

表 4 展示了 WRF 模拟中康定站平均雪深的变化情况。在冬季 3 个月中,共发生 5 场积雪,起始时间分别为 12 月 3 日、12 月 15 日、12 月 26 日、2 月 10 日和 2 月 23 日,风吹雪一般发生在降雪过程中或降雪后的几天内,因此这些时段内发生风吹雪的可能性较高,应加强防范,5 场积雪总时长共 30 d,占整个冬季总时长的 1/3,平均每次积雪 6 d,平均积雪深度为 1.8 cm。

表 4 WRF 模拟中康定站平均雪深的变化情况

起止日期	持续时间/d	平均雪深/cm
12 月 3 日—12 月 7 日	5	1.0
12 月 15 日—12 月 18 日	4	1.5
12 月 26 日—1 月 1 日	7	2.3
2 月 10 日—2 月 17 日	8	1.3
2 月 23 日—2 月 28 日	6	2.5

2.4 模拟区域风速风向

图 7 展示了康定地区的月平均风场分布,箭头代表风向。大雪山东部的大渡河区域风向以南风为主,西部以南风和西南风为主,中部的大雪山以及南部的贡嘎山区风速较高,最高风速值为 9 m/s,大渡河谷和雅砻江谷地,风速低于县城其他地区。

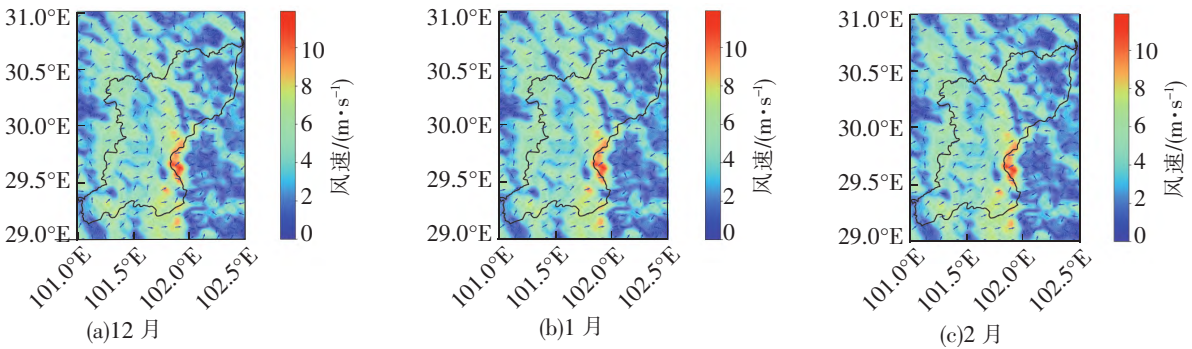


图 7 康定市平均风速风向

图 8 为康定站风玫瑰图,表 5 为康定站风速对应的概率密度。一级主导风向为西南风,占整个模拟时段的 30%,二级主导风向为西西南风,占整个模拟时段的 17.6%,风速范围主要集中在 1~5 m/s,约占整个风速模拟时段的 55%。

表 5 康定站风速对应的概率密度

风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	(5,6]
概率密度/%	3.32	12.68	13.38	13.24	10.81	7.11
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	(6,7]	(7,8]	(8,9]	(9,10]	(10,12]	(12,20]
概率密度/%	6.08	5.80	3.98	3.98	2.81	5.21

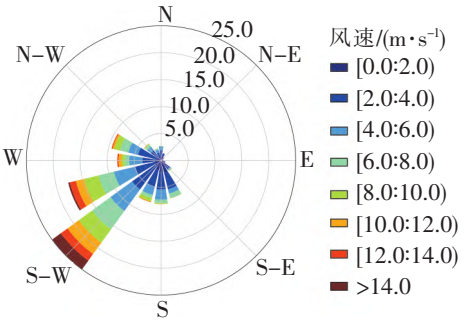


图 8 康定站风玫瑰图

2.5 风吹雪易发性判断

根据学者对发生风吹雪时的气象信息检测,了解到风速和降雪为影响其是否发生的关键因素^[5],以康定地区雪的物理特性为基础,了解到风吹雪现象产生的条件有:风速范围达到 $3\sim 8\text{ m/s}$ ^[11]并且伴有降雪事件发生,同时为保证雪的相态为固态,增加温度限定条件,温度值小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,某地同时满足上述 3 种条件时,则判定会发生风吹雪现象。为判定该地区发生风吹雪灾害的相对危险性,参考文献^[12]中的方法,以模拟数据中的气温、风速和降雪信息为基准,根据满足判定条件的时刻个数对风吹雪发生概率进行量化,即某地点风吹雪易发性概率等于该地点满足风吹雪发生条件的总时刻数与模拟时段总时刻数的比值。

图 9 展示了其发生的概率,县城东部边缘易发性概率较高约为 19%,易发性第 2 高的区域为县城中部的大雪山和南部的贡嘎山区,概率约为 14%;图 9 中线段为康定市内部经过的铁路线路,在康定市内部位于 $101.7^{\circ}\text{E}\sim 102.0^{\circ}\text{E}$ 位置处的铁路发生风吹雪现象概率稍高,约为 12%,其余位置的铁路风吹雪发生概率低于 4%。因此康定市的中部、东部和南部以及位于康定市东部的铁路需加强风吹雪灾害的防护。

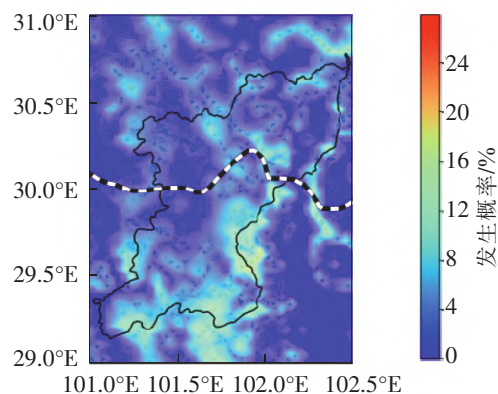


图 9 康定市风吹雪易发性概率

(1) WRF 模式参数方案中,YSU 和 ACM2 的组合方式计算结果最为准确,各种气象要素的时空分布特征与康定市地形地貌相对应。

(2) 康定地区在冬季 1 月份温度最低,大渡河谷及雅砻江谷地温度高于其他地区,大雪山和贡嘎山区温度较低;2 月份降水量最高,降水落区主要集中在东部和南部边缘;冬季风速范围主要集中在 $2\sim 8\text{ m/s}$,东部边缘风速高于其他地区的风速,主导风向为西南风。

(3) 康定市风吹雪易发性概率较高地区主要位于城市的东南边缘和其内部靠近城市东部边缘处铁路。

参 考 文 献

- [1] NISHIMURA K, YOKOYAMA C, ITO Y, et al. Snow particle speeds in drifting snow[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(16): 9901-9913.
- [2] HUANG N, SANG J, HAN K. A numerical simulation of the effects of snow particle shapes on blowing snow development[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D22): 1-14.
- [3] KIND R J, MURRAY S B. Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982, 10(1): 89-102.
- [4] 丁录胜,白明洲,李鹏翔. 风吹雪积雪分布特征和铁路路基形式相关性研究[J]. 北京交通大学学报,2023,47(1):54-64.
- [5] VIONNET V, GUYOMARC H G, NAAIM B F, et al. Occurrence of blowing snow events at an alpine site over a 10-year period: Observations and modelling[J]. Advances in Water Resources, 2013, 55: 53-63.
- [6] LIAO X, HUANG K, SONG D, et al. Distribution characteristics of snow and evaluation of snowdrift susceptibility along the Xinku section of Yining-Aksu Railway in China[J/OL]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 217: 104020[2023-09-20]. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104020>.
- [7] 廖昕,黄凯阳,李梦恒,等. 尤路都斯盆地风吹雪成因特征及防治措施研究[J]. 工程地质学报,2023,31(4):1450-1460.
- [8] 薛羽君,白爱娟,李典. 四川盆地降水日变化特征分析和个例模拟[J]. 地球科学进展,2012,27(8):885-894.
- [9] 郭新春,熊海星,晋明红,等. 四川西南地区山地与平坝风速关系研究[J]. 电力勘测设计,2016(增刊 2):108-114.
- [10] 王中隆,张志忠. 中国风吹雪区划[J]. 山地学报,1999(4):312-317.
- [11] MELLOR M. Cold regions research and engineering[R]. [S.l:s.n]: 1965.
- [12] 骆颜,马文勇,孙元春. 高寒地区交通线路风速及风向预测研究[J]. 工程力学,2022,39(增刊 1):195-201.

The Judgement of Susceptibility of Wind-blown Snow in Kangding Area Based on WRF Model

ZHOU Xue¹, YANG Weidong^{1,2,3}, ZHANG Zhen^{1,2,3}, LIU Qingkuan^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to provide a method to study the susceptibility of wind-blown snow for the railway through the mountainous areas of southwest China with complex terrain and lack of meteorological data, this paper takes Kangding of Sichuan province as an example. The mesoscale numerical weather research and forecasting mode (WRF) is used to simulate the spatiotemporal distribution of meteorological elements in this region. Based on the characteristics of various parameters schemes, three combination methods are designed in this paper. Using double-layer mesh nesting to achieve downscale simulation, and in order to analyze atmospheric boundary layer process with high accuracy, the vertical direction was increased into 15 layers within a height of 1.5 km near the ground. The calculation results of Kangding station were extracted and compared with the observation results. The results show that WRF model is consistent with the climate characteristics of Kangding. The correlation coefficients of meteorological information are both higher than 0.5; The regions with the probability of wind-blown snow from high to low are the eastern part of Kangding and the southern edges of Gongga Mountain, the great snow mountain section inside Kangding, and the railway line at 101.7°E~102.0°E, with the probability of 19%, 14% and 12%, respectively, and the probability of other areas is lower than 4%.

Key words: railway disaster prevention; snowdrift; susceptibility discrimination; numerical simulation; WRF; parameterization scheme