

引用格式: 毛妤·阿依提看, 李霞, 玉素甫·木沙, 李淑婷, 钟玉婷. 中天山北坡焚风时空分布特征及预报效果分析[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 823-834.

AYITKEN Maulen, LI Xia, MUSA Yusuf, LI Shuting, ZHONG Yuting. Temporal and spatial characteristics of foehn on the north slope of the Tianshan Mountains of China and prediction ability of European Fine Grid Numerical Products [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 823-834.

中天山北坡焚风时空分布特征及预报效果分析

毛妤·阿依提看¹, 李霞^{1*}, 玉素甫·木沙², 李淑婷¹, 钟玉婷¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 中国气象局气象干部培训学院 新疆分院, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 焚风是一种特殊的山地气候现象,是由地形造成的高温、低湿的强下坡风,在天山北坡乌鲁木齐及其周边地区频繁发生。焚风影响飞机起降、陆路运输,对建筑设施以及当地人民生命财产安全有着潜在威胁,并且在重污染天气的形成过程中起重要作用。目前对中天山北坡的焚风研究,多局限于乌鲁木齐焚风天气个例的分析,对焚风的时空分布特征的认识不够细致深入,对焚风的形成机理依然缺乏全面系统的认识。本研究采用 2018—2020 年中天山北坡 9 个气象站逐时风速风向资料、欧洲细网格数值预报产品,分析乌鲁木齐及其周边焚风的时空分布特征,并检验了欧洲细网格数值预报产品对焚风最大风速的预报效果。结果表明:(1)近 3 年乌鲁木齐南郊乌拉泊出现大于等于 $17.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的焚风 1213 时次,其次是西郊八钢(480 时次)、峡谷内部柴窝堡(329 时次)和乌鲁木齐市(101 时次)。焚风着陆点春季偏向南郊乌拉泊以北地区,冬季则偏向其以南地区;(2)上述 4 站平均瞬时风速由大到小依次为乌拉泊 $21.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、八钢 $20.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、乌鲁木齐 $19.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、柴窝堡 $18.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。秋季八钢平均风速大于乌拉泊。4 个站点出现东东南(ESE)风向频率最高;(3)近 3 年焚风天气过程共发生 27 次,其中春季发生 14 次(51.85%)、冬季 7 次(25.93%)、秋季 6 次(22.22%);(4)与南郊乌拉泊相比,乌鲁木齐市焚风过程持续时间相对较短;(5)欧洲细网格 10 m 风场预报产品对八钢、乌鲁木齐、乌拉泊焚风最大风速的预报相关性较高,相关系数均达 0.80 以上,但预报偏差较大;欧洲细网格 850 hPa 风场预报产品对八钢、乌鲁木齐、乌拉泊焚风最大风速预报偏差较小。本研究可为中天山北坡焚风天气监测预警提供科技支撑。

关键词: 中天山北坡;焚风;时空分布;欧洲细网格数值预报产品;预报检验

中图分类号: P425.5+2

文献标志码: A

焚风是气流过山时,由于地形强迫在背风坡产生的一种高温、低湿的强下坡风,具有起止时间突然、风力变化大、季节性明显等特点,且大风期间伴随有强烈的升温、降压和降湿^[1-6]。焚风不仅影响当地的气候,还对城市生活、陆路交通运输、农业生产、民航飞机起降等带来极大危害^[7-12]。冬季的焚

风则是造成城市重污染事件的主要因素之一^[12]。大兴安岭东坡、太行山东麓、天山北坡等均为焚风高发地带^[13-18]。中国各地发生焚风的年际变化、季节变化、月际变化、日变化都有所不同。多数地区焚风发生在春季最多,夏季最少;太行山中段石家庄市焚风多始于夜间^[16],太行山东麓焚风多发于白天^[17]。

收稿日期 (Received date): 2022-02-22; **改回日期** (Accepted date): 2022-12-01

基金项目 (Foundation item): 中国沙漠气象科学研究基金 (Sqj2017013); 国家自然科学基金 (42205010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (IDM2020001)。[China Desert Meteorological Science Research Foundation (Sqj2017013); National Natural Science Foundation of China (42205010); Special Foundation Project for Basic Research Business Fees of Central Public Welfare Research Institutes (IDM2020001)]

作者简介 (Biography): 毛妤·阿依提看 (1988-), 女, 新疆阿勒泰人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 天气气候变化。[AYITKAN Maulen (1988-), female, born in Altay, Xinjiang province, M. Sc., research assistant, research on climate change] E-mail: 271768198@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 李霞 (1969-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向: 大气环境和天气。[LI Xia (1969-), female, Ph. D., professor, specialized in atmospheric environment and weather research] E-mail: susannary@163.com

研究表明焚风的形成机理主要为垂直传播的过山波理论、水跃理论、背风波理论^[19]。

位于中天山北坡的乌鲁木齐是中国西部地区重要的政治、经济、文化中心^[20]。乌鲁木齐及其周边地区的东南大风是山口风,也是焚风^[4],是跨越天山“南高北低”气压场以及峡谷地形等因素共同造成的^[1-3]。中天山北坡的焚风给当地社会经济发展带来了很大影响,亟需对焚风的活动规律开展深入的研究和探索。

中天山北坡焚风的相关研究^[1-6,8-12,21-25]表明乌鲁木齐市区春季焚风发生频率最高,冬季最低^[3]。乌鲁木齐北郊机场焚风早晨至中午期间多发且风速较大;午后至夜间发生次数少,且风速也相对较小;持续时间以低于 5 h 为主^[10]。在欧洲细网格数值预报产品(European Fine Grid Numerical Products, EFGNPs)对焚风的释用性方面,有学者研究发现细网格资料在预报时空分辨率和预报性能等方面均有一定提高,对焚风预报具有指示意义^[21]。此外,有学者指出冬季乌鲁木齐焚风对边界层逆温的形成、增强等方面影响很大,在重污染天气的形成过程中起重要作用^[12]。然而,已有的焚风研究成果多局限于乌鲁木齐焚风天气个例的分析^[5,8,10-11,21-22,24-25],同时由于过去气象观测站点稀疏,上述研究多是基于乌鲁木齐市气象站这个唯一站点数据资料,因此,至今对焚风时空分布特征的认识不够细致深入,对焚风的形成机理认识依然较为薄弱。

本文利用 2018 年 3 月—2021 年 2 月中天山北坡乌鲁木齐及周边地区 9 个自动站的逐时气象数据,对焚风的时空分布特征以及焚风天气过程的时间等特征开展了统计分析,并采用欧洲中心细网格数值预报产品对焚风风速的预报效果进行了评估,以期深入认识焚风天气规律、为提高焚风预报准确率提供科学参考依据。

1 研究区域概况

天山山脉位于我国新疆中部,平均海拔在 4000 m 以上,东西向超过 2000 多公里,将新疆分为南北不同的 2 个气候区:北疆、南疆。从达坂城到乌鲁木齐的中天山峡谷以东南—西北走向纵穿天山山脉,峡谷宽度最窄处约 15 km,其两端非常易于出现山口

风或下坡风暴^[2]。乌鲁木齐就处在中天山峡谷北端开口处,市区三面被高度 1300 ~ 5000 m 山地包围,北部开口朝向准噶尔盆地,大致呈现为一个喇叭口形状(见图 1)。市区地势从东南向西北倾斜,平均海拔为 800 m,落差 300 ~ 400 m。当蒙古高压外围的冷气团回流到天山南坡之后,在中天山峡谷两端易形成跨越天山的气压梯度,继而导致气流穿越中天山峡谷,入侵乌鲁木齐及其下游地区,产生焚风。

2 研究方法

2.1 数据资料

已有研究表明^[1,3],焚风发生区域从达坂城—乌鲁木齐的中天山峡谷开始,沿着东南—西北路径向下游区域蔓延,甚至可以到达北疆沿天山一带的呼图壁附近。本文沿着焚风发生的上、下游区域由东南向西北依次选取了 9 个地面气象站,分别是吐鲁番、一碗泉、达坂城、柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢、昌吉、呼图壁(见图 1)。气象数据为这 9 个气象站 2018 年 3 月—2021 年 2 月逐时的 2 分钟和瞬时风速、风向,气象站的地理位置详见图 1 和表 1。

为了验证数值预报产品对复杂地形大风的预报能力,本文采用了欧洲中心细网格数值预报产品。欧洲中心细网格预报产品 10 m 风场空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 850 hPa 风场空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。每日发布 2 次预报产品,分别是 8 时和 20 时(北京时间,下同)。预报时效长达 10 d (240 h),前 72 h 之内时间分辨率为 3 h,之后分辨率为 6 h。

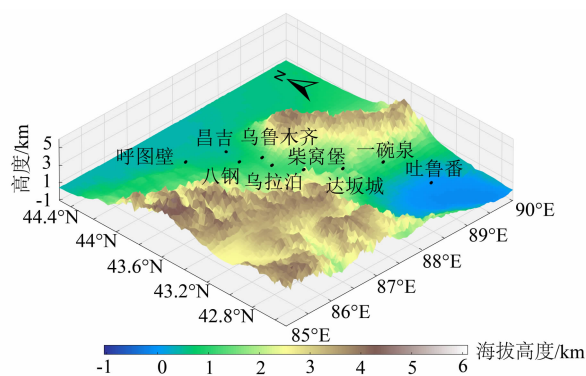


图 1 中天山北坡三维地形及气象站点分布

Fig. 1 Three-dimensional topography and weather stations' distribution on the north slope of the Tianshan Mountains of China

表 1 气象站地理位置及海拔
Tab. 1 Geographical location and altitude
information of weather stations

站 点	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m
吐鲁番	89.20	42.93	37.20
一碗泉	88.87	43.22	1173.00
达坂城	88.32	43.35	1105.30
柴窝堡	87.89	43.53	1101.00
乌拉泊	87.58	43.67	1073.00
乌鲁木齐	87.65	43.78	935.90
八钢	87.31	43.84	914.00
昌吉	87.43	44.02	579.30
呼图壁	86.82	44.13	523.50

2.2 统计方法

在中天山北坡焚风强度达到大风级别^[26]时(即瞬时风速大于等于 $17.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或2分钟平均风速大于等于 $10.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时),对城市及其周边带来的危害非常大^[1,8-11]。因此,本文基于上述9站逐时的风速、风向数据,针对焚风选取的数据标准为:(1)瞬时风速大于等于 $17.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或2分钟平均风速大于等于 $10.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (2)焚风发源于中天山峡谷,受地形影响很大,本文将焚风风向取值范围定为 $78.75^{\circ}\sim 191.25^{\circ}$ ^[12]。按照不同季节统计了上述9个站点焚风的频次、风速、风向等特征。

本文对焚风天气过程的统计方法是当八钢、乌鲁木齐、乌拉泊、柴窝堡4站中有3站以上(包含3站)瞬时风速同时大于等于 $17.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或2分钟平均风速同时大于等于 $10.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,则记录为一次焚风天气过程开始,当上述4站中有1站瞬时风速小于等于 $17.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或2分钟平均风速小于等于 $10.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且持续期大于6 h,则记录为截止时间;开始时间到截止时间的间隔则为焚风过程持续期。

为了评估欧洲细网格风速预报效果,针对每个气象站附近的4个网格点10 m、850 hPa 风场 U、V 分量的预报值(U 是东西风上的分量,西风为正;V 是南北风上的分量,南风为正),利用双线性插值法^[27-28]内插到各站点上(见图2),从而得到每个站点的风速、风向预报值,之后与站点实况值进行比较。季节划分是春季3—5月,夏季6—8月,秋季9—11月,冬季12月至次年2月。

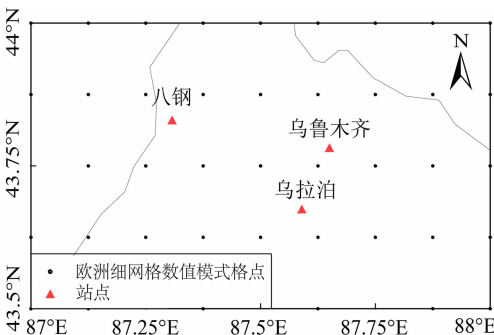


图 2 欧洲细网格数值模式格点及气象站点分布
Fig. 2 Spatial distribution of European Fine Grid
Numerical Model grids and weather stations

3 结果与分析

3.1 焚风出现时次的空间分布特征

2018 年 3 月—2021 年 2 月,乌鲁木齐及其周边 9 个自动站出现焚风的时次见图 3。可知,3 年期间 9 站中乌鲁木齐南郊乌拉泊发生焚风次数最多,高达 1213 时次,其次分别为乌鲁木齐西郊的八钢,为 480 时次,峡谷内部的柴窝堡站出现了 329 时次,而乌鲁木齐市气象站仅有 101 时次,其余 5 站点鲜有焚风发生。达坂城仅在 2019 年 1 月 14 日 8:00 时出现 1 个时次焚风。由此说明焚风的出现范围主要集中在中天山峡谷柴窝堡到下行方八钢一带,乌鲁木齐南郊的乌拉泊附近焚风发生频率最高,是上游站柴窝堡、下游站八钢的 2~3 倍。

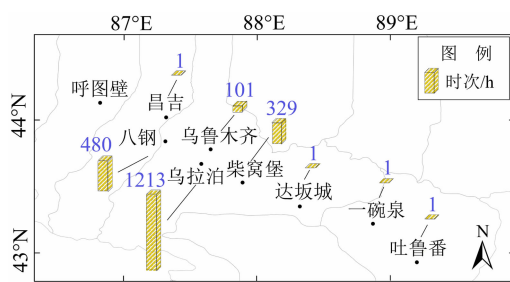


图 3 2018—2020 年乌鲁木齐及其周边站点
发生焚风的时次

Fig. 3 The numbers of occurrence hours of
foehn around Urumqi from 2018 to 2020

图 4 显示了柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢 4 个站点在不同季节焚风的出现时次情况。这 4 个站点只有乌拉泊于 2020 年夏季出现了 10 时次焚风,其余 3 站夏季均没有焚风。从图 4 可知,不同季节

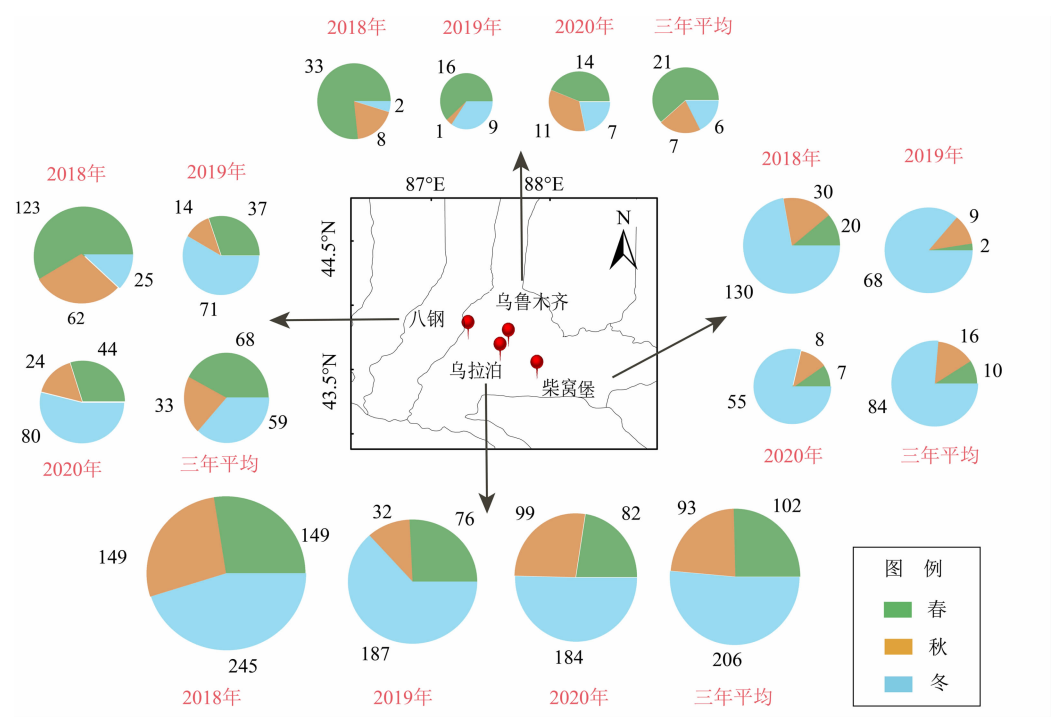


图 4 2018—2020 年乌鲁木齐及周边站点四季焚风时次

Fig. 4 Occurrence hours of foehn in four seasons around Urumqi from 2018 to 2020

表 2 2018—2020 年乌鲁木齐及其周边站点发生焚风时次的月分布

Tab. 2 Monthly distribution of occurrence hours of foehn around Urumqi from 2018 to 2020

站 点	焚风时次											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
柴窝堡	141	86	10	12	0	0	0	0	0	2	36	42
乌拉泊	369	287	96	151	57	9	0	0	13	35	130	66
乌鲁木齐	17	12	28	32	3	0	0	0	1	0	8	0
八 钢	102	95	88	99	17	0	0	0	0	3	73	3

中尽管乌拉泊一直是焚风出现时次最高的地点,但是其余 3 站焚风的出现频次还是略微有些差别。例如春季焚风的出现频次由小到大依次是乌拉泊(102 时次)、八钢(68 时次)、乌鲁木齐(21 时次)、柴窝堡(10 时次),秋季是乌拉泊(93 时次)、八钢(33 时次)、柴窝堡(16 时次)、乌鲁木齐(7 时次),冬季则是乌拉泊(206 时次)、柴窝堡(84 时次)、八钢(59 时次)、乌鲁木齐(6 时次)。由此可见,焚风着陆地点在春季主要集中在中天山峡谷开口处乌拉泊及其以北地区(包含西北、偏北地区),秋季和冬季大风着陆点偏向于乌鲁木齐市周边,但是冬季乌拉泊以南区域(乌拉泊—柴窝堡)的焚风频次更高一些。

从单个站点来看(见图 4),各个季节出现焚风的时次相差巨大。柴窝堡发生焚风频次由大到小依次为冬季 84 时次(频率为 76.36%)、秋季 16 时次(14.55%)、春季 10 时次(9.09%),冬季焚风发生频率是春、秋季的 5 倍左右;乌拉泊则是冬季 206 时次(51.37%)、春季 102 时次(25.44%)、秋季 93 时次(23.19%),即冬季频率约是其余 2 个季节的 2 倍;乌鲁木齐为春季 21 时次(61.76%)、秋季 7 时次(20.59%)、冬季 6 时次(17.65%),春季频率最高,是秋、冬季 2 倍左右;八钢则为春季 68 时次(42.50%)、冬季 59 时次(36.88%)、秋季 33 时次(20.62%),春季焚风频率最高,是秋季的 2 倍。此外,2018 年春秋季是焚风高发期,从图 4 中不难发

现,2018 年春秋季节每个站点焚风频次都比 2019 年、2020 年同期次数偏多。新疆气象局在统计 2018 年新疆十大天气气候事件中指出,受大气环流调整影响,每年春秋两季,南北疆均会出现阶段性的大风过程。2018 年春秋季节冷空气活动比较频繁,而春秋季节基础气温较高,冷暖交替时容易产生南高北低的气压差,因此较好的热力条件加上特殊的地形影响,使 2018 年春秋季节东南风数量偏多、强度偏强。本文研究与此相符。

从各站每月的焚风出现时次来看(见表 2),柴窝堡、乌拉泊、八钢 3 站在 1 月发生焚风时次最高,而乌鲁木齐则是在 4 月最高。乌鲁木齐市焚风高发期在春秋季节,冬季频次少是由于冬季乌鲁木齐上空深厚逆温层的阻挡^[1]。冬半年当南郊发生焚风时,焚风气流翻山过后,往往出现水跃现象^[28-29]。焚风气流开始发生上下两层分离现象,近地面焚风沿着地形绕行,一部分前往市区,一部分向八钢方向流动;而 500 m 以上的焚风气流则直接越过乌鲁木齐市上空^[12]。因此 1 月柴窝堡、乌拉泊、八钢 3 站频繁发生焚风时,乌鲁木齐市则很少发生。

3.2 焚风风速风向统计特征

3.2.1 焚风风速的季节变化特征

表 3 给出了柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢 4 站焚风的平均风速统计值。从 3 个季节平均值来看,乌拉泊焚风平均风速最大,为 $21.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其次为八钢站 $20.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、乌鲁木齐站为 $19.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,柴窝堡最小,为 $18.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此说明焚风从峡谷涌出后,在谷口乌拉泊处最大,其次在下游区八钢,而山谷中的柴窝堡相对来说比较小。进一步从四季风速值排序来看,春季是乌拉泊($20.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、八钢($20.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、乌鲁木齐($19.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、柴窝堡($18.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);秋季为八钢($21.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、乌拉泊($20.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、乌鲁木齐($19.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、柴窝堡($18.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);冬季排序依次是乌拉泊($22.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、乌鲁木齐($19.84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、八钢($19.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、柴窝堡($18.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。可见,中天山峡谷中柴窝堡焚风风速一直都小于峡谷开口端乌拉泊及其下游区域,而秋季八钢风速甚至高于乌拉泊。

表 4 是基于瞬时风速给出了 4 个站 3 年间各个季节焚风的最大风速值。可见近 3 年里焚风最大风速出现在秋季,一个极值在八钢,高达 $35.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

另一个极值在乌拉泊,达 $35.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,夏季乌拉泊焚风最大值($19.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)要远远小于其他季节。

表 3 2018—2020 年乌鲁木齐及周边站点焚风季节平均风速

Tab. 3 Seasonal average wind speed of foehn at four weather stations from 2018 to 2020

站点	平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				平均值
	春季	夏季	秋季	冬季	
柴窝堡	18.02		18.79	18.27	18.36
乌拉泊	20.35	18.24	20.75	22.62	21.24/20.49 *
乌鲁木齐	19.41		19.57	19.84	19.61
八钢	20.06		21.28	19.29	20.21

注:带星号数字表示统计值包含夏季时次数。除乌拉泊站以外 3 站夏季均无焚风。

表 4 2018—2020 年乌鲁木齐及周边站点焚风的最大值

Tab. 4 The maximum wind speed of foehn at four weather stations from 2018 to 2020

站点	极大风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	春季	夏季	秋季	冬季
柴窝堡	19.40		23.00	22.60
乌拉泊	28.80	19.30	35.10	34.70
乌鲁木齐	26.50		25.60	24.50
八钢	30.60		35.40	27.60

3.2.2 焚风风向的季节变化特征

由于受到复杂地形的影响,从峡谷涌出的焚风沿途风向出现微妙的变化,而精准掌握风向分布对城市规划、交通运输、风能资源的利用等有重要指导意义^[31]。图 5 为八钢、乌鲁木齐、乌拉泊、柴窝堡站 4 个站点春、秋、冬 3 个季节焚风的风向频率玫瑰图。从图 5 中可知,乌拉泊站在春、秋、冬 3 个季节风向主要以东东南(ESE)为主,均在 80.00% 以上,其次为东南(SE)风向;八钢 3 个季节东东南(ESE)风向均在 50.00% 以上,其次为东南(SE)风向。在春季和冬季也出现了较大概率的东(E)风,频率分别为 20.10% 和 17.05%;乌鲁木齐站在 3 个季节同样以东东南(ESE)风向和东南(SE)风向为主,频率分别在 70.00% 和 12.00% 以上,而冬季出现了东(E)风向和南东南(SSE)风向,占据比例均为 5.88%;柴窝堡站春季为东东南(ESE)风向和东南(SE)风向,各占 50.00%,而秋季和冬季主要为东(E)风向和东东南(ESE)风向,频率分别在 15.00%

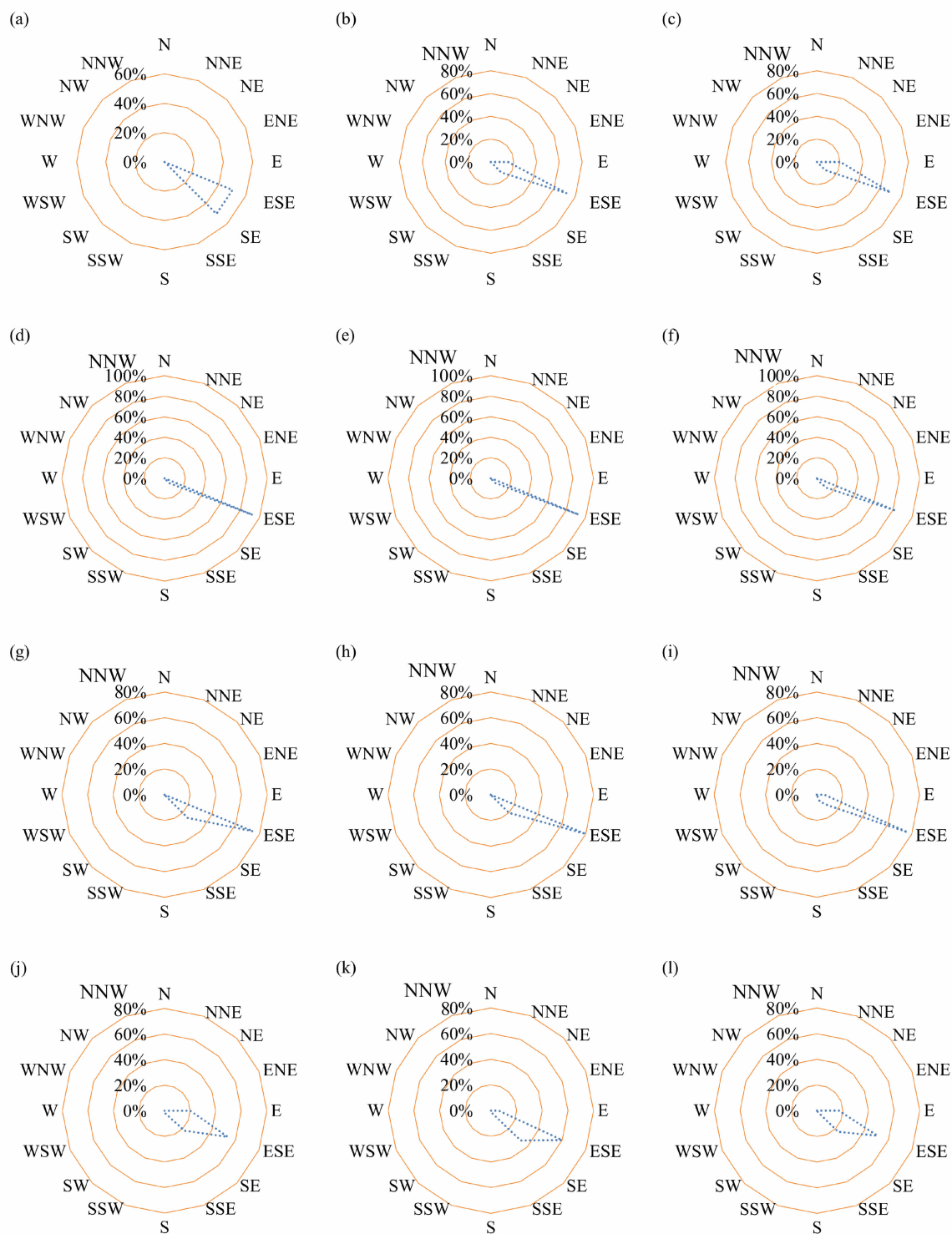


图 5 各站点焚风风向的季节变化:

(a) 春季柴窝堡站; (b) 秋季柴窝堡站; (c) 冬季柴窝堡站; (d) 春季乌拉泊站; (e) 秋季乌拉泊站; (f) 冬季乌拉泊站;
(g) 春季乌鲁木齐站; (h) 秋季乌鲁木齐站; (i) 冬季乌鲁木齐站; (j) 春季八钢站; (k) 秋季八钢站; (l) 冬季八钢

Fig. 5 Seasonal wind-roses of foehn at four weather stations;

(a) Chaiwopu in spring; (b) Chaiwopu in autumn; (c) Chaiwopu in winter; (d) Wulabai in spring;
(e) Wulabai in autumn; (f) Wulabai in winter; (g) Urumqi in spring; (h) Urumqi in autumn;
(i) Urumqi in winter; (j) Bagang in spring; (k) Bagang in autumn; (l) Bagang in winter

和 65.00% 以上。其次还出现了东南 (SE) 风向。从以上分析可知,4 个站点春、秋、冬三季出现东东南 (ESE) 风向最多,其次为东南 (SE) 风向和东 (E) 风向。

3.3 焚风天气过程的频次和时间特征

3.3.1 焚风过程的频次特征

2018 年 3 月—2021 年 2 月,乌鲁木齐及其周边一共出现了 27 次焚风天气过程。在 27 次过程中乌拉泊均出现了焚风,其中 4 个站点均出现焚风的过程有 8 次。27 次焚风过程中有 14 次发生在春季,占 51.85%;7 次发生在冬季,占 25.93%;6 次发生在秋季,占 22.22%;夏季无焚风过程。

3.3.2 焚风天气过程持续时间特征

表 5 罗列了 3 年中乌鲁木齐市出现的 21 次焚风过程。图 6 给出了这 21 次焚风过程中乌拉泊、乌鲁木齐市焚风的持续时间。可见乌拉泊焚风持续时间较乌鲁木齐市区长一些。乌拉泊持续时间多在 6~24 h,比率为 66.67%,24~36 h 为 19.05%,其

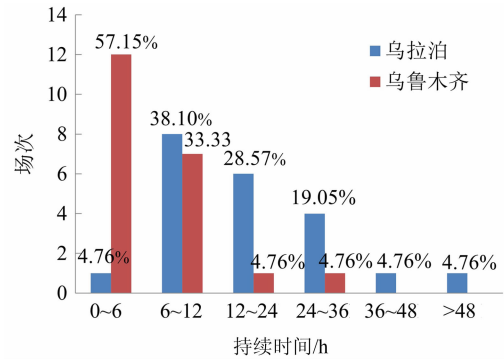


图 6 2018—2020 年乌拉泊、乌鲁木齐出现焚风过程的持续时间

Fig. 6 Statistics of duration of foehn weather processes at Wulabai and Urumqi station from 2018 to 2020

中最长一次持续时间达 49 h,发生在 2018 年 4 月 5—7 日。乌鲁木齐市焚风持续时间在 0~6 h 的比率为 57.15%,12 h 以内占 90.48%。

3.4 欧洲细网格数值预报产品对焚风的预报能力评估

基于上文乌鲁木齐市出现 21 次焚风的天气过程发生时间,利用双线性插值方法,将焚风发生前一日初始场为 20 时的欧洲细网格 10 m 和 850 hPa 风场 0~96 h 的 U、V 分量预报值插值到八钢、乌鲁木齐、乌拉泊站,通过 U、V 分量计算得到 21 次焚风天气过程 3 个站点 0~96 h 风向、风速的预报值。图 7 显示了 2018 年 4 月 5—7 日焚风天气过程前一日(即 2018 年 4 月 4 日)20 时起 0~96 h 欧洲细网格 10 m 预报风场插值到 3 个站点的结果。选取每场大风过程 10 m 和 850 hPa 风场 0~96 h 预报焚风的最大值,以此来检验欧洲细网格数值预报产品对 3 站焚风天气过程中最大风速的预报能力(图 8,其中第 13 场过程欧洲细网格数值预报产品数据缺失)。由于表 5 中柴窝堡站发生焚风仅有 8 场,统计学意义相对不显著,因此没有检验欧洲细网格数值预报产品对该站的预报能力。

欧洲细网格 10 m、850 hPa 风场预报产品与八钢焚风最大风速实况的相关系数分别为 0.86、0.72,最大风速预报值比实况风速值分别平均偏小 11.19 m·s⁻¹和 4.53 m·s⁻¹;与乌鲁木齐市焚风最大风速实况的相关系数分别为 0.81、0.42,最大风速预报值比实况风速值分别平均偏小 7.93 m·s⁻¹和 1.24 m·s⁻¹;与乌拉泊焚风最大风速实况的相关系数分别为 0.80、0.82,最大风速预报值比实况风速

表 5 乌鲁木齐及周边 4 站点发生焚风的过程

Tab. 5 Weather processes of foehn at four weather stations around Urumqi

焚风发生日期	焚风发生站点
2018-03-25—2018-03-26	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-03-30—2018-03-31	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-04-05—2018-04-07	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-04-13—2018-04-13	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-04-14—2018-04-14	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-11-23—2018-11-24	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2018-11-30—2018-11-30	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2019-01-19—2019-01-21	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2019-04-09—2019-04-10	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2019-04-13—2019-04-13	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2019-04-15—2019-04-15	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2019-05-11—2019-05-12	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-01-24—2020-01-25	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-02-08—2020-02-10	柴窝堡、乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-04-01—2020-04-01	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-04-02—2020-04-02	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-04-24—2020-04-24	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-04-26—2020-04-26	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-10-06—2020-10-06	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2020-10-27—2020-10-27	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢
2021-02-18—2021-02-19	乌拉泊、乌鲁木齐、八钢

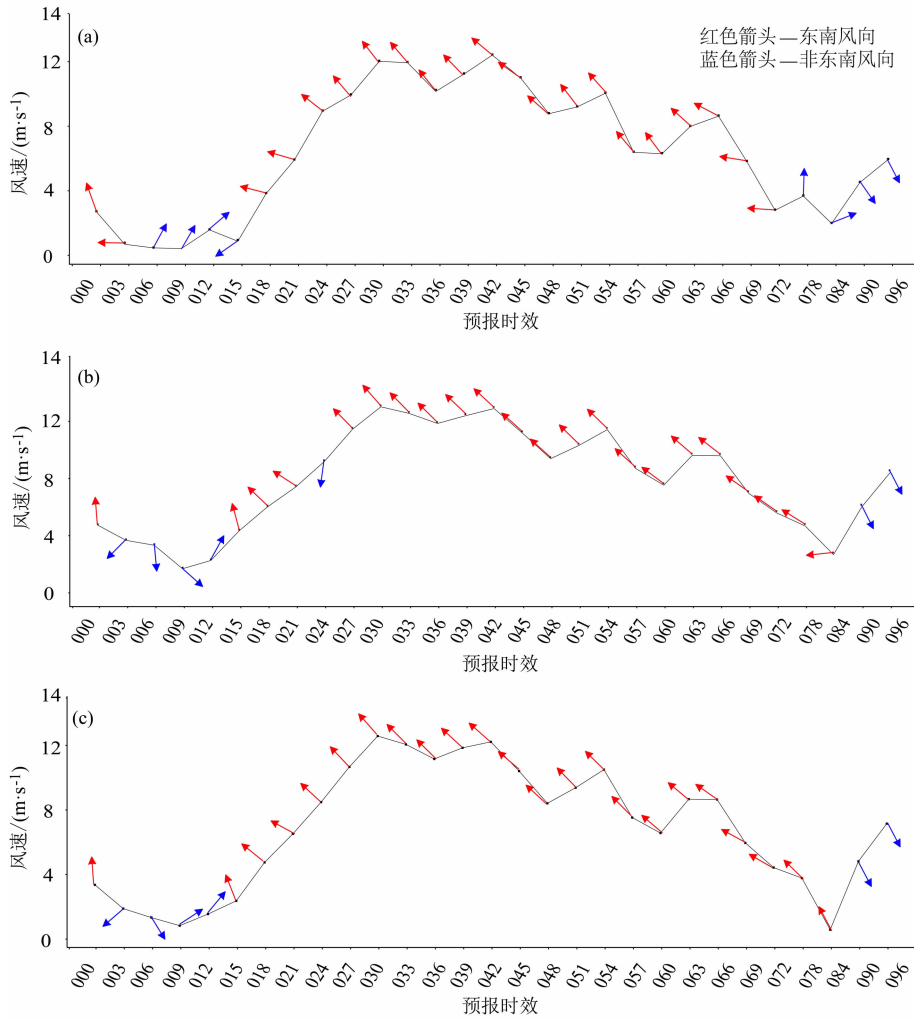


图 7 2018 年 4 月 4 日 20 时起 0~96 h 欧洲细网格 10 m 预报风场插值到各站点的结果：
(a) 八钢; (b) 乌鲁木齐; (c) 乌拉泊

Fig. 7 Forecasted values by EFGNPs of 10-meter wind field in 0~96 hour from 20:00 on April 4, 2018:
(a) Bagang; (b) Urmqi; (c) Wulabai

值分别平均偏小 $11.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上均通过了信度为 0.01 的显著性水平检验。总体来看,欧洲细网格 10 m 风场预报产品与 3 个站点实况值相关性较高,相关系数均在 0.80 以上,八钢站相关系数高达 0.86。但是对最大风速的值预报均较小,对最大风速的预报值平均在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,与实况值相差甚大。其中对乌鲁木齐最大风速预报误差最小,为 $7.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而其余两站误差都在 $11.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。因此在做天气预报预警时,当 10 m 风场预报各站点风速在 $10.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,应当引起足够重视。欧洲细网格 850 hPa 风场预报产品对八钢和乌拉泊预报效果较好,相关系数分别为 0.72、0.82,平均误差分别为 4.53 、 $3.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

与 10 m 风场预报产品相比,850 hPa 风场预报产品对焚风最大值的预报与实况更接近。因此,在气象业务预报焚风风速时,可适当参考 850 hPa 预报产品风速值的大小。

4 讨论

中天山北坡焚风由于其风力强劲对乌鲁木齐及其周边地区造成很大危害。多年来对该地区焚风天气的研究多是基于乌鲁木齐市一个观测站或者机场观测数据进行统计分析,因此对焚风时空分布特点的认识不够全面。本文针对大风强度的焚风,通过选取焚风上下游区域 9 个代表站的气象数据,统

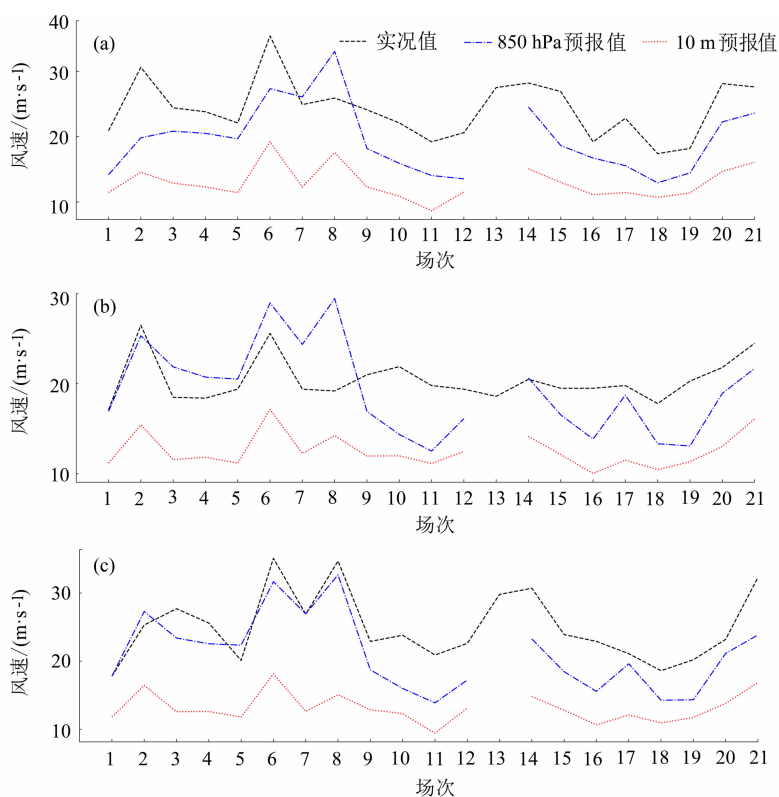


图 8 21 场焚风 10 m 风场和 850 hPa 风场最大风速预报值与实况值的比较:

(a) 八钢; (b) 乌鲁木齐; (c) 乌拉泊

Fig. 8 Comparison of the maximum wind speed between observed values and the forecasted values of 10-meter and 850 hPa wind field of 21 foehn weather processes: (a) Bagang; (b) Urmqi; (c) Wulabai

计得出了强劲焚风的时空分布特征,发现中天山北坡焚风多发生在峡谷柴窝堡、南郊乌拉泊、西郊八钢和乌鲁木齐市,这与以往的研究结果一致^[1,3]。同时本研究明确了南郊乌拉泊是焚风发生频率最高的地点,其次是西郊八钢和峡谷内部柴窝堡,而乌鲁木齐市焚风时次远小于其余 3 站。以往的研究多关注于春秋季节的焚风天气过程^[2,6,8],本文研究表明春季市区焚风发生频率高,但是其他 3 站焚风发生频率的最高值都是出现在冬季 1 月,这与低空型焚风的发生频率比较一致^[12]。因此,乌鲁木齐南郊乌拉泊、西郊八钢和峡谷柴窝堡,除了春秋季节,冬季也需要高度重视大风灾害的防御工作。

本文研究表明欧洲细网格数值预报产品对焚风风速预报有一定参考价值,但预报值偏小,下一步需要利用一些统计方法对欧洲细网格数值模式的风产品进行订正,以提高欧洲细网格数值预报产品对中天山北坡焚风预报的释用能力。

中天山北坡每次焚风天气过程强度都存在差别,本文只是利用了 9 个站点数据给出了大风级别

以上的焚风分布的大致区域和变化特点。目前,乌鲁木齐及其周边已布设有 60 多个地面自动站,对于复杂地形下的焚风监测和预警提供了宝贵的基础数据。下一步将基于这 60 多个站点数据,对焚风天气过程强度进行划分,按照季节、月份,针对不同站点焚风开展更加细致地统计分析工作,以此更加全面地揭示中天山北坡不同强度焚风的分布特征和季节变化规律。

5 结论

依据 2018—2020 年中天山北坡乌鲁木齐及周边 9 个气象站逐时风速和风向资料以及欧洲细网格数值模式预报产品,筛选出焚风强度达到大风级别的焚风小时数据,利用统计分析、双线性插值法、相关性分析等方法,对乌鲁木齐及其周边焚风的时空分布特征以及欧洲细网格数值预报产品对焚风最大风速的预报效果进行评估,得到以下结论:

(1) 2018—2020 年乌鲁木齐及其周边焚风出现

时次的排序为南郊乌拉泊 1213 时次、西郊八钢 480 时次、峡谷内柴窝堡 329 时次、乌鲁木齐市气象站 101 时次。焚风春季着陆点偏向中天山峡谷乌拉泊以北区域,冬季则偏向乌拉泊以南地区。

(2) 乌鲁木齐及其周边焚风平均风速由大到小为乌拉泊 $21.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、八钢站 $20.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、乌鲁木齐站 $19.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、柴窝堡 $18.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。春秋冬 3 季中乌拉泊焚风最大、峡谷中柴窝堡风速一直最小。4 站春、秋、冬 3 季出现东东南(ESE)风向最多,其次为东南(SE)风向和东(E)风向。

(3) 2018—2020 年乌鲁木齐出现焚风天气过程 27 次,其中春季 14 次(51.85%)、冬季 7 次(25.93%)、秋季 6 次(22.22%)。南郊乌拉泊焚风过程持续时间高于乌鲁木齐市,2 站焚风持续时间小于 12 h 的比率分别是 42.86%、90.48%。

(4) 欧洲细网格 10 m 风场预报产品与八钢、乌鲁木齐、乌拉泊焚风最大风速实况的相关系数均达到了 0.80 以上,但预报风速值与实况偏差较大。欧洲细网格 850 hPa 风场预报产品与八钢、乌拉泊焚风最大风速实况的相关性较高,并且预报风速值较 10 m 风场预报产品更接近实况。

参考文献 (References)

- [1] 张家宝, 苏启元, 孙沈清, 等. 新疆短期天气预报指导手册 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986: 341–347. [ZHANG Jiabao, SU Qiyuan, SUN Shenqing, et al. Xinjiang short-term weather forecast guidebook [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1986: 341–347]
- [2] 刁平. 乌鲁木齐市春季东南大风统计特征及预报[J]. 新疆气象, 1991, 14(10): 16–18. [DIAO Ping. The statistical characteristics and forecast of southeast gale in Urumqi in spring [J]. Xinjiang Meteorology, 1991, 14(10): 16–18]
- [3] 孟齐辉, 吕斌, 刁平. 乌鲁木齐地区东南大风分布规律的研究[J]. 新疆气象, 1995, 18(1): 6–10. [MENG Qihui, LYU Bin, DIAO Ping. Research on the distribution law of southeast gale in Urumqi area [J]. Xinjiang Meteorology, 1995, 18(1): 6–10]
- [4] 潘守文. 现代气候学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 1994. [PAN Shouwen. Principles of modern climatology [M]. Beijing: Meteorological Press, 1994]
- [5] 苏小岚. 1998 年 4 月乌鲁木齐东南大风天气过程分析[J]. 新疆气象, 2001, 24(3): 15–17. [SU Xiaolan. Analysis on an southeast gale in Urumqi in April 1998 [J]. Xinjiang Meteorology, 2001, 24(3): 15–17] DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2001.03.005
- [6] 刁平, 刁晓芸, 姚丽花, 等. 乌鲁木齐市春季东南大风机理的

- 研究[J]. 农业气象, 2015, 2: 53–55. [DIAO Ping, DIAO Xiaoyun, YAO Lihua, et al. A study on the mechanism of the southeast gale in Urumqi city in Spring [J]. Agrometeorology, 2015, 2: 53–55]
- [7] 张克映, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 哀劳山(西南季风山地)焚风效应的农业意义[J]. 山地研究, 1993, 11(2): 81–87. [ZHANG Keying, MA Youxin, LIU Yuhong, et al. Agricultural significance of the foehn effect in the SW monsoon: A case study in the Ailao Mountain [J]. Mountain Research, 1993, 11(2): 81–87]
- [8] 窦新英, 宾建华, 蒋军. 一次造成乌鲁木齐市电网瑶线铁塔倒塌事故的气象原因分析[J]. 新疆气象, 2005, 28(5): 32–34. [DOU Xinying, BIN Jianhua, JIANG Jun. The meteorological causes of the collapse of iron tower in Urumqi electronic network [J]. Xinjiang Meteorology, 2005, 28(5): 32–34] DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2005.05.014
- [9] 王楠, 杨洪儒, 周建军, 等. 乌鲁木齐机场恶劣天气影响起降航班延误的量化研究[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 684–693. [WANG Nan, YANG Hongru, ZHOU Jianjun, et al. Quantitative study on impact of severe weather on flight delay at Urumqi airport [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 684–693] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0684
- [10] 杨洪儒, 王楠. 地窝堡机场东南大风特征及其大气结构[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 393–398. [YANG Hongru, WANG Nan. Characteristics of southeast gale and its corresponding atmospheric structure at Urumqi airport [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(3): 393–398] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-03-0393
- [11] 黄海波. 2009 年 4 月 25 日–26 日乌鲁木齐机场大风天气的数值分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21(3): 31–33. [HUANG Haibo. Numerical analysis of gale weather at Urumqi airport from April 25th to 26th, 2009 [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2010, 21(3): 31–33] DOI: 10.3969/j.issn.1009-4288.2010.03.009
- [12] LI Xia, XIA Xiang'ao, ZHONG Shiyuan, et al. Shallow foehn on the northern leeward side of Tianshan Mountains and its influence on atmospheric boundary layer over Urumqi, China: A climatological study [J]. Atmospheric Research, 2020, 240: 104940. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104940
- [13] 齐瑛, 傅抱璞. 影响大兴安岭焚风的几个因子[J]. 地理研究, 1992, 11(8): 16–21. [QI Ying, FU Baopu. Factors affecting Daxinganling foehn [J]. Geographical Research, 1992, 11(8): 16–21] DOI: 10.1007/BF02951625
- [14] 齐瑛, 傅抱璞. 过山气流与大兴安岭焚风[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 403–411. [QI Ying, FU Baopu. Airflow over mountain and Daxinganling foehn [J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(5): 403–411] DOI: 10.11821/xb199305003
- [15] 陈明, 傅抱璞. 太行山东坡的数值模拟[J]. 高原气象, 1995, 14(4): 443–450. [CHEN Ming, FU Baopu. Numerical study for foehn in east slope of Taihang Mountain [J]. Plateau Meteorology, 1995, 14(4): 443–450]

- [16] 赵世林, 王荣科, 郭彦波, 等. 太行山中段的焚风[J]. 气象, 1993, **19**(2): 3–6. [ZHAO Shilin, WANG Rongke, GUO Yanbo, et al. The foehn in the middle rang of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly, 1993, **19**(2): 3–6]
- [17] 王宗敏, 丁一汇, 张迎新, 等. 太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析Ⅱ: 背风波对焚风产生和传播影响的个例分析[J]. 高原气象, 2012, **31**(2): 555–561. [WANG Zongmin, DING Yihui, ZHANG Yingxin, et al. Feature and mechanism of the foehn weather on east slope Taihang Mountains Ⅱ: Case analysis of the influence of leeward wave on the generation and propagation of foehn wind [J]. Plateau Meteorology, 2012, **31**(2): 555–561]
- [18] ZHANG Guangxing, ZHANG Dalin, SUN Shufang. On the orographically generated low – level easterly jet and severe downslope storms of March 2006 over the Tacheng Basin of northwest China [J]. Monthly Weather Review, 2018, **146**: 1667–1682. DOI: 10.1175/MWR-D-17-0355.1
- [19] 李艺苑, 王东海, 王斌. 中小尺度过山气流的动力问题研究[J]. 自然科学进展, 2009, **19**(3): 310–324. [LI Yiyuan, WANG Donghai, WANG Bin. Study on dynamics of small – and medium – scale over – the – mountain airflow [J]. Progress in Natural Science, 2009, **19**(3): 310–324] DOI: 10.3321/j.issn.1002-008X.2009.03.010
- [20] 侯志强, 刘春雨. 丝绸之路经济带西段五省区旅游资源群开发潜力评价[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 109–117. [HOU Zhiqiang, LIU Chunyu. Development potentiality evaluation of tourism resource group for five provinces and regions in the western section of the Silk Road Economic Belt, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 109–117] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000404
- [21] 万瑜, 曹兴, 窦新英, 等. ECMWF 细网格数值预报产品在乌鲁木齐东南大风预报中的释用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, **8**(1): 32–38. [WAN Yu, CAO Xing, DOU Xinying, et al. The application of ECMWF refined net umerical forecast data in the southeast gale in Urumqi [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, **8**(1): 32–38] DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2014.01.007
- [22] 汤浩, 王旭, 储长江, 等. 乌鲁木齐城区一次极端东南大风的形成机制 – 重力波与超低空急流耦合[J]. 干旱区地理, 2019, **42**(6): 1229–1238. [TANG Hao, WANG Xu, CHU Changjiang, et al. Formation mechanism of a southeast gale event in Urumqi urban area: The coupling of gravity wave and ultra – low level jet [J]. Arid Land Geography, 2019, **42**(6): 1229–1238] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.01
- [23] 张利平, 王春红. 乌鲁木齐机场东南大风过程温压湿及水平风切变特征[J]. 气象科技, 2007, **35**(5): 719–722. [ZHANG Liping, WANG Chunhong. Characteristic analysis of temperature, pressure, humidity and horizontal wind shear under southeast strong wind at Urumqi International Airport [J]. Meteorological Science And Technology, 2007, **35**(5): 719–722] DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2007.05.022
- [24] 孙鸣婧, 李如琦, 刘俊哲, 等. 乌鲁木齐春季两类东南大风个例的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, **11**(5): 38–45. [SUN Mingjing, LI Ruqi, LIU Junzhe, et al. Analysis of comparison between the two kinds of the southeasterly gale cases in Spring in Urumqi [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, **11**(5): 38–45] DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2017.05.006
- [25] 刁晓芸, 冯丽晔, 樊瑞瑞, 等. 乌鲁木齐市2017年3月东南大风诊断分析[J]. 新疆农垦科技, 2018(2): 44–45. [DIAO Xiaoyun, FENG Lihua, FAN Ruirui, et al. Diagnostic analysis of southeast gale in Urumqi in March 2017 [J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2018(2): 44–45]
- [26] 顾钧禧, 章基嘉, 巢纪平, 等. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 521. [GU Junxi, ZHANG Jijia, CHAO Jiping, et al. Atmospheric Science Dictionary [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 521]
- [27] 申华羽, 方艳莹, 涂小萍, 等. ECMWF 细网格 10 m 风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. 气象, 2020, **46**(11): 1485–1494. [SHEN Huayu, FANG Yanying, TU Xiaoping, et al. Verification of ECMWF 10m wind forecast for coastal Zhejiang province [J]. Meteorological Monthly, 2020, **46**(11): 1485–1494] DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.009
- [28] 杨景泰, 隋玉秀, 肖剑, 等. 大连地区 ECMWF 细网格 10 m 风场与观测实况对比与检验[J]. 气象与环境学报, 2021, **37**(1): 73–81. [YANG Jingtai, SUI Yuxiu, XIAO Jian, et al. Comparison and verification of 10 m wind field based on ECMWF fine grid and observations in Dalian [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, **37**(1): 73–81] DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2021.01.010
- [29] LI Xia, XIA Xiang'ao, XIN Yu, et al. An examination of boundary layer structure under the influence of the gap winds in Urumqi, China, during air pollution episode in winter [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2012, **62**(1): 26–37. DOI: 10.1080/10473289.2011.617628
- [30] LI Xia, XIA Xiang'ao, WANG Lei, et al. The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**: 5371–5384. DOI: 10.1002/2014JD022778
- [31] 吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 风向的统计方法研究[J]. 气象与环境学报, 2012, **28**(3): 83–89. [LYU Minghua, YAN Jiangyu, YAO Rentai, et al. Study on the statistical method of wind direction [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, **28**(3): 83–89] DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2012.03.015

Temporal and Spatial Characteristics of Foehn on the North Slope of the Tianshan Mountains of China and Prediction Ability of European Fine Grid Numerical Products

AYITKEN Maulen¹, LI Xia^{1*}, MUSA Yusuf², LI Shuting¹, ZHONG Yuting¹

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Branch, China Meteorological Administration Training Centre, Urumqi 830002, China)

Abstract: Foehn is a peculiar climate phenomenon occurring in mountainous areas, usually accompanied by precipitous increase in temperature and decrease in humidity at same time. It is believed topography is responsible for foehn wind occurrences. In Urumqi with undulating surrounding areas on the northern slope of the Tianshan Mountains of China, foehn wind has been haunted. Foehn wind not only directly does inflicting huge damages to construction local facilities, seriously interfering aircraft take-off and landing, and land transportation, even threatening people's lives and property safety, etc., but also worsen air quality in winter. The terrible air quality in winter in Urumqi is the product of foehn wind. Past investigations into the foehn wind on the northern slope of the Tianshan Mountains was conducted on an individual case basis, scarcely involving with the tempo-spatial distribution of foehn wind. There was a serious lack of comprehensive and systematic knowledge of the foehn wind in Urumqi.

In this study, the temporal and spatial characteristics of the foehn winds above $17.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was investigated on the north slope of Tianshan Mountains of China, and a comparison on the prediction ability of European Fine Grid Numerical Products (EFGNPs) were performed based on hourly wind speed and wind direction observation data at 9 automatic stations and numerical prediction product of European Centre Fine Grid Model during 2018 – 2020.

The following results are listed: (1) The hourly occurrences of foehn wind at Wulabai, Bagang, Chaiwopu and Urumqi urban area were 1213, 480, 329 and 10, respectively. The foehn winds preferred to land at the north of Wulabai station in spring but at the south of it in winter. (2) The average instantaneous wind speeds of the above four stations were $21.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at Wulabai, $20.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at Bagang, $19.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at Urumqi and $18.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at Chaiwopu from high to low. The frequency of east southeast (ESE) wind direction in the four stations was the highest. The foehn at Bagang was stronger than that at Wulabai in autumn. (3) The weather processes of foehn wind occurred 27 times in total, including 14 in spring (51.85%), 7 in winter (25.93%) and 6 in autumn (22.22%). (4) The duration of the foehn process at Urumqi station was relatively short compared with the southern suburb of Wulabai. The maximum forecast values of EFGNPs of 10 m wind field had a high correlation to the maximum observed wind speed of the foehn at Bagang, Urumqi and Wulabai, with correlation coefficients above 0.80. The maximum forecast values of the foehn based on EFGNPs 850 hPa wind field had a small deviation compared with the observed maximum values at Bagang, Urumqi and Wulabai. This study can provide scientific and technological support for the monitoring and early warning of foehn weather on the northern slope of the Tianshan Mountains.

Key words: the north slope of the Tianshan Mountains; foehn; temporal and spatial distribution; European Fine Grid Numerical Products (EFGNPs); forecast verification