Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1190-1198
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156125

Hans汉斯

奎玛流域中下游阵风锋时空特征分析

姜彩莲[1]，陈艳丽[2*]，张　颖[1]，石江花[1]，李宗达[1]

[1]兵团第六师气象局，新疆　五家渠
[2]第二师铁门关市农业发展服务中心，新疆　铁门关

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

本文利用2009~2018年昌吉州中西部(奎玛流域中下游)5个国家站、42个区域自动气象站及12个兵团气象站4~9月逐时观测资料和多普勒天气雷达资料，统计分析了该区域大风天气过程及阵风锋的时空分布特征。结果表明：(1) 近10a昌吉中西部共出现8级以上大风135次，年平均13.5次，年际变化明显；大风主要发生在5~7月，中部大风频次多于西部；(2) 基于有限样本(n = 23)的初步统计显示，共筛选出23次阵风锋过程，其年际变化无明显趋势，4~9月呈单峰型分布，6月最多，4月和9月最少；(3) 阵风锋主要发生在16:00至次日00:00，其中傍晚至前半夜(20:00~02:00)发生最多；阵风锋平均维持时间夏季最长，7月可达110 min以上，且傍晚至前半夜维持时间较长。研究结果可为奎玛流域下游雷暴大风和阵风锋的监测预警及短时临近预报提供参考。

关键词

阵风锋，雷暴大风，时空分布特征，奎玛流域，昌吉中西部

Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics of Gust Fronts in the Lower Reaches of the Kui-Ma River Basin

Cailian Jiang[1], Yanli Chen[2*], Ying Zhang[1], Jianghua Shi[1], Zongda Li[1]

[1]Meteorological Bureau of the Sixth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Wujiaqu Xinjiang
[2]Agricultural Development Service Center of Tiemenguan City, The Second Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Tiemenguan Xinjiang

Received: September 30, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

[*]通讯作者。

文章引用: 姜彩莲, 陈艳丽, 张颖, 石江花, 李宗达. 奎玛流域中下游阵风锋时空特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1190-1198. DOI: 10.12677/ccrl.2026.156125

Abstract

Based on the hourly observations from 5 national stations, 42 regional automatic weather stations and 12 meteorological stations of the Xinjiang Production and Construction Corps in central-western Changji (the middle and lower reaches of the Kui-Ma River Basin) from April to September during 2009~2018, combined with Doppler weather radar data, the temporal and spatial distribution characteristics of gale weather processes and gust fronts in this region were statistically analyzed. The results show that: (1) A total of 135 gale events with instantaneous wind speeds of no less than 17.2 m/s (wind force grade 8 or above) occurred in central-western Changji over the past 10 years, with an annual average of 13.5 events, showing an obvious interannual variation; gales mainly occurred from May to July, and gales were more frequent in the central region than in the western region. (2) Based on a limited sample (n = 23), preliminary statistics identified 23 gust front processes, showing no obvious interannual trend and a unimodal distribution from April to September, with the highest frequency in June and the lowest in April and September. (3) Gust fronts mainly occurred from 16:00 to 00:00 the next day, with the highest frequency from evening to the first half of the night (20:00~02:00); the average duration of gust fronts was the longest in summer, exceeding 110 min in July, and the duration from evening to the first half of the night was relatively longer. These results can provide a reference for the monitoring, early warning and nowcasting of thunderstorm gales and gust fronts in the lower reaches of the Kui-Ma River Basin.

Keywords

Gust Front, Thunderstorm Gale, Temporal and Spatial Distribution Characteristics, Kui-Ma River Basin, Central-Western Changji

Copyright © 2026 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

大风是新疆主要的灾害性天气之一，具有出现频率高、持续时间长、影响范围广等特点，对农业生产、交通运输、电力设施及人民生命财产安全危害严重[1] [2]。新疆地处欧亚大陆腹地，地形复杂，既受冷空气入侵引发的大范围系统性大风影响，又受地形强迫作用下的翻山大风和强对流天气引发的雷暴大风影响[3]-[5]。昌吉回族自治州中西部(奎玛流域中下游地区)是新疆重要的粮棉生产基地，春夏季正值棉花、小麦、玉米等农作物生长发育的关键期，也是大风等灾害性天气的多发时段[6]。2018 年 7 月 9~10 日，昌吉州中西部出现大风和雷阵雨天气，31 个站点风力达 6~7 级，9 个站点出现 8 级以上大风，给当地农业生产造成了严重损失。因此，深入开展该区域大风天气及其相关中尺度系统的研究具有重要意义。

阵风锋是雷暴母体云内冷性下沉气流到达低空和地面后向外扩散形成的出流边界，在多普勒天气雷达低仰角反射率因子图上常表现为弧形窄带回波，其过境处地面气象要素会出现风向突变、风速骤增、气温下降、气压涌升等剧烈变化[7]-[9]。阵风锋不仅自身可产生灾害性雷暴大风，还能抬升触发新对流，对强对流的短时临近预报具有重要指示意义[10]-[14]。我国学者围绕阵风锋开展了大量研究：席宝珠等[7]分析了我国阵风锋的类型与产生机制，并给出了主观识别方法；朱敏华等[8]、王彦等[9]分析了阵风锋的雷达产品特征及其在监测中的应用；吴举秀等[10]、高晓梅等[11]、王福侠等[12]、何娜等[13]分别对阵风锋及锋后大风、阵风锋触发强对流等过程的雷达回波特征和预报要点进行了研究；孟妙志等[15]则分析了

关中阵风锋的环境场和雷达特征。

目前，针对新疆大风天气的气候统计和环流背景研究已有较多成果[1] [2] [4] [5]，但针对奎玛流域中下游阵风锋的系统研究仍较缺乏，该区域阵风锋的时空分布特征尚不清楚。本文利用 2009~2018 年昌吉中西部气象站观测资料和多普勒天气雷达资料，统计分析该区域大风天气过程和阵风锋的时空分布特征，以期为奎玛流域中下游雷暴大风和阵风锋的监测预警及短时临近预报提供参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本研究使用昌吉中西部 5 个国家站、42 个区域自动气象站以及 12 个兵团气象站春夏季(4~9 月)逐时实况观测资料，包括温度、湿度、风场、降水量等要素，资料来自新疆气象信息中心，均已通过相应的检验和质控，连续性和可信度较高；环流分析使用 NCEP 再分析资料；用于阵风锋识别的雷达资料为石河子和五家渠新一代天气雷达(雷达型号为 CINRAD-CC，观测模式为 VCP21，体扫间隔时间为 6 分钟，距离分辨率为 250 米) 0.5~1.5˚低仰角基本反射率因子和基本径向速度产品，并配合地面区域站加密观测资料使用。

根据《蒲氏风力等级表》，极大风速大于等于 17.2 m • s^{-1} (8 级以上风力等级)为大风。本研究中大风天气过程的定义为：(1) 局地性大风过程为 1 个国家站出现大风，或直线距离在 30 km 以内的两个相邻区域站出现大风；(2) 区域性大风过程为 2 个国家站出现大风，或直线距离在 80 km 以内的三个及以上相邻区域站出现大风。此外，本研究中阵风锋生命史是指从阵风锋出现到消失的时段。大风天气过程的起止时间界定为：以研究区内任一测站首次达到大风标准(极大风速 ≥ 17.2 m • s^{-1})的时刻作为一次过程的起始时间，以区内最后一次达到该标准的时刻作为过程的结束时间，且要求其后 6 h 内区内再无测站达到该标准方可判定过程结束；同一次过程中间歇性出现的大风不重复计数。对少数连续性强风过程，起止时间还结合冷空气过境等天气背景进行了人工核定。

2.2. 研究区域

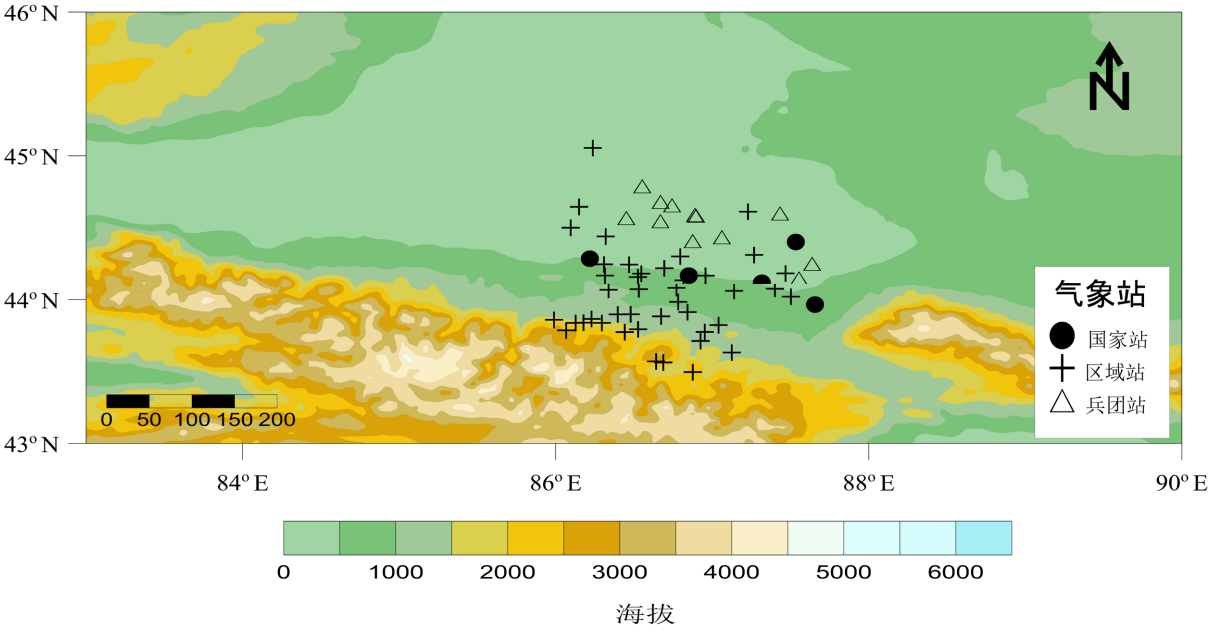


Figure 1. Topography and distribution of automatic weather stations in the study area
图 1. 研究区域地形及自动站分布

本文所研究的区域为昌吉中西部(奎玛流域中下游地区，见图 1)，属温带大陆性气候，其中南部毗邻天山，北部靠近古尔班通古特沙漠，东西部均为地势相对平坦的绿洲。春夏季，该地区受极锋急流和副热带急流共同影响，冰雹、雷暴大风等强对流天气时常出现，对农业的影响最大，因为此时段正是棉花、小麦、玉米等农作物的重要生长期。例如 2018 年 7 月 9~10 日，昌吉中西部出现大风和雷阵雨天气，31 个站点风力达到 6~7 级，9 个站点出现 8 级以上大风，极大风速达到 21.7 m • s^{-1}，出现在石河子巴音山庄观测站。因此该区域也是强对流、雷暴大风等气象灾害集中发生的典型区域。在区域划分上，本文依据测站空间分布、行政边界及下垫面条件的相似性，将玛纳斯县和呼图壁县地域内的测站划分为西部，昌吉市、蔡家湖和米东区地域内的测站划分为中部；该划分兼顾了站点布局的均匀性与当地大风预报服务的历史分区习惯，以保证统计结果的代表性与业务可用性。

2.3. 研究方法

基于大风过程定义，利用气象站逐日极大风速数据对昌吉中西部地区近 10a 的短时大风天气进行筛选，总结研究区大风天气的时空分布特征。

利用大风天气对应的雷达数据查验是否存在阵风锋，确定阵风锋过程。根据阵风锋特点，初步得出其生成、发展、消亡阶段的时空分布特征。阵风锋的识别主要参照席宝珠等[7]提出的阵风锋主观识别方法，并结合本区域雷达探测性能与站点布局确定，主要采用“雷达形态－强度－速度特征 + 地面要素响应”相结合的综合判据，具体标准如下。

(1) 形态与强度。低仰角反射率因子图上，阵风锋表现为与雷暴母体相连或分离的弧形、线状窄带回波，长度一般不小于 10 km，宽度一般小于 5 km，回波强度多在 15~35 dBZ 之间，且在连续 2 个体扫以上可稳定追踪；(2) 径向速度。径向速度图上，窄带回波沿线出现明显的径向速度辐合特征，锋线两侧径向风速差达到 5 m • s^{-1} 以上；(3) 地面要素。锋线过境时，沿线自动站出现风向突变、风速骤增，并伴有气温下降、气压涌升；(4) 排除标准。无上述速度辐合特征配合的降水回波或其他弧形回波不予认定。

利用 NCEP 再分析数据、雷达、自动气象站等资料对典型阵风锋天气过程的动力、热力等方面进行深入分析，得出阵风锋形成的环流配置，给出阵风锋的形成机理。

3. 结果与分析

3.1. 大风天气过程的时空分布特征

3.1.1. 大风天气时间分布特征

从昌吉中西部大风天气统计结果可以看出，近 10a 共出现 8 级及以上大风 135 次，其中 2015 年大风次数最多，出现 21 次；2016 年最少，出现 9 次，总数差别较大。大风次数平均每年 13.5 次，大于平均次数的有 5 年，低于平均次数的有 5 年，年际差别较大(图 2(a))。

从月际分布来看，5~7 月大风日数较多，4 月、8 月次数减少，9 月减少最明显。这主要是由于 5 月春夏交替，寒潮天气较频繁，大风沙尘天气也相应增加；6~7 月强对流天气增多，阵性大风频次增大(图 2(b))。

按照区域对昌吉州中西部进行划分，玛纳斯县和呼图壁县地域内国家站和区域站为西线，昌吉市、蔡家湖和米东区地域内国家站和区域站为中线，对 2009~2018 年极大风速大于等于 17.2 m • s^{-1} (8 级以上风力等级)的大风按月进行统计。

3.1.2. 西部大风分布规律

西部大风近 10 年出现总次数 82 次，2009 年和 2015 年大风次数最多，都出现 16 次；2012 年最少，

仅有 1 次，总数差别较大。大风次数平均每年 8.2 次，大于平均次数的有 4 年，和平均次数相当的有 2 年，低于平均次数的有 4 年，年际差别较大(图 2(c))。从月际分布来看，5~7 月大风日数较多，4 月、8 月次数减少，9 月减少最明显(图 2(d))。

3.1.3. 中部大风分布规律

中部大风天气表现为 2015 年次数最多，2013 年和 2018 年次之，2016 年大风次数最少。大风年次数平均 10.9 次，且年均次数、不同月份大风日数均值以及年最大风速都比西部略有增加(图 2(e))。月际变化显示 5~7 月为大风频发时段，夏末秋初次数减少(图 2(f))。

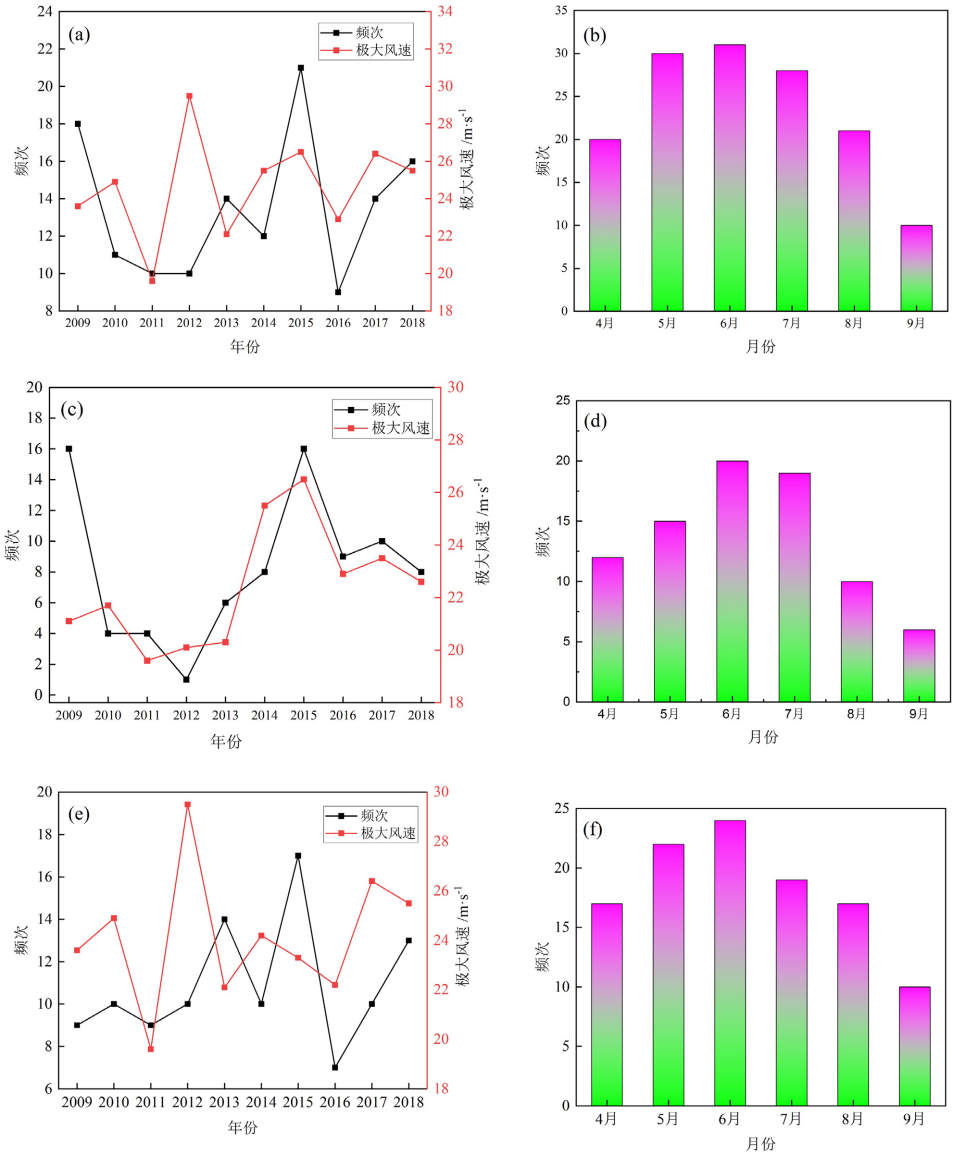


Figure 2. Temporal Distribution of Gale Weather in Central-Western Changji During 2009~2018 ((a) annual total frequency and annual maximum wind speed in central-western Changji; (b) monthly total frequency in central-western Changji; (c) annual total frequency and annual maximum wind speed in the western region; (d) monthly total frequency in the western region; (e) annual total frequency and annual maximum wind speed in the central region; (f) monthly total frequency in the central region)

图 2. 2009~2018 年昌吉州中西部大风天气时间分布，((a) 中西部年总次数和年极大风速；(b) 中西部月总次数；(c) 西部年总次数和年极大风速；(d) 西部月总次数；(e) 中部年总次数和年极大风速；(f) 中部月总次数)

3.1.4. 昌吉州中西部大风分布差异成因

一般认为，中纬度地区全年主要受西风带控制，昌吉西部地区应比中部地区出现大风次数多才算正常。但研究结果却相反。综合考虑各方因素，应从以下几个方面解释：

(1) 由于近几年当地经济的快速发展，西部地区气象站的周边环境发生了较大的变化，防护林或高层建筑大大阻挡了近地面大气快速流动，使风力减小。

(2) 中部处于绿洲过渡带，北部靠近古尔班通古特沙漠。受绿洲“湿岛效应”的影响，春夏季局地对流活动频繁，对流云系前方的下沉气流易引发大风，造成大风记录增多。

3.2. 阵风锋天气过程的时空分布特征

3.2.1. 阵风锋时间分布特征

基于大风过程的判定标准，利用多普勒天气雷达资料筛查，共筛选出近 10a 的 23 个阵风锋过程。受样本量限制，按二项分布正态近似，以 23 个样本估计比例型特征时，其 95%置信区间半宽可达±15~20 个百分点，因此下述统计特征仅代表研究时段内的初步观测事实：从年际、月际、日内变化来看，昌吉中西部阵风锋过程年际变化无明显趋势，其中 2009、2017 年各达到 5 次，其次为 2011、2014、2018 年，2012~2013 年无阵风锋出现(图 3(a))。从 4~9 月分布来看，阵风锋呈现单峰型分布，6 月份最多，4 月、9 月最少；从季节看，夏季较多，春季次之，秋季最少(图 3(b))。从日变化看，16:00 至次日 00:00 为阵风锋易发时段，其它时间很少发生(图 3(c))。从发生时段看，傍晚至前半夜(20:00~02:00)发生最多，午后到傍晚(14:00~20:00)次之，后半夜至上午最少(图 3(d))。

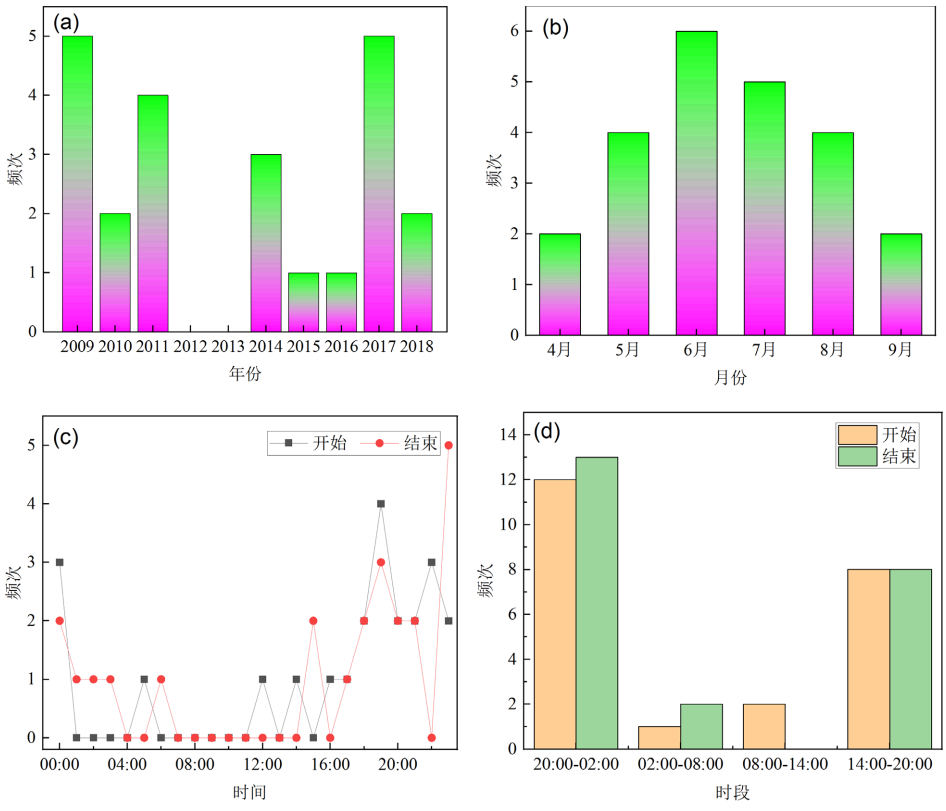


Figure 3. Temporal distribution of gust front processes ((a) interannual variation; (b) monthly variation; (c) diurnal variation; (d) time period)

图 3. 阵风锋过程的时间分布((a) 年际，(b) 月际，(c) 日内，(d) 时段)

3.2.2. 阵风锋生命史特征

对阵风锋的生命史进行了统计，从月分布看，7 月维持时间较长，其次为 4 月(由于样本数较少，平均值偏大)，8 月紧跟其后。总的来看，仍然为夏季持续时间较长，这和夏季该地区对流活动较频繁相对应(图 4(a))。从时段分布看，傍晚至前半夜维持时间较长，其次为后半夜，说明该地区阵风锋引发的大风易在夜间出现(图 4(b))。

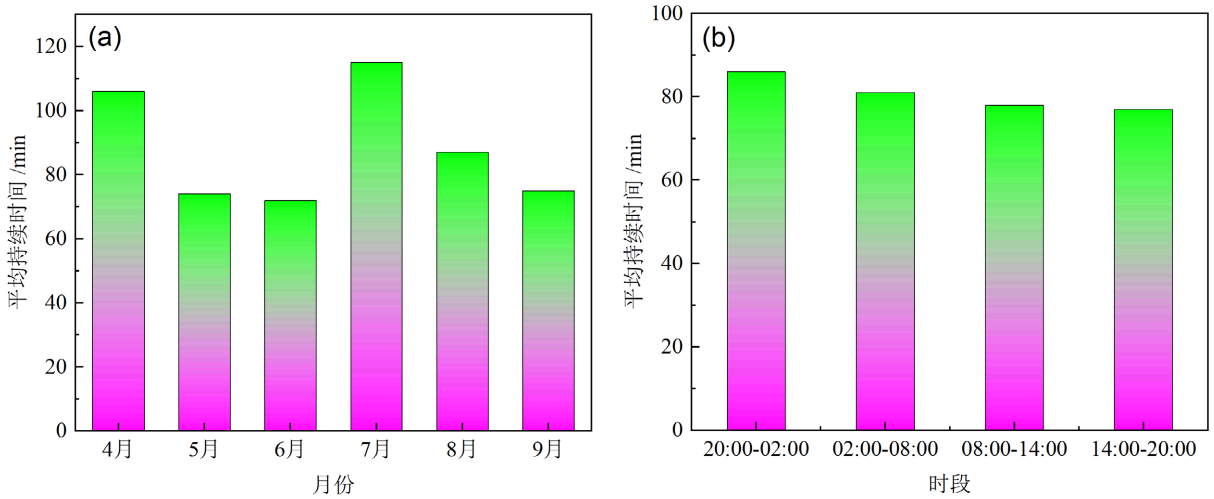


Figure 4. Life History of gust front processes ((a) month; (b) time period)
图 4. 阵风锋过程的生命史((a) 月份，(b) 时段)

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本文利用 2009~2018 年昌吉中西部气象站观测资料和多普勒天气雷达资料，统计分析了奎玛流域下游地区大风天气过程和阵风锋的时空分布特征，主要结论如下：

(1) 近 10a 昌吉中西部共出现 8 级以上大风 135 次，年平均 13.5 次，其中 2015 年最多(21 次)、2016 年最少(9 次)，年际差异较大；大风主要发生在 5~7 月，5 月与寒潮大风沙尘天气相联系，6~7 月则与强对流阵性大风相联系。

(2) 中部大风次数(年均 10.9 次)多于西部(年均 8.2 次)，与西风带控制下西部应偏多的一般认识相反，其原因可能与西部地区测站探测环境变化(防护林和高层建筑阻挡近地面大气流动)以及中部绿洲过渡带“湿岛效应”导致局地对流活动频繁有关。

(3) 近 10a 共筛选出 23 个阵风锋过程，其年际变化无明显趋势，4~9 月呈单峰型分布，6 月最多，4 月和 9 月最少；16:00 至次日 00:00 为阵风锋易发时段，其中傍晚至前半夜(20:00~02:00)发生最多。由于样本量较小，上述结论具有初步性质，其稳健性有待更长序列资料的检验。

(4) 阵风锋平均维持时间夏季最长，7 月可达 110 min 以上；傍晚至前半夜维持时间较长，初步表明该地区阵风锋引发的大风易在夜间出现，应加强夜间雷暴大风的监测预警。

4.2. 讨论

受样本数量的限制(近 10a 仅 23 个阵风锋过程)，本文主要给出了阵风锋的统计特征，阵风锋形成的环流配置、动力和热力结构及其形成机理，仍有待结合典型个例诊断和数值模拟进一步深入分析。此外，

区域自动气象站周边探测环境的变化可能影响大风观测的代表性，西部地区大风次数偏少的结论还需依靠更长序列的资料和更为均匀的站点布局加以验证。

与国外经典研究相比，本研究的基本认识与其一致，但干旱区背景带来了明显的定量差异。Wakimoto [16]基于美国大平原地区的观测与模拟研究指出阵风锋的维持取决于出流冷池与低层环境风切变之间的平衡，出流边界能否触发新对流及其维持时间，与其所处环境的水汽、风切变和边界层结构密切相关。本研究区阵风锋生命史整体偏短、以弱出流为主的特点，与干旱区边界层湿度小、蒸发冷却效率低有关，与上述经典认识一致。

与我国东部季风区相比，本研究区阵风锋的统计特征既有共性也有差异。共性在于发生时段均呈现明显的日变化，午后至傍晚为高发时段，这与太阳辐射驱动的边界层热力日循环密切相关[9] [13]。差异主要体现在三个方面：首先，华北平原和京津冀地区的雷暴大风多与组织化程度较高的线状对流系统相伴生，阵风锋生命史长、移速快、影响范围广。何娜等[13]统计的北京及周边地区雷暴阵风锋的平均生命史明显长于本研究区；其次，东部地区水汽充沛，冷池出流强而深厚，阵风锋后部雷暴高压特征显著，而本研究区处于干旱半干旱气候区，边界层干燥、蒸发冷却效率受限，出流边界的强度和维持能力相对较弱；最后，本研究区阵风锋在 7 月维持时间最长，与当地 7 月对流活动最旺盛相一致，而河北[12]、山东[11]等地的大风高发期多出现在 6 月前后，这一季节差异可能与不同区域对流有效位能和垂直风切变的季节配置不同有关。

与新疆其他地区相比，奎玛流域下游的阵风锋具有较明显的区域特点。王磊等[4]对阿勒泰地区大风的统计表明，北疆北部大风以冷空气入侵引发的系统性大风为主，对流性大风占比相对较低。而本研究区地处天山北麓冲积扇与古尔班通古特沙漠南缘之间的绿洲过渡带，春夏季午后充沛的热力抬升与局地辐合条件有利于孤立雷暴的生成，其阵风锋成为雷暴大风的重要组织形式之一。张超等[5]对天山南坡翻山大风的分析则表明，南疆盆地西缘大风的动力来源以上坡气流与地形绕流为主，与本研究区“绿洲－沙漠热力差异叠加天山地形强迫”的出流大风机制在物理本质上明显不同。这种差异主要源于两地在水汽条件、地形走向和层结结构上的不同：本研究区夏季边界层内水汽含量相对较高，绿洲“湿岛效应”为对流提供了局地水汽与能量，使阵风锋得以维持一定的生命史；而南疆盆地腹地水汽匮乏，对流组织化程度低，出流边界强度弱、维持时间短。

国外对阵风锋的研究起步较早。Wakimoto [16]利用多普勒雷达和探空资料系统刻画了非强雷暴阵风锋的生命史与结构特征，指出阵风锋的维持取决于出流冷池与低层环境风切变之间的平衡；美国大平原地区的观测与模拟研究亦表明，出流边界能否触发新对流及其维持时间，与其所处环境的水汽、风切变和边界层结构密切相关。本研究区阵风锋生命史整体偏短、以弱出流为主的特点，与干旱区边界层湿度小、蒸发冷却效率低有关，与上述经典认识一致，也提示阵风锋强度－冷池特性－环境切变之间的定量关系可作为后续研究的切入点。

下一步将优先聚焦典型阵风锋过程精细化诊断、识别算法业务化落地及灾害应用拓展，将资料序列延长至近 20 年，优化站点空间布局均匀性，重新验证现有统计结论的稳健性，重点分析气候变暖背景下，奎玛流域阵风锋活动频率、强度的长期演变规律与趋势特征；完善基于雷达资料的阵风锋自动识别、追踪算法，系统评估识别准确率、虚警率等核心指标，推动算法嵌入雷暴大风短时临近预报业务流程，实现客观化、业务化应用；综合利用雷达、风廓线雷达、微波辐射计及加密自动站等多源观测数据，结合公里级数值模拟与大涡模拟，定量化揭示典型阵风锋的三维动力、热力精细结构，及其触发新生对流的关键物理机制；对比绿洲、沙漠、戈壁等不同下垫面的出流边界特征，深入剖析下垫面热力非均匀性对阵风锋生成、发展及维持的调控机制，完善区域阵风锋形成理论；聚焦阵风锋诱发的低空风切变，明晰其对航空运行、农业设施、输电线路的致灾机理，针对性开展阵风锋大风灾害风险区划与评估研究，为奎玛流域下游防灾减灾提供更有力的科技支撑。

基金项目

本文由新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202505)资助。

参考文献

[1] 王旭, 马禹. 新疆大风的时空统计特征[J]. 新疆气象, 2002, 25(1): 1-3.

[2] 王旭, 王健, 马禹. 新疆大风天气过程的特点[J]. 新疆气象, 2002, 25(2): 4-6.

[3] 王黉, 李英, 吴哲红, 等. 我国大风机理研究和预报技术进展[J]. 气象科技, 2019, 47(4): 699-706.

[4] 王磊, 李春芳. 阿勒泰地区大风时空统计分析及其灾害防御[J]. 新疆气象, 2006, 29(1): 19-20.

[5] 张超, 陈春艳, 吐莉尼沙, 等. 2018 年 5 月天山南坡两次翻山大风成因对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 1-8.

[6] 王玲. 40 年昌吉州大风、沙尘暴天气分析[J]. 北京农业, 2012(5): 224-225.

[7] 席宝珠, 俞小鼎, 孙力, 等. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法[J]. 气象, 2015, 41(2): 133-142.

[8] 朱敏华, 周红根. 多普勒天气雷达在阵风锋监测中的应用[J]. 气象科学, 2006, 26(1): 97-102.

[9] 王彦, 唐熠, 赵金霞, 等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 91-96.

[10] 吴举秀, 周青, 杨传凤, 等. 2015 年 7 月 14 日阵风锋及锋后大风多普勒天气雷达产品特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1082-1090.

[11] 高晓梅, 王世杰, 王文波, 等. 2016 年山东一次阵风锋触发的强对流天气分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2): 67-75.

[12] 王福侠, 俞小鼎, 裴宇杰, 等. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报, 2016, 27(3): 342-351.

[13] 何娜, 丁青兰, 俞小鼎, 等. 北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象学报, 2020, 78(2): 250-259.

[14] 王彦, 于莉莉, 李艳伟, 等. 边界层辐合线对强对流系统形成和发展的作用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 724-731.

[15] 孟妙志, 卢晔, 王仲文. 关中阵风锋环境场和雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2019(5): 12-16.

[16] Wakimoto, R.M. (1982) The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data. *Monthly Weather Review*, **110**, 1060-1082. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<1060:tlcotg>2.0.co;2