

拉萨贡嘎机场北风吹沙机制及激光测风雷达的应用

王 慷¹, 其美旺珍¹, 陆雪蓓¹, 拉巴卓嘎¹, 陈逸凡²

¹中国民用航空西藏自治区管理局西藏空管中心, 西藏 拉萨

²南京牧镭激光科技股份有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年6月2日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

拉萨贡嘎机场地处雅鲁藏布江河谷, 干季裸露的河滩沙源丰富, 在强地面风作用下易形成低能见度吹沙天气。本文利用NCEP再分析资料和激光测风雷达产品, 从高空形势、温压场配置和中低空风场特征方面, 对2025年1月25日出现的一次北风吹沙天气进行了分析, 结果表明: 本次北风吹沙过程与冷空气活动有关, 冷空气先在高原北部堆积形成强冷高压, 500 hPa横切变和600 hPa横槽南压引导主体冷空气向东南垮塌, 部分冷空气南下侵入拉萨地区。拉萨地区所在的高原中东部均受冷平流控制。DBS风廓线产品显示偏北风具有底层触发-向低层扩展、地面风增强-向中层扩展、地面风减弱的特征, 底层偏北风触发初期有强下沉运动配合, 持续的下沉气流有利于北风低空急流的维持。RHI (180°)剖面产品能够跟踪北风层的推进和演变。实践表明激光测风雷达产品能够辅助判断中低层天气系统的精细化过境时间。此项工作对探究北风吹沙机制、拓展激光测风雷达在高原地区的应用场景和提升精细化预报预警水平具有重要意义。

关键词

高原机场, 冷空气, 北风吹沙, 激光测风雷达

The Northern Wind-Driven Sand Mobilization Mechanism and the Application of Wind Lidar at Lhasa Gonggar Airport

Kang Wang¹, Qimei wangzhen¹, Xuebei Lu¹, Labazhuoga¹, Yifan Chen²

¹Xizang Air Traffic Center, Xizang Autonomous Regional Administration of CAAC, Lahsa Xizang

²Nanjing Move Laser Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Jun. 2nd, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 9th, 2025

文章引用: 王慷, 其美旺珍, 陆雪蓓, 拉巴卓嘎, 陈逸凡. 拉萨贡嘎机场北风吹沙机制及激光测风雷达的应用[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 624-639. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144062

Abstract

Located in the Yarlung Zangbo River Valley, Lhasa Gonggar Airport frequently experiences low-visibility sand-blowing weather during dry seasons due to abundant riverbed sand sources and strong surface winds. This study investigates a northern wind-driven sand mobilization on January 25, 2025, using NCEP reanalysis data and wind lidar products. The results show that: the sandstorm was linked to cold air activity, and cold air initially accumulated in the northern plateau, forming a strong cold high-pressure system. A 500 hPa transverse shear line and a 600 hPa horizontal trough guided the main cold air mass to collapse southeastward, with partial intrusion into the Lhasa region. Cold advection dominated the mid-eastern plateau, including the Lhasa area. DBS wind profile data revealed a three-stage northerly wind evolution: Surface-triggered northerly winds expanding downward; Enhanced surface winds propagating upward; Gradual weakening of surface winds. Strong downdrafts during the initial phase supported the maintenance of a low-level northerly jet. RHI (180°) vertical section products effectively tracked the progression and evolution of northerly wind layers. Wind lidar data improved the precision of judging mid-low-level weather system transit times. This study advances understanding of northern wind sandstorm mechanisms, expands wind lidar applications in high-plateau regions, and enhances refined forecasting capabilities.

Keywords

High Plateau Airports, Cold Air, The Northern Wind-Driven Sand Mobilization, Wind Lidar

Copyright © 2025 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

拉萨贡嘎机场地处高原南部雅鲁藏布江河谷中段, 干季雅鲁藏布江水位枯减, 河滩裸露的沙地范围增大, 在干季大风频发的背景下常引起低能见度沙尘天气, 叠加高高原地区可靠备降场稀少等因素, 对航班运行安全和效率带来极大挑战。

国内外针对沙尘天气的预报方法和激光测风雷达的使用已开展多项研究。李亚云[1]等指出塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠的沙尘暴的主要影响系统分别为东西向地面冷锋系统和南北向地面冷锋系统, 且 500 hPa 高度距平场具有明显特点。李玲萍[2]等认为沙尘暴影响强度和范围与高空冷空气强度、高低空风速、地面热低压中心、冷锋前后变压梯度以及冷锋入侵河西走廊的时间有关。杨晓军[3]等通过分析 2021 年 3 月中旬西北地区东部一次持续性沙尘重污染天气, 发现自北向南分布的银川、中卫、兰州 3 站的垂直螺旋度的波动与污染浓度的变化基本一致, 混合层高度较其气候平均值明显偏低。李玲萍[4]等分析了河西走廊春季不同强度冷锋型沙尘暴, 结果表明锋生强度越强或者锋生高度越高, 沙尘暴越强。张春燕[5]等认为沙尘暴前期, 高空冷空气侵入与中低层暖空气进行剧烈交换, 在边界层形成不稳定层结, 槽后冷空气下沉将强风迅速向下传递到地面产生大风, 槽前高空急流加强垂直动力抽吸增强上升运动。梁希豪[6]等通过研究动量下传型大风个例发现多普勒光束摆动(DBS)模式产品中强下沉气流标志动量下传开始, RHI 模式 500 m 高度径向风分层现象的出现及被破坏是动量下传变化的预报指标。杨梅[7]等对 2019 年 5 月午后和夜间发生的 2 次沙尘暴过程进行对比分析发现沙尘暴出现在水平螺旋度负值中心下游及地气温差大值时。袁国波[8]认为内蒙古沙尘暴过程中, 发生在深厚混合层中的干对流是起沙扬沙的主要因素, 大风是形成大范围区域

性沙尘暴的动力条件, 高空急流的动量下传是形成大风的重要因素。魏倩[9]等分析 2007 年 3 月 27 日一次沙尘暴过程发现沙尘暴发生发展期间近地层风速存在明显的逆尺度发展特征, 1 h 左右尺度的扰动气温信号提前出现, 并在沙尘暴出现阶段逐渐减弱。李娜[10]等发现“4.23”南疆翻山型强沙尘暴动力结构特征是干冷与干暖空气剧烈交绥, 激发热力不稳定, 高低空急流抽吸加强冷暖空气垂直运动进而引起了地面大风。杨吉萍[11]等指出高空急流动量下传是沙尘暴发生的直接因素。李瑶婷[12]等对一次正侧风过程分析发现动量在下传过程中造成近地面层风速增大的同时, 也会使得本层动量损失, 动量下传过程中, 高空风速大值区先下移后上移且强度范围减小。黎倩[13]等通过分析激光测风雷达产品发现低空急流风速随高度先增大后减小, 强度和厚度随时间减弱, 急流轴高度随时间升高, 佐证了激光测风雷达对低空急流的结构特征以及低空急流内部强度和脉动有很好的探测效果。马秋杰[14]等经过统计分析后认为多普勒激光雷达可以通过高时空分辨率的风廓线产品有效检测低空急流结构的存在及其特征。华志强[15]等发现激光测风雷达能够实现 10 分钟左右的地面风预警提前量。其他研究人员[16]-[19]对激光测风雷达的应用也开展了相关研究分析。本文通过分析一次典型的北风吹沙天气形成原因, 结合目前先进的激光测风雷达等监测设备, 讨论北风吹沙的形成机制, 提炼预报经验和激光雷达产品特点, 从而提升气象保障能力。

2. 天气过程

2025 年 1 月 25 日, 拉萨贡嘎国际机场发生一次长时间的低能见度北风吹沙天气, 导致多架航班返航备降。从地面风及能见度时序图(图 1)来看, 17 时地面风转为西北风, 2 分钟平均风速 5 m/s, 仅在机场周边出现局部高吹沙, 未影响主导能见度; 18 时转为偏北风, 平均风速增大到 10 m/s, 同时高吹沙导致能见度降低到 7000 米; 18 时 06 分, 能见度迅速降低到 2000 米, 此后至 23 时, 偏北风维持在 10~14 m/s, 能见度在 2000 至 3000 米波动; 24 时能见度转好到 5000 米, 后续至 26 日 4 时, 偏北风逐渐减小, 能见度逐渐抬升。整个过程来看, 低于 3.4 公里的持续时间达到了 5 个小时以上。

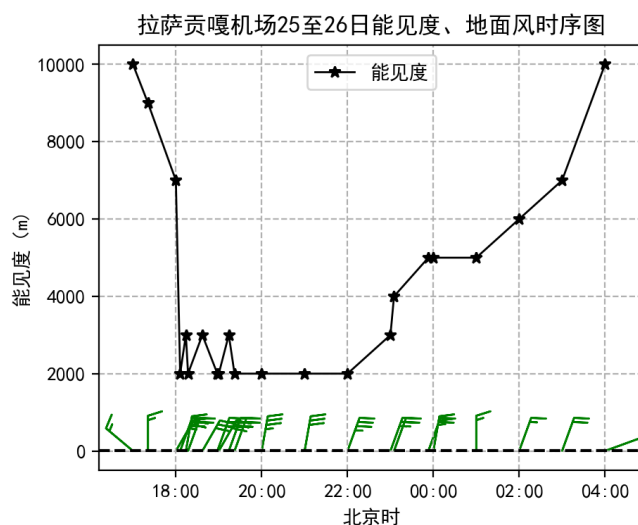


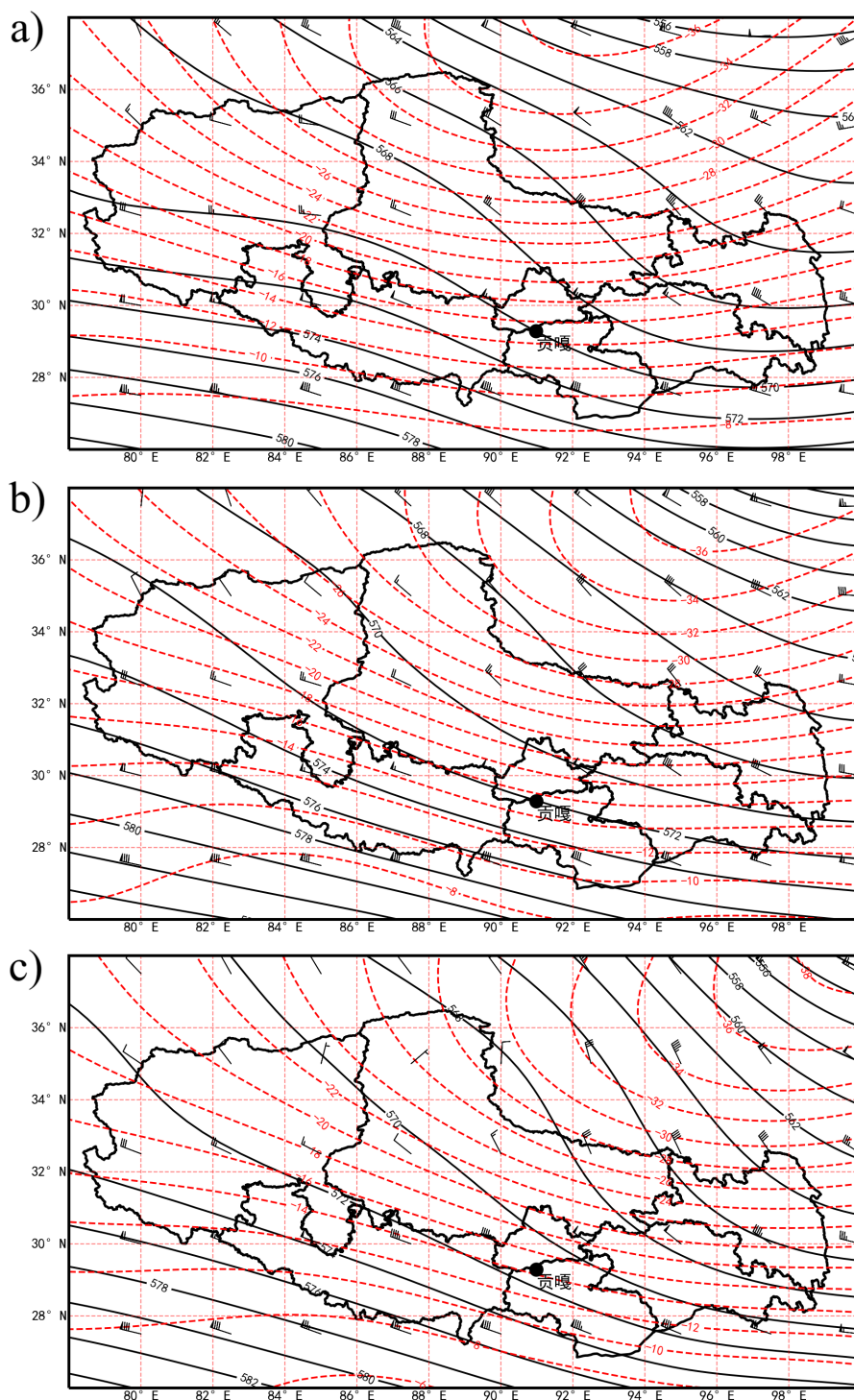
Figure 1. Surface wind and visibility time series chart for January 25~26, 2025
图 1. 2025 年 1 月 25 至 26 日地面风及能见度时序图

3. 天气背景

3.1. 高空形势

从 NCEP 再分析资料的 500 hPa 天气图(图 2)来看, 25 日 08 时至 26 日 02 时, 高原中东部均受西北

气流影响, 其中 14~20 时, 高原北部西北风逐渐转偏北风, 那曲一带有弱切变生成, 利用 NCEP 再分析资料绘制的 500 hPa 高空形势场由于格点分辨率偏低, 不能很好展示中尺度切变, 我们对当日 08 时和 20 时的高空天气图(图 3), 可以明显看到 08 时外蒙向甘肃中部延伸出的阶梯槽, 南部槽线移速更快, 影响四川北部和东部地区, 高原上为一致偏西气流, 温度梯度大。20 时, 高原东南部存在明显横切变, 拉萨站(55591)已转东北风, 表明 08 至 20 时有横切变过境影响拉萨地区。



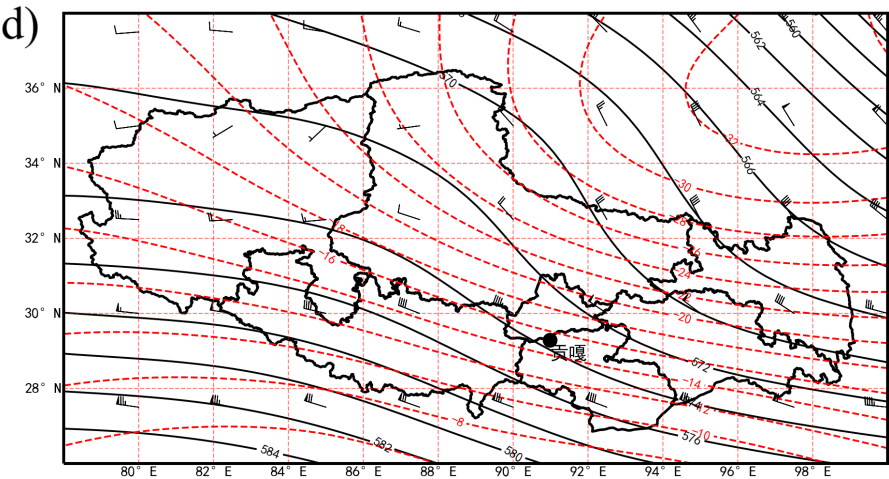


Figure 2. 500 hPa Weather chart (NCEP reanalysis data). (a) 8:00 AM, 25th, (b) 2:00 PM, 25th, (c) 8:00 PM, 25th, (d) 2:00 AM, 26th
图 2. 500 hPa 天气图(NCEP 再分析资料)。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 20 时, (d) 26 日 02 时

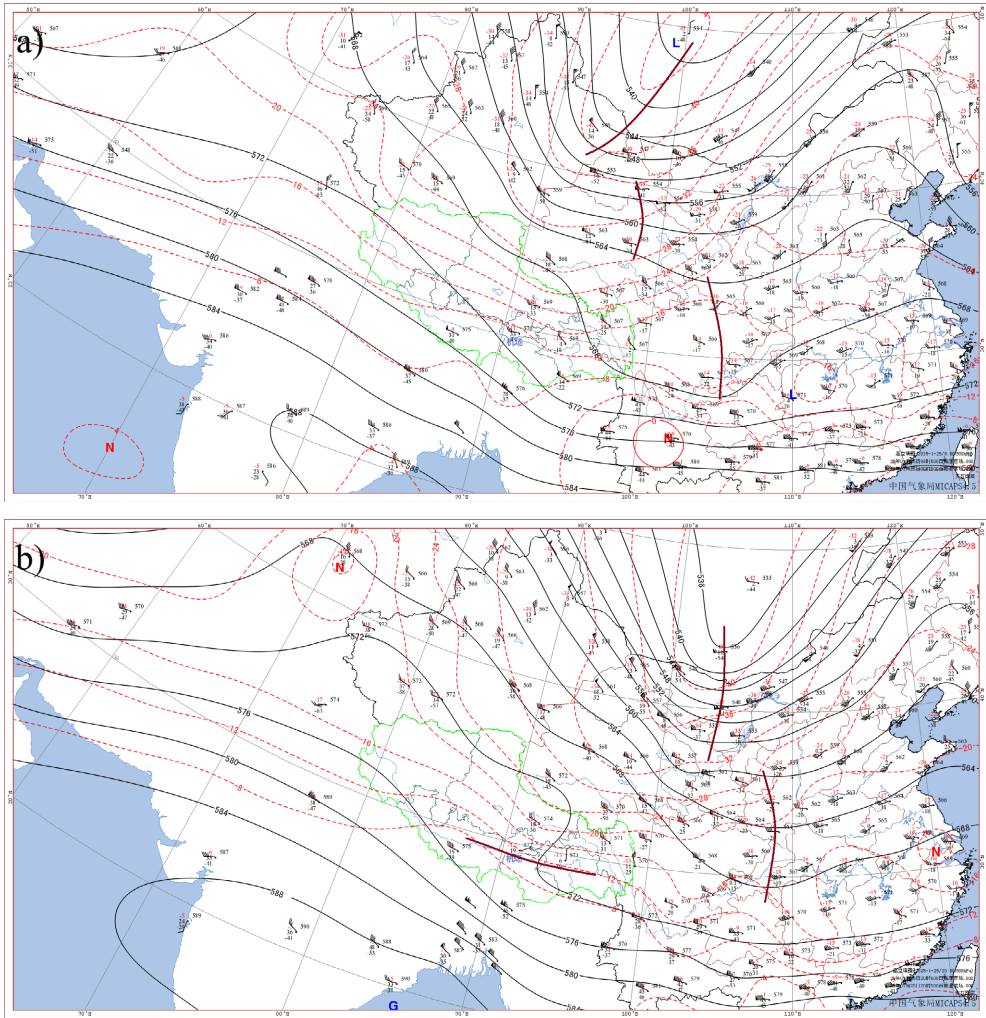
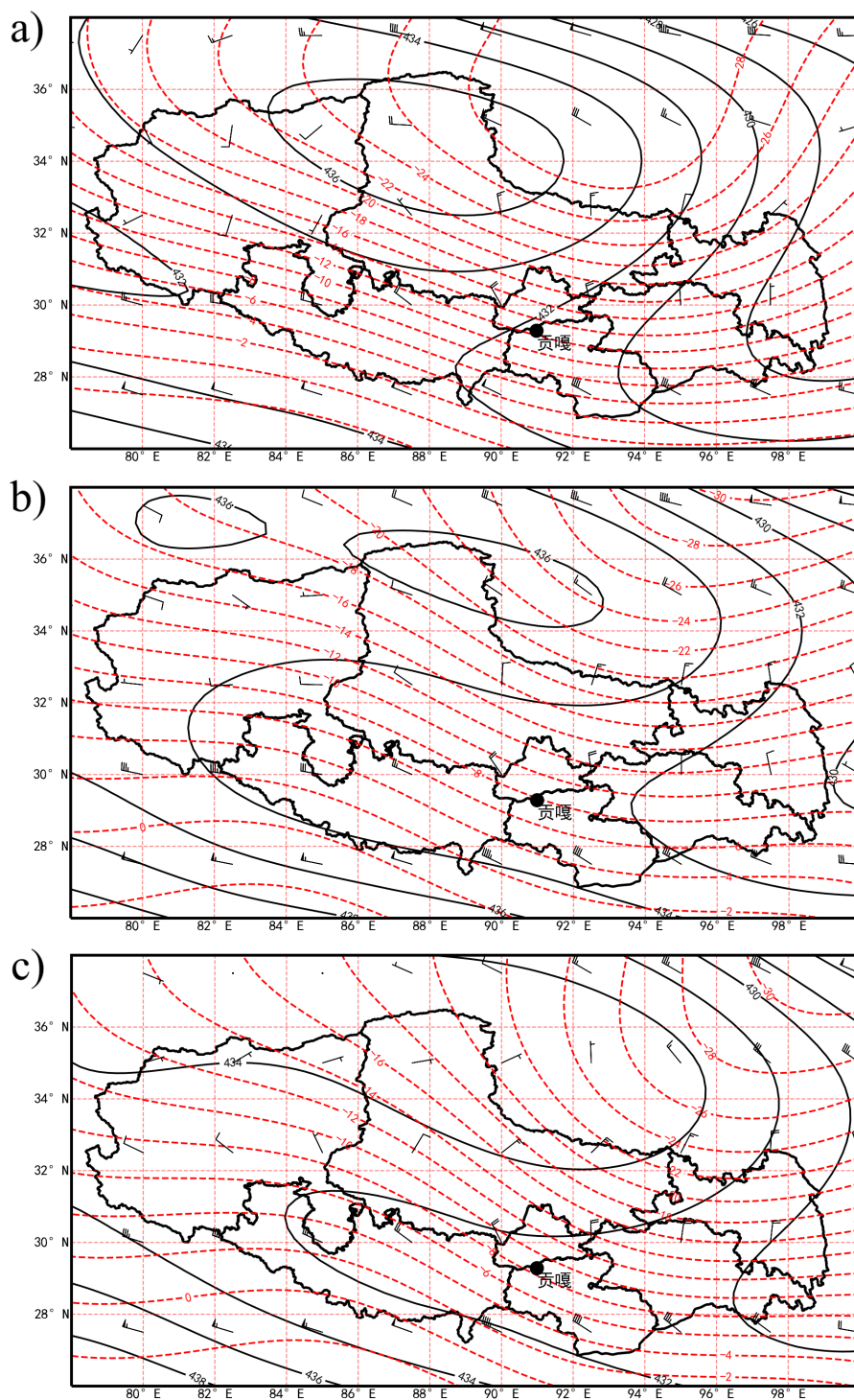


Figure 3. 500 hPa Weather chart. (a) 8:00 AM, 25th, (b) 8:00 PM, 25th
图 3. 500 hPa 天气图。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 20 时

NCEP 再分析资料绘制的 600 hPa 天气图上(图 4), 08 时高原北部形成 436 的冷高压中心, 拉萨地区处于冷高南部, 高原中、东部盛行偏北风, 冷平流明显, 环流形式有利于冷空气南下, 14~20 时高原南部横槽进一步增强, 至 26 日 02 时 436 位势高度线范围增大并南压到拉萨北部, 同时横槽移出拉萨地区, 表明本次天气过程与横槽及其后部的冷高压有直接关联, 冷空气在中低层偏北气流的引导下南下导致了本次长时间的低能见度天气。



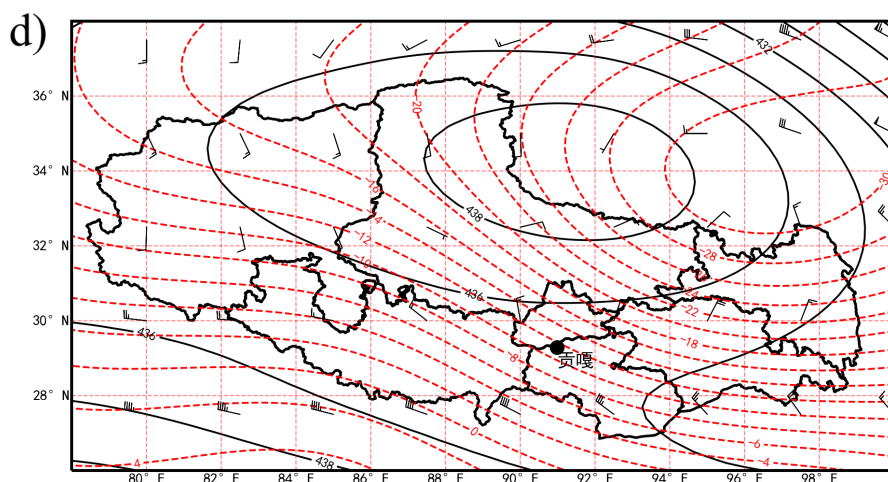


Figure 4. 600 hPa Weather chart (NCEP reanalysis data). (a) 8:00 AM, 25th, (b) 2:00 PM, 25th, (c) 8:00 PM, 25th, (d) 2:00 AM, 26th

图 4. 600 hPa 天气图(NCEP 再分析资料)。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 20 时, (d) 26 日 02 时

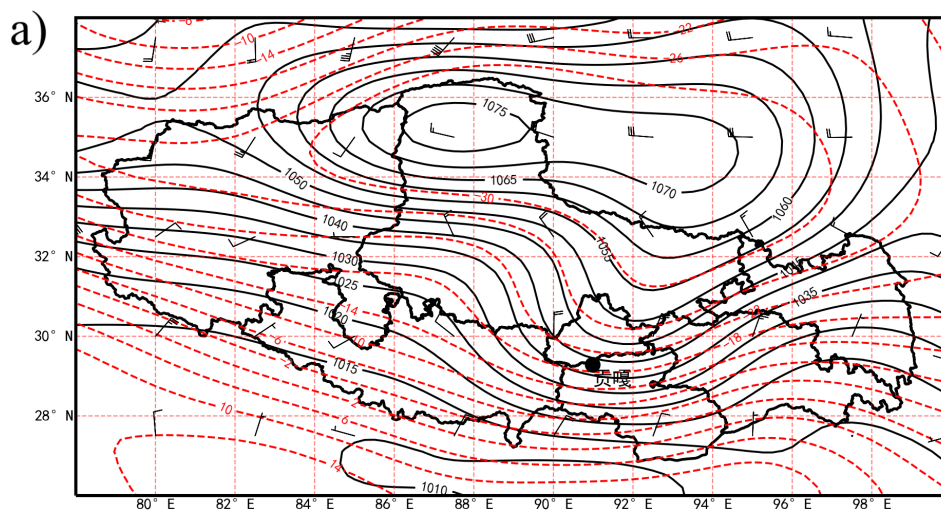
3.2. 地面要素

地面天气图

与 600 hPa 形势场相关联, 08 时地面天气图(图 5)在高原北部至青海有强地面冷高压存在, 冷高中心达到 1070 hPa, 高原整体南北向气压梯度大, 部分冷空气沿高原中部南下开始侵入拉萨地区, 随着 600 hPa 横槽的增强, 20 时冷空气推进到山南到日喀则北部一线已影响拉萨贡嘎机场。低层推进的冷空气前沿极易形成地面辐合线, 导致沙尘更容易被风扬起, 同时高原中东部的南北向气压梯度和气温梯度都进一步增强, 对地面偏北风有促进作用, 两者共同作用下引起低能见度风沙天气。

3.3. 温度平流

为进一步证实本次过程由冷空气引起, 我们绘制了 500 hPa 温度平流(见图 6)和 600 hPa 温度平流(见图 7), 500 hPa 高原整体呈现西暖东冷的特点, 冷平流中心位于高原东北部, 14 时至 26 日 02 时, 冷平流中心有所减弱并缓慢东移, 拉萨地区一直处于冷平流影响区域。600 hPa 总体特点类似, 冷平流中心相对偏西, 从拉萨和林芝交界处逐渐向东南移动。



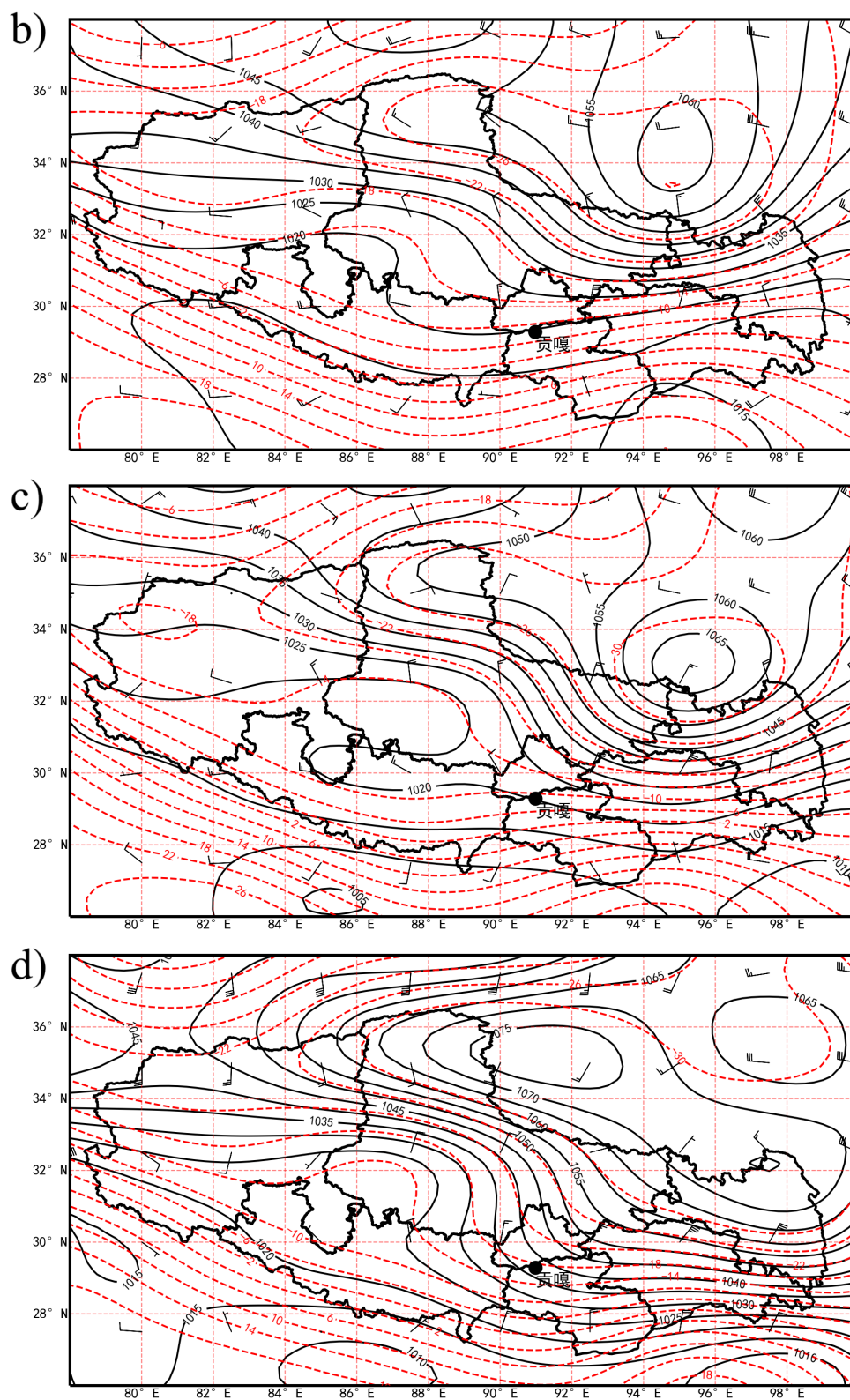
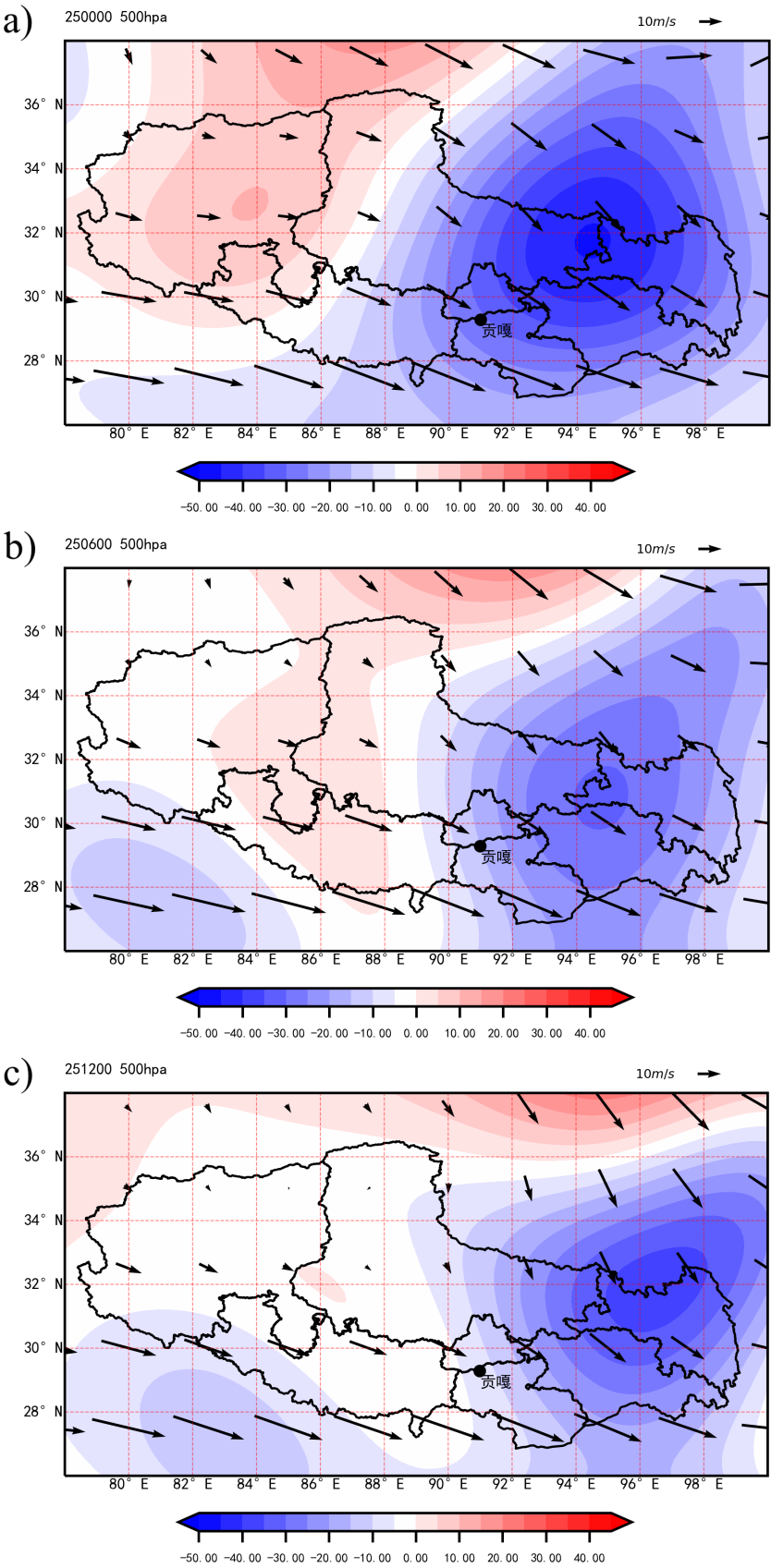


Figure 5. Surface weather chart (NCEP reanalysis data). (a) 8:00 AM, 25th, (b) 2:00 PM, 25th, (c) 8:00 PM, 25th, (d) 2:00 AM, 26th

图 5. 地面天气图(NCEP 再分析资料)。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 20 时, (d) 26 日 02 时



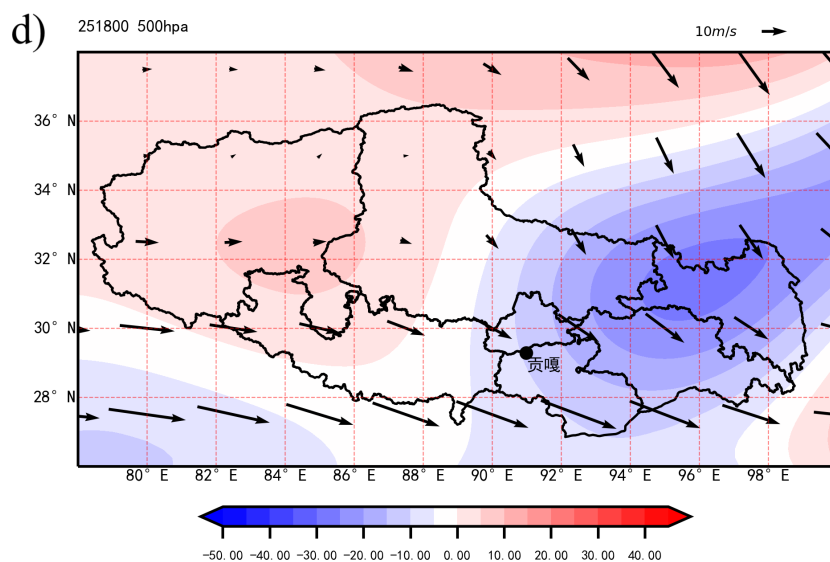
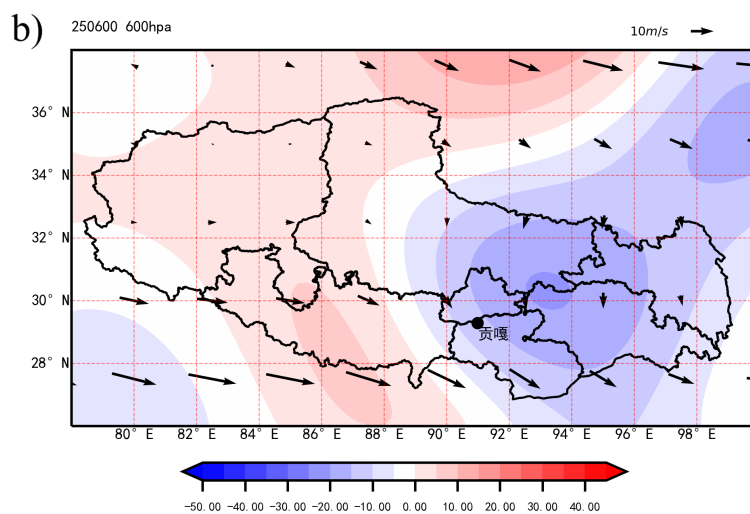
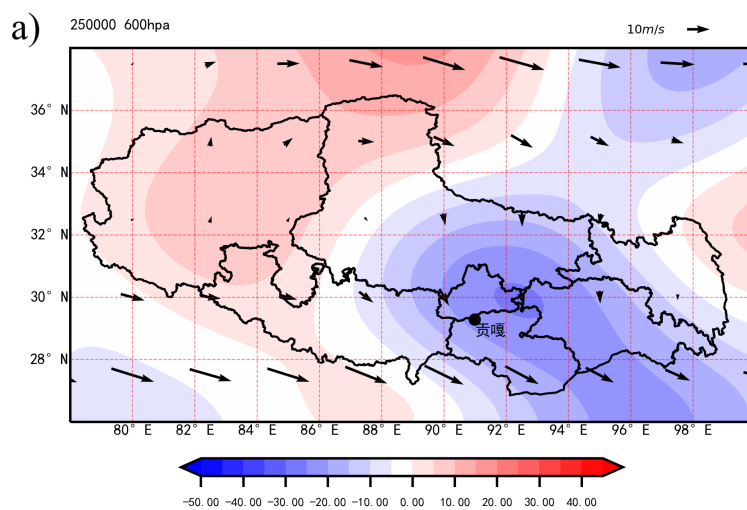


Figure 6. 500 hPa Temperature advection (NCEP reanalysis data). (a) 8:00 AM, 25th, (b) 2:00 PM, 25th, (c) 8:00 PM, 25th, (d) 2:00 AM, 26th

图 6. 500 hPa 温度平流(NCEP 再分析资料)。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 20 时, (d) 26 日 02 时



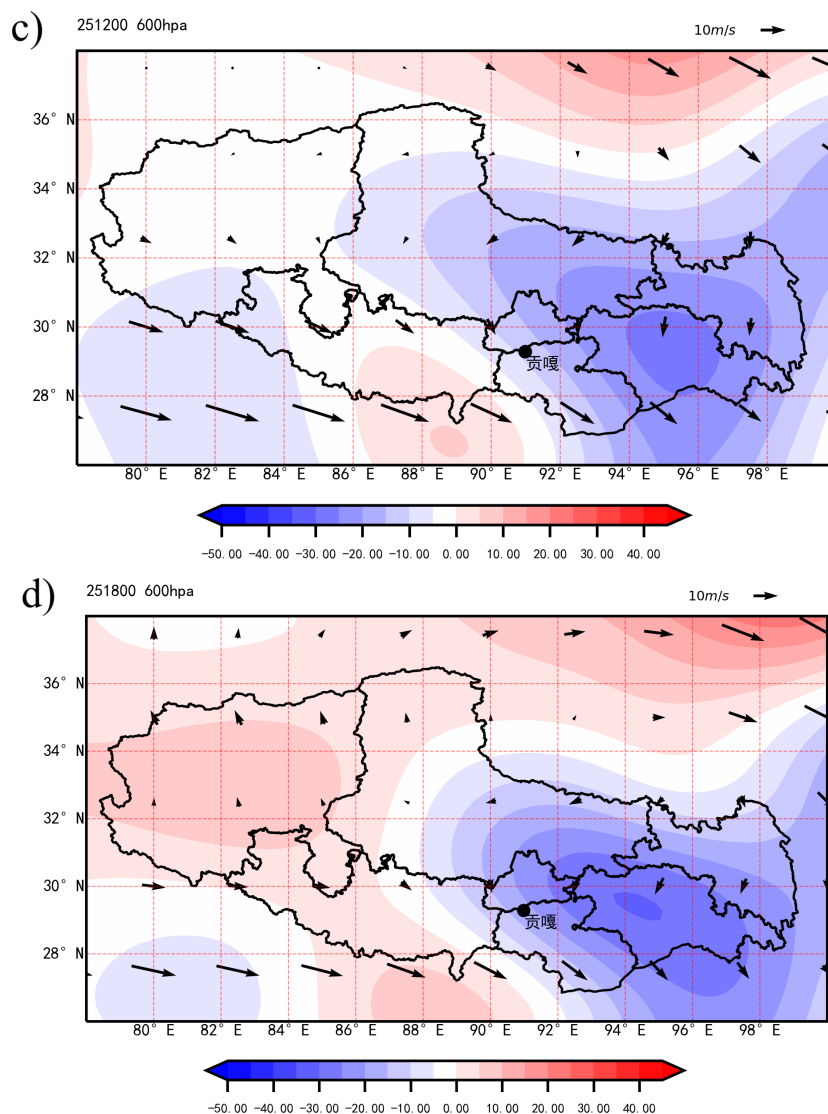


Figure 7. 600 hPa Temperature advection (NCEP reanalysis data). (a) 8:00 AM, 25th, (b) 2:00 PM, 25th, (c) 8:00 PM, 25th, (d) 2:00 AM, 26th

图 7. 600 hPa 温度平流(NCEP 再分析资料)。(a) 25 日 08 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 20 时, (d) 26 日 02 时

4. 激光测风雷达在临近预报中的应用

4.1. DBS 风廓线产品

从 DBS 风廓线时序图(图 8)来看,16:00 前整层以偏西风为主,1200 米以上的中低空急流明显;16:30,500 米以下低层首先触发偏北风,后续逐渐向中高层扩展;至 18:00,1000 米以下出现北风低空急流并一直维持,同时拉萨贡嘎机场出现 7000 米吹沙天气;18:06,能见度急速下降到 2000 米;后续直至 23:00,偏北风的延伸高度均在 1000 至 1300 米波动,动量下传至低层后导致中层动量损失;23:30 偏北风继续向中高层延伸到 2000 米及以上高度,风廓线产品很好地展示了系统性北风的层结分布和演变规律,其具有底层触发-向低层扩展、地面风增强-向中层扩展、地面风减弱的特点。垂直气流主要有两个主要特征,一是底层偏北风触发初期,整层大气的下沉运动显著增强,有利于动量下传。二是地面偏北风持续期间的低层大气仍以下沉运动为主。

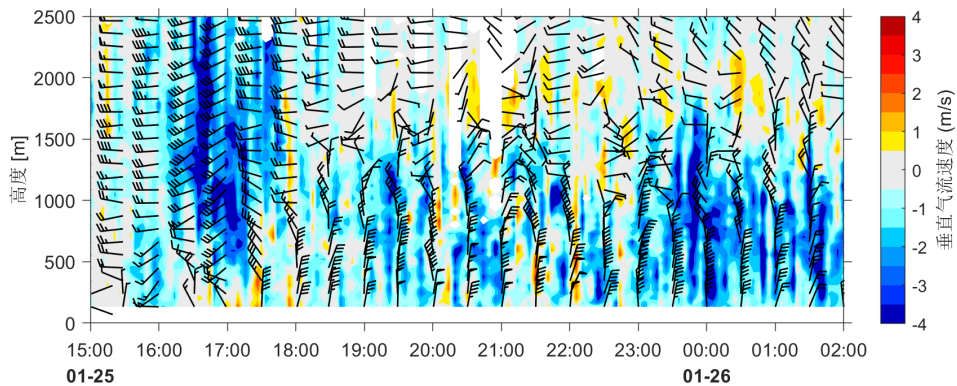
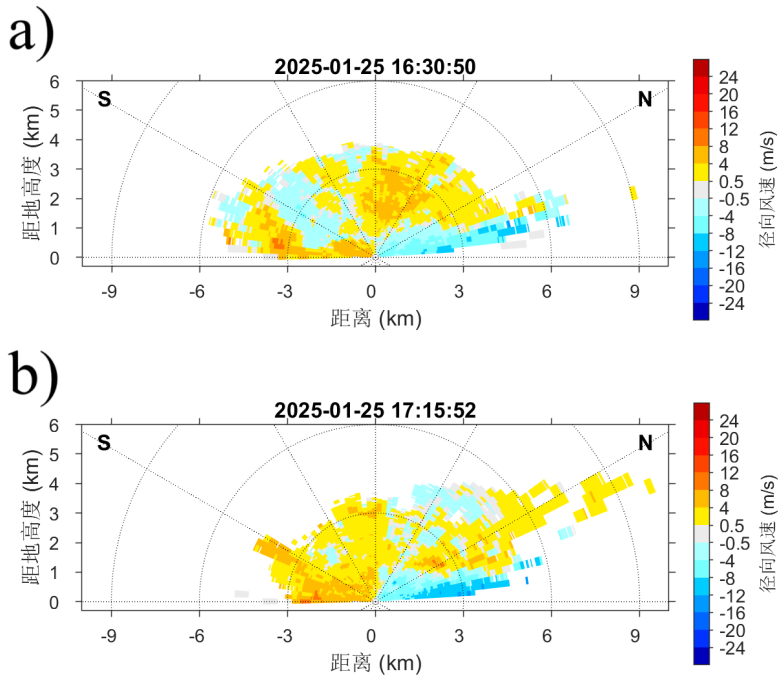


Figure 8. DBS wind profile product time series plot
图 8. DBS 风廓线时序图

我们注意到 2000 米以上高度转为持续性偏北气流时,表明本场上空 500 hPa 高度已转为稳定偏北风,从探测资料上证实 500 hPa 横切变系统已过境本场,这与地面风减弱和能见度抬升时间具有较好的关联性。所以激光测风雷达产品可以作为数值预报资料的有力补充,通过监测相应高度层风向变化,辅助预报员精细化判断对应天气系统具体过境时间。

4.2. RHI 剖面产品和 PPI 平面产品

进一步分析 RHI(180°)铺面产品(图 9), 16:30, 1000 米高度以内的低层盛行偏北风,北向 2 公里外开始出现不连续强北风区, 1000 米高度以上均为弱辐散层; 17:15 强北风区抵近且呈连续性; 18:00 强北风区到达机场, 同时, 拉萨贡嘎机场地面北风显著增大, 能见度迅速转差。18:59, 低层北风继续增大, 北风层向上扩展到 1300 米左右; 20:58, 北向 3 公里以内的低层北风增大到极值, 1000 至 2000 米转为弱辐合层, 受空气中沙粒影响, 探测范围明显缩小; 23:31, 北风层向上扩展到 2000 米以上, 北向 3 公里内的北风分量明显减弱, 能见度抬升, 探测范围显著提升。



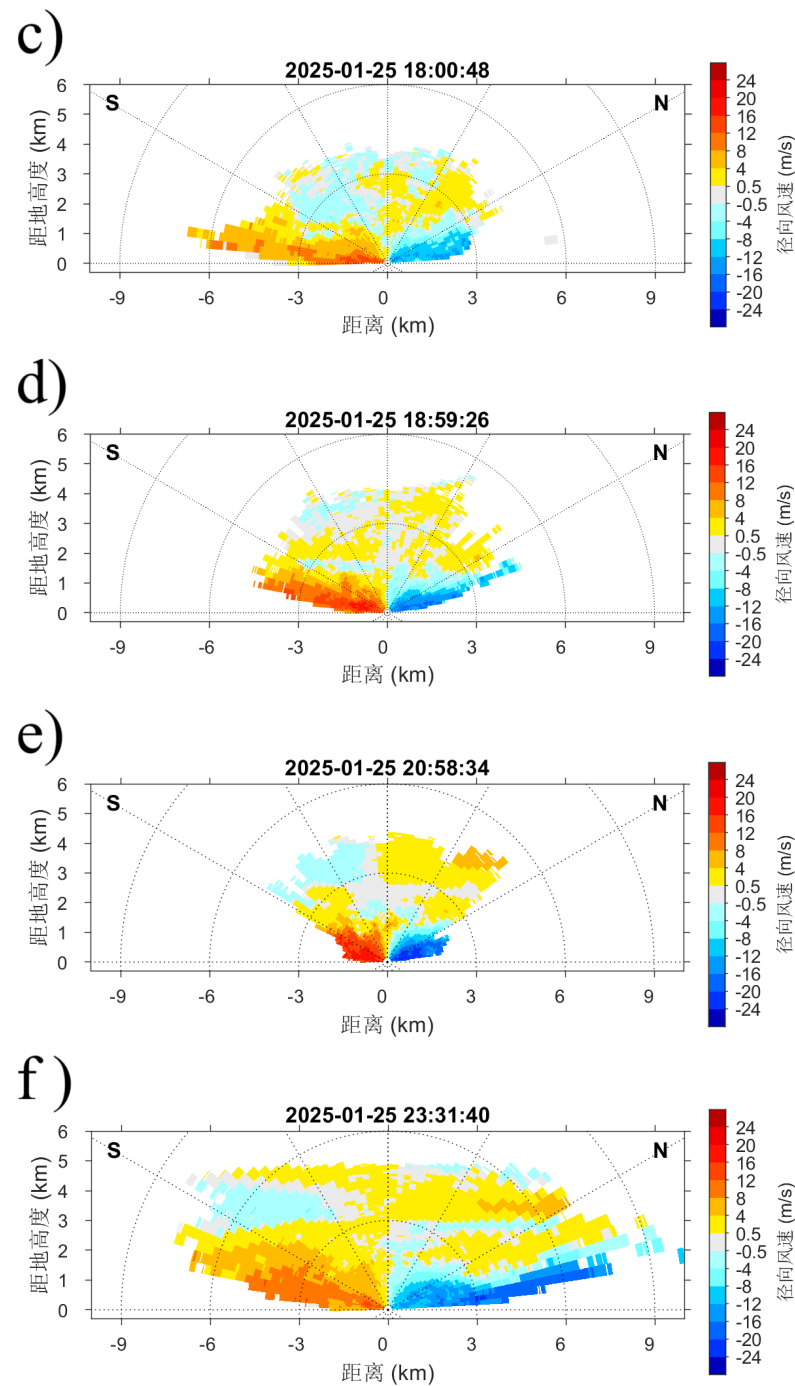
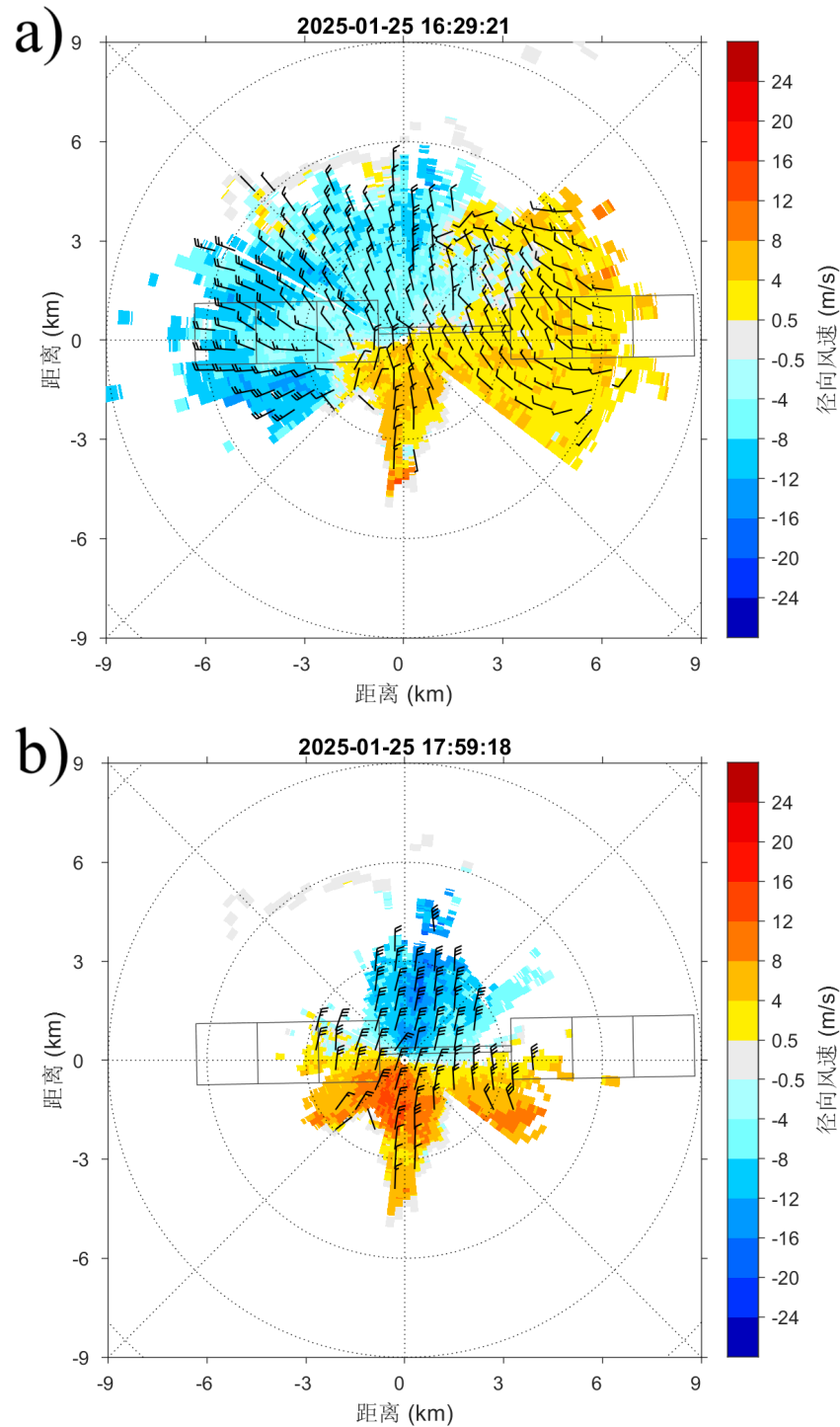


Figure 9. RHI (180°) vertical section product. (a) 16:39, (b) 17:15, (c) 18:00, (d) 18:59, (e) 20:58, (f) 23:31
图 9. RHI (180°)剖面产品。(a) 16:39, (b) 17:15, (c) 18:00, (d) 18:59, (e) 20:58, (f) 23:31

PPI (3°)平面产品上(图 10), 16:29, 拉萨贡嘎机场西北方向首先出现入流区, 大值区主要位于偏西方向; 17:59, 入流区转变为正北方向, 强度增强, 探测范围明显收窄; 23:31 探测范围进一步减小。从地形来看, 雅江和拉萨河交汇于机场西北侧 14 公里的曲水县, 北侧 5 公里的山脉自西向东高度逐渐升高, 冷空气沿低层首先从西北面侵入, 所以会出现西北入流区逐渐过渡到正北入流区的情况。

本次过程 RHI (180°)剖面产品和 PPI 平面产品具有 4 个重要特点: 1) 南北向的剖面产品能够跟踪中

低层北风的移动和变化，从而提高地面风预报的提前量和准确性；2) 能够直观显示北风层的延伸高度，与 DBS 风廓线产品特点一致，当北风扩展到 2000 米以上高度时，地面偏北风开始减弱，能见度抬升；3) 由于激光测风雷达的探测原理，沙尘对其探测范围有较大影响，但可以通过探测范围的变化侧面佐证夜间的能见度情况；4) PPI (3°)平面产品显示西北入流区逐渐转变为正北入流区，这与地形有关，沙尘浓度的增加导致探测范围急剧减小，严重削弱了 PPI 平面产品的作用。



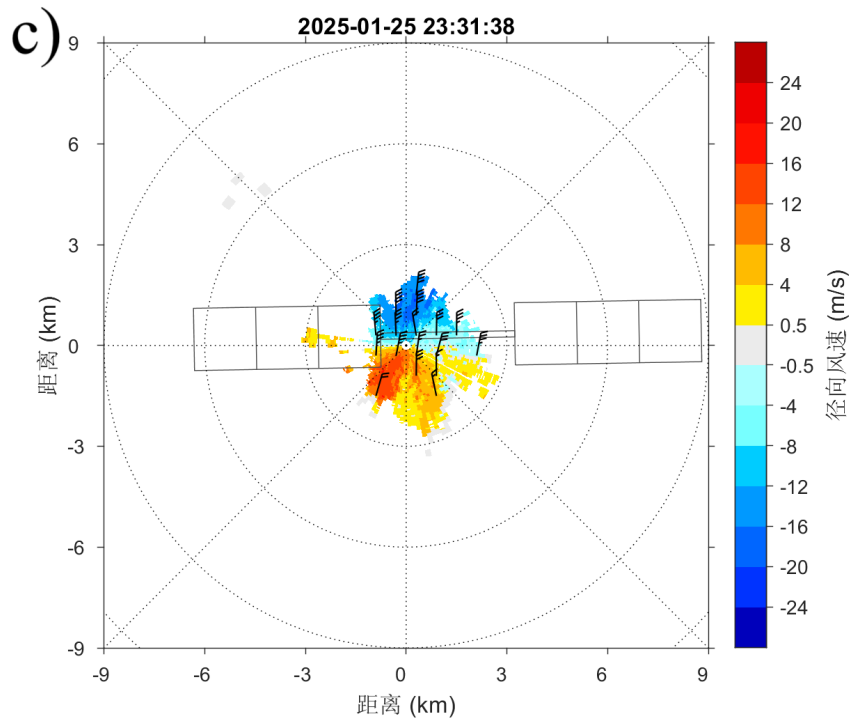


Figure 10. PPI (4°) flat product. (a) 16:29, (b) 17:59, (c) 23:31
图 10. PPI (4°)平面产品。(a) 16:29, (b) 17:59, (c) 23:31

5. 结论

- 1) 本次北风吹沙过程与冷空气活动有关，具体过程是 500 hPa 横切变和 600 hPa 横槽南压，引导高原北部堆积的冷空气主体向东南垮塌，部分冷空气南下侵入拉萨地区，地面至 500 hPa 南北向显著的温、压梯度和中空急流加剧了天气烈度，引起了长达 5 小时的低能见度北风吹沙天气。
- 2) 600 hPa 横槽后部的冷高压表明冷空气至少延伸到了 600 hPa，可以作为冷空气强度指标，地面冷高压的移动和中低层冷平流分布佐证了冷空气活动路径。
- 3) 激光测风雷达高时空分辨率的探测特点对三维风场有很好的监测作用。DBS 风廓线产品上偏北风具有底层触发 - 向低层扩展、地面风增强 - 向中层扩展、地面风减弱的特点。底层偏北风触发初期下沉运动显著增强，低层大气持续的下沉气流促进动量下传，成为北风低空急流维持的重要原因，同时中层表现为动量损失。RHI (180°)剖面产品能够跟踪中低层北风的推进和变化情况。2000 m 以上高度转稳定偏北风时表明 500 hPa 横切变已过境本场，预示地面偏北风有减弱趋势，可作为天气转好的指标。受地形影响，PPI (3°)平面产品显示西北入流区逐渐转变为正北入流区，起沙后受沙尘浓度的影响较大，可用性随着能见度降低明显削弱。
- 4) 青藏高原探空资料稀缺，激光测风雷达产品可以作为中低空探测数据和数值预报资料的有力补充，通过监测相应高度层风向风速变化，辅助判断中低层天气系统的精细化过境时间。

参考文献

[1] 李亚云, 成巍, 王宁, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠春季沙尘暴特征及其气象影响因素对比[J]. 中国沙漠, 2023, 43(4): 1-9.

[2] 李玲萍, 李天江, 李岩瑛, 等. 陆面与大气边界层热力作用对河西走廊冷锋型沙尘暴的影响[J]. 高原气象, 2024, 43(2): 498-509.

- [3] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 等. 中国北方 2021 年 3 月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 245-255.
- [4] 李玲萍, 李岩瑛, 李晓京, 等. 河西走廊不同强度冷锋型沙尘暴环流和动力特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 219-228.
- [5] 张春燕, 李岩瑛, 马幸蔚, 等. 河西走廊不同强度槽型沙尘暴垂直动量传输特征分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(9): 925-936.
- [6] 梁希豪, 杨寅, 冯亮, 等. 基于测风激光雷达银川机场动量下传大风特征研究[J]. 激光技术, 2023, 47(3): 432-438.
- [7] 杨梅, 李岩瑛, 张春燕, 等. 河西走廊中东部春季沙尘暴变化特征及其典型个例分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1339-1349.
- [8] 袁国波. 21 世纪以来内蒙古沙尘暴特征及成因[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1204-1209.
- [9] 魏倩, 隆霄, 田畅, 等. 民勤一次沙尘暴天气过程的近地层气象要素多尺度特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1352-1362.
- [10] 李娜, 闵月, 汤浩, 等. “4·23”南疆翻山型强沙尘暴动力结构特征分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 792-800.
- [11] 杨吉萍, 胡兴才, 崔志强. 甘肃民勤“4·24”沙尘暴过程的数值模拟分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 718-724.
- [12] 李瑶婷, 梁明增, 李耀辉, 等. 激光测风雷达在广汉机场的一次应用分析[J]. 民航学报, 2021, 5(6): 64-66.
- [13] 黎倩, 郑佳锋, 朱克云, 等. 基于激光测风雷达的低空急流结构特征研究[J]. 激光技术, 2020, 44(5): 557-562.
- [14] 马秋杰, 李珍妮, 宋小全, 等. 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 61-67.
- [15] 华志强, 黎倩, 黄轩, 等. 激光测风雷达在航空保障中的典型应用分析[J]. 激光技术, 2020, 44(5): 600-604.
- [16] 程志刚, 李炬, 张鑫宇, 等. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究[J]. 气象学报, 2020, 78(6): 1021-1036.
- [17] 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 2018, 42(1): 178-191.
- [18] 唐磊, 董吉辉, 吴海滨. 多普勒测风激光雷达风场探测结果分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 29(9): 39-45.
- [19] Hon, K.K. and Chan, P.W. (2013) Application of LIDAR-Derived Eddy Dissipation Rate Profiles in Low-Level Wind Shear and Turbulence Alerts at Hong Kong International Airport. *Meteorological Applications*, **21**, 74-85.
<https://doi.org/10.1002/met.1430>