Geographical Science Research 地理科学研究, 2022, 11(5), 478-490
Published Online October 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/gser
https://doi.org/10.12677/gser.2022.115049

乌鲁木齐机场春季东南大风的多资料天气过程及风切变分析

张　茜

民航新疆空管局气象中心，新疆，乌鲁木齐

收稿日期：2022年9月5日；录用日期：2022年10月8日；发布日期：2022年10月12日

摘　要

本文利用FNL 1°*1°再分析数据、EC-thin数值预报、激光雷达数据、机场周边气象站、机场AWOS等资料对乌鲁木齐机场2022年4月18日~19日春季天气背景下的一次东南大风天气过程及低空风切变特征进行分析，结论如下：此次东南风长时间维持的原因为：1) 本次东南大风以锋前减压加回流型为主。2) 新疆脊区发展导致冷空气从脊前补充南下，使得东疆至甘肃一带冷槽维持；脊区东升导致高压南压，高压主体稳定在西藏青海一带并明显加强，地面逐渐形成东高西低、南高北低的气压形势场。北疆地区受低压系统和其前部减压影响，更有利于维持东高西低的气压场形势。3) 达坂城站与乌鲁木齐机场的气压场与机场风速的相关性较好。4) 在东南风持续期间，R07与MID端有明显的风速差，其风切变值超过安全阈值。5) EC-thin数值预报对此东南风的预报时长误差较大，预报风场的风速明显比实况偏大。6) 激光雷达风廓线资料700~1200米高度及500米高度的东南风层资料对本场东南风预报有一定的参考价值。

关键词

东南风，风切变，激光雷达，AWOS，EC-Thin

Analysis of Multi-Data Weather Process and Wind Shear of Southeast Gale in Springat Urumqi Airport

Qian Zhang

Xinjiang ATMB CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Sep. 5th, 2022; accepted: Oct. 8th, 2022; published: Oct. 12th, 2022

文章引用: 张茜. 乌鲁木齐机场春季东南大风的多资料天气过程及风切变分析[J]. 地理科学研究, 2022, 11(5): 478-490.
DOI: 10.12677/gser.2022.115049

Abstract

In this paper, using the 1° * 1° FNL reanalysis data, EC-THIN numerical forecast, laser radar data, weather stations around the airport, and AWOS data to analyze the weathering process of a southeast wind and low-level wind shear characteristics under the background of spring weather of Urumqi airport from April 18 to 19, 2022. The conclusions follow: the reason why the southeasterly wind maintained for a long time: 1) The southeast gale was mainly prefrontal decompression and reflux type. 2) The development of the Xinjiang ridge area leads to the cold air moving southward from the front of the ridge and maintaining the cold trough from eastern Xinjiang to Gansu; The eastward rise of the ridge leads to the southward pressure of the high pressure, and the main of the high pressure is stable in Tibet and Qinghai and strengthened obviously. The surface gradually forms a pressure field with high pressure in the east and low pressure in the west, high-pressure in the south and low-pressure in the north. Under the influence of the low-pressure system and its front decompression, the northern Xinjiang area is more conducive to maintaining the high-pressure field in the east and the low-pressure field in the west. 3) The pressure field of Dabancheng Station and Urumqi Airport has a good correlation with the airport wind speed. 4) During the duration of the southeast gale, there is an obvious wind speed difference between R07 and MID, and the wind shear value exceeds the safety threshold. 5) The time error of the EC-THIN numerical forecast is relatively large, and the wind speed of the predicted wind field is obviously larger than the real wind. 6) The laser radar wind profile data of 700~1200 m height and the southeast wind layer data of 500 m height have certain reference values for the southeast gale forecast.

Keywords

Southeast Gale, Wind Shear, Laser Radar, AWOS, EC-Thin

1. 引言

航空器起飞着陆，选择起降跑道、飞行高度层，设计飞机活动路径及计算油料消耗等都必须考虑风的影响。东南大风是乌鲁木齐地区特有的地方性大风天气，由于乌鲁木齐机场跑道呈西南－东北向(R07/R25)，而东南风方向在 120°~160°之间，对乌鲁木齐机场跑道基本上是正侧风，风速较大时，极易造成航空器侧风超标，令飞机无法正常起降。乌鲁木齐机场地面刮东南风时，低空存在着明显的水平风的垂直切变，加之本场附近地形起伏，气流更加难以预测，常常造成航空器在起降过程中产生颠簸[1] [2] [3] [4] [5]。因此东南大风是诱发乌鲁木齐机场空中风切变最为频繁和严重的天气。

风切变是严重威胁飞行安全的“隐形杀手”。乌鲁木齐机场刮东南风时，天空大都晴朗少云，在地面上还未有反应时，空中已存在着很强的东南风层和风切变。关于乌鲁木齐机场的跑道水平风切变和低空水平风的垂直切变，机场气象专家从高低空配置、动量下传、地形影响等[6]-[11]方面系统性的研究了东南大风发生的演变过程和动力机制，得到了大量借鉴意义的结论，为东南大风诱发乌鲁木齐机场风切变天气的预报提供了有益参考。

2. 资料选取

本文利用 2022 年 4 月 18 日~19 日 FNL 1° * 1°再分析数据、EC-thin 数值预报资料、激光雷达数据、机场周边气象站、乌鲁木齐机场自动气象观测系统(Aviation Automated Weather Observing Systems，简称 AWOS)资料，通过以上多种数值预报和探测资料对乌鲁木齐机场春季一次东南大风天气过程及低空风切变特征进行分析。

3. 天气实况及影响

2022 年 4 月 17~19 日，乌鲁木齐机场及其周边地区出现区域性东南大风天气。如图 1 所示，乌鲁木齐机场 2022 年 4 月 17 日 20:00~19 日 12:00 AWOS 逐时风速风向资料显示：乌鲁木齐机场 2022 年 4 月 17 日 21:00 风向转为南风，风向范围为 140~190°，平均风速 2~6 m/s；18 日 7:00 前后出现波动；18 日 8:00~19 日 12:00 为持续的东南风天气。其中 19 日 04:00~08:30 平均风 10~12 m/s，阵风 15~20 m/s，其中 R07 方向最大阵风达 23 m/s。

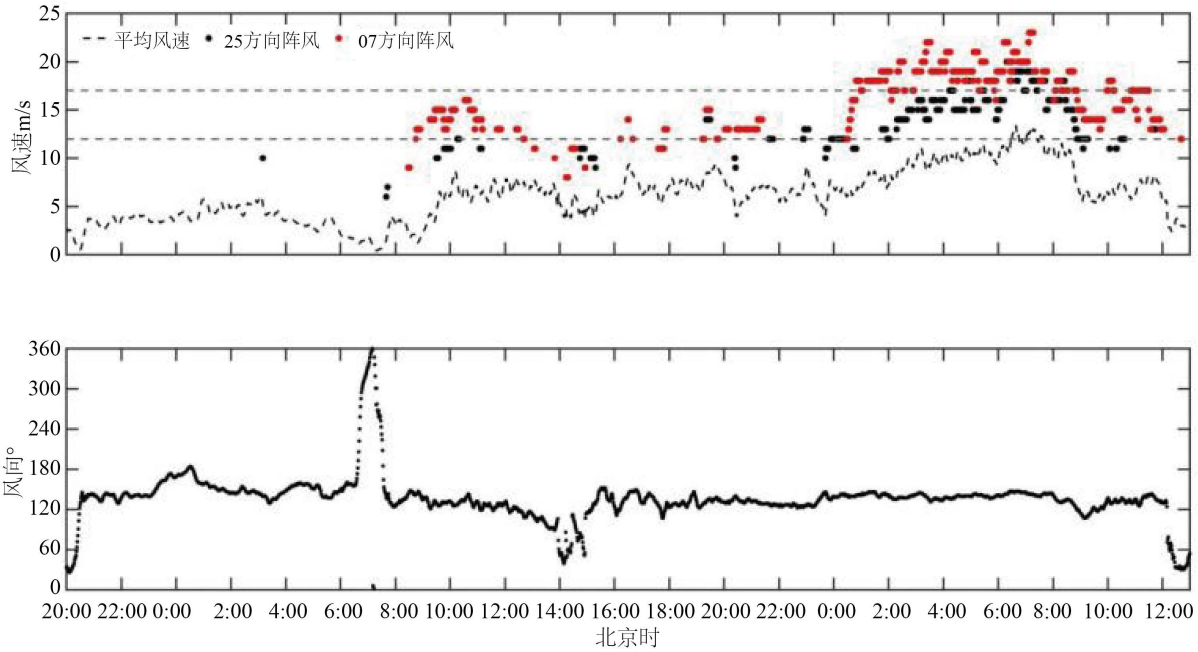


Figure 1. AWOS wind speed and direction chart of Urumqi Airport from April 20:00 on 17th to 12:00 on 19th
图 1. 乌鲁木齐机场 4 月 17 日 20:00~19 日 12:00 AWOS 风速风向图

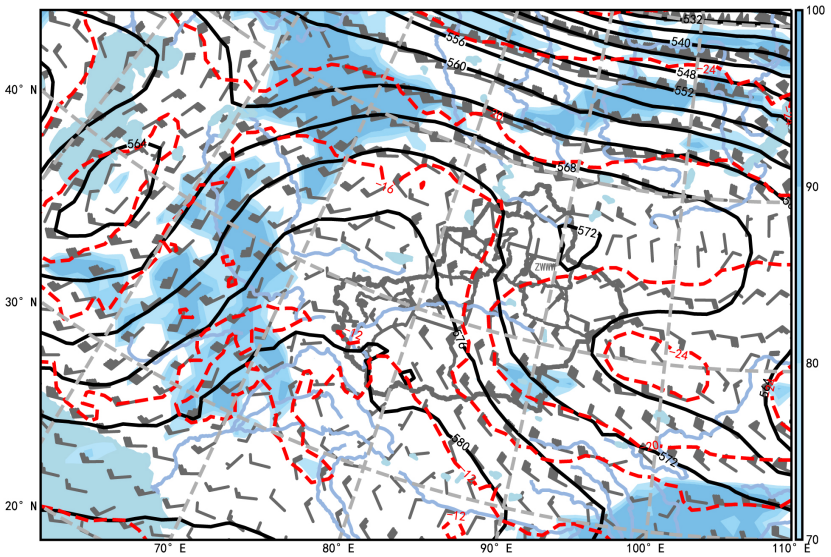
此次东南大风天气过程给乌鲁木齐机场的航空运行造成了较严重的影响，在大风期间乌鲁木齐气象监视台共收到 2 份关于低空风切变的航空器空中报告，2022 年 4 月 18 日 14:13 因风向风速变化较大造成 1 架航班在本场 760 米高度复飞，共造成乌鲁木齐机场航班动态调时 70 余架次。

4. 天气学诊断分析

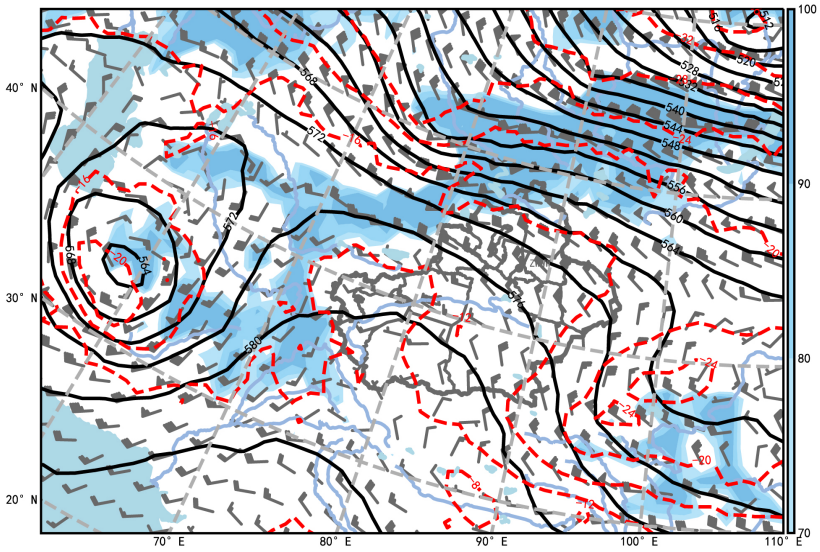
4.1. 天气形势

在 500 hpa 位势高度图上，16 日 20 时新疆上游西伯利亚地区受偏西气流弱扰动控制，新疆区域转为脊区控制，脊呈东北－西南走向，在东疆哈密与酒泉之间有一支东北－西南向横槽，温度槽落后于高度槽；17 日 08 时东部横槽加深并南下明显，如图 2(a)所示，18 日 08 时北疆东部地区形成阻塞高压，冷槽

稳定在东疆哈密至酒泉之间，在内蒙古与甘肃交界的地方形成一个冷中心，中心气温为−24℃；18 日 08-18 日 20 时，槽脊不断发展，脊前强盛的偏北气流引导冷空气不断南下堆积；如图 2(b)所示，19 日 08 时，横槽南下明显，整体已经移出新疆区域，北疆大部为西北气流控制；南疆基本已无温度差异，东南风形势逐渐结束。下文中图 2~5 的单位说明：风场(风杆，单位 m/s)、高度场(黑色等值线，单位 hPa)、温度场(红色等值线，单位℃)。



(a)



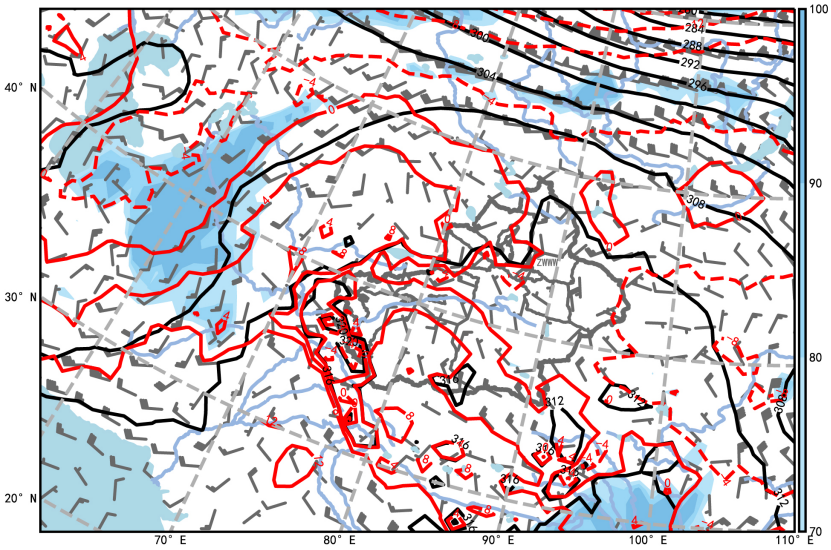
(b)

Figure 2. (a) 500 hPa synoptic situation at 08:00 on April 18; (b) 500 hPa synoptic situation at 08:00 on April 19

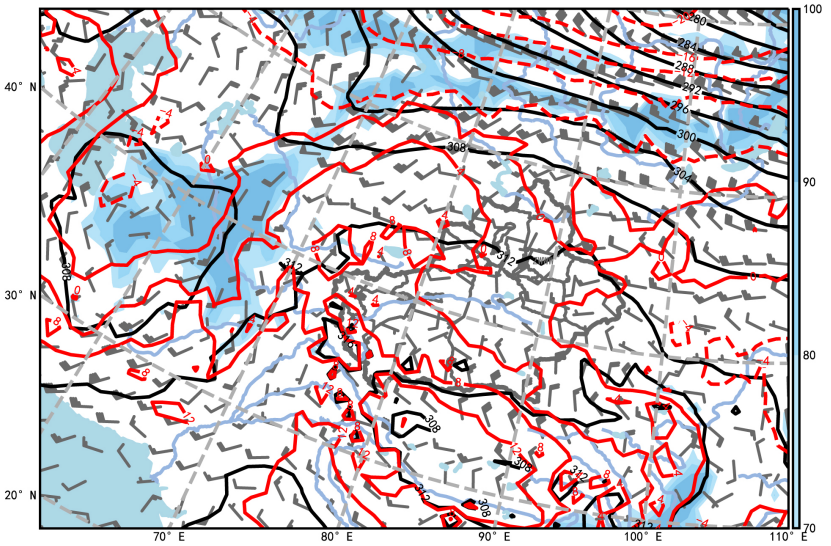
图 2. (a) 4 月 18 日 08 时 500 hpa 天气形；(b) 4 月 19 日 08 时 500 hpa 天气形势

在 700 hpa 位势高度图上，如图 3(a)所示，18 日 08 时，西伯利亚高空槽位于乌拉尔山－巴尔喀什湖一带，巴尔喀什湖附近存在明显的暖舌，中心值为 8℃。如图 3(b)所示，18 日 20 时新疆区域为偏西气流

控制，最大风速达到 8 米/秒，乌鲁木齐地区上空为东南风。暖舌东升至伊犁河谷，中心温度为 8℃，南疆盆地受冷高压控制，南疆盆地及东疆高空温度基本为 0~4℃，南北温差明显，19 日 08 时，乌鲁木齐站减压 4 hPa，北疆地区逐渐转为西北气流控制，南北压差逐渐减弱，东南风形势趋于结束。



(a)

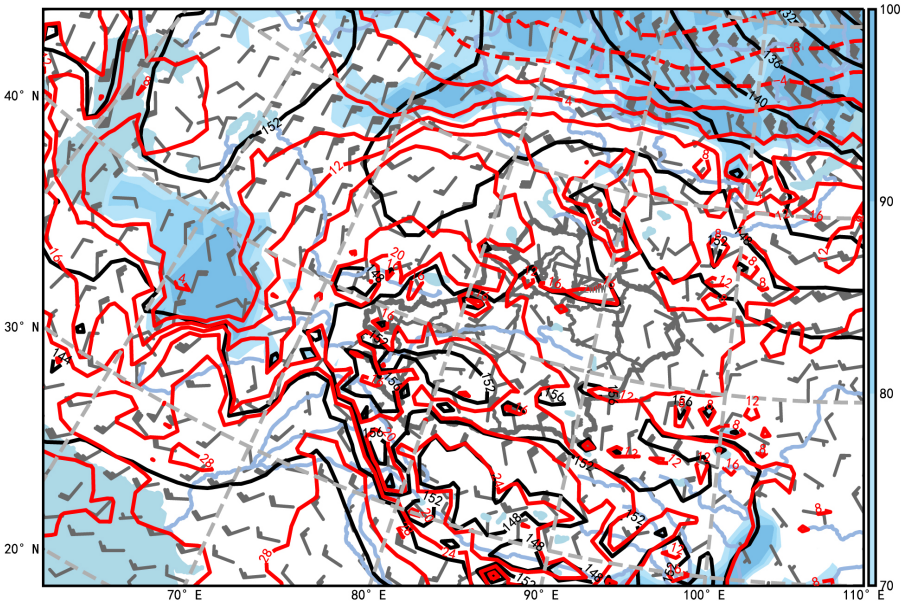


(b)

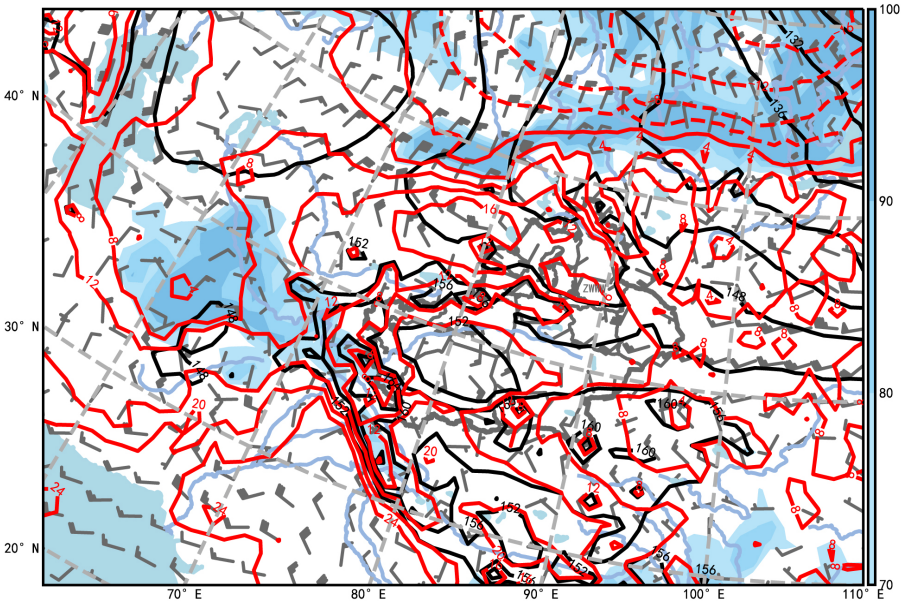
Figure 3. (a) 700 hPa synoptic situation at 08:00 on April18; (b) 700 hPa synoptic situation at 20:00 on April 18

图 3. (a) 4 月 18 日 08 时 700 hpa 天气形势；(b) 4 月 18 日 20 时 700 hpa 天气形势

在 850 hpa 位势高度图上，17 日 08 时，乌鲁木齐站上空转为明显的东南风控制，17 日 20 时北疆大部上空为明显的东南风层。如图 4(a)所示，18 日 20 点北疆沿天山一带东南风已明显加强，达到 10~14 m/s，东南风层厚度大，强度进一步加强。如图 4(b)所示，19 日 08 时，北疆大部东南风明显减弱，乌鲁木齐站后续转为偏北气流控制，此次东南大风天气趋于结束。



(a)

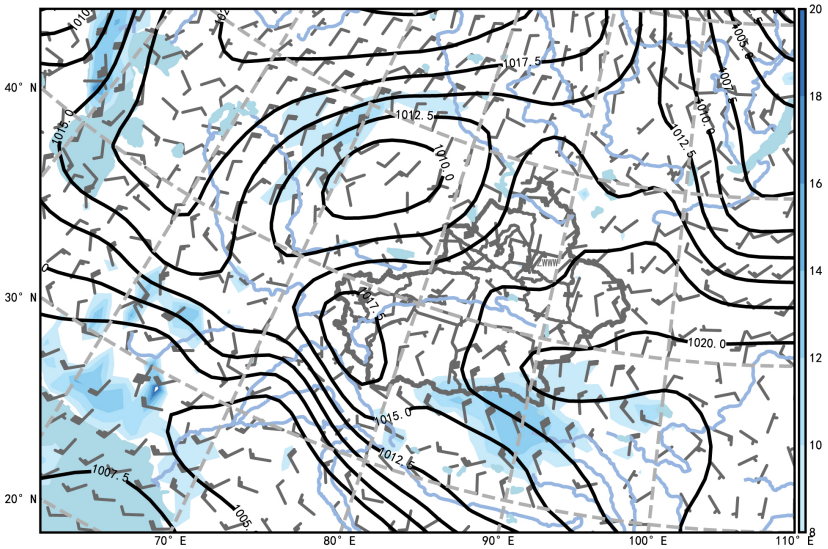


(b)

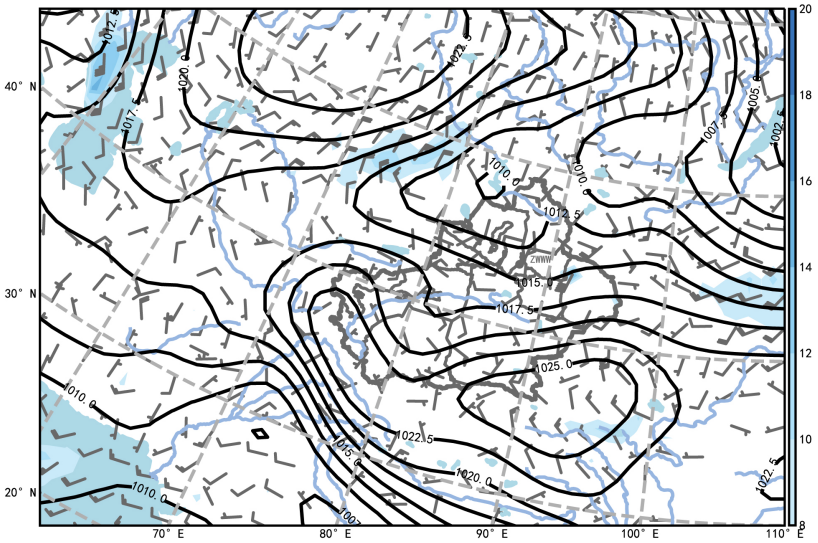
Figure 4. (a) 850 hPa synoptic situation at 20:00 on April 18; (b) 850 hPa synoptic situation at 08:00 on April 19

图 4. (a) 4 月 18 日 20 时 850 hpa 天气形势；(b) 4 月 19 日 08 时 850 hpa 天气形势

地面天气图上，17 日 20 时，北疆地区位于蒙古高压底后部，如图 5(a)所示，18 日 20 时随着高空脊东伸，蒙古高压进一步南压。地面逐渐形成东高西低、南高北低的气压场形势场。如图 5(b)所示，19 日 08 时高压主体稳定在西藏、青海一带并明显加强，北疆地区受低压系统和其前部减压影响，仍然维持着东高西低、南高北低的气压场形势。后续，伴随着低压系统逐渐进入东疆地区，进一步向东移动，地面形势场逐渐被破坏，东南风趋于结束。



(a)



(b)

Figure 5. (a) Prebaratic chart at 20:00 on April 18; (b) Prebaratic chart at 08:00 on April 19

图 5. (a) 4 月 18 日 20 时地面图；(b) 4 月 19 日 08 时地面图

从本次东南大风影响最明显时段来看，虽然锋面整体位置偏北，但是锋前减压明显，如图 6 所示，从地面 3 小时变压图上来看，19 日 02 时至 05 时乌鲁木齐站三小时负变压达到 2 hPa，这与实况本场 04:00~08:30 东南大风明显时段吻合，此次大风天气过程为一次明显的锋前减压加蒙古高压回流型。

4.2. 周边站点气象要素对比

从周边观测站风向变化来看，达坂城站的风向变化与本场较为一致，基本为同频变化，提前量小；从周边观测站的风速变化来看，整个天气过程中，机场与乌鲁木齐市区风速较大，且市区风速变化比本场提前半小时；从周边修正海压来看，除达坂城站外，其余周边站点都与本场同向变化，总体来看，本场的修正海压较大；从周边温度场的变化来看，除 19 日 01:00~09:00 部分站点缺少资料外，本场、蔡家

湖站、呼图壁站、昌吉站、玛纳斯站温度都比较高，本场温度最高，达到了 30℃。针对本场东南风，可关注达坂城站半小时内的风向变化以及市区半小时内的风速变化。

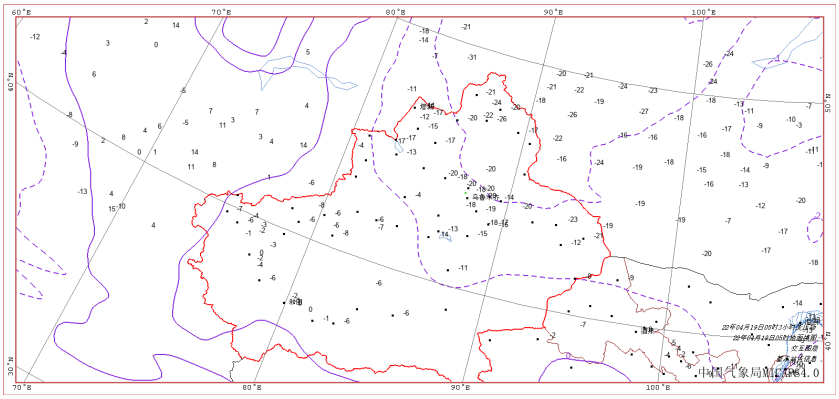


Figure 6. Prebaraticvariation of pressure chart at 02:00 on April 19
图 6. 4 月 19 日 02 时地面变压图

根据乌鲁木齐地区春秋东南大风期间本站与上游站气压差经验：1) 3 hPa ≤ ΔP ≤ 6 hPa，地面东南风风速 4~10 m/s；2) 6 hPa ≤ ΔP ≤ 7.3 hPa，地面东南风风速 7~15 m/s，阵风可达 20 m/s；3) ≥7.3 hPa，地面东南风风速 ＞ 17 m/s。如图 7 所示，东南风期间，乌鲁木齐市区气压始终低于乌鲁木齐机场，达坂城站与乌鲁木齐机场的气压场与机场风速的相关性更好，达坂城站与机场气压差持续在 6~7 hPa 时乌鲁木齐机场出现东南大风；当达坂城与机场气压差持续下降并低于 3 hPa 时东南风风速随之减小并陆续结束。

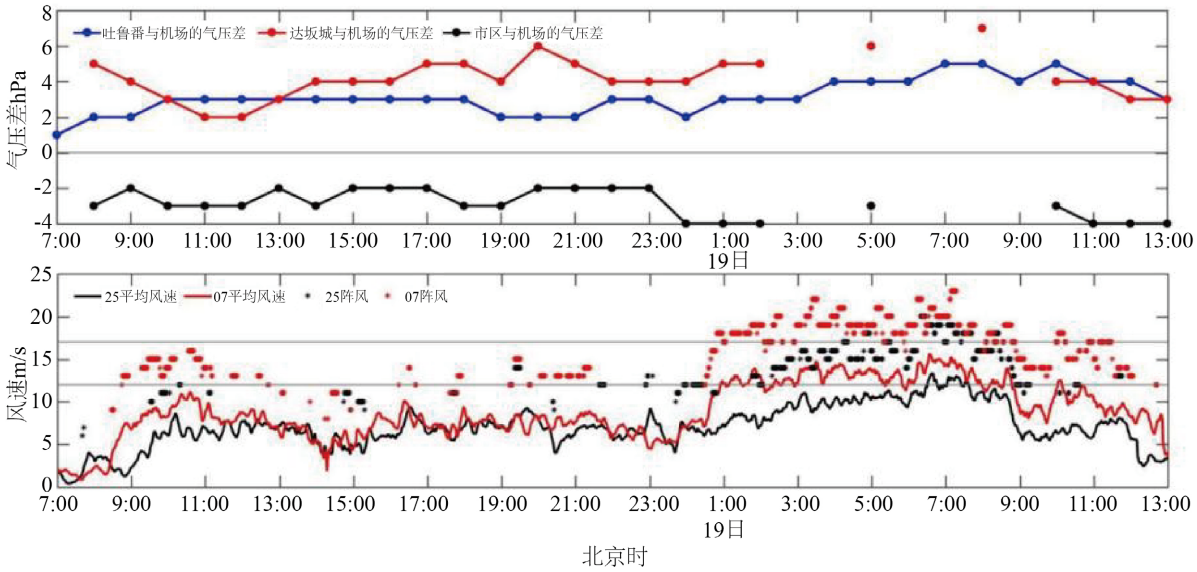


Figure 7. Chart of Pressure difference between Urumqi Airport and upstream on April 19
图 7. 4 月 19 日乌鲁木齐机场与上游站气压差图

5. EC thin 数值模式检验

如图 8 所示，EC-thin 数值模式的多个不同起报时间对此次东南风的起、止时间均未作调整，与实况资料相比较，东南风天气过程时间明显偏长。EC-thin 数值模式东南风开始时间比实况偏早 12 小时，结

束时间比实况偏晚 9 小时。EC-thin 数值模式中预报风场的风速明显比实况偏大，此次天气预报过程中预报员的经验预报和从天气学角度预报的精度优于 EC-thin 数值模式。进一步说明，乌鲁木齐地区区域性东南大风精细化的预报工作任重而道远。

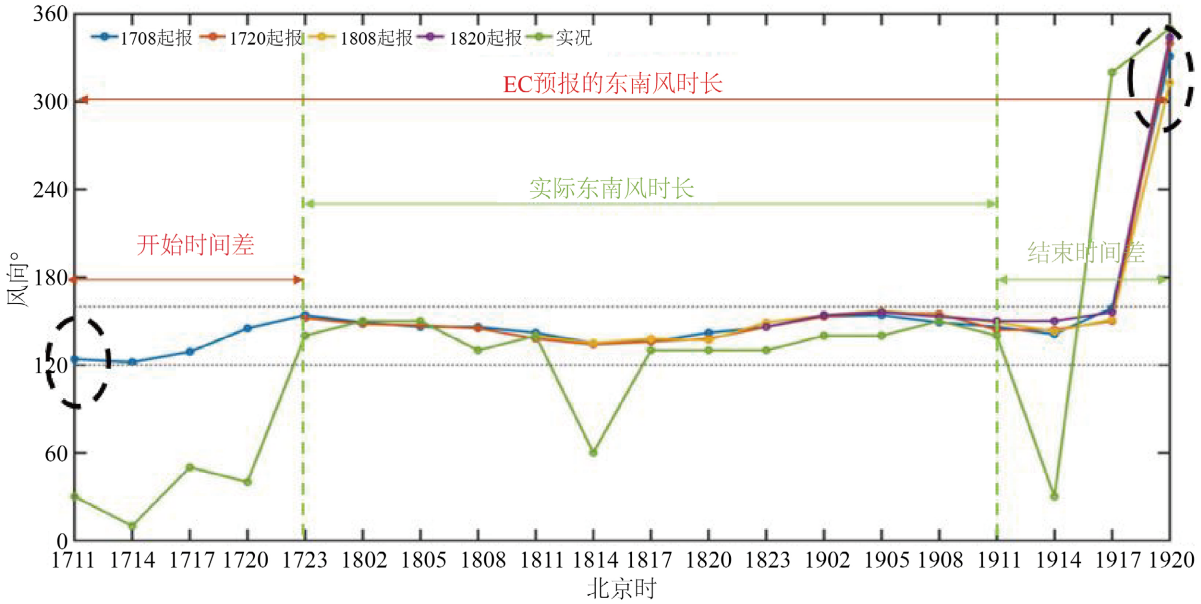


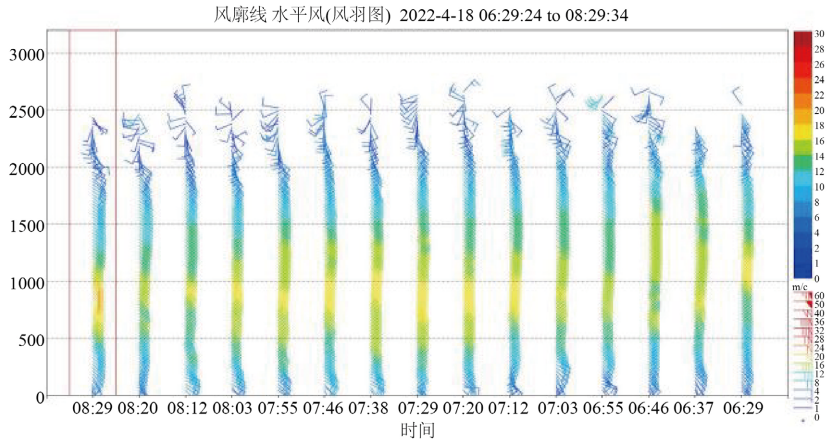
Figure 8. Comparative analysis of EC-thin numerical model and Scene
图 8. EC-thin 数值模式与实况对比分析

6. 激光雷达资料分析

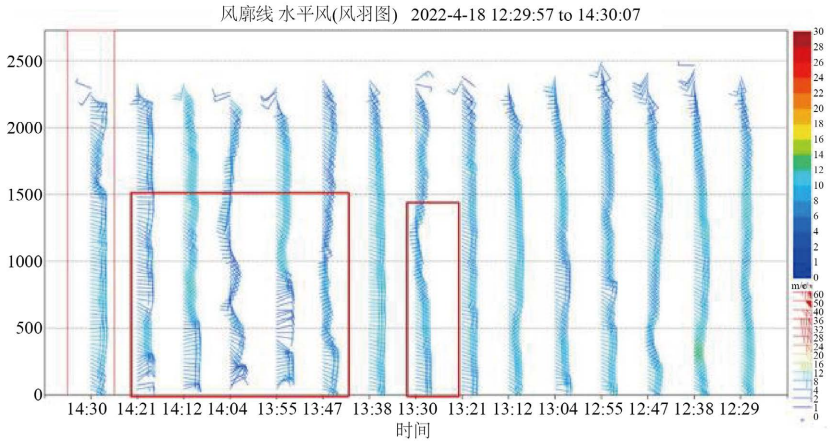
图 9(a)所示，乌鲁木齐机场激光雷达风廓线图 4 月 18 日 2000 米以下均为东南风，7:00 以后东南风层明显下压并且增大，6:46 前后低层风向有明显的波动，可见低层有一定的扰动存在。7:00 前大风区域主要集中在 700~1500 米，7:00 后大风区域集中在 700~1000 米高度，实况显示乌鲁木齐机场本场 7:00 出现波动，后转为持续的东南风，激光雷达风廓线图与此有很好的对应。乌鲁木齐机场气象台收到航空器报告，报告显示在 4 月 18 日 14:22 因风向风速不连续造成一架航空器复飞。图 9(b)所示，激光雷达风廓线图显示 13:30 开始本场 1500 米以下风向风速变化大，低层风向存在明显的风随高度先顺转再逆转的情况，存在冷暖平流交汇，航空器复飞的高度为 760 米，正好处在风向风速变化最明显的高度。激光雷达图上也有风切变提示，但提示高度比较高。在本场 2500 米以下风切变最显著的高度和时间范围内无航空器报告。2500 米以上高度层以上无资料，故无法评判激光雷达对于本场上空风切变的预警能力。

图 10 所示，乌鲁木齐机场 4 月 19 日激光雷达风廓线图上来看，4 月 19 日 22:39 以后 500~1200 米风速明显加大，最大风速达到 24 m/s，700~1200 米高度风速均在 20 m/s 以上，在 23:56 可以明显看到 600~1000 米高度风速增加至 28 m/s，且在 23:39 时 1200 米以下风速均在 16 m/s 以上，对应机场实况 19 日凌晨 00:00 后阵风明显加大，可以着重观察 700~1200 米高度风速的转变，提前量大概有 1 个半小时。从激光雷达风廓线上可以明显看到，02:00 以后风速明显加大，并且下压至 500 米左右高度，并且风速增加至 28 m/s，并且 02:00 前后风速存在明显的波动，先减小后增大后下压，与本场 AWOS 资料相对应，02:00 后本场风速明显增大，阵风一度增大至 20 m/s，后续至 4:00 风速持续增大，最大风速层进一步下压，300~700 米高度风速基本维持在 28 m/s 左右，持续至 7:14 从激光雷达风廓线资料上来看，低层风速略有减小，至 7:30，低层风速维持在 20 m/s 左右，与本场实况来看，本场 04:00~08:30 平均风 10~12 m/s，阵风 15~20 m/s，

由此可见在风廓线雷达 500 米左右，大风对本场风速预报有一定提前量，预报时可以关注本场上空 500 米左右风速突然增大或突然减小的时段，该时段后一个小时左右本场风速将发生变化，但风速是否下传至地面还需要其它条件共同作用。

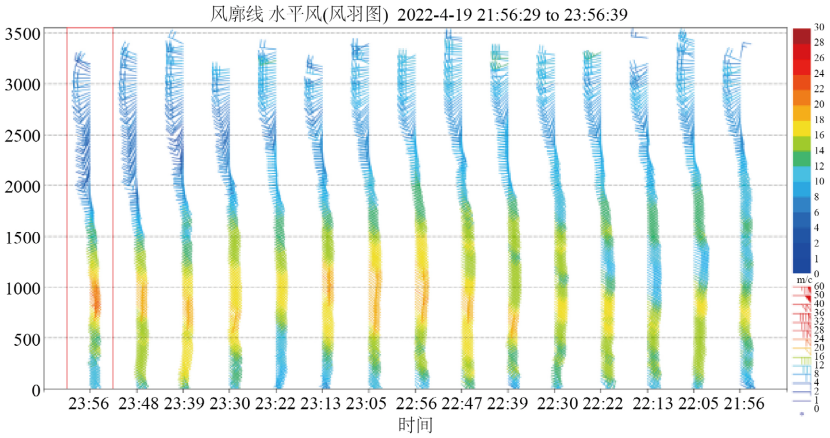


(a)

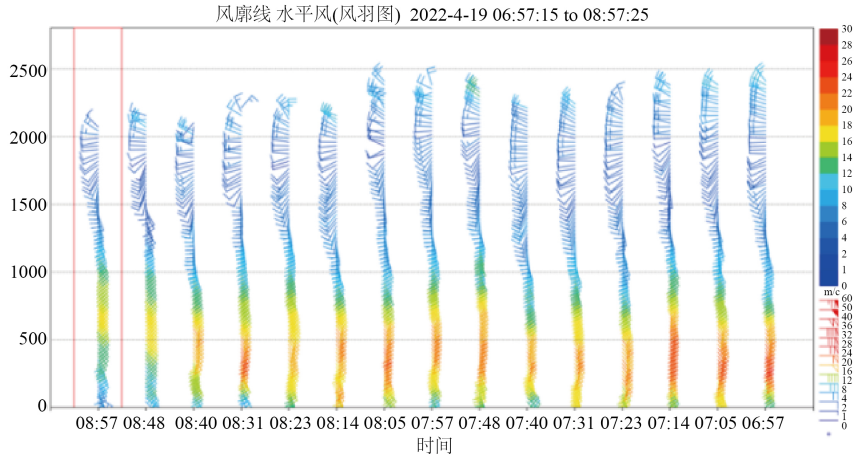


(b)

Figure 9. (a) Wind profile of laser radar at 06~08 on 18; (b) Wind profile of laser radar at 12~15 on 18
图 9. (a) 18 日 06-08 时激光雷达风廓线图；(b) 18 日 12~15 时激光雷达风廓线图



(a)



(b)

Figure 10. (a) Wind profile of laser radar at 21~24 on 18; (b) Wind profile of laser radar at 06~08 on19

图 10. (a) 18 日 21~24 时激光雷达风廓线图；(b) 19 日 06~08 时激光雷达风廓线图

7. AWOS 风切变分析

AWOS 数据是空管运行保障最关键的数据之一，其风向、风速、跑道视程等要素直接关系到飞行安全。AWOS 分别安装在距乌鲁木齐机场东西跑道两端 R07/R25 方向 300 米和距跑道中线(MID) 120 米处，AWOS 大部分气象要素时间分辨率达到分钟级，风向、风速数据时间分辨率达到秒级。

通过风切变计算公式 $\beta = \mathrm{SQRT}(U1^2 + U2^2 - 2U1 * U2 * \cos\theta)$，其中 U1、U2 分别代表跑道两端的风速，$\theta$ 为跑道两端的风向差[11] [12] [13]。

对乌鲁木齐机场 AWOS 资料中 RO7\MID\R25 跑道方向中的瞬时风向、风速进行风切变计算，当机场风切变数值 $\beta \geq 7.7$ m/s，即认为超过风切变强度标准参考值，对本场飞行安全造成威胁，需要进行风切变告警[14] [15] [16]。同时计算 RO7\MID\R25 跑道的风速、风向差，客观、精细分析乌鲁木齐机场风切变超标的位置和原因。

对乌鲁木齐机场 RO7\MID\R25 跑道的风向、风速、风切变做差得到图 11。由图 11 所示，2022 年 4 月 18 日 14:00 前跑道两端风向、风速基本一致，在 14:00~14:20 时间段内 R07\MID 端因存在较明显的风速差，风切变值出现明显波动，其风切变值在大部分时间均超过安全阈值(2.6 m/(s·km))。在 14:50~15:00 时间段内 R07\MID 端因风向差，其风切变值超过安全阈值。

8. 预报预警产品偏差分析

如图 12(a)所示，2022 年 4 月 17 日 11:00 乌鲁木齐机场气象台发布的《等级预警》和《机场警报》中，预报乌鲁木齐机场及终端区 3000 米以下有中度－严重颠簸；4 月 17 日 22:00 开始乌鲁木齐机场预计风向 120˚~160˚，平均风速 5~8 m/s，阵风 10~12 m/s；18 日 2:00~14:00 预计有东南大风，平均风速 10~15 m/s，阵风 15~20 m/s；18 日 14:00~19 日 12:00，平均风速 7~10 m/s，阵风 12~17 m/s。17 日 22:00~18 日 01:00，预计本场及终端区海拔高度 1500 米以下，风向风速变化较大，有轻到中度风切变；但根据实况来看 17 白天未出现明显东南风天气。

如图 12(b)所示，4 月 17 日夜间根据资料更新，对于预报有效时段做出适量延长，略微调整了量级和时间；预计 4 月 17 日 22:00 开始，乌鲁木齐机场预计风向 120˚~160˚，平均风速 5~8 m/s，阵风 10~12 m/s；18 日 5:00~14:00 预计有东南大风，平均风速 10~15 m/s，阵风 15~20 m/s；18 日 14:00~19 日 12:00，平均

风速 7~10 m/s，阵风 12~17 m/s。与实况对比来看，东南风起风和结束时间把握基本准确，对东南风增大的时间偏差也仅有 1 小时左右。18 日基于激光雷达风廓线资料于早晨 07:00 取消大风黄色等级预警，解除机场警报，预计至 19 日 12:00 维持东南风风向，但风速下降至 5~8 m/s，阵风 10~12 m/s。

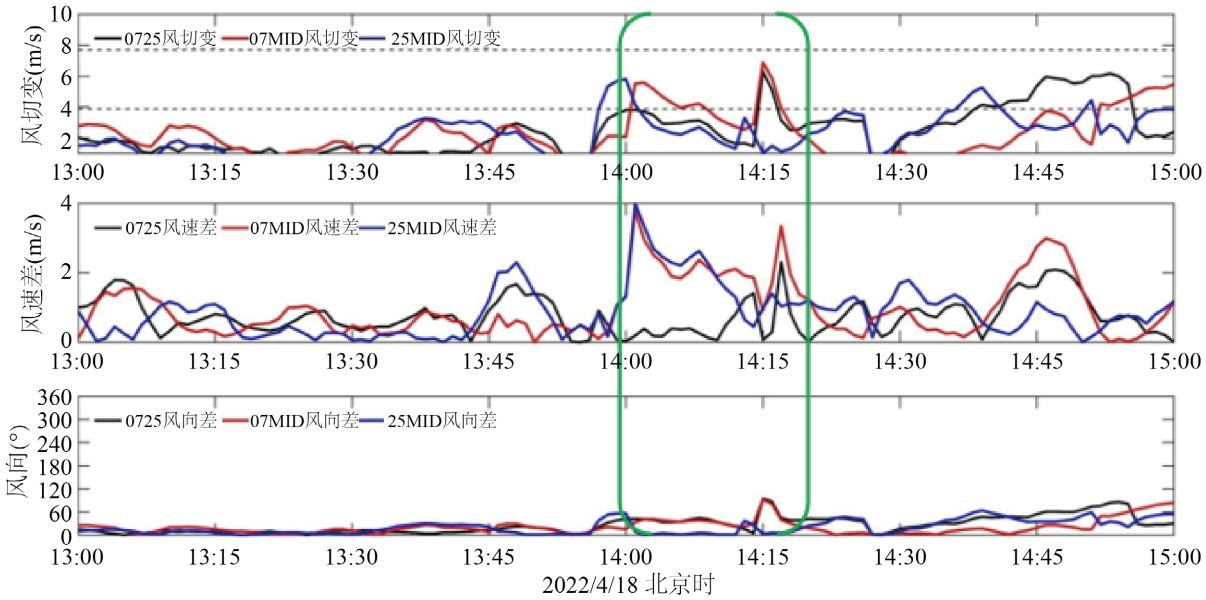
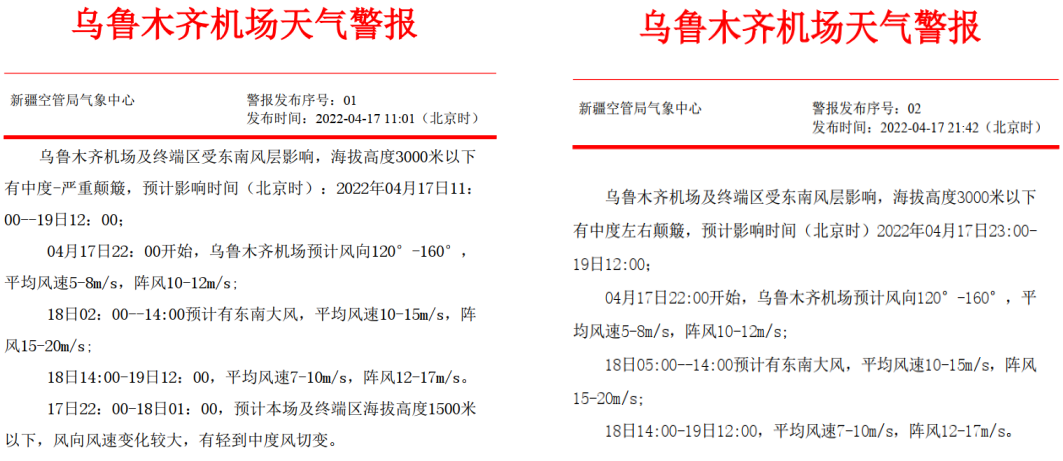


Figure 11. Wind direction, wind speed and wind shear of R07\MID\R25 at Urumqi Airport on April 18
图 11. 乌鲁木齐机场 4 月 18 日 RO7\MID\R25 的风向、风速、风切变差



乌鲁木齐机场天气警报

新疆空管局气象中心　　警报发布序号：01
发布时间：2022-04-17 11:01（北京时）

乌鲁木齐机场及终端区受东南风层影响，海拔高度3000米以下有中度-严重颠簸，预计影响时间（北京时）：2022年04月17日11：00--19日12：00；

04月17日22：00开始，乌鲁木齐机场预计风向120°-160°，平均风速5-8m/s，阵风10-12m/s；

18日02：00--14:00预计有东南大风，平均风速10-15m/s，阵风15-20m/s；

18日14:00-19日12：00，平均风速7-10m/s，阵风12-17m/s。

17日22：00-18日01：00，预计本场及终端区海拔高度1500米以下，风向风速变化较大，有轻到中度风切变。

乌鲁木齐机场天气警报

新疆空管局气象中心　　警报发布序号：02
发布时间：2022-04-17 21:42（北京时）

乌鲁木齐机场及终端区受东南风层影响，海拔高度3000米以下有中度左右颠簸，预计影响时间（北京时）2022年04月17日23:00-19日12:00；

04月17日22:00开始，乌鲁木齐机场预计风向120°-160°，平均风速5-8m/s，阵风10-12m/s；

18日05:00--14:00预计有东南大风，平均风速10-15m/s，阵风15-20m/s；

18日14:00-19日12:00，平均风速7-10m/s，阵风12-17m/s。

(a)　　(b)

Figure 12. (a) 1st airport alert of Urumqi Airport on 17; (b) 2nd airport alert of Urumqi Airport n 17
图 12. (a) 乌鲁木齐机场 17 日第 1 份机场警报；(b) 乌鲁木齐机场 17 日第 2 份机场警报

9. 结论

1) 本次东南大风以锋前减压加回流型为主，各个模式均有预报，但预报持续时间偏长。其中 EC-thin 数值预报对此东南风的预报时长误差较大，预报风场的风速明显比实况偏大。

2) 新疆脊区发展导致冷空气从脊前补充南下，使得东疆至甘肃一带冷槽维持；脊区东升导致高压南

压，高压主体稳定在西藏青海一带并明显加强，地面逐渐形成东高西低、南高北低的气压形势场。北疆地区受低压系统和其前部减压影响，更有利于维持东高西低的气压场形势。以上三点是此次东南风长时间维持的主要原因。

3) 达坂城站与乌鲁木齐机场的气压场与机场风速的相关性较好。

4) 激光雷达风廓线资料 700~1200 米高度及 500 米高度的东南风层资料对本场东南风的临近预报具有一定参考价值。

5) 此次东南大风持续时间长、风速大、阵性强，为飞行安全带来了较大影响。在东南风的部分期间，R07 与 MID 段有明显的风速差，其风切变值超过安全阈值。

6) 本次东南大风的预警发布及时、准确。特别是 17 日夜间发布的预警产品精确度较高，对于长时间的东南大风天气，预报员要实时根据最新的资料更新预警产品，做好航空气象服务保障。

参考文献

[1] 编写组. 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.

[2] 汪青春, 王振宇, 朱西德, 戴升, 张成昭, 李海红. 青海省三江源机场低空风切变的初步分析[J]. 青海气象, 2008(3): 1-6.

[3] 刘峰, 刘式达, 文丹青. 广州白云机场“721”低空风切变天气过程综合分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(1): 23-39.

[4] 陈春元, 罗义, 王刚, 等. 中南地区航空器空中颠簸指数适用分析[J]. 气象科技, 2022, 50(3): 412-419.

[5] 赵建伟, 毕波, 王周鹤, 等. 基于自动气象站和风廓线雷达资料的大理机场风切变分析与应用[J]. 气象科技, 2019, 47(6): 1014-1020.

[6] 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.

[7] 孙少明, 张茜, 朱雯娜, 等. 东南大风诱发的乌鲁木齐机场水平风切变成因分析[J]. 中国空管, 2019, 46(4): 78-82.

[8] 孟齐辉, 吕斌, 刁平. 天山地形对乌鲁木齐东南大风影响的再认识[J]. 新疆气象, 1996(3): 5-9.

[9] 孙少明, 张茜, 朱雯娜, 杜安妮. 乌鲁木齐国际机场典型低空风切变事件分析[J]. 民航学报, 2021, 5(6): 81-88.

[10] 万瑜, 曹兴, 窦新英, 杨莲梅. 乌鲁木齐东南大风气压场中尺度特征分型及其演变分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 724-731.

[11] 王春红, 朱雯娜, 陈阳权. 乌鲁木齐国际机场风切变颠簸天气个例分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(6): 15-21.

[12] 程海艳. 乌鲁木齐国际机场风切变特征及其定量分析[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(2): 87-94.

[13] 王春红. 乌鲁木齐东南大风的低空风切变特征及飞行安全保障[J]. 空中交通管理, 2001(5): 34-37.

[14] 张亚男, 罗浩. 贵阳机场低空风切变气候特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(1): 7-16.

[15] 赵晨阳, 李自鑫. 基于航空器空中报告的风切变事件统计分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1683-1691. https://doi.org/10.12677/AG.2021.1112163

[16] 郭玮彪, 段炼, 窦鑫. 飞行中强低空风切变影响的大数据分析[J]. 电子技术(上海), 2022, 51(4): 31-35.