

2020年11月乌鲁木齐机场一次强降雪天气过程及特征分析

张亚莉, 刘佳, 郭俊含, 尹才虎, 张茜

民航新疆空中交通管理局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年12月9日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月12日

摘要

利用常规气象观测资料、NECP FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析数据、微波辐射计等资料, 对2020年11月29日~30日乌鲁木齐机场强降雪天气过程的环流形势、水汽条件及动力条件等方面进行分析。结果表明: 此次强降雪天气主要是巴湖低涡槽、中高层西南急流、低层西北急流、低层风切变、地面弱冷锋和地形强迫抬升等系统共同作用造成。降雪前, 来自阿拉伯海和黑海的水汽在里海以东汇合后, 随西南急流入侵北疆, 随后由低层西北急流接力输送影响天山北麓一带。低空850 hPa上 θ_{se} 高值中心、低层逆温的存在, 有利于强降雪区的不稳定能量累积。强降雪期间, 机场低层850 hPa位于 θ_{se} 等值线相对密集处的能量锋区内, 低层逆温被中层冷空气侵入, 不稳定能量释放。高层辐散、中低层辐合和垂直次级环流形成和加强使降雪增幅, 高层辐散中心、中低层辐合中心出现的时段与强降雪时段重合。

关键词

乌鲁木齐机场, 强降雪, 急流, 水汽, 微波辐射计

Analysis of the Weather Process and Characteristics of a Heavy Snowfall at Urumqi Airport in November 2020

Yali Zhang, Jia Liu, Junhan Guo, Caihu Yin, Qian Zhang

Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 9th, 2022; accepted: Jan. 4th, 2023; published: Jan. 12th, 2023

Abstract

Using conventional meteorological observation data, NECP FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ reanalysis data, micro-

wave radiometer and other data, the circulation situation, water vapor conditions and dynamic conditions of heavy snowfall weather at Urumqi Airport from November 29 to 30, 2020 were analyzed. The results show that the heavy snowfall is mainly caused by the combined effect of the low vortex trough of Ba Lake, the middle and upper southwest jet stream, the low northwest jet stream, the low-level wind shear, the weak cold front on the ground and the forced lifting of the terrain. Before snowfall, water vapor from the Arabian Sea and the Black Sea converges east of the Caspian Sea, invades northern Xinjiang with the southwest jet stream, and is then relayed by the low-level northwest jet stream to affect the northern foothills of the Tianshan Mountains. The presence of high θ_{se} center and low-level temperature inversion on 850 hPa at low altitude is conducive to the unstable energy accumulation in heavy snowfall areas. During the heavy snowfall, the low level of the airport 850 hPa is located in the energy front area at the relatively dense θ_{se} contour, and the low-level temperature inversion is invaded by the cold air in the middle layer, and the unstable energy is released. High-level divergence, middle and low-level convergence and vertical secondary circulation increase the snowfall amplitude, and the periods of high-level divergence centers, middle and low-level convergence centers coincide with the heavy snowfall periods.

Keywords

Urumqi Airport, Heavy Snowfall, Jet Stream, Water Vapor, Microwave Radiometer

Copyright © 2023 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

强降雪是北方冬季最重要的标志，也是冬季主要灾害性天气之一。随着社会经济快速发展，强降雪的频发给当地的公路、铁路及航空运输带来的损失日益严重，人民的生命财产安全受到了严重的威胁。国内学者从环流形势、物理量特征、成因和发生机制等不同方向对强降雪进行了大量的统计和研究分析[1]-[7]，并取得了一定的成果。顾佳佳等[8]分析河南暴雪得出，干冷东北急流与强盛暖湿急流在暴雪区交汇，为暴雪提供了有利的水汽和动力条件。张萍萍等[9]对湖北干湿雪过程对比发现，干雪水汽层次浅薄，低层冷平流强，层结稳定，动力辐合位于中高层；湿雪水汽充沛，低层暖平流强，大气不稳定性增加，具有深厚上升运动区。阎琦等[10]对辽宁低涡暴雪研究表明，低涡是暴雪引发的直接原因，而对正涡度变率贡献最大的强迫项分别是散度项和涡度垂直输送项。张芹芹等[11]和刘畅等[12]对山东强降雪分析发现，山东省极端降雪发生在江淮气旋和回流天气形势下，受高空槽、低层切变线影响，配合低层西南急流，强降雪落区位于水汽通量大值带左侧水汽通量散度辐合中心附近。

近年来，新疆学者对北疆强降雪也做了大量的研究，研究表明，近 59 年北疆降雪日数、降雪量、降雪强度和降水量呈现上升趋势[13]。北疆暴雪水汽以接力方式输送，与北方冷空气、中纬西风和西南急流密切相关，低层辐合、中高层辐散是上升运动的动力维持机制[14][15][16]。一些学者对乌鲁木齐强降雪研究发现，乌鲁木齐市暴雪分为槽前西南气流型、高空槽东移型和强锋区型，形成乌鲁木齐市暴雪的机制为低层偏北气流遇山堆积迫使暖湿空气抬升形成“冷垫”，并与 500 hPa 以上西南气流形成强垂直风切变和深厚的锋生区，暴雪的水汽输送主要为西南、偏西和西北路径，水汽在中低层的辐合上升明显[17][18][19]。对乌鲁木齐机场来说，冬季强降雪、低能见度等是影响飞行安全和正常的主要天气。降雪对飞行的影响主要表现在雪片过大使能见度恶劣，雪片贴在飞机前挡玻璃会阻碍目视飞行，中-大雪还会造

成机场跑道积雪和结冰,严重影响飞机起降,造成机场关闭等情况。目前,气象学者对乌鲁木齐的极端暴雪天气研究较多,但是对乌鲁木齐机场强降雪的研究相对较少。因此,研究乌鲁木齐机场强降雪天气过程及特征,以期对今后强降雪预报提供一定的参考,减小冬季复杂天气对航班正常造成的影响。

2. 天气实况

2020年11月28日夜间~30日白天,北疆大部、天山山区、东疆及南疆西部山区自西向东出现降雪天气过程。强降雪区域主要集中在北疆西部、北疆沿天山一带及天山山区,局地出现大-暴雪天气。本文采用新疆降水等级中的24h降雪量级:6.1~12.0 mm为大雪,大于等于12.1 mm为暴雪[20]。28日08时~29日08时(北京时,下同),伊犁州伊宁县、博州博乐县、温泉县、塔城裕民县共4站出现暴雪天气,降水量为12.1~17.0 mm,伊犁州伊宁市、尼勒克县、博州精河县、塔城托里县、沙湾县共5站出现大雪天气,降水量为7~10 mm,新增积雪深度8~16 cm,最大降雪中心出现在博州博乐市,主要降雪时段为28日19时~29日01时。随着系统东移,29日08时~30日08时,北疆西部降雪渐弱,强降雪区东移至天山北坡,博州温泉县、乌鲁木齐天山区、新市区、米东区、头屯河区、昌吉州昌吉市共7站出现大雪天气,降水量为6.1~8 mm,最大降雪中心出现在博州温泉县,主要降雪时段为29日08时~21时。

11月29日~30日,乌鲁木齐地窝堡国际机场(以下简称“机场”)迎来一次强降雪天气过程。降雪自29日凌晨01:00持续至30日08:39,持续32个小时,过程降水量6.2 mm,新增积雪深度13 cm,主要降雪时段为29日11:30~18:30,其中29日14:00~14:30出现短时中雪。29日01:00~24:00,机场过程降水量为6.1 mm,新增积雪深度13 cm,按照新疆本地24h降雪等级达到大雪量级。据统计可知,近5年(2017~2021年)机场的日降雪中,29日的日降雪量级位居第五,日新增积雪深度位居第三;近5年11月机场的日降雪中,29日的日降水量级和日新增积雪深度均位居第一。29日机场强降雪天气过程对空管运行影响较大,因降雪天气,出港航班取消38架次,延误航班68架次(延误2小时以上12架次),航班正常率59.09%,严重影响机场进出港航班正常率。

3. 环流形势及影响系统

500 hPa,欧亚大陆为两槽两脊形势,欧洲西部和西西伯利亚为脊区,欧洲中部-乌拉尔山一带和亚洲东部为宽广的槽区。28日08时,500 hPa欧洲中部-乌拉尔山槽后北风带建立,最大风速达 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,北风带引导冷空气南下堆积,副热带锋区和极锋锋区在 40°N 附近交汇,槽前西南气流明显加强。此时新疆区域为浅脊控制,配合有暖平流,脊不断向北加深发展,后部冷槽落后于高度槽,槽发展加强。28日20时,500 hPa欧洲西部脊衰退,欧洲中部-乌拉尔大槽发展东移,随着欧洲东部不断长脊,欧洲中部-乌拉尔大槽分裂出两个低涡中心,分别位于欧洲中部和巴湖,巴湖低涡不断发展加强并南伸至 40°N ,低涡前部西南急流强盛,最大风速达 $38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图1(a))。700 hPa塔城和伊宁等地出现低空偏西急流,风速最大达 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,博乐出现西北-西南风切变,伊宁出现风速的辐合(图1(c))。850 hPa塔城-克拉玛依-沙湾一带出现西北-西南风切变。29日02时~20时,500 hPa欧洲东部脊不断发展加强,脊顶逐渐北伸至 65°N ,使得巴湖低涡缓慢东移,自西向东影响新疆北部区域,低涡前部不断有短波分裂东移(图1(b))。随着急流带进一步东移,北疆西部-北部-天山北麓高空出现西南急流,300 hPa急流最大风速为 $46\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,集中在伊犁河谷-塔城等地。低空出现西北急流,850 hPa急流最大风速为 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,集中在塔城-克拉玛依-乌鲁木齐一带(图1(d)),14~20时乌鲁木齐附近出现西北-西南风切变及风速辐合区。高低空急流的配置,为降雪区水汽补充提供有利条件。29日20时,高度槽落后于温度槽,700 hPa的槽线落后于500 hPa槽线,转变为前倾槽,使得低涡快速减弱。30日,低涡不断填塞,至08低涡消散,新疆转为弱横槽前部西北气流控制。

地面上,28日08时,冷锋位于巴湖以西,锋后正变压中心为+9.9 hPa,锋前负变压中心为-2.4 hPa,

14时, 锋区东移至巴湖以东西部国境线, 3小时变压中心加强至+10.0 hPa, 锋面强度加强, 20时, 锋面位于北疆西部-伊犁河谷-天山山区西段, 此时北疆西部出现强降雪。29日08时, 锋前锋后变压迅速减弱, 锋后正变压减弱至+1.2 hPa, 锋后负变压减弱至-1.3 hPa, 锋面强度减弱、移速减缓, 北疆大部已经出现降雪, 14时, 弱锋面位于北疆东部-乌鲁木齐-天山山区中段, 20时, 锋面逐渐消散。

综上所述, 巴湖低槽在东移过程中表现出“后倾槽”-“同位相槽”-“前倾槽”的高低空环流配置演变特征, 当低槽为典型的后倾结构, 大气斜压性强, 有利于上升运动加强和强降雪产生, 当低槽转变为前倾结构时, 降雪强度逐渐减弱至结束。中高层西南急流和低层西北急流的出现有利于水汽输送, 为降雪提供充足的水汽条件。低层风切变和风的辐合、地面弱冷锋及地形强迫抬升作用等中小尺度系统为降雪提供有利的动力条件。此次强降雪天气过程中, 冷空气沿西方路径向东移动, 源地为欧洲地区, 冷高压前部不断有小股冷空气入侵新疆地区, 降雪特点为时间长, 范围广, 强降雪区局地性明显, 降温幅度小。

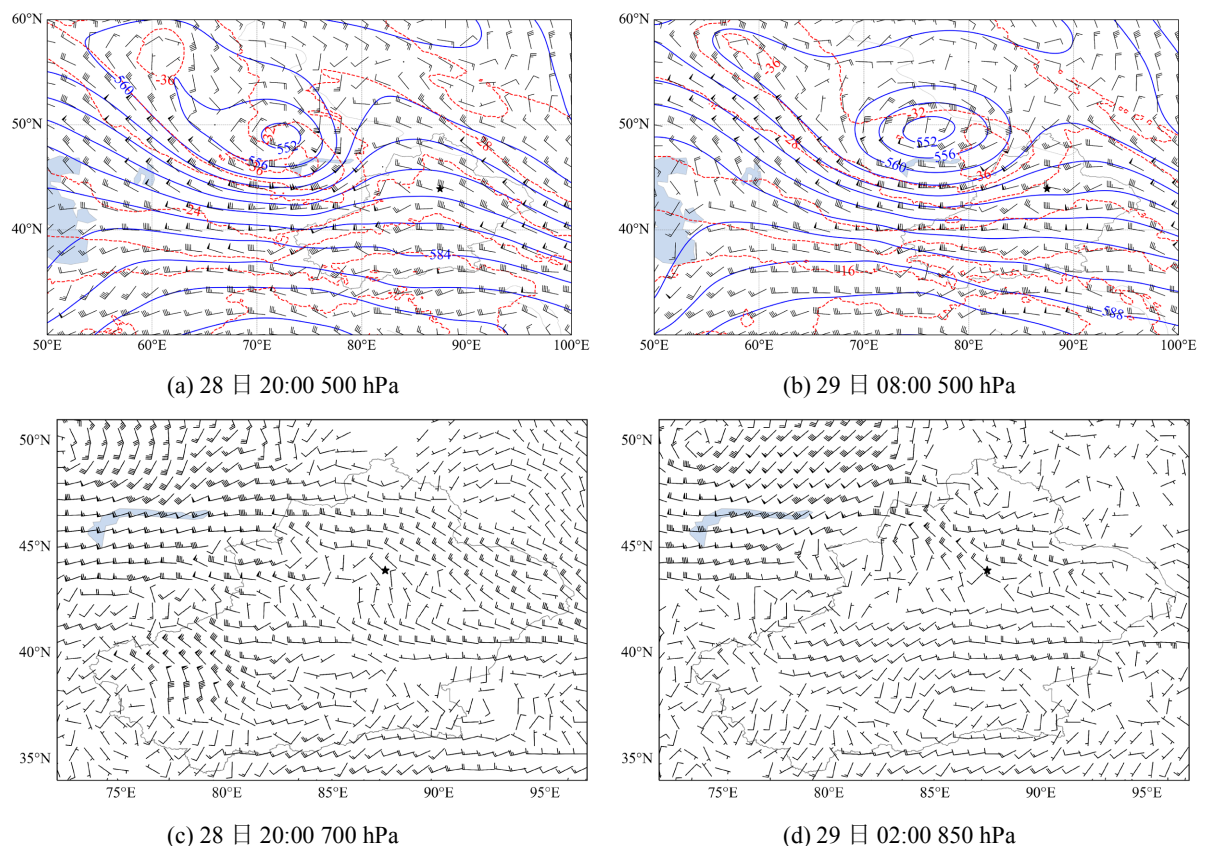


Figure 1. 500, 700 and 850 hPa circulation on the 28th and 29th (altitude (blue line: dagpm), temperature (red line: °C) and wind field map, the location of the airport in the ★ figure (the same below))

图 1. 28日和29日500、700及850 hPa环流形势图(高度(蓝线: dagpm)、温度(红线: °C)及风场图, 图中★为机场位置(以下同))

4. 水汽条件

从850 hPa的水汽通量和风场水平分布分析, 强降雪前期, 27日08时, 阿拉伯海附近有水汽通量带随着西南急流向东北方向输送, 水汽通量中心大值区 $> 10 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 黑海附近有中心强度 $4 \sim 6 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量带沿着西北急流向西南方向输送。27日20时, 西南急流与西北急流在里海以东汇合, 交汇区域水汽通量中心值为 $8 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 伴随着低涡东移, 水汽缓慢耗散。28

日 20 时,水汽沿着低涡底前部的偏西急流快速东移影响北疆西部,中心强度值为 $6\sim 8 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2(a)),与 2016 年北疆暴雪过程中低层最大水汽通量持平。29 日 02 时,受地形的影响,强西北气流沿天山北麓到达乌鲁木齐低空,伴随着西北急流的水汽通量中心强度值为 $4\sim 6 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2(b)),大于 2015 年乌鲁木齐极端暴雪的中低层最大水汽通量,为强降雪区提供充足水汽条件。

从 850 hPa 的水汽通量散度分析,28 日 14 时,中心值达 $-10 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽在巴湖以东强烈辐合,塔城地区的水汽通量散度中心值达 $-8\sim -6 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,有明显水汽辐合。28 日 20 时,充足的水汽沿着偏西急流进入北疆西部,塔城-博乐-伊宁一带出现强烈的水汽辐合区,水汽通量散度中心强度迅速增强至 $>10 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2(c))。29 日 02 时,水汽随着西北急流东南而下,天山北坡的水汽通量散度增强至 $-10\sim -8 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2(d)),强于 2015 年乌鲁木齐极端暴雪的中低层最大水汽通量散度。

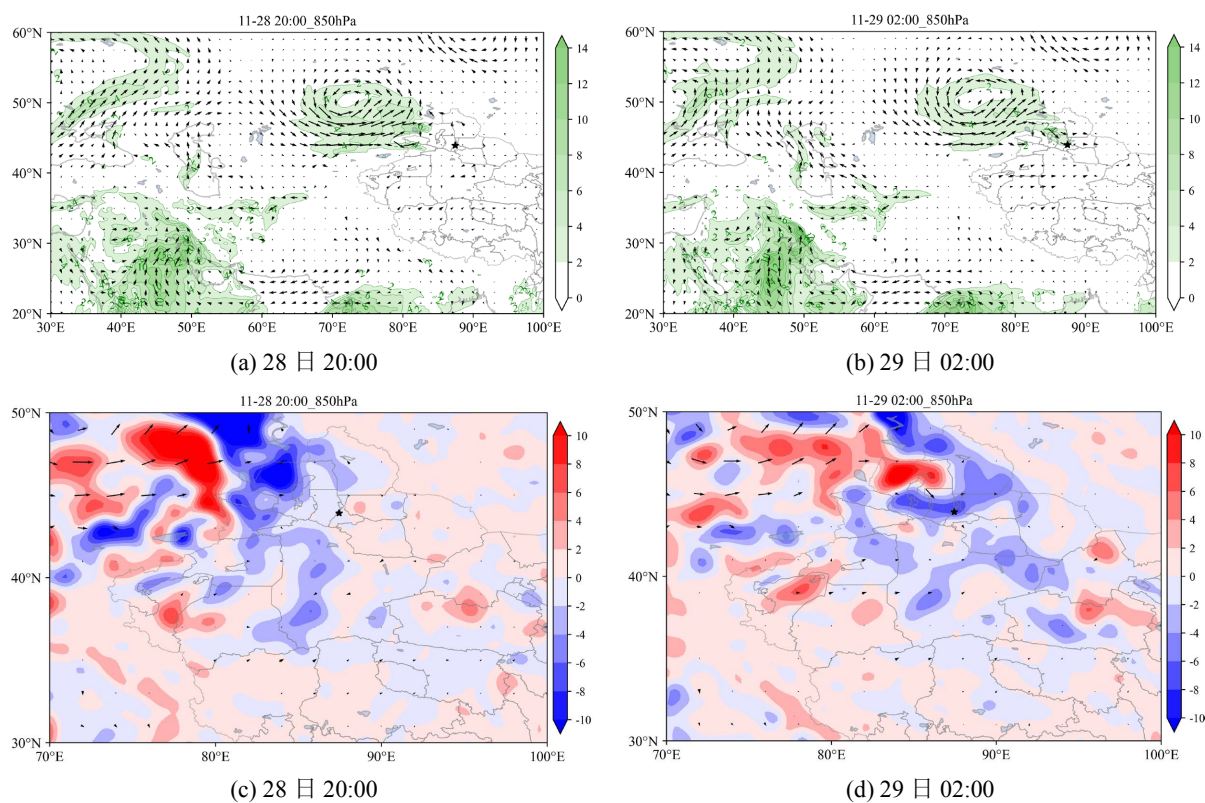


Figure 2. Water vapor flux ((a)~(b), unit: $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence ((c)~(d), unit: $\times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) on the 28th and 29th

图 2. 28 日和 29 日 850 hPa 的水汽通量((a)~(b), 单位: $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)及水汽通量散度((c)~(d), 单位: $\times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

5. 动力和热力条件

5.1. 散度场分析

由图 3 可知,28 日 20 时~29 日 02 时,机场 700 hPa 以下和 600 hPa 以上为弱辐散,有弱的下沉气流,600~500 hPa 为弱辐合场,有弱的上升气流。随着系统东移,29 日 02 时,850~500 hPa 辐合明显增强,辐合中心位于 600 hPa,强度为 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,850~200 hPa 转变为上升区,上升中心位于 500 hPa,强度为 $8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,使得中低层上升运动逐渐增强,此时机场开始出现降雪。29 日 08 时~20 时,400 hPa 以下为强

辐合场, 辐合中心位于 600~500 hPa, 中心强度为 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 400 hPa 以上为辐散场, 中心值为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这种高层辐散、中低层辐合的配置形成后, 使得中低层的大气垂直上升运动增强至 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 强上升运动中心位于 900 hPa 和 500 hPa, 造成机场降雪强度加强, 与机场强降雪集中时段基本一致。29 日 20 时, 中低层辐合明显减弱, 辐合中心位于 700~400 hPa, 强度减弱为 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 上升气流随之减弱, 中心位于 400~300 hPa, 强度为 $2 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 降雪强度明显减小。从以上分析发现, 散度场随高度变化与降雪强度变化关系密切, 当高层辐散、中低层辐合的散度场配置形成后, 大气抽吸作用加强使得垂直上升运动加强, 降雪强度增强。出现高层辐散中心、低层辐合中心的时段与短时强降雪时段重叠, 反之, 降雪强度减弱。

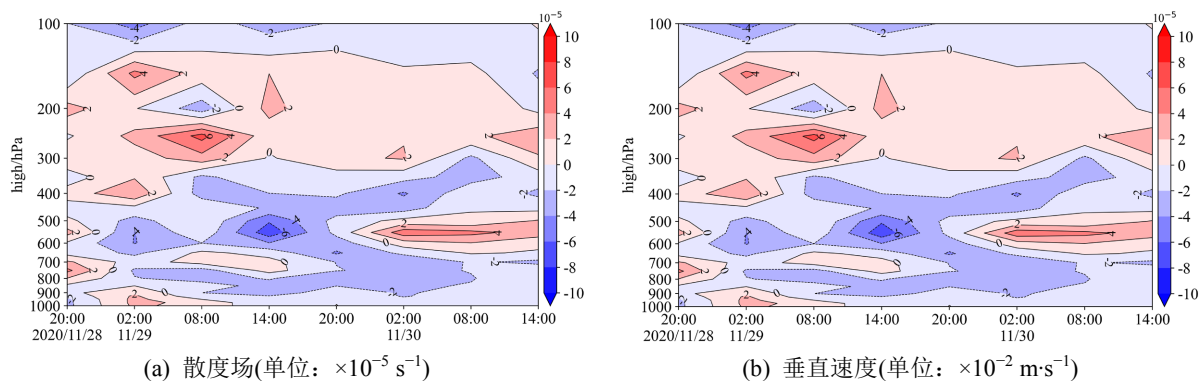


Figure 3. Time series diagram of vertical velocity and divergence field of the airport from 08:00 on the 27th to 20:00 on the 30th

图 3. 27 日 08 时~30 日 20 时机场垂直速度和散度场的时间序列图

5.2. 热力条件

分析中低层假相当位温(θ_{sc})可知, 降雪开始前 28 日 14 时, 925~700 hPa, 北疆西部塔城、伊犁河谷等地上空有高能舌沿着伊犁河谷向东伸至乌鲁木齐地区, 中心分别位于伊犁河谷和乌鲁木齐南部山区, 中心值为 35°C 和 30°C (图 4(a)), 暴雪区低层为暖湿气团控制, 低层高温高湿的不稳定能量与中层向下渗透的冷空气导致中低层位势不稳定, 有利于强降雪生成。29 日 02 时, 随着西部降雪开始, 北疆西部低层有冷空气侵入, 850 hPa 上乌鲁木齐南部山区高能中心继续维持, 高能中心的维持使乌鲁木齐附近不断积累能量, 机场位于高能中心与低能中心交汇处, 即等值线相对密集处的能量锋区内(图 4(b)), 为乌鲁木齐附近强降雪提供了热力条件。

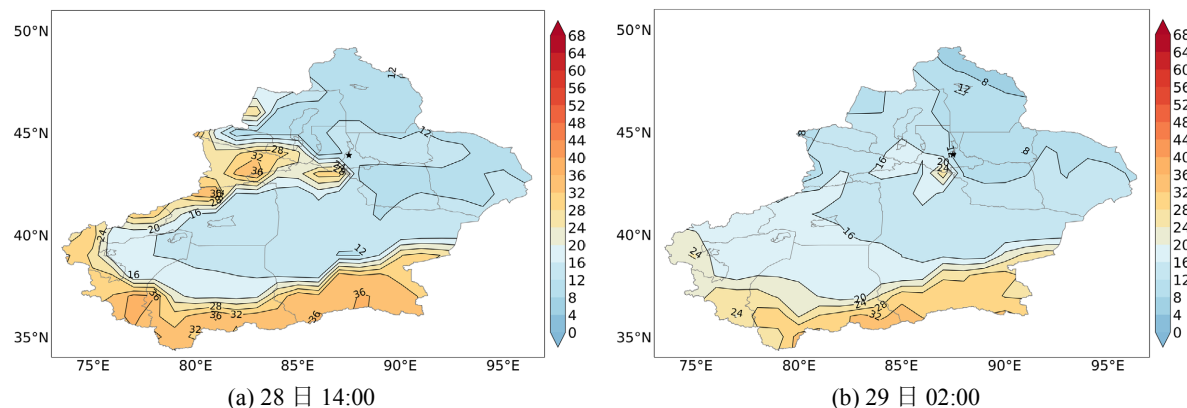


Figure 4. 850 hPa false equivalent temperature in Xinjiang region from 14:00 on the 28th to 02:00 on the 29th (unit: $^\circ\text{C}$)

图 4. 28 日 14 时~29 日 02 时 850 hPa 新疆区域假相当位温(单位: $^\circ\text{C}$)

分析微波辐射计温度廓线可知,28日20时,机场低空具有强度较弱的逆温层,逆温层顶高度为1400m,逆温强度为 $0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (图5(a)),张云惠等[18]认为降雪发生前逆温层的存在,对不稳定能量有储蓄和积累作用,而机场降雪前低空逆温的存在,有利于不稳定能量在低层累积。29日00时~02时,中层有冷空气向下渗透,打破机场近地面层逆温层(图5(b)),近地面暖气团被侵入冷空气抬升,不稳定能量释放,动力作用加强,造成机场降雪天气。

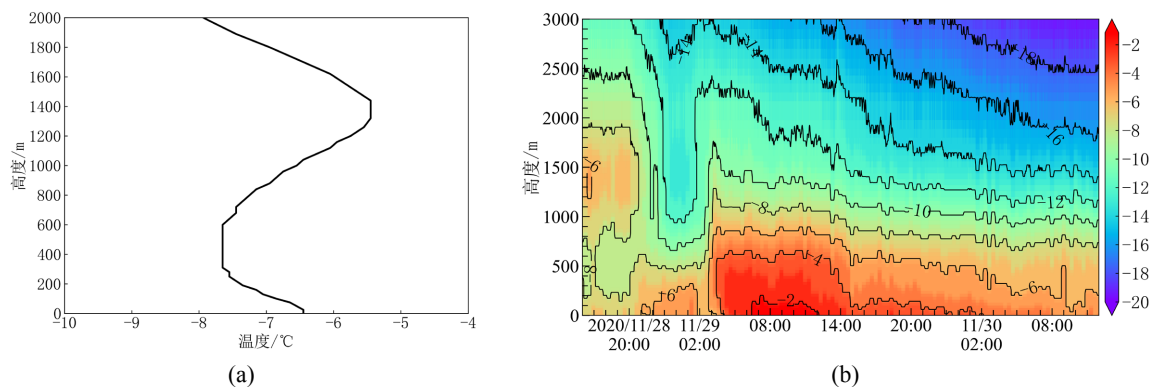


Figure 5. Vertical line of temperature at 20:00 on the 28th (a) and temperature profile of 28th~30th (b), unit: $^{\circ}\text{C}$ of airport microwave radiometer

图 5. 机场微波辐射计 28 日 20 时温度垂直线(a)和 28 日~30 日温度廓线图(b), 单位: $^{\circ}\text{C}$

5.3. 垂直环流特征分析

图 6 为沿着 44°N 对新疆做物理量场的垂直空间剖面图,分析可知,29日02时,在高低空西南急流配置环流下,伊犁河谷上空深厚的大湿区随着西南急流快速向东移,由于地形阻挡作用,机场西侧低层气流在下坡作用下转为西北急流,机场低空具有明显的西北-西南风切变,机场上空强湿区主要位于中高层(图6(a))。垂直速度和散度场在空间剖面上具有明显的后倾结构,在 $86^{\circ}\text{E}\sim 88^{\circ}\text{E}$ 空间剖面上,600 hPa 以下为强辐合场,中心在 700~600 hPa,强度为 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图6(c)),600 hPa 以上为辐散场,中心强度为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图6(e))。在中高层辐散、低层辐合的配置下,200 hPa 以下为上升运动区,中心位于 700~600 hPa,强度为 $8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上升运动加强,机场开始降雪。此时机场西侧为上升运动区,东侧为下沉运动区,在局地形成垂直次级环流,有利于强降雪的产生。

29日14时,随着西北急流进一步东移,引导一部分水汽向低层补充,在 $86^{\circ}\text{E}\sim 88^{\circ}\text{E}$ 空间剖面上,整层具有充足的水汽条件,在 $88^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 呈现“上干下湿”的逆湿特征,层结不稳定加强(图6(b))。垂直速度和散度场在空间上的后倾角度减小,强度减弱,在 $86^{\circ}\text{E}\sim 88^{\circ}\text{E}$ 垂直空间剖面上,400 hPa 以下转变为辐合场,中心位于 600~500 hPa,强度为 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,400 hPa 以上为辐散场,强度为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图6(d)),高层辐散、中低层辐合加强,使得上升运动加强,上升中心位于 500~600 hPa,强度为 $8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图6(f))。机场东侧下沉气流加强,中心增强至 $-8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时垂直次级环流强度最强,机场出现短时强降雪。由此可见,高层辐散、中低层辐合和垂直次级环流的加强有利于降雪的增强。

29日20时,机场低层风场减弱,风向较乱,随着水汽东移耗散,大湿区集中在中低层,300 hPa 以下具有弱辐合场,强度减弱至 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,上升运动随之减弱,上升区主要位于 700 hPa,强度减弱至 $-2 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,近地面层为弱的下沉气流,不利于强降雪的继续维持,此时机场降雪强度明显减弱。30日08时,低层水汽逐渐耗散,机场 300 hPa 以下转变为下沉气流,不利于降雪维持,至此机场降雪天气结束。

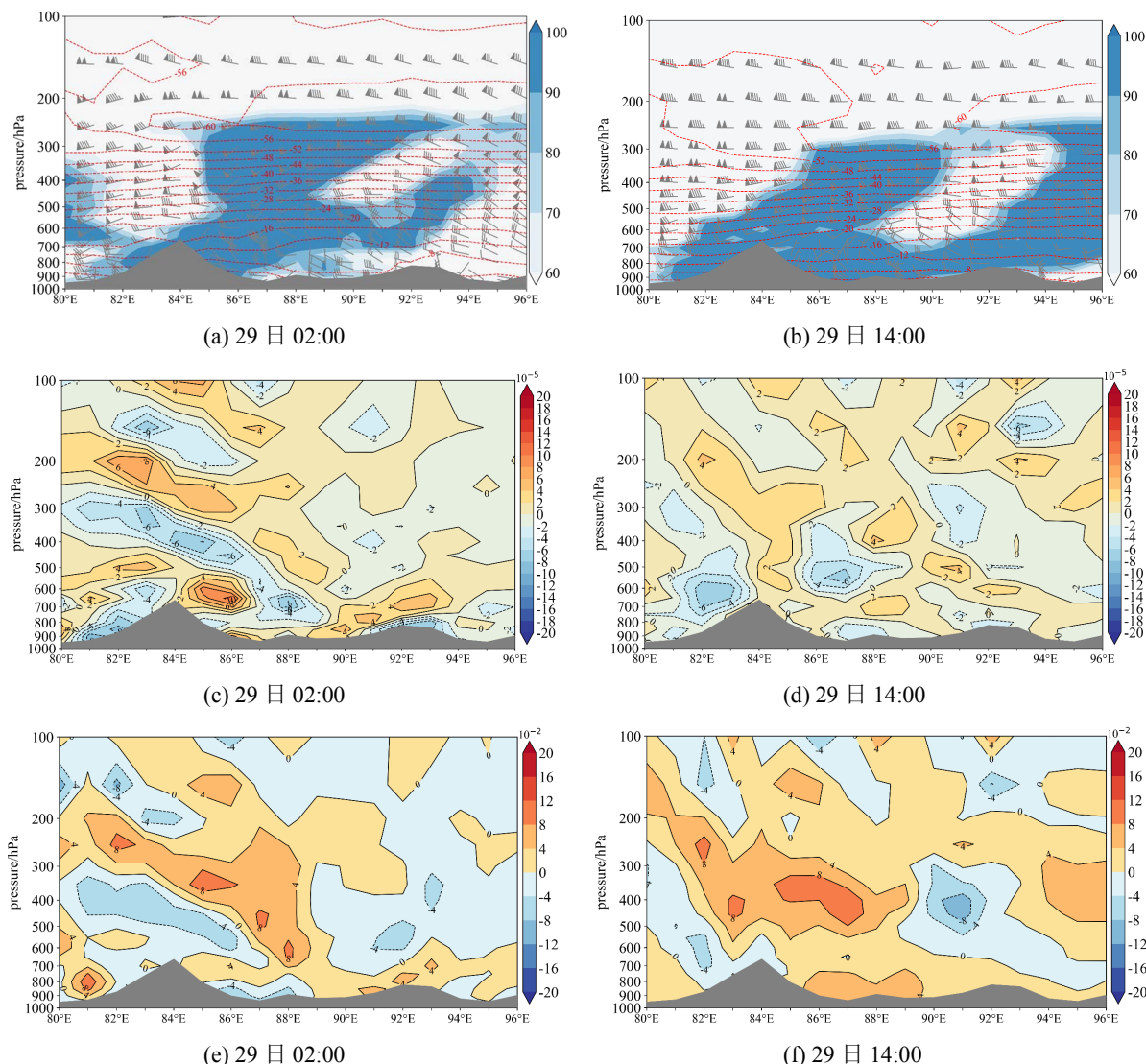


Figure 6. Spatial profile along 44°N vertical circulation ((a)~(b), relative humidity (color zone: %), temperature (red line: °C) and wind field diagram), divergence field ((c)~(d), divergence field (unit: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and vertical velocity ((e)~(f), vertical velocity (unit: $\times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$))

图 6. 沿 44°N 垂直环流((a)~(b), 相对湿度(彩色区: %)、温度(红线: °C)及风场图)、散度场((c)~(d), 散度场(单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)及垂直速度((e)~(f), 垂直速度(单位: $\times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$))的空间剖面

6. 结论

1) 在巴湖低槽为后倾结构, 中高层偏西急流和低层西北冷湿急流叠加的高低空有利环流背景下, 由低空风切变和风的辐合、地面弱冷锋及地形强迫抬升等中小尺度共同作用造成北疆西部的塔城、伊犁河谷及乌鲁木齐周边的强降雪天气。

2) 水汽的主要来源为阿拉伯海和黑海。来自阿拉伯海的西南急流和来自黑海的西北急流携带着充沛水汽在里海以东的汇合后, 沿偏西路径随着巴湖低涡前部西南急流和低层西北急流接力将水汽输送至北疆, 配合低层的水汽的辐合, 为强降雪提供充足的水汽条件。

3) 高层辐散、中低层辐合的高低空配置为强降雪提供动力条件。散度场随高度的变化与降雪强度关系密切, 出现高层辐散中心、中低层辐合中心的时段与强降雪时段重合。高层辐散、中低层辐合和垂直

次级环流的形成和加强有利于降雪强度增幅。

4) 降雪前暴雪区低空 850 hPa 上 θ_{se} 高值中心和逆温层的存在, 使不稳定能量不断储蓄和累积。强降雪期间, 在 850 hPa 上机场处于 θ_{se} 等值线相对密集处的能量锋区内, 低层逆温被中层冷空气侵入, 不稳定能量得到释放, 为强降雪提供热力条件。

参考文献

- [1] 王其英, 冀翠华, 刘琛, 等. 河南中东部强降雪物理量特征统计分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 24-29.
- [2] 杨杰, 范俊红, 段宇辉, 等. 河北北部强降雪统计特征及预报[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(1): 48-55.
- [3] 陈双, 符娇兰. 华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J]. 气象, 2021, 47(1): 36-48.
- [4] 李刚, 刘畅, 曹玥瑶, 等. 一次 1 月山东半岛东部极端海效应暴雪的发生机制分析[J]. 气象, 2020, 46(8): 1074-1088.
- [5] 杜佳, 杨成芳, 戴翼, 等. 北京地区 4 月一次罕见暴雪的形成机制分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1363-1374.
- [6] 王宁, 秦玉琳, 姚帅, 等. 不同触发条件下吉林省一次极端暴雪大风天气过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 1-9.
- [7] 马淑萍, 冉令坤, 曹洁. 复杂地形强降雪过程中垂直运动诊断分析[J]. 大气科学, 2021, 45(5): 1127-1145.
- [8] 顾佳佳, 武威. 2014 年 2 月 4-7 日河南暴雪过程的环流特征及其持续原因[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 117-125.
- [9] 张萍萍, 吴翠红, 祁海霞, 等. 2013 年湖北省两次降雪过程对比分析[J]. 气象, 2015, 41(4): 418-426.
- [10] 阎琦, 温敏, 陆井龙, 等. 两次引发辽宁暴雪过程低涡的动力发展机制[J]. 气象, 2016, 42(4): 406-414.
- [11] 张芹, 秦增良, 张秀珍, 等. 山东春季两次强降雪过程对比分析[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 76-86.
- [12] 刘畅, 杨成芳. 山东省极端降雪天气事件特征分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 957-967.
- [13] 刘成武, 安大维, 张俊兰, 等. 1961-2019 年北疆冬季不同等级降雪变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(4): 115-122.
- [14] 牟欢, 闵月, 洪月, 等. 2016 年 3 月北疆一次暴雪天气过程诊断分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6): 26-33.
- [15] 于碧馨, 洪月, 张云惠, 等. 天山两麓一次极端暴雪天气多尺度配置及机制分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 11-18.
- [16] 李桢宇, 李如琦, 李娜, 等. 新疆北部持续暖区暴雪过程动力特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 53-60.
- [17] 李桢宇, 万瑜, 张俊, 等. 1961-2019 年乌鲁木齐市暴雪环流分型及其成因分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 379-388.
- [18] 张云惠, 于碧馨, 谭艳梅, 等. 乌鲁木齐一次极端暴雪事件中尺度分析[J]. 气象科技, 2016, 44(3): 430-438.
- [19] 许婷婷, 张云惠, 于碧馨, 等. 2015 年 12 月乌鲁木齐极端暴雪成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 23-29.
- [20] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分[J]. 新疆气象, 2005(3): 7-8.