

九寨黄龙机场两次降雪过程对比分析

窦体正, 赵德显

中国民航西南地区空中交通管理局云南分局, 云南 昆明

收稿日期: 2024年6月1日; 录用日期: 2024年7月1日; 发布日期: 2024年7月8日

摘要

本文利用欧洲中期预报中心发布的ERA5再分析资料、NCEP/NCAR再分析资料、气象常规资料、九寨黄龙机场月总薄等对九寨黄龙机场2020~2021年两次10月降雪过程的天气形势、物理量场等进行对比和诊断分析。两次降雪过程均由冷暖气团交汇引起, 高层抽吸作用增强抬升运动有利于降雪的维持。水汽和降温是降雪两个必备的条件, 两次过程分别随着水汽、降温条件的满足而开始。个例一降雪过程水汽条件好, 且有较强的水汽积聚, 降雪量大。600 hPa的 -2°C 线可作为九黄机场10月份降雪过程中低层降温的参考线。正压位涡正值的变化与降雪强度变化一致, 降雪中心位于斜压位涡绝对值得到较大增长的区域; 两次降雪过程九黄机场上空均有倾斜的上升气流存在。

关键词

降雪, 水汽通量散度, 垂直速度, 湿位涡

Comparative Analysis of Two Snowfall Processes in Jiuzhai Huanglong Airport

Tizheng Dou, Dexian Zhao

Yunnan Branch of the Southwest Air Traffic Management Bureau of China's Civil Aviation, Kunming Yunnan

Received: Jun. 1st, 2024; accepted: Jul. 1st, 2024; published: Jul. 8th, 2024

Abstract

This article uses ERA5 reanalysis data, NCEP/NCAR reanalysis data, meteorological conventional data, and monthly total snowfall at Jiuzhai Huanglong Airport released by the European Centre for Medium Range Forecasting to compare and diagnose the weather patterns, physical quantities, and other factors of the two October snowfall processes at Jiuzhai Huanglong Airport from 2020 to 2021. Both snowfall processes are caused by the intersection of cold and warm air masses, and the

enhanced suction effect of the upper level enhances the lifting motion, which is beneficial for maintaining snowfall. Water vapor and cooling are two essential conditions for snowfall, and the two processes begin with the satisfaction of water vapor and cooling conditions. Example 1: During the snowfall process, the water vapor conditions are good and there is a strong accumulation of water vapor, resulting in a large amount of snowfall. The -2°C line at 600 hPa can serve as a reference line for lower level cooling during the snowfall process at Jiuhuang Airport in October. The change in the positive value of the positive pressure potential vortex is consistent with the change in snowfall intensity, and the snowfall center is located in the area where the absolute value of the oblique pressure potential vortex increases significantly; During the two snowfall processes, there were inclined updrafts over Jiuhuang Airport.

Keywords

Snowfall, Vapor Flux Divergence, Vertical Velocity, Wet Potential Vorticity

Copyright © 2024 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/>

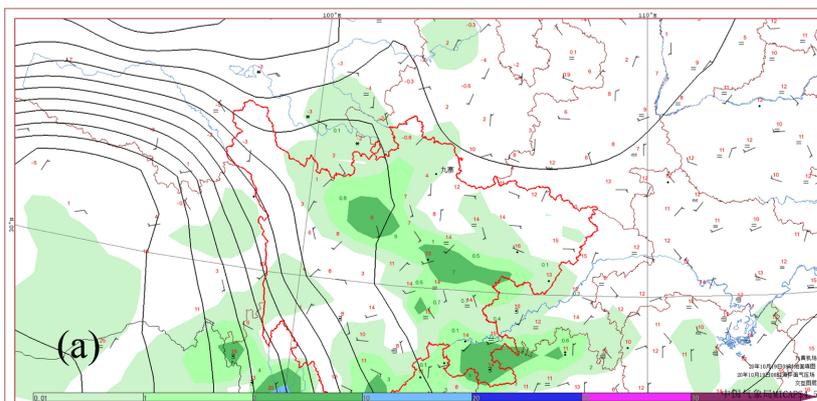


Open Access

1. 引言

九寨黄龙机场地处东经 $103^{\circ}40'56''$, 北纬 $32^{\circ}51'14''$, 海拔高度 3447.6 米, 主降跑道方向 20° , 位于四川省松潘县川主寺镇东北方向 15 km, 地处岷山南坡, 岷江源头, 东靠高山, 南、西、北三面为深沟峡谷, 地势险要, 地形复杂。九黄机场天气气候多变, 既有青藏高原典型的天气气候特征, 又有明显的局地性山地气候特点, 天气十分复杂[1], 影响航班安全、正常的灾害性天气活动频繁, 受地形小气候的影响, 机场区域天气变化快, 给飞行造成巨大影响, 造成飞机返航备降和延误的情况时有发生。根据《九寨黄龙机场航空气候志(2012~2016)》[2], 九黄机场四季均有降雪情况, 累年平均降雪日数为 65 天, 秋季平均降雪日数占全年平均降雪日数的 24.9%, 降雪平均初期为 10 月 1 日。10 月初正逢国庆小长假旅游高峰, 九黄机场航班量大, 降雪天气严重影响了航班的正常运行, 因此研究九黄机场 10 月份的降雪显得尤为重要。本文选取九黄机场 2020 年 10 月 19 日和 2021 年 10 月 10 日两次降雪过程进行对比和诊断分析, 研究其形成机制, 揭示九黄机场 10 月降雪过程的物理机制。

2. 降雪实况



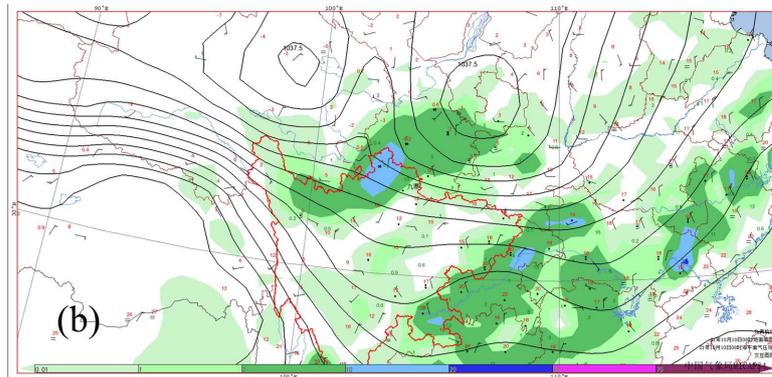


Figure 1. Surface weather charts on October 19, 2020 (a) and October 10, 2021 (b) at 08:00
图 1. 2020 年 10 月 19 日 (a)和 2021 年 10 月 10 日 (b) 08 时地面实况填图

2020 年 10 月 19 日降雪过程(图 1(a), 个例一), 08:00 时降雪主要出现在红原县附近, 九黄机场有小阵雨, 08:50 机场开始下小阵雪, 09:19 下中阵雪, 主导能见度下降至 900 米, 10:50 结束第一波降雪; 18:50 开始第二波降雪, 19:36 出现中雪, 至 21:55 航班结束, 测得积雪深度 6 cm, 上午和晚上的航班均受降雪天气影响延误或取消。2021 年 10 月 10 日的降雪过程(图 1(b), 个例二), 08 时降雪主要出现在红原—若尔盖县—甘肃南部, 冷空气后部有较强的冷高压, 机场附近以阵雨为主。随着冷空气进一步南压入侵, 08:35 机场出现雨夹雪, 08:50 转小雪, 10:30 主导能见度下降至 1200 米, 11:22 降雪结束。受降雪天气及伴随低云的影响, 2 个航班返航, 上午的其余航班均延误。

3. 环流形势分析

3.1. 高空环流分析

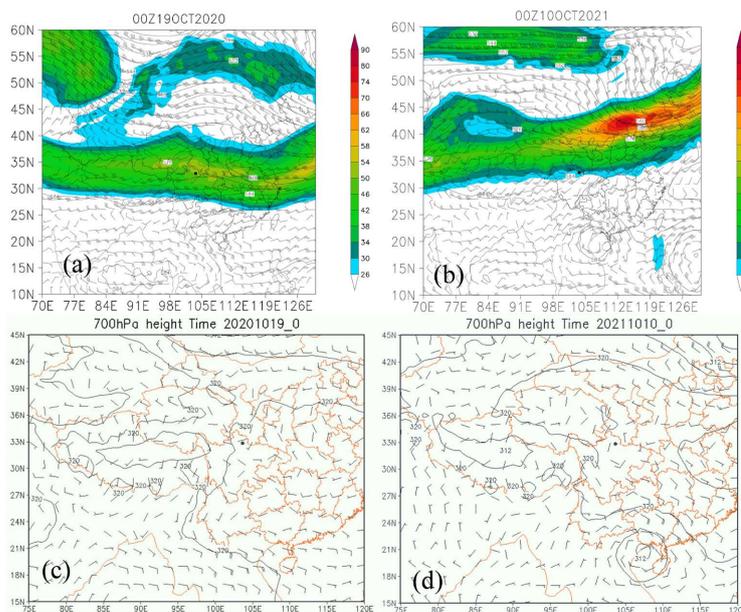


Figure 2. Composite maps of 500 hPa wind speed on October 19, 2020 (a) and October 10, 2021 (b) at 08:00, overlaid with 200 hPa wind speed coloring maps (wind speed in the coloring part ≥ 26 m/s), and composite maps of 700 hPa wind speed on October 19, 2020 (c) and October 10, 2021 (d) at 08:00

图 2. 2020 年 10 月 19 日 (a)和 2021 年 10 月 10 日 (b) 08 时 500 hPa 综合图叠加 200 hPa 风速填色图(填色部分风速 ≥ 26 m/s)、2020 年 10 月 19 日 (c)和 2021 年 10 月 10 日 (d) 08 时 700 hPa 综合图

分析个例一表明, 2020 年 10 月 19 日 08 时(图 2(a)), 200 hPa 中国北方地区上空形成高空急流, 该高空急流有南北两个急流核, 北急流核位于青海 - 甘肃 - 陕西一带, 其入口的强辐散区正对应着四川北部九黄机场附近, 存在反气旋性弯曲; 500 hPa 上高空形势为两槽一脊型, 在川西高原北部到青海东部有一西风槽, 槽后有明显的冷平流, 西风槽发展东移逐渐影响九黄机场, 并带来很强的降温; 孟加拉湾北部南支槽前西南气流将孟湾暖湿水汽向高原东部输送, 冷暖气流在高原的东部交汇辐合。700 hPa (图 2(c)) 上高原北部有一横向的切变辐合区逐渐闭合形成低涡, 并发展东移, 机场位于低涡外围, 有较强的辐合上升气流。

分析个例二表明, 2021 年 10 月 10 日 08 时(图 2(b))机场位于高空急流的右侧, 具有反气旋性切变。500 hPa 上高空形势为一槽一脊型, 低纬度地区形成“双台风”, 中高纬度地区有西风槽东移, 机场为西南气流控制。700 hPa (图 2(d))在川陕边界有一切变线逐渐南压, 随着切变线南压, 冷空气逐渐入侵四川北部, 与西南暖气流在高原东侧交汇, 形成降雪。

综上, 个例一随西风槽东移, 槽后西北气流引导冷空气南下, 个例二冷空气随切变线南压入侵川西高原, 两次降雪过程均由冷暖气团交汇引起; 高层抽吸作用增强抬升运动有利于降雪的维持。个例一有南支槽存在, 水汽条件较好, 降雪量大。

3.2. 地面温压风分析

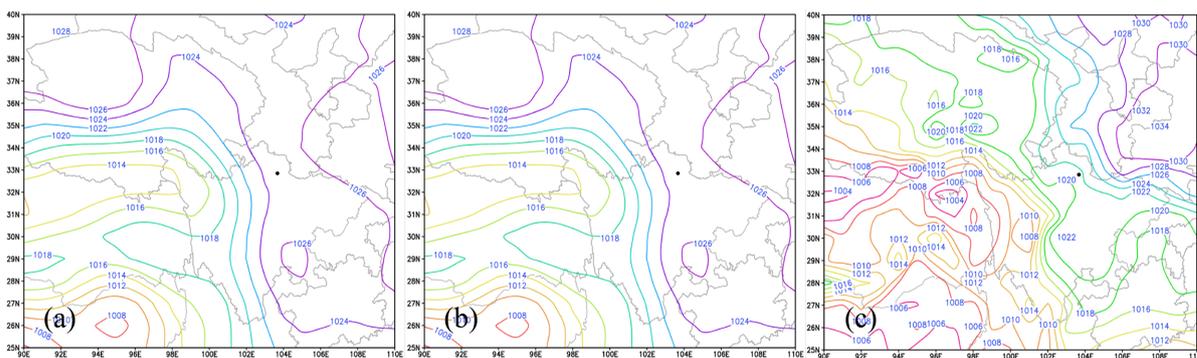


Figure 3. Revised sea level pressure on October 19, 2020 at 08:00 (a), October 10, 2021 at 08:00 (b), and 14:00 (c) Beijing time

图 3. 北京时间 2020 年 10 月 19 日 08 时 (a)、2021 年 10 月 10 日 08 时 (b)和 14 时 (c)修正海平面气压

个例一降雪前机场最低气温 0.7℃, 降雪期间温度维持在 0~2.2℃。19 日 08 时(图 3(a))修正海平面气压 1024 hPa 线南压过机场, 机场修正海平面气压最高值为 1031.2 hPa。午后气温回升至 6.6℃, 修正海平面气压最低将至 1025.2, 降雪停止, 18 时气温降至 2.6℃, 机场修正海平面气压 1027.8 hPa, 随后 18:50 第二波降雪开始。第一波降雪期间维持西南风 1~3 m/s, 第二波降雪开始前逐渐转为东北风 3~8 m/s。个例二降雪前机场最低气温 1.8℃, 降雪期间温度维持在 0.2℃~1.8℃。机场 08 时(图 3(b))修正海平面气压 1024 hPa 线过机场, 机场修正海平面气压最高值 1034.4 hPa, 降雪期间维持东北风, 风速 3~6 m/s, 导致 20 号跑道头顺风超标, 14 时(图 3(c))冷高压已北退, 1022 hPa 线已退回机场北侧。

综上, 九黄机场 10 月降雪天气气温维持在 0~2.2℃, 地面修正海平面气压一般大于 1024 hPa, 机场东北部有冷高压, 地面风向为东北风或弱的偏南风。

3.3. 温度场分析

分析 600 hPa 温度场(图 4(a)), 个例一 19 日 08 时(北京时)在机场附近形成一个-5℃的冷中心, 结合

图 4(b)可知, 午后温度略有回升, 18~21 时后再次降温至 -6°C , 降雪期间 600 hPa 温度一直维持在 -5°C 以下, 个例一低层冷平流很强, 且不断有冷空气补充, 有利于降雪的时间维持。个例二降雪前(10 日 08 时) (图 4(c)) 600 hPa 的 -2°C 等温线南压过机场, 无冷空气补充, 11~12 时再次回升至 -2°C 以上, 降雪停止。根据经验总结, 600 hPa 的 -2°C 等温线可作为九黄机场 10 月降雪过程中低层降温的参考线。

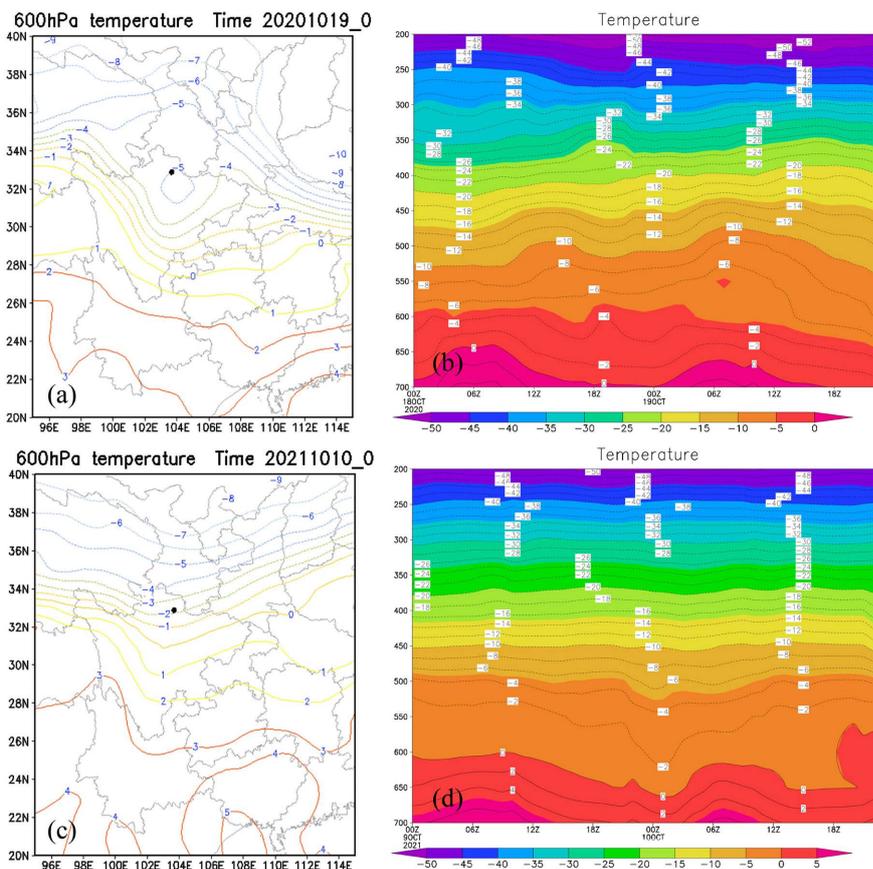


Figure 4. Temperature field at 600 hPa on October 19, 2020 (a) and October 10, 2021 (c) at 08:00; Time series chart of temperature from October 18th to 19th, 2020 (b) and October 9th to 10th, 2021 (d) (with UTC time as the horizontal axis in the chart)

图 4. 2020 年 10 月 19 日 (a)和 2021 年 10 月 10 日 (c) 08 时 600 hPa 温度场; 2020 年 10 月 18~19 日 (b)和 2021 年 10 月 9~10 日 (d) 温度的时间系列图(图中横坐标为 UTC 时间)

4. 物理量诊断分析

4.1. 水汽通量

分析 500 hPa 水汽通量图(图 5)表明, 两次降雪过程水汽均主要来源于 550 hPa~500 hPa 上水汽的输送, 孟加拉湾是主要的水汽来源地。

个例一降雪前(图 5(a))在川西高原上有一片较大的水汽输送带, 水汽通量中心值高达 $6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 九黄机场附近 500 hPa 的水汽通量为 $0\sim 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 西南面有源源不断的水汽往机场方向输送。结合图 5(b)可知, 08~21 时机场上空 600 hPa~500 hPa 一直维持 $2.5\sim 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值区, 中心位于 500 hPa 附近, 为机场长时间的降雪过程提供了充足的水汽, 22 时后水汽通量迅速减小至 $0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 降雪也逐渐减弱。个例二 10 日 00~08 时(图 5(c))机场上空 550 hPa 一

直有较强的水汽输送, 但降温不足, 机场以降雨为主。08 时大值区向 500 hPa 转移, 随后水汽通量逐渐减小, 500 hPa 维持 $4\sim 6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值区。

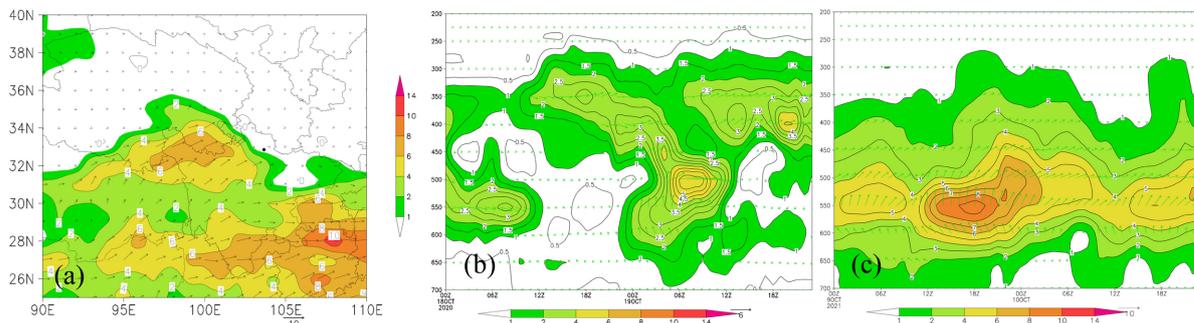


Figure 5. Water vapor flux and water vapor transport direction at 500 hPa on October 19, 2020 at 08:00 (a); Time series charts of water vapor flux from October 18th to 19th, 2020 (b) and October 9th to 10th, 2021 (c) (the horizontal axis in the figure is UTC time, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 5. 2020 年 10 月 19 日 08 时 (a) 500 hPa 水汽通量和水汽输送方向; 2020 年 10 月 18~19 日 (b) 和 2021 年 10 月 09~10 日 (c) 水汽通量时间系列图 (图中横坐标为 UTC 时间, 单位是 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

4.2. 水汽通量散度

区域强降水(雪)与大气中水汽的辐合有关, 水汽通量散度能够较好反映大气中水汽的含量和聚集程度 [3] [4], 充足水汽的汇合是大雪和暴雪发生的重要物理条件之一, 大气中水汽的多少、传输特点及其聚散度对降水大小有着重要影响 [5]。

个例一(图 6(a))降雪前在川西高原东部有一呈西北-东南向的带状辐合中心, 中心强度达 $-3.5 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$, 南支槽前西南气流输送过来的水汽在该区域积聚, 并逐渐移向机场, 10 月 19 日 08 时机场上空的水汽通量散度为 $-1.5 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$, 午后水汽逐渐移向机场东北区域, 降雪停止。20 时(图 6(b))水汽再次在川西高原形成大片的带状辐合中心, 中心强度为 $-4 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$, 且辐合中心随着西南气流不断靠近机场, 机场开始出现中等强度的降雪。个例二(图 6(c))降雪前水汽辐合中心位于红原附近, 中心强度仅为 $-1.5 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$, 对红原出现较强的降雪(图 1(b)), 机场附近水汽通量散度为 0, 降雪所需水汽主要是沿着西南气流输送过来的, 由于没有水汽的积聚, 降雪持续时间较短。

综上, 个例一强水汽输送区对应有较强的水汽积聚, 降雪量大, 积雪深度达 6 cm; 个例二机场虽然有强的水汽输送, 但无明显水汽积聚, 降雪时间短。

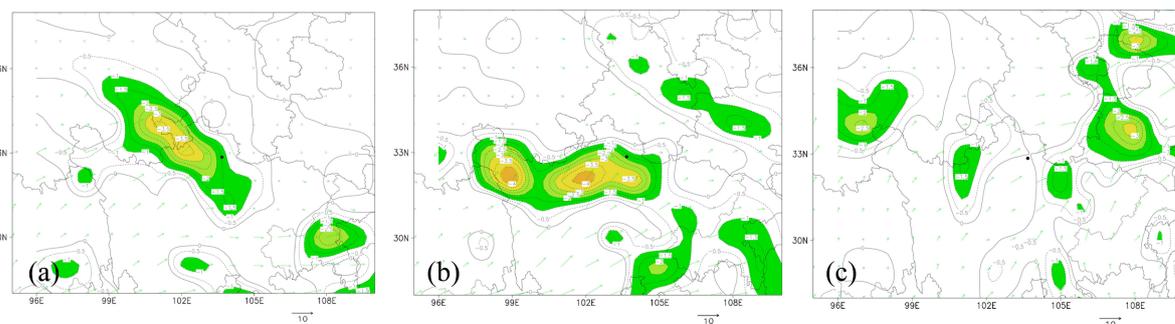


Figure 6. Water vapor flux divergence at 500 hPa on October 19, 2020 at 08:00 (a) and 20:00 (b), and October 10, 2021 at 08:00 (c), in units of $10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$

图 6. 2020 年 10 月 19 日 08 时 (a) 和 20 时 (b)、2021 年 10 月 10 日 08 时 (c) 500 hPa 水汽通量散度, 单位为 $10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$

4.3. 垂直速度分析

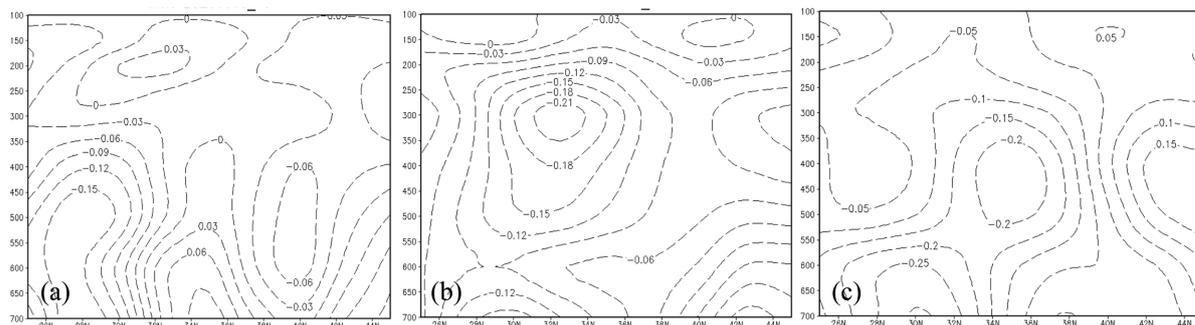


Figure 7. Vertical velocity profiles (in units of 10^{-2} hPa/s) along 103.6°E at 08:00 (a) and 20:00 (b) on October 19, 2020, and 08:00 (c) on October 10, 2021

图 7. 2020 年 10 月 19 日 08 时 (a) 和 20 时 (b)、2021 年 10 月 10 日 08 时 (c) 沿 103.6°E 的垂直速度剖面图(单位: 10^{-2} hPa/s)

从垂直速度分布来看, 个例一 19 日 08 时(图 7(a)) 33°N 以南有倾斜的上升气流, 中心值为 -0.15×10^{-2} hPa/s, 300 hPa 以上为下沉气流, 这与前面的分析一致, 中低层辐合上升, 高层则辐散下沉。 33°N 以南为下沉气流。即高纬度地区气流下沉, 低纬度地区气流上升, 易形成有组织的对流云团[6] [7]。随着对流的发展, 机场附近上升气流进一步增强, 19 日 20 时(图 7(b))机场上空为一致的强上升气流控制, 上升区强度加强, 中心值为 -0.21×10^{-2} hPa/s, 在 300 hPa 附近。个例二 10 日 08 时(图 7(c))机场上空为一致的倾斜上升气流控制, 中心值为 -0.2×10^{-2} hPa/s, 在 400 hPa 附近。综上, 两次降雪过程九黄机场上空均存在倾斜的上升气流, 中心区位于 300~400 hPa 附近。

4.4. 湿位涡分析

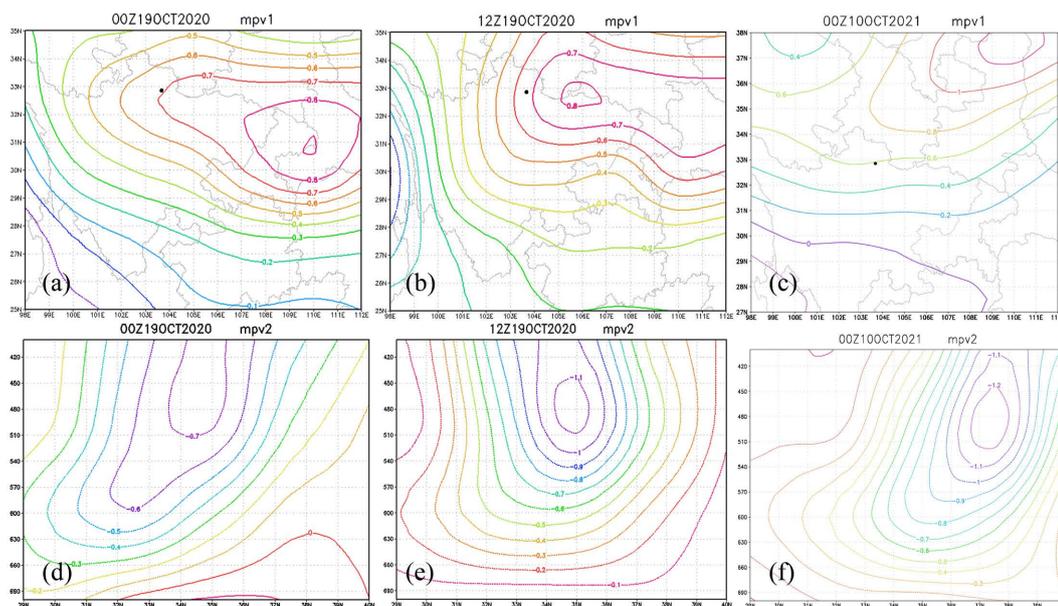


Figure 8. Distribution of MPV1 at 600 hPa at 08:00 (a) and 20:00 (b) on October 19, 2020 and 08:00 (c) on October 10, 2021; MPV2 distribution map along 103.6°E at 08:00 (d) and 20:00 (e) on October 19, 2020, and 08:00 (f) on October 10, 2021

图 8. 2020 年 10 月 19 日 08 时 (a) 和 20 时 (b)、2021 年 10 月 10 日 08 时 (c) 600 hPa 的 MPV1 分布图; 2020 年 10 月 19 日 08 时 (d) 和 20 时 (e)、2021 年 10 月 10 日 08 时 (f) 沿 103.6°E 的 MPV2 分布图

湿空气的位势涡度称为湿位涡。Hoskins [8]指出绝热无摩擦情况下位涡与湿位涡守恒以及湿位涡为负时可能产生的对称不稳定。吴国雄等[9]从严格的原始运动方程出发, 把饱和大气中的水汽凝结潜热的作用引进位涡分析中, 得到了等压面上湿位涡。湿位涡可分为湿正压项 MPV1 和湿斜压项 MPV2。MPV1 为湿位涡的正压项, 其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与相当位温的垂直梯度的乘积。MPV2 为湿位涡斜压项, 包含了湿斜压性以及风垂直切变两项, 是衡量湿斜压性和风垂直切变的综合物理量。一般来说, 绝对涡度为正值, 当对流稳定时, 湿正压项 $MPV1 > 0$, 只有湿斜压项 $MPV2 < 0$ 时, 垂直涡度才能得到较大增长, 此时 MPV2 负值越强表明大气斜压性越强。当对流不稳定时, $MPV1 < 0$, 只有湿斜压项 $MPV2 > 0$, 垂直速度才能得到较大增长。湿位涡单位为 PVU ($1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot k \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)。

4.4.1. 正压位涡(MPV1)分析

个例一和个例二降雪过程中冷暖气团交汇较为强烈的区域位于 600 hPa 附近, 因此本文选取 600 hPa 的 MPV1 图进行分析。从个例一 MPV1 分布图可以看出, 19 日 08 时(图 8(a))川渝边界存在一个 MPV1 正值中心, 中心强度为 0.9PVU, 对应重庆北部出现强降雪, 机场上空强度为 0.7PVU, 随后 08:50 机场开始降雪, 19 日 14 时机场上空强度为 0.4PVU (图略), 此时机场无降雪, 19 日 20 时(图 8(b)) MPV1 正值范围扩大, 机场附近强度明显加强, 机场上空强度为 0.7PVU, 降雪范围也进一步扩大。从个例二 MPV1 分布图(图 8(c))和降雪分布图(图 1(b))可以看出, $MPV1 \geq 0.6PVU$ 等值线的区域大致对应出现降雪的区域。因此, 对流层中低层 MPV1 正值区与降雪中心有较好的对应关系, MPV1 正值的变化与降雪强度变化一致。

4.4.2. 斜压位涡(MPV2)分析

从两次降雪过程沿 103.67°E 的湿位涡斜压项经向垂直剖面图可以看出, 个例一 19 日 08 时(图 8(d)), 机场上空 $MPV2 < 0$, 其绝对最大值为 -0.7PVU, 在 400~500 hPa 附近, $MPV2$ 中心值从低纬度地区向高纬度地区倾斜上升。19 日 20 时(图 8(e))随着冷空气的不断补充, 锋区加强, 大气的斜压性加强, $|MPV2 < 0|$ 增大, 其中心值为 -0.9PVU, 且中低层的 $MPV2$ 绝对值增大明显, 斜压性加强, $|MPV2 < 0|$ 得到较大增长时段与较强降雪时段对应。 $|MPV2 < 0|$ 得到较大增长, 其附近的垂直涡度增大, 导致下滑倾斜涡度发展, 降雪加强。个例二 10 日 08 时(图 8(f))机场上空 $MPV2 < 0$, 其绝对最大值为 -0.6PVU, 机场附近大气有较强的大气斜压性, 高纬度地区 36°N~38°N 上空出现 -1.2PVU 的强中心, 对应高纬度有较强的降雪。降雪中心位于 $MPV2$ 绝对值得到较大增长的区域。

5. 结论

两次降雪过程虽然降雪量不一样, 但都导致九黄机场部分航班延误或取消, 严重影响了九黄机场的正常运行。通过对两次降雪过程的天气形势和物理量诊断分析, 得出以下结论:

(1) 两次降雪过程均由冷暖气团交汇引起, 高层的抽吸作用增强抬升运动有利于降雪的维持。个例一随西风槽东移, 槽后西北气流引导冷空气南下, 机场先出现强降温, 降雪随着西南部的的水汽输送过来而开始; 个例二冷空气随切变线南压入侵川西高原, 水汽条件先满足, 降雪随着降温开始出现。水汽和降温是降雪两个必备的条件, 降雪只有在两个条件同时满足时才会发生。

(2) 600 hPa 的 -2°C 线可作为九黄机场 10 月降雪过程中低层降温的参考线, 10 月降雪过程地面气温一般在 0~2.2°C。

(3) 个例一有源源不断的水汽输送, 且有较强的水汽积聚, 降温幅度大, 降雪较强; 个例二降温不强, 无明显水汽聚集, 降雪时间短。

(4) 正压位涡(MPV1)正值的变化与降雪强度变化一致, 降雪中心位于斜压位涡(MPV2)绝对值得到大增长的区域; 两次降雪过程九黄机场上空均有倾斜的上升气流存在。

参考文献

- [1] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 107-117.
- [2] 马林, 等. 九寨黄龙机场航空气候志(2012-2016) [Z]. 松潘, 2018.
- [3] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度[J]. 气象, 1980(6): 34-36.
- [4] 张腾飞, 鲁亚斌, 等. 2000年以来云南4次强降雪过程的对比分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 64-72.
- [5] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 320-334.
- [6] 郭荣芬, 高安生, 杨素雨. 低纬高原两次冬季南支槽强降水的对比分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 82-88.
- [7] 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, 41(4): 406-414.
- [8] Hoskins, B.J., McIntyre, M.E. and Robertson, A.W. (1985) On the Use and Significance of Isentropic Potential Vorticity Maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **111**, 877-946.
<https://doi.org/10.1002/qj.49711147002>
- [9] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.