

文章编号: 2096-1618(2024)05-0571-10

四川盆地西北侧一次飑线与 MCS 相互作用的诊断分析

周 昱, 李国平

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:为更好理解飑线与 MCS 这两种典型中尺度系统相互作用过程中热力、动力、水汽与微物理的基本特征及其演变规律,利用 ERA5 再分析资料、GPM 及 FY-4A 卫星资料,对 2018 年 7 月 1-2 日发生于四川盆地西北侧一次飑线与 MCS 相互作用过程进行诊断分析。得出的主要结果有:(1)受高原槽、低层切变线及复杂地形的共同作用,飑线东南移动过程中,先爬坡加强,后下坡减弱,与原地少动的中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)合并后,二者有明显的热力、动力、水汽等物理量交换,飑线减弱而 MCS 加强。(2)在两种中尺度天气系统发生相互作用前,对流有效位能大值区由“零散点状分布”转变为“集中式大范围分布”。(3)“上正下负”的位涡垂直配置与中层较小的正热力螺旋度均能较好指示系统的加强,中低层水汽通量辐合与中层较小的正水汽螺旋度相呼应。(4)飑线与 MCS 合并前,飑线以冷云降水过程为主,MCS 则以暖云降水过程为主;二者开始合并至合并完成后,受飑线的影响,MCS 的 0℃ 层以上雪水与冰水含量有明显提升,MCS 降水转为暖云与冷云降水共同作用。该研究可为加深认识两类中尺度系统相互作用过程提供理论参考,对其预警预报也有一定指导意义。

关键词: 飑线; MCS; 四川盆地; 相互作用; 诊断分析

中图分类号: P434+.5

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.009

0 引言

在气候变化的背景下,全球极端灾害性天气事件呈增加趋势。四川盆地及其周边区域地形复杂,中尺度天气过程引发的自然灾害尤为严重^[1-4]。飑线与 MCS 均为典型的致灾性中尺度天气系统,两种系统不仅可以产生强降水、大风、冰雹以及雷电等高影响天气,还可以引发山洪与泥石流等次生灾害。四川盆地及其周边区域是飑线与 MCS 高频发生区^[5-7]。已有研究表明^[8-11],由于两种天气系统及过程均具有复杂的触发、维持机制及宏微观物理特征,因此对其科学认识与准确预警预报仍存在较大的难度。

竹利等^[8]对四川北部一次飑线过程分析,指出辐合线可指示飑线演变,中高层干冷平流与中低层水汽条件对飑线维持有一定作用。李永军等^[9]对四川攀西地区一次飑线的形成机制进行分析,认为高空槽东移与低层暖空气汇合形成的露点锋触发了飑线过程,高空急流和动量下传对飑线的加强有促进作用。青泉等^[12]则利用雷达观测资料,统计分析了线(带)状回波,建立了四川盆地西部、北部、中南部强降雨概念模型,对强降雨的预警具有积极意义。李曦等^[13]对川东北一次飑线的分析认为低空西南急流与冷槽东移触发了飑线过程,飑线后部高压利于产生大风。Wu 等^[14]

通过数值模拟研究了飑线对海岸边山地上空海风演变的影响,发现离岸移动的飑线会先削弱海风,后又通过重力波使其增强。

陈永仁等^[10]对一次 MCS 过程分析,认为高不稳定能量与深厚正涡度触发了 MCS。张武龙等^[11]对四川盆地 MCS 的成因进行了较为系统的研究,认为 MCS 可分为斜压锋生类和准正压类,其形成与高温高湿环境、低层流场、地面中尺度辐合线以及地形强迫等有密切关系。Li S 等^[15]利用 FY-4A 卫星和多普勒天气雷达对一次发生在贵州水城由 MCS 造成的突发性强降雨事件进行研究,发现山地降水主要发生在暖湿区,而天气型降水则是由局地辐合和冷舌入侵而引起。Schumacher 等^[16]归纳了 MCS 的组织、形成与维持取决于深对流的湿度、不稳定性与上升运动,以及垂直风切变与对流的上升气流和冷池的相互作用。

由以上已有工作可知,飑线和 MCS 各自发生发展的演变特征是目前主要研究内容;而对于该复杂地形区域中飑线和 MCS 的相互作用鲜有涉及,系统性研究更是匮乏。有鉴于此,本文对 2018 年 7 月初发生于四川盆地西北侧的一次飑线与 MCS 相互作用过程进行针对性分析。

1 资料与诊断物理量

1.1 资料

本文诊断分析运用的多源资料有:分辨率为

收稿日期:2023-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42175002、42075013);四川省自然科学基金资助项目(2023NSFSC0242)

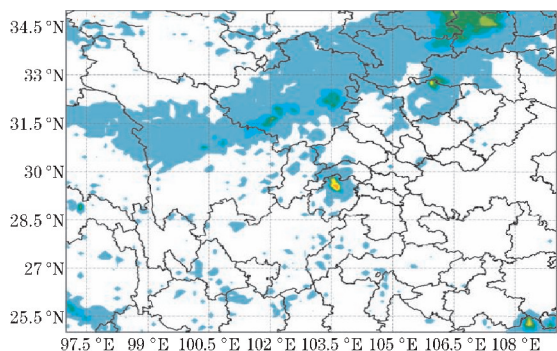
通信作者:李国平, E-mail: liguoping@cuit.edu.cn

0.25°×0.25°的逐小时欧洲中期天气预报中心的第五代再分析资料(ERA5),分辨率为0.1°×0.1°、全球降水观测计划(GPM: Global Precipitation Measurement)半小时间隔的三级数据产品中的降水资料,以及分辨率为4 km、逐小时的中国FY-4A卫星相当黑体温度产品(TBB)资料。

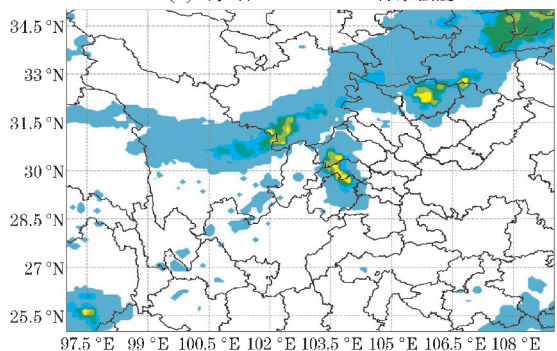
1.2 诊断物理量

本文用于诊断热力、动力特征的物理量有垂直速度(ω)、热力螺旋度(TH)及位涡(PV)。诊断水汽特征的物理量有水汽通量散度(D_{vf})与水汽螺旋度(MH)。诊断微物理特征的物理量有雪水含量(Q_s)、冰水含量(Q_i)、云水含量(Q_l)和雨水含量(Q_r)。其中TH(单位: $\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-2}$)、MH(单位: $\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)及 D_{vf} (单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)的表达式分别为:

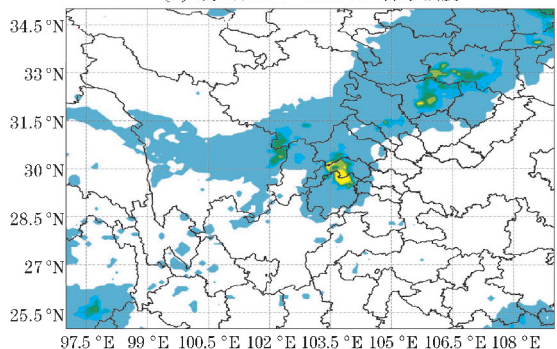
$$\text{TH} = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial vT}{\partial x} - \frac{\partial uT}{\partial y} \right) \quad (1)$$



(a) 7月1日800-1900UTC降水强度



(c) 7月1日2100-2200UTC降水强度



(e) 7月1日2300-2日0000UTC降水强度

mm/h

$$\text{MH} = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial vq}{\partial x} - \frac{\partial uq}{\partial y} \right) \quad (2)$$

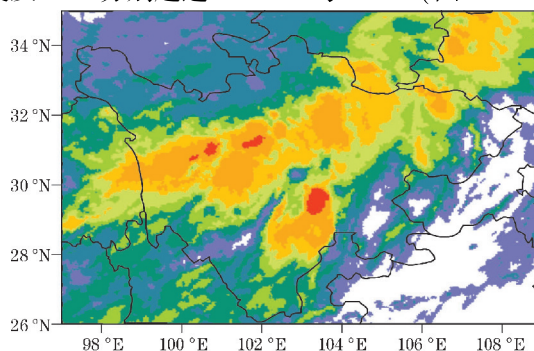
$$D_{vf} = \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} \quad (3)$$

式中 q 为比湿, T 为温度。

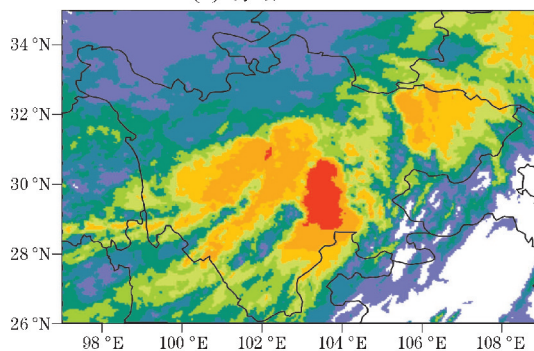
2 天气实况分析

2.1 天气概况

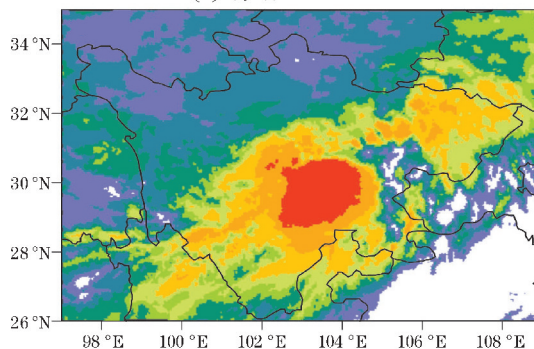
2018年7月1日1900 UTC,源自阿坝北部至甘孜西北部一线的飢线,向东南方向移动到绵阳北部至甘孜西南部一线,同时夹金山东南侧、乐山与凉山交界处生成了一个MCS,逐步增强缓慢北移;飢线的降水中心主要位于阿坝的青川、汶川及南充与巴中的交界处;MCS的降水中心则位于乐山西北部;飢线与MCS中心降水强度及TBB分别超过30 mm/h与-70 °C(图1a~b)。



(b) 7月1日1900UTC TBB



(d) 7月1日2200UTC TBB



(f) 7月2日0000UTC TBB

-70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 °C

图1 2018年7月1-2日飢线与MCS相互作用过程中降水强度与TBB分布特征

7 月 1 日 2200 UTC,减弱的飑线继续向东南移动,MCS 北抬与飑线东南侧在成都双流相遇,MCS 显著加强;飑线的降水中心范围扩大,主要位于青川与南充;MCS 的降水中心范围明显扩大,主要位于眉山、成都南侧与乐山北侧;飑线与 MCS 中心降水强度及 TBB 同样分别超过30 mm/h与-70 ℃(图 1c~d)。

7 月 2 日 0000 UTC,飑线后部与 MCS 合并,合并后范围显著扩大,中心主要位于眉山,TBB ≤ -70 ℃

的连续冷云区直径达 190 km,中心降水强度超过 30 mm/h;而原飑线部分呈显著减弱(图 1e~f)。

2.2 大尺度环流形势

欧亚中高纬地区 500 hPa 高度场“两脊一槽”东移,青藏高原低槽也同步东移,影响青藏高原东部与川西高原。700 hPa来自孟加拉湾暖湿空气与北方干冷气流切变线位于兰州至白银附近(图 2)。

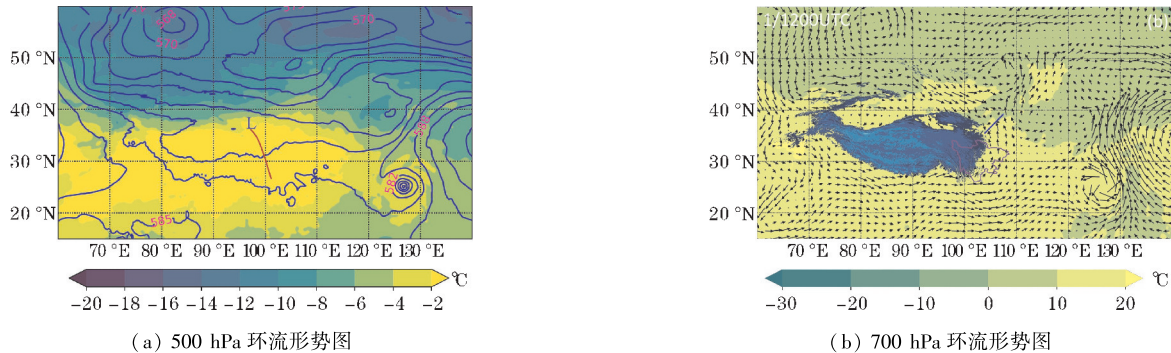


图2 2018 年 7 月 1 日 1200 UTC 500 hPa 和 700 hPa 环流形势图(蓝色实线为等势高度线,红色短线为槽线,蓝色短线表示切变线,紫色实线为四川省轮廓线,箭头表示风场矢量,二者的彩色填充均表示温度)

3 飑线与 MCS 相互作用的诊断分析

3.1 大气不稳定条件

CAPE 可在一定程度上指示天气过程的发生与发展潜势。

7 月 1 日 0600UTC 的 CAPE 大值区分布得较为零散,主要分布于成都西北部、广元北部、重庆西南及云南昭通以南,最大值超过3800 J/kg(图 3a)。

7 月 1 日 1200UTC,CAPE 大值区则由 0600UTC 的“零散分布”转变为“集中分布”,主要分布于成都东部及宜宾至达州的西南—东北向的地区,大值核心区扩大,最大值超过3800 J/kg(图 3b)。

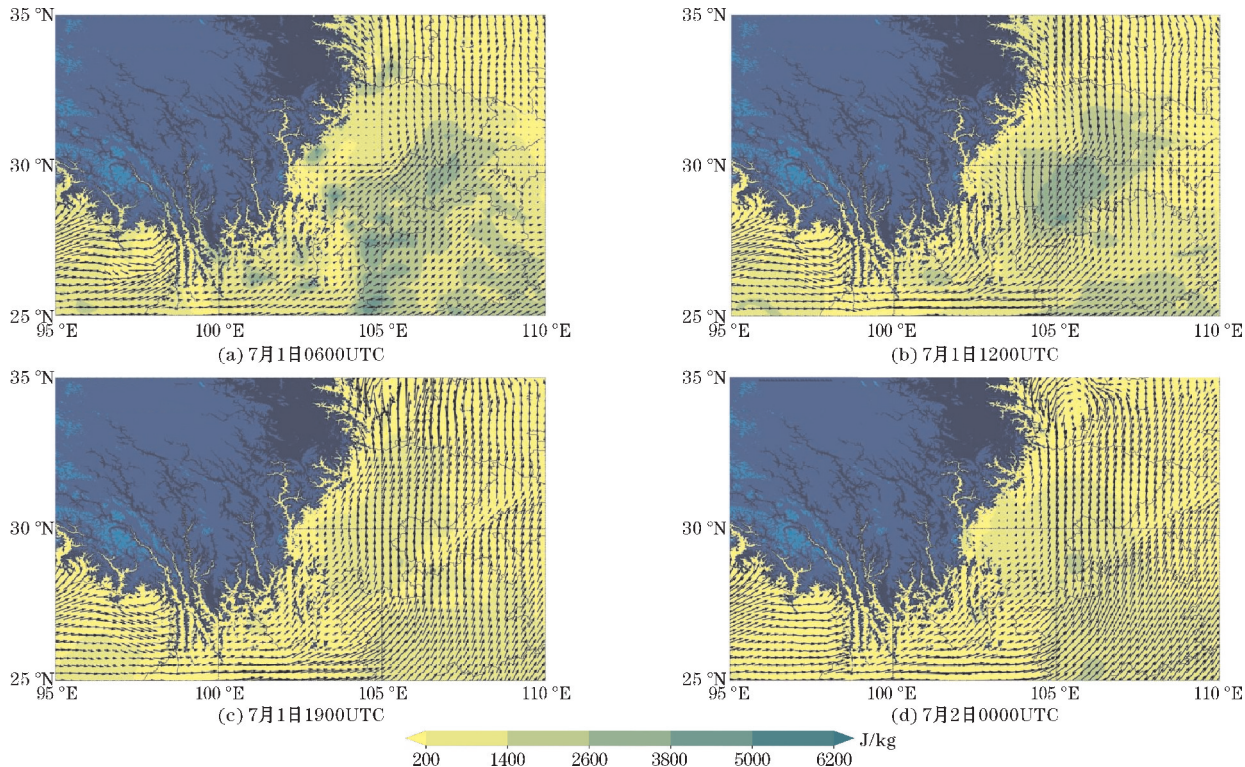


图3 飑线与 MCS 相互作用过程中的 CAPE 与 700 hPa 风场(彩色填充为 CAPE,箭头表示风场矢量)

7月1日1900UTC,CAPE大值区消失,2日0000UTC于泸州北部出现一个对应MCS核心区的较小范围的CAPE大值区,其值超过2600 J/kg(图3c~d)。

7月1日0600UTC至1日1200UTC,飑线与MCS相互作用过程发生前,CAPE大值区分布情况有明显转变,由“零散分布”转变为“集中分布”,这与两个天气系统相互作用的过程中雨带和TBB的分布变化一致。CAPE大值区分布变化也为后来MCS与飑线的合并,与飑线的消散提供了预兆。

3.2 热力和动力特征

对天气影响主要时段(7月1日1900UTC至2日0000UTC)的垂直速度(ω)、热力螺旋度(TH)及位涡(PV)3个热力、动力诊断量进行分析。由于MCS少动

发展,而飑线沿西北—东南方向移动并与MCS产生相互作用。为更好地分析飑线与MCS的相互作用特征,下面重点对二者相互作用密切的关键区进行诊断分析。

7月1日1900UTC,MCS刚形成,其核心位置处于夹金山东侧与龙门山南侧的位置(29.5°N , 103.5°E),而飑线则主要分布于 34°N 以南,此时飑线与MCS的中心降水强度均超过30 mm/h,TBB也均超过 -70°C ,但两者的雨带和TBB中心分布范围都较小且分散,诊断位置较MCS核心位置略有偏西(103°E)。在飑线上空,300~600 hPa有明显上升运动($\omega_{\min} < -2 \text{ Pa/s}$)(图4a),350~550 hPa为正位涡($\text{PV}=4 \text{ PVU}$),500~600 hPa为负位涡($\text{PV}=-2 \text{ PVU}$)(图4b),位涡为“上正下负”垂直配置,飑线区域有一定的垂直发展潜势。

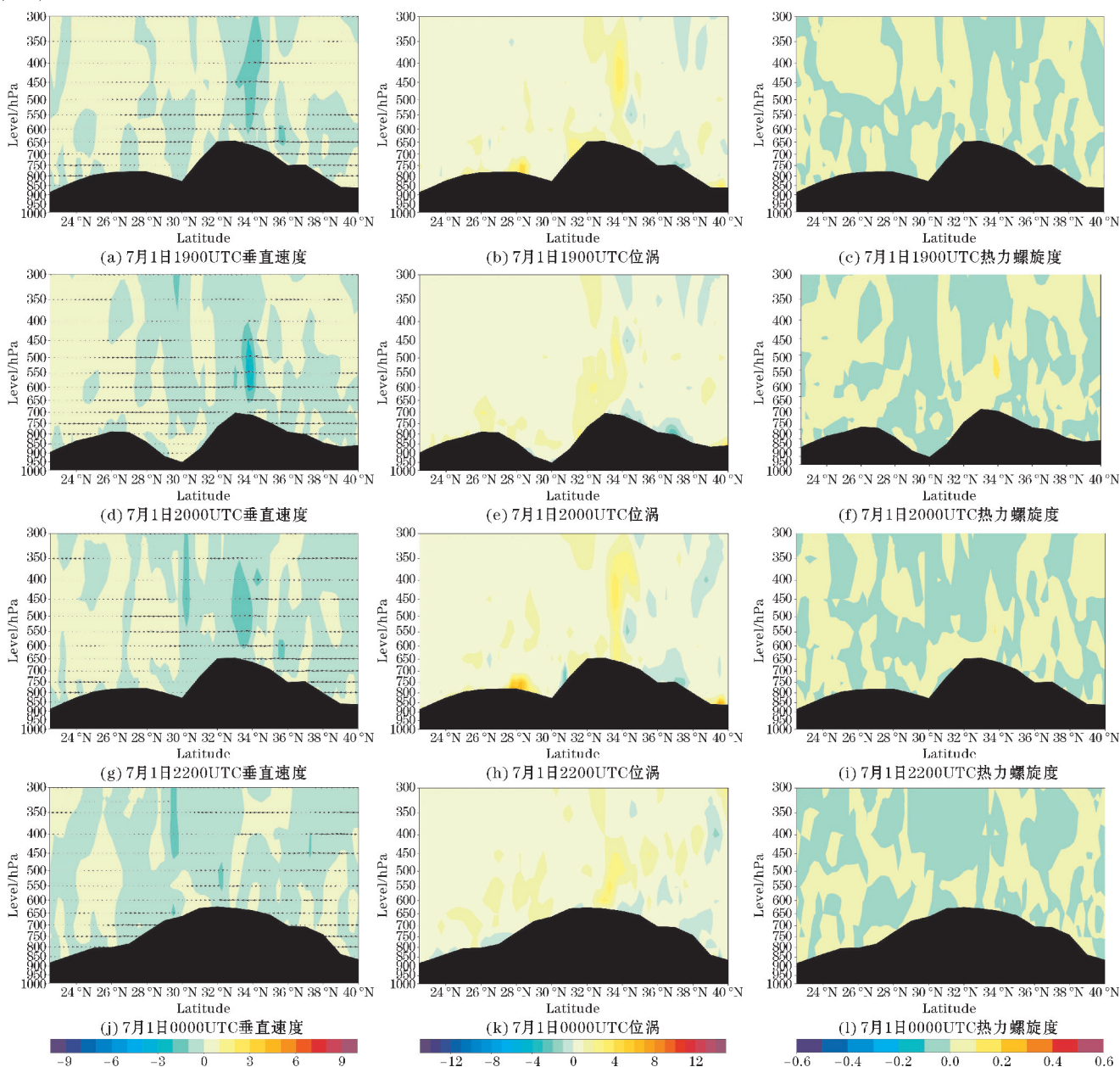


图4 飑线与MCS相互作用过程中关键时刻诊断分析经度位置处的垂直速度、热力螺旋度及位涡随高度的分布

2000UTC, 飑线向东南移动, 其中部与 MCS (29.7°N, 103.5°E) 相遇使 MCS 加强, 此时飑线与 MCS 的中心降水强度继续维持在 30 mm/h, TBB 也均超过 -70℃, 两者的雨带和 TBB 中心分布范围均有显著扩大, 诊断位置较 MCS 核心位置略有偏东 (104°E)。飑线上空, 400 ~ 650 hPa 上升运动有显著加强 ($\omega_{\min} < -4 \text{ Pa/s}$) (图 4d), 500 ~ 575 hPa 出现正热力螺旋度 ($\text{TH} = 0.2 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$) (图 4f), 随着飑线南移沿地形爬升, 地形强迫使对流发展加强, 400 hPa 到近地面均被正位涡 ($\text{PV} = 3 \text{ PVU}$) 占据 (图 4e), 飑线区域的垂直发展潜势减弱。MCS 位置, 300 ~ 350 hPa 出现明显的上升运动 ($\omega_{\min} < -2 \text{ Pa/s}$) (图 4d), 近地面为负位涡 ($\text{PV} = -1 \text{ PVU}$) (图 4e), MCS 位置的垂直发展潜势加强。

2200 UTC, 飑线继续向东南移动, 并部分与 MCS 合并, 使 MCS (30°N, 103.6°E) 继续加强, 此时 MCS 的降水与 TBB 中心强度继续维持, 飑线 TBB 中心则减弱到 -60℃, 而 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围继续扩大, 飑线则开始收缩, 诊断位置较 MCS 核心位置略有偏西 (103°E)。飑线上空, 350 ~ 650 hPa 上升运动减弱 ($\omega_{\min} < -2 \text{ Pa/s}$) (图 4g), 550 ~ 575 hPa 正热力螺旋度也同步减弱 (图 4i)。随着飑线继续南移至 33°N 以南并与 MCS 部分合并, 地形强迫减弱, 向南逐步为下坡, 对流发展减弱, 300 hPa 到近地面正位涡有所加强 ($\text{PV} = 4 \text{ PVU}$) (图 4h), 飑线位置垂直发展潜势减弱。MCS 位置, 300 ~ 500 hPa 上升运动加强 ($\omega_{\min} < -2 \text{ Pa/s}$) (图 4g), 700 hPa 到近地面负位涡明显加强 ($\text{PV} = -3 \text{ PVU}$) (图 4h), MCS 位置的对流发展与垂直发展潜势加强。

7月2日 0000 UTC, 飑线与 MCS 的合并基本完成, MCS (30°N, 103.6°E) 显著加强, 此时 MCS 的降水与 TBB 中心强度维持, 飑线 TBB 中心基本消失, 其降水中心强度也减弱到 20 mm/h, 而 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围明显扩大, 飑线则基本消散, 诊断位置较 MCS 核心位置略有偏西 (102.25°E)。MCS 北侧, 飑线开始消散的位置 (32.5°N), 500 ~ 550 hPa 垂直上升运动显著减弱 (图 4j), 正热力螺旋度继续减弱 (图 4l), 400 hPa 到近地面正位涡继续维持 ($\text{PV} = 4 \text{ PVU}$) (图 4k), 飑线位置的对流发展与垂直发展潜势均减弱。MCS 的位置, 300 ~ 450 hPa 上升运动继续维持 ($\omega_{\min} < -2 \text{ Pa/s}$) (图 4j), 对流发展维持, 500 hPa 到近地面为正位涡 ($\text{PV} = 2 \text{ PVU}$) (图 4k), MCS 位置的垂直发展潜势略有减弱。

7月1日 1900 UTC 至 2日 0000 UTC, 飑线与 MCS 相互作用的过程中, 从热动力角度可以发现, 飑线与 MCS 位置的垂直速度、热力螺旋度及位涡 3 个物理量发

生了交换, 随过程发展物理量有 MCS 位置加强, 飑线位置减弱的趋势。7月1日 1900 UTC, 位涡“上正下负”的垂直配置良好地指示了系统的加强趋势。中层的正热力螺旋度变化, 虽然量值较小, 也很好指示了系统的加强。

3.3 水汽特征

基于水汽通量散度 (D_{vf}) 与水汽螺旋度 (MH) 两个量, 对天气系统主要时段 7月1日 1900 UTC 至 2日 0000 UTC 分别进行水汽条件诊断分析。水汽诊断位置与热动力诊断位置一致, 均为系统间的关键位置。

7月1日 1900 UTC 南部 MCS 核心位置处于夹金山东侧与龙门山南侧附近 (29.5°N, 103.5°E), 而北部的飑线则主要分布于 34°N 以南, 飑线与 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围都较小且分散, 诊断位置较 MCS 核心位置略有偏西 (103°E)。飑线位置, 575 hPa 到近地面有水汽通量辐合 ($D_{\text{vmin}} = -2.5 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 5a), 550 ~ 600 hPa 有正水汽螺旋度 ($\text{MH}_{\text{max}} = 0.4 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$) (图 5b), 水汽辐合抬升。

2000 UTC 飑线中部与 MCS (29.7°N, 103.5°E) 相遇使其有所加强, 飑线与 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围均有显著扩大, 诊断位置较系统核心位置略有偏东 (104°E)。飑线位置, 550 ~ 700 hPa 水汽通量辐合加强 ($D_{\text{vmin}} = -3 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 高层 475 ~ 500 hPa 出现对应的水汽通量辐散 ($D_{\text{vmax}} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 5c), 500 ~ 600 hPa 正水汽螺旋度也加强 ($\text{MH}_{\text{max}} = 0.6 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$) (图 5d), 随着飑线南移沿地形爬升, 地形强迫使水汽辐合抬升加强。MCS 位置, 800 ~ 850 hPa 出现水汽通量辐合 ($D_{\text{vmin}} = -1.5 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 5c)。

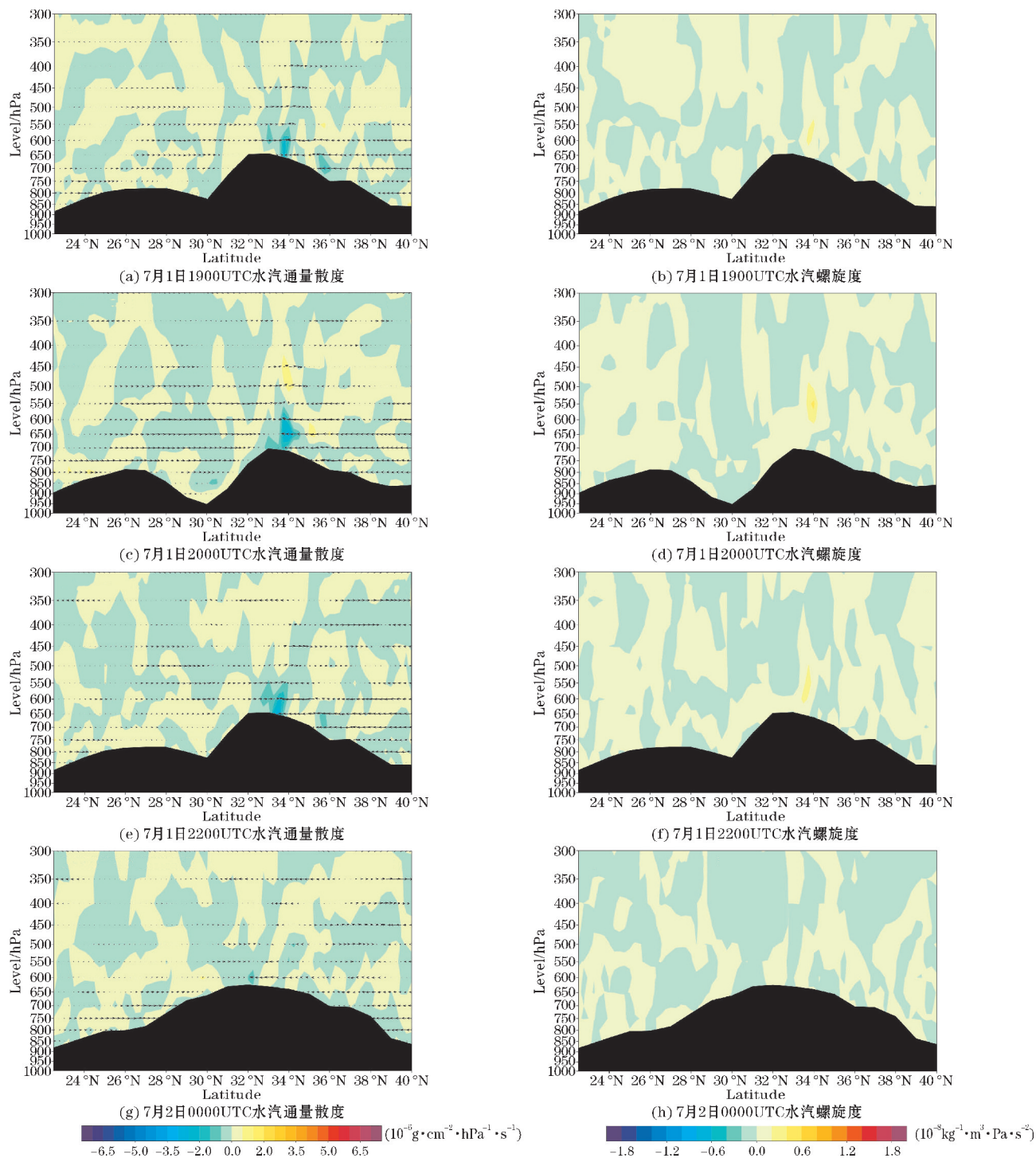
2200 UTC 飑线部分与 MCS 合并, 使 MCS (30°N, 103.6°E) 继续加强, MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围继续扩大, 飑线则开始收缩, 诊断位置较 MCS 核心位置略有偏西 (103°E)。飑线位置, 550 hPa 到近地面水汽通量辐合继续维持, 但高层水汽通量辐散消失 (图 5e), 500 ~ 600 hPa 正水汽螺旋度减弱 ($\text{MH}_{\text{max}} = 0.4 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$) (图 5f), 随着飑线继续南移至 33°N 以南并与 MCS 部分合并, 地形强迫减弱, 向南逐步为下坡, 水汽垂直输送减弱。

7月2日 0000 UTC 飑线与 MCS 基本合并完成, 使 MCS (30°N, 103.6°E) 显著加强, MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围明显扩大, 飑线则基本消散, 诊断位置较系统核心位置略有偏西 (102.25°E)。MCS 北侧, 飑线开始消散位置 (32.5°N), 575 hPa 到近地面水汽通

量辐合减弱($D_{vmin} = -1.5 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图5g),同一位置正水汽螺旋度减弱消失(图5h),水汽垂直输送减弱。

7月1日1900 UTC至2日0000 UTC,飑线与MCS相互作用的过程中,从水汽角度发现了与热动力角度

类似的结果,飑线与MCS位置的水汽通量散度与水汽螺旋度两个物理量发生了交换,随过程发展物理量同样有MCS位置加强,飑线位置减弱的趋势。过程期间中低层水汽通量辐合与中层较小的正水汽螺旋度与系统加强后的水汽辐合抬升有着良好的对应关系。



3.4 微物理特征

基于雪水含量(Q_s)、冰水含量(Q_i)、云水含量(Q_c)与雨水含量(Q_r)4个量,对系统主要影响时段

(7月1日1900 UTC至2日0000 UTC)进行微物理诊断分析。微物理特征诊断位置与前面热、动力和水汽特征的诊断位置保持一致。

7 月 1 日 1900 UTC, MCS 刚形成,其核心位置处于夹金山东侧与龙门山南侧的位置 (29.5 °N, 103.5 °E),而北部的飑线则主要分布于34 °N以南,飑线与 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围都较小且分散,诊断位置较系统核心位置略有偏西(103 °E)。飑线位置处,气流辐合上升将冰相与液相水成物输送到 0 °C 层以上。 $-20\text{ °C} \sim 0\text{ °C}$ 层, $Q_{\text{smax}} = 1.8\text{ g/kg}$ (图 7a), $Q_{\text{lmax}} = 0.25\text{ g/kg}$ (图 6b), -20 °C 层以上 Q_{imax}

$= 0.32\text{ g/kg}$ (图 7b),冷云过程比较显著。0 °C 层以下,云水含量较丰富 ($Q_{\text{lmax}} = 0.35\text{ g/kg}$) (图 6b)。与高层水成物相对应,0 °C 层以下有较高的雨水含量 ($Q_{\text{rmax}} = 0.42\text{ g/kg}$) (图 6a),此时飑线位置处以冷云降水为主;MCS 位置处,0 °C 层以上,雪水、冰水和云水含量均很低,冷云过程很弱。0 °C 层以下,云水含量较丰富 ($Q_{\text{lmax}} = 0.3\text{ g/kg}$) (图 6b), $Q_{\text{rmax}} = 0.06\text{ g/kg}$ (图 6a),此时 MCS 位置处以暖云降水为主。

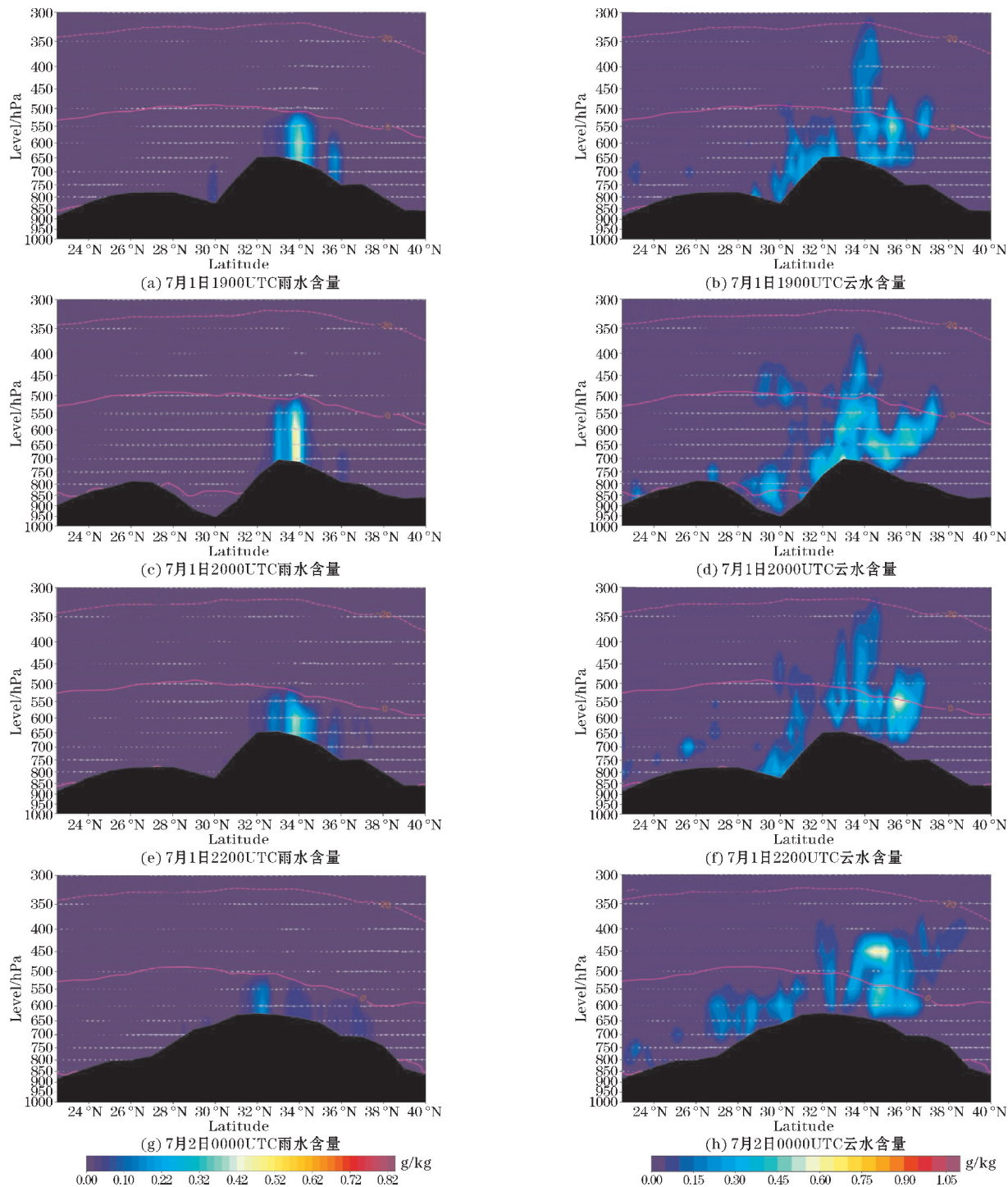


图 6 飑线与 MCS 相互作用过程中关键时刻分析经度位置处雨水含量和云水含量随高度的分布

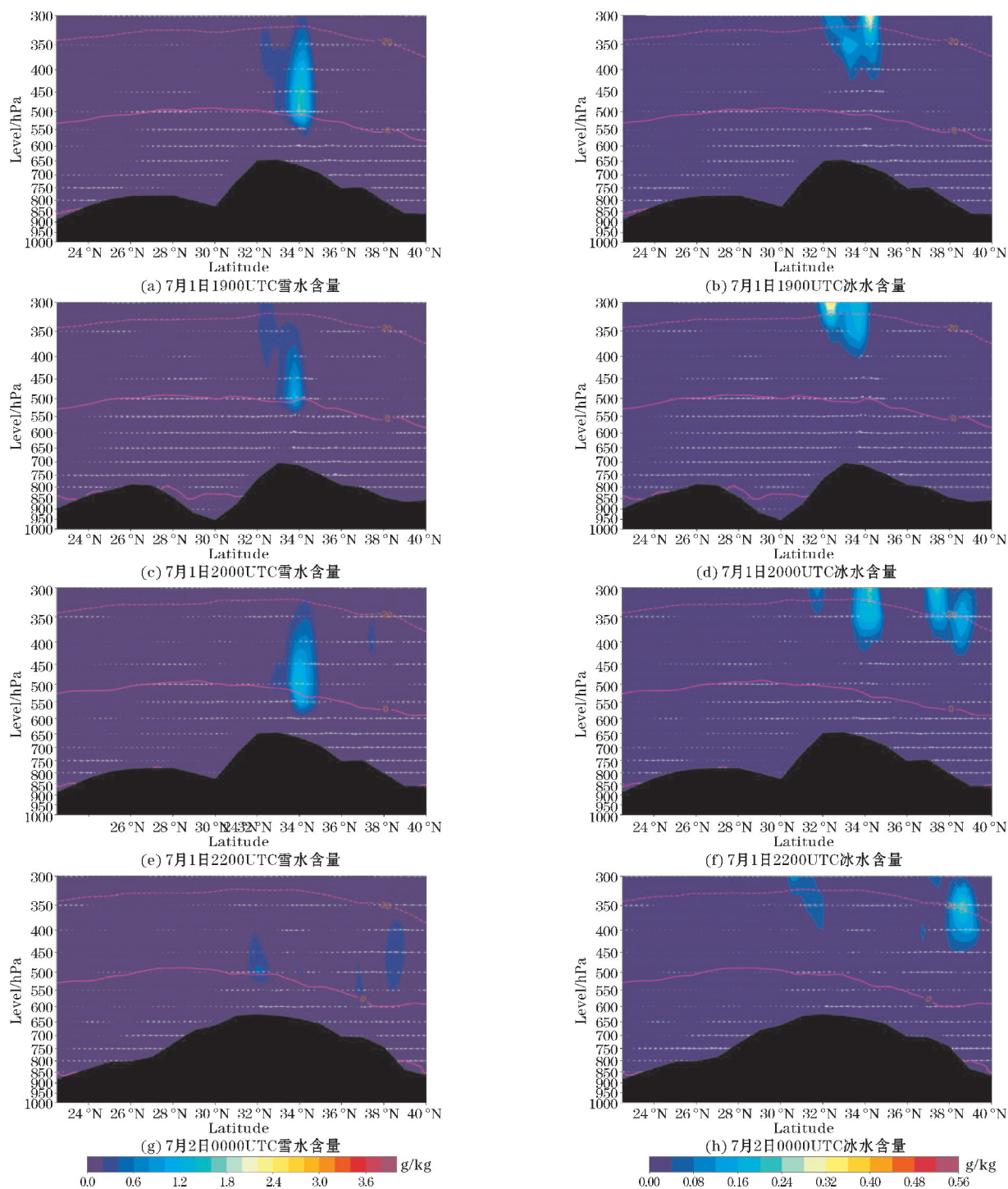


图7 飕线与MCS相互作用过程中关键时刻诊断分析经度位置处的雪水含量和冰水含量随高度的分布

2000 UTC, 飕线中部与 MCS (29.7°N, 103.5°E) 相遇使 MCS 有所加强, 飕线与 MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围均有显著扩大, 诊断位置较系统核心位置略有偏东 (104°E)。飕线位置处, -20℃~0℃层, 雪水含量降低 ($Q_{smax} = 1.2$ g/kg) (图 7c), 云水含量有所提升 ($Q_{lmax} = 0.35$ g/kg) (图 6d)。-20℃层以上, 冰水含量略有加强 ($Q_{imax} = 0.36$ g/kg) (图 7d), 雪水与冰水含量分布均向南延伸, 冷云过程继续维持, 有南移趋势。0℃层以下, 云水含量有所上升 ($Q_{lmax} =$

0.6 g/kg) (图 6d), 雨水含量也略有上升 ($Q_{rmax} = 0.5$ g/kg) (图 6c) 且向南延伸, 此时飕线位置处暖云降水有所加强, 但仍然以冷云降水为主; MCS 位置处, -20℃~0℃层, 云水含量上升 ($Q_{lmax} = 0.25$ g/kg) (图 6d), 0℃层以上冰水与雪水含量仍然很低, 冷云过程很弱。0℃层以下, 云水含量上升 ($Q_{lmax} = 0.4$ g/kg) (图 6d), 雨水含量略有降低 ($Q_{rmax} = 0.02$ g/kg) (图 6c), 此时 MCS 位置处降水较弱, 以暖云降水为主。

2200UTC,飑线部分与 MCS 合并,使 MCS (30°N , 103.6°E) 继续加强, MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围继续扩大,飑线则开始收缩,诊断位置较 MCS 核心位置略有偏西 (103°E)。飑线位置处, $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 层,雪水含量略有上升 ($Q_{\text{smax}} = 1.4 \text{ g/kg}$) (图 7e),云水含量降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.25 \text{ g/kg}$) (图 6f), -20°C 层以上冰水含量降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.24 \text{ g/kg}$) (图 7f),冷云过程维持。 0°C 层以下,云水含量降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.5 \text{ g/kg}$) (图 6f),雨水含量也降低 ($Q_{\text{rmax}} = 0.42 \text{ g/kg}$) (图 6e) 并继续向南延伸。此时飑线位置处暖云降水减弱,以冷云降水为主; MCS 位置处, $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 层,云水含量略有降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.15 \text{ g/kg}$) (图 6f),雪水含量很低。 -20°C 层以上,出现冰水含量 ($Q_{\text{imax}} = 0.12 \text{ g/kg}$) (图 7f),冷云过程加强。 0°C 层以下,云水含量略有降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.3 \text{ g/kg}$) (图 6f),雨水含量有所升高 ($Q_{\text{rmax}} = 0.04 \text{ g/kg}$) (图 6e)。此时 MCS 位置处降水整体较弱的背景下,暖云降水维持,冷云降水加强。

7月2日 0000 UTC,飑线与 MCS 合并基本完成,使 MCS (30°N , 103.6°E) 显著加强, MCS 的雨带和 TBB 中心分布范围明显扩大,飑线则基本消散,诊断位置较系统核心位置略有偏西 (102.25°E)。 MCS 北侧,飑线开始消散的位置 (32.5°N),上升气流减弱, $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 层,雪水含量明显降低 ($Q_{\text{smax}} = 0.4 \text{ g/kg}$) (图 7g),云水含量略有降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.2 \text{ g/kg}$) (图 6h), -20°C 以上冰水含量也降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.04 \text{ g/kg}$) (图 7h),冷云过程减弱。 0°C 层以下,云水含量降低 ($Q_{\text{imax}} = 0.25 \text{ g/kg}$) (图 6h),雨水含量显著降低 ($Q_{\text{rmax}} = 0.16 \text{ g/kg}$) (图 6g),此时飑线位置的冷云与暖云降水均减弱,飑线降水整体减弱; MCS 位置处, $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 层,出现雪水含量 ($Q_{\text{smax}} = 0.6 \text{ g/kg}$) (图 7g),而云水含量维持 ($Q_{\text{imax}} = 0.15 \text{ g/kg}$) (图 6h)。 -20°C 层以上,冰水含量维持 ($Q_{\text{imax}} = 0.12 \text{ g/kg}$) (图 7h) 并向下延伸,冷云过程继续加强。 0°C 层以下,云水含量维持 ($Q_{\text{imax}} = 0.3 \text{ g/kg}$) (图 6h),雨水含量也维持 ($Q_{\text{rmax}} = 0.04 \text{ g/kg}$) (图 6g),此时 MCS 位置处暖云降水维持,冷云降水加强。

7月1日 1900 UTC 至 2日 0000 UTC,飑线与 MCS 相互作用的过程中,1日 2000 UTC 两中尺度系统合并前,飑线位置处雪水与冰水含量较高,飑线由冷云过程所主导,而 MCS 位置处冰相水成物粒子含量很低,降水主要由 0°C 层以下的暖云过程主导。随着飑线进一步南移与 MCS 逐步合并,至 2日 0000 UTC 可以看出,受飑线的影响, MCS 位置处, 0°C 层以上的雪水与冰水含量有明显提升,随着飑线与 MCS 的合并完成, MCS 降水也由以暖云降水为主导转为暖云与冷云降水共同作用。

4 结论与讨论

本文运用 ERA5 再分析资料、GPM 及 FY-4A 卫星资料,对 2018 年 7 月 1-2 日发生于四川盆地西北侧一次飑线与 MCS 相互作用过程进行诊断分析,从热力、动力、水汽与微物理的角度对这两种典型中尺度系统相互作用过程中的基本特征及其演变规律进行研究并得到如下主要结果:

(1) 高原低槽和低层切变线在青藏高原东部和川西高原过渡到盆地的复杂地形作用下,向东南移动的飑线先爬坡加强,后下坡减弱,与原地少动的 MCS 合并后,二者的热力、动力、水汽等物理量发生了交换,导致飑线减弱而 MCS 加强。

(2) 两种中尺度系统相互作用前,对流有效位能大值区由“零散点状分布”转变为“集中式大范围分布”。

(3) “上正下负”的位涡垂直配置与中层较小的正热力螺旋度均能较好指示系统加强,中低层水汽通量辐合与中层较小的正水汽螺旋度与系统加强后的水汽辐合抬升相一致。

(4) 飑线与 MCS 合并前,飑线以冷云降水过程为主, MCS 则以暖云降水过程为主;二者开始合并至合并完成,受飑线的影响, MCS 0°C 层以上雪水与冰水含量明显提升, MCS 降水则转为暖云与冷云降水共存。

四川盆地及其周边地形复杂,飑线与 MCS 等中尺度天气过程引发的自然灾害尤为严重。本研究分别从大气不稳定条件、热力和动力特征、水汽特征及微物理特征等多视角进行诊断分析。尽管研究个例、所用资料 and 诊断物理参量还比较有限,但仍能在一定程度上为认识复杂地形区中尺度天气系统相互作用提供有益参考,也为今后深入开展这方面研究打下基础。

致谢:感谢成都信息工程大学科技创新能力提升计划重大项目 (KYTD202201) 对本文的资助

参考文献:

- [1] Dong Y, Li G, Xie X, et al. Mechanism of Diabatic Heating on Precipitation and the Track of a Tibetan Plateau Vortex over the Eastern Slope of the Tibetan Plateau [J]. Adv. Atmos. Sci, 2023.
- [2] Wu A, Li G. Roles of the Topographically-Affected Boundary Layer Low-Level Jet in the Moisture Transport Process of Nocturnal Rainstorms in Mountainous Areas around the Western Sichuan Basin [J]. Atmosphere, 2022, 14(1): 84.
- [3] Shen C, Li G, Dong Y. Vertical structures associat-

- ed with orographic precipitation during warm season in the Sichuan Basin and its surrounding areas at different altitudes from 8-year GPM DPR observations[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17):4222.
- [4] 付智龙,李国平,姜凤友,等.四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分析与局地环流数值模拟[J]. *大气科学*, 2022, 46(6):1366-1380.
- [5] 陈炯,郑永光,张小玲,等.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. *气象学报*, 2013, 71(3):367-382.
- [6] 龙柯吉,康岚,罗辉,等.四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. *气象*, 2020, 46(2):212-222.
- [7] 康岚,朱克云,张杰,等.引发四川盆地区域性暴雨的高原 MCS 特征分析[J]. *成都信息工程大学学报*, 2017, 32(4):402-408.
- [8] 竹利,陈朝平,陈茂强,等.川北飚线成熟阶段灾害性大风成因个例分析[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(2):164-173.
- [9] 李永军,陈科艺.一次攀西地区飚线天气过程形成机制分析[J]. *气象科技*, 2019, 47(6):997-1005.
- [10] 陈永仁,李跃清.“12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J]. *气象*, 2013, 39(7):848-860.
- [11] 张武龙,青泉,杨景朝,等.触发四川盆地极端短时强降雨的中尺度对流系统环境条件[J]. *成都信息工程大学学报*, 2023, 38(3):349-357.
- [12] 青泉,赵静,叶儒辉.夏季四川盆地强降雨列车效应特征[J]. *气象科技*, 2015, 43(2):250-260.
- [13] 李曦,黄敬淋,王智楷.2019年4月9日四川东北部一次飚线大风的成因分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(4):52-60.
- [14] Wu F, Lombardo K. The impact of offshore-propagating squall lines on coastal-mountain flows [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6):e2023GL102825.
- [15] Li S, Li G, Wang X, et al. Precipitation characteristics of an abrupt heavy rainfall event over the complex terrain of southwest China observed by the FY-4A satellite and doppler weather radar [J]. *Water*, 2020, 12(9):2502.
- [16] Schumacher R S, Rasmussen K L. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(6):300-314.

Diagnostic Study of a Squall Line and MCS Interaction on the Northwest Side of Sichuan Basin

ZHOU Yu, LI Guoping

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To better understand the basic characteristics and evolution patterns of thermodynamics, dynamics, water vapor, and microphysics in the interaction process between the two typical mesoscale synoptic systems, this article used ERA5 (the fifth generation hourly reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis data, GPM (Global Precipitation Measurement) and Chinese FY-4A satellite data to diagnose and analyze the interaction process between the squall line and MCS (Mesoscale Convective System) that occurred from July 1 to 2, 2018 on the northwest side of the Sichuan Basin. The main results obtained were as follows: (1) Under the joint influence of the plateau trough, low-level shear line, and complex terrain, the squall line moved southeast, strengthening first when climbing, and then weakening when descending. After merging with the MCS with minimal movement in place, there was a significant exchange of matter and energy between the two, and the squall line weakened and MCS strengthened. (2) Before the interaction between the two mesoscale synoptic systems, the high-value area of convective available potential energy (CAPE) changed from a “scattered spot distribution” to a “concentrated large area distribution”. (3) The configuration of the “upper positive and lower negative” potential vorticity, as well as the smaller positive thermal helicity in the middle layer, could effectively indicate the strengthening of the system. The convergence of the water vapor flux in the middle and lower layers corresponded to the smaller positive water vapor helicity in the middle layer. (4) Before the merger of the squall line and MCS, the squall line was dominated by the cold cloud precipitation process, while the MCS was dominated by the warm cloud precipitation process; During the period from the beginning of the merger to the completion of the merger, due to the influence of the squall line, the specific snow water content and specific cloud ice water content above 0 °C of the MCS significantly increased, and the precipitation of the MCS turned into a combination of the warm and cold cloud precipitation. This study could provide the theoretical reference for deepening the understanding of the interaction process between the two types of mesoscale systems and also had certain guiding significance for their early warning and forecast.

Keywords: squall line; MCS; Sichuan Basin; interaction; diagnostic analysis