

赵桂香, 王晓丽, 王一颀, 等. 黄河中游地区 MCC 天气学分型及结构差异分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 1-14.
ZHAO Guixiang, WANG Xiaoli, WANG Yijie, et al. Synoptic patterns of MCCs and analysis of their structural differences over the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 1-14. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.001. (in Chinese)

黄河中游地区 MCC 天气学分型及结构差异分析

赵桂香¹, 王晓丽¹, 王一颀¹, 李莹²

(1. 山西省气象台, 山西 太原 030006; 2. 山西省气象科学研究所, 山西 太原 030002)

摘要: 利用 2005—2017 年卫星、实况探测、L 波段探空秒数据和 NCEP/NCAR FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析等资料, 采用天气学和动力诊断分析等方法, 对黄河中游地区中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)进行天气学分型, 并对其结构特征及差异进行分析。结果表明: 1) 黄河中游地区 MCC 主要生成在夏季, 多在傍晚至次日凌晨发展成熟, 生命史长、移动缓慢, 以暴雨及以上量级降水为主, 雨强大, 地域差异明显。2) 依据 200 hPa 环流形势, 将 MCC 分为 3 个主型, 结合 500 hPa 形势特点, 每个主型下分为不同副型。通过分析不同分型下 MCC 环境场及物理量空间结构特征及差异, 提炼 MCC 强降水预报关键技术, 建立 MCC 强降水预报物理模型。3) MCC 形成在低层比湿和能量扰动的正值中心附近, 在低层扰动梯度大值区、靠近正中心的区域发展成熟。扰动正值中心所在高度、中心强度以及正扰动的厚度等物理因子与 MCC 发展以及降水强度关系密切。4) 不同分型下, MCC 不同生命阶段云系及环境大气的垂直变化存在明显差异。云顶高度下降, 湿层加厚, 凝结高度降低, 逆温层消失, 是 MCC 达到成熟的先兆信号。5) 在 200 hPa 南亚高压稳定背景下, 地面存在次天气尺度冷锋、中尺度高压和冷池; 中尺度高压作用明显小于冷池, 冷池强度和维持时间与 MCC 降水强度和持续时间密切相关。在 200 hPa 深厚低槽和西北急流或急流分支背景下, 地面无冷池和中尺度高压形成, 低层入流风速和温度梯度的加大是 MCC 发展成熟的重要因素, 中尺度露点锋对 MCC 强降水的触发作用不可忽视。

关键词: MCC; 水汽和能量扰动; 冷池; 边界层入流; 结构差异

中图分类号: P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0001-14

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.001

Synoptic patterns of MCCs and analysis of their structural differences over the middle reaches of the Yellow River

ZHAO Guixiang¹, WANG Xiaoli¹, WANG Yijie¹, LI Ying²

(1. Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China)

Abstract Based on satellite data, observational data, L-band second-level radiosonde data, and NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data from 2005 to 2017, the synoptic patterns of mesoscale convective complex (MCC) over the middle reaches of the Yellow River are classified, and their structural characteristics are comparatively analyzed by synoptic and dynamic diagnostic analysis. The results are listed as below. 1) In the middle reaches of the Yellow River, MCCs are mainly generated in the summer and generally develop to be mature from dusk till dawn with a long life cycle and slow movements. MCCs mainly produce rainstorm or above-level precipitation with high intensity and significant regional

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475050)

作者简介: 赵桂香, 女, 研究员级高级工程师, 主要从事中小尺度数值诊断和灾害天气预报技术研究, liyun0123@126.com。

distribution differences. 2) According to the circulation at 200 hPa, the synoptic situation of MCCs are classified into three main patterns, and each main pattern is classified into different secondary patterns according to the circulation at 500 hPa. By comparative analysis of the structural characteristics, environmental conditions, and physical parameters of different MCCs patterns, the key forecasting techniques of heavy MCC precipitation are summarized and the physical models of MCCs are set up. 3) MCCs occur near the positive center of specific humidity and energy disturbance at the lower layer and develop to be mature at areas of great disturbance gradient near the positive center. The development of MCCs and the precipitation intensity have close relationships with the height, intensity, and thickness of the positive disturbance. 4) Though cloud system and vertical variations of ambient atmosphere display obvious differences in different life stages of different MCC patterns, the descent of cloud top, the thickening of moisture level, the decrease of condensation level, and the disappearance of inversion layer are premonitory signals of MCCs developing to be mature. 5) Under the background of stable South Asia high at 200 hPa, there are subsynoptic-scale cold front, mesoscale high, and cold pool on the surface. The impact of mesoscale high is less than that of cold pool, whose intensity and duration are closely related to intensity and duration of MCC precipitation. While under the background of thick upper trough and northwestern jet stream or jet stream branch at 200 hPa, there are no cold pool and mesoscale high on the surface. The increase of inflow wind speed and temperature gradient at the lower layer are the main factors for MCCs developing to be mature. The triggering mechanism of mesoscale dew-point front on heavy MCC precipitation cannot be ignored.

Key words MCC; water vapor and energy disturbance; cold pool; boundary layer inflow; structural difference

引言

研究^[1]表明,黄河中游地区是中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)的高发区,常导致暴雨大暴雨,引发洪水灾害。赵桂香等^[2]分析了黄河中游地区 MCS 特征指出,中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)和 β 中尺度持续拉长状对流系统(meso- β scale persistent elongated convective systems, M β ECS)是该区域夏季降水的主要 MCS,降水特征复杂,地域差异明显。MCC 的发生发展与环境条件关系密切。以往研究^[3-5]多认为 MCC 生成发展的环境大气斜压性较弱,赵桂香等^[6]分析发现,不同季节 MCC 形成、发展机制不尽相同,其后期发展对能量、水汽和大气不稳定等的要求存在很大差异,春季 MCC 可以生成在大气斜压性强的环境背景下。高帆等^[7]研究指出,孤立对流云团合并为扁平状中尺度对流系统,造成了对流暴雨,暖区对流发生在地面露点温度大值区;赵桂香等^[8]认为低层稳定的切变线附近形成的中尺度扰动低涡,与地面中尺度露点锋和中尺度辐合线共同作用,触发了中尺度对流云团的发生、发展。黄治勇等^[9]分析发现, MCC 发展到成熟阶段,对流层中低层始终

维持不稳定层结状态,风速切变较强。侯淑梅等^[10]认为后向传播雷暴的环境场水汽条件较好,大气斜压特征明显,近地面层高温高湿;赵桂香等^[6]研究则指出 MCC 生成于条件不稳定、对流不稳定和对称不稳定等三种不稳定共存区域。杨忠明等^[11]分析了贵州中南部 2 个致洪 MCC,认为地面中尺度低压中的辐合线或静止锋的存在,加强了辐合上升运动,从而反复生成 MCC,造成连续性暴雨;杨晓霞^[12]在分析副热带高压边缘强降水形成机制时发现,造成强降水的中尺度对流系统具有新老云团更替、向东移动缓慢等特点。张立祥和李泽椿^[13]对一次东北冷涡 MCS 边界层特征进行了数值模拟得出, MCS 温湿层结及气流结构改变了边界层入流;朱义青等^[14]认为强对流云团旺盛时期,其北侧有相对干冷空气入侵,加剧了降水蒸发,在强对流云团低层对应相应冷池。赵桂香等^[15]分析 MCC 演变过程中气象要素的垂直变化特征发现,云系分层现象消失,云顶高度降低,湿层厚度加大,凝结高度降低,逆温层消失,均有可能是 MCC 发展的先兆信号。这些研究对认识 MCC 强降水成因和改进 MCC 强降水预报具有重要意义。井喜等^[16]利用 2005—2011 年资料,以 200 hPa 环流形势作为分型标准,对中国

MCC(20 个)天气学分型特征进行了分析。然而,要更为全面认识 MCC 形成发展机制、三维结构特征及其造成强降水的差异,显然不够。本文试图选取更多个例(33 个),利用多种探测资料,采用天气学分析和动力诊断相结合的方法,较为系统地研究黄河中游地区 MCC 分型特点、空间结构特征及差异,为 MCC 强降水预报提供参考。

1 资料与方法

文章研究区域为黄河中游地区,地理位置为 $104^{\circ}27' \sim 113^{\circ}39'E, 33^{\circ}45' \sim 40^{\circ}11'N$ 。所用资料序列为 2005—2017 年的 5—10 月。根据文献[17—18]的标准,利用 FY-2E 高分辨率($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)TBB 和卫星云图逐时或逐半小时资料,通过增强处理,筛选 MCC 个例^[2];降雨资料来自地面国家气象站,共计 232 个。采用实况探测、L 波段探空秒数据以及 NCEP/NCAR FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料等,通过普查历史个例的环流背景和影响系统特点等,对 MCC 进行天气学分型,并选取典型个例进行系统配置,结合动力诊断方法,研究 MCC 强降水预报关键技术,建立 MCC 强降水预报物理模型。

2 MCC 基本特征及天气学分型

2.1 MCC 基本特征

2005—2017 年,黄河中游地区共形成 33 个

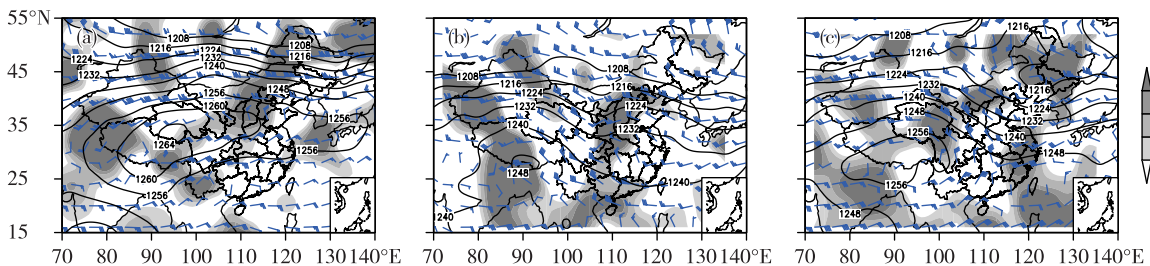


图 1 200 hPa 环流形势合成分析(a.第一主型,b.第二主型,c.第三主型;实线为等高线,单位: dagpm;阴影表示散度大于零,单位: $10^{-6} s^{-1}$)

Fig.1 Synthetic analysis of three patterns of circulation at 200 hPa (a/b/c. the first/second/third main pattern; the solid line for contour line, units: dagpm; the shaded area for divergence greater than zero, units: $10^{-6} s^{-1}$)

2.2.1 200 hPa 南亚高压稳定型

此型共有 13 个,主要出现在 7 月下旬至 8 月中旬。特点:200 hPa 南亚高压强盛,且稳定少动,大多呈东西向带状分布,有时会有 2 个中心或分裂为 2 个中心; $32^{\circ} \sim 37^{\circ}N, 100^{\circ} \sim 110^{\circ}E$ 之间存在强的辐散区。MCC 形成在反气旋前沿的强辐散区,中心强度一般在 $40.5 \times 10^{-6} s^{-1} \sim 51.2 \times 10^{-6} s^{-1}$ 之间(图 1a)。

MCC。85% 的 MCC 生成在夏季,多在傍晚至次日凌晨发展成熟;成熟期最低云顶亮温在 $-68^{\circ}C$ 以下的个例占 87%,生命史大多在 8 h 以上;移动路径以偏东方向为主,少数稳定少动或向西或西南移动。MCC 所产生的日降水量均在中雨以上,其中达暴雨以上的为 22 个,占总数的 67%(暴雨和大暴雨及以上的个例数相等,各为 11 个),主要集中在陕西到山西一带;产生大雨的有 8 个,占 24%,基本集中在甘肃到陕西交界;中雨的仅 3 个,占 9%,位于内蒙古与山西交界。78.8% 的 MCC 可产生短时强降水(雨强 $\geq 20 mm \cdot h^{-1}$)。可见, MCC 具有云顶亮温低、生命史长、移动缓慢、降雨量和降雨强度大等特点,且具有明显的地域特征。

2.2 MCC 的天气学分型

马禹等^[1]和井喜等^[16]以 200 hPa 环流形势为依据给出了 MCC 天气学模型。研究^[2,6]表明,黄河中游地区不同季节的 MCC,环流背景和结构特征差异很大,仅依据 200 hPa 形势特点分型,难以深入了解该区域 MCC 形成发展机制。本文以 200 hPa 环流形势为依据划分主型,以 500 hPa 形势为辅助划分副型,并选取典型个例,对低层风场和物理量特征等进行系统配置,揭示环境场差异。通过综合归纳,可分为 3 个主型(图 1),第一主型下分 3 个副型,第二和第三主型下各分 2 个副型(表 1)。

1) 以 2011 年 8 月 15—16 日为例分析第一副型系统配置特点。500 hPa 高纬地区为一低值系统,多短波槽活动;西太平洋副热带高压(以下简称副高)较强盛, MCC 形成在弱西南气流中(图 2a)。对应 700 hPa(图略),来自孟加拉湾的西南气流与来自西风带系统的偏北风形成一条中尺度切变线,850~925 hPa(图略)之间形成约 $500 km \times 500 km$ 的中尺度气旋式涡旋。700 hPa 为一湿舌,温度露点

差 $\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 850 hPa 以下为一暖中心。湿层厚度在 700 hPa 附近, 500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差为

$-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。500~700 hPa, MCC 后部存在较强冷平流, 中层冷空气的侵入触发 MCC 强降水。

表 1 MCC 天气学分型

Table 1 Synoptic patterns of MCCs

主型(200 hPa)	副型(500 hPa)
I 南亚高压稳定型(13个)	1 中纬度西南气流型(简称 11 型, 4 个)
	2 中纬度环流平直型(简称 12 型, 6 个)
	3 两高之间切变型(简称 13 型, 3 个)
II 深厚低槽型(13个)	1 中纬度西南气流型(简称 21 型, 6 个)
	2 中纬度环流平直型(简称 22 型, 7 个)
III 急流或急流分支型(7个)	1 一槽一脊、中纬度环流较平型(简称 31 型, 3 个)
	2 两槽一脊、中纬度切断涡旋型(简称 32 型, 4 个)

卫星资料显示, 强降水开始前, 500 hPa 西南气流区、沿 700 hPa 切变线不断有对流云团生成、发展和合并。MCC 在低层中尺度涡旋区以及对流不稳定区发展成熟(图 2b), TBB $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云罩面积分别为 $6.1\times 10^4\text{ km}^2$ 和 $12.2\times 10^4\text{ km}^2$, 离心率接近 0.8, 中心 TBB 达 $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$; 约 2 h 后进入最旺盛期, TBB $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云罩面积

以及离心率仍在增大, 中心 TBB 不再下降。MCC 从形成到消亡维持了近 10 h, 先沿 500 hPa 弱西南气流向东北方向缓慢移动, 再沿偏西北气流向东南方向折转, 造成甘肃南部和陕西中南部中到大雨、局部暴雨(图 2b), 24 h 最大降水量为 56 mm, 对流性较强, 最大雨强 $44\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 出现在 MCC 最旺盛时期的后部。

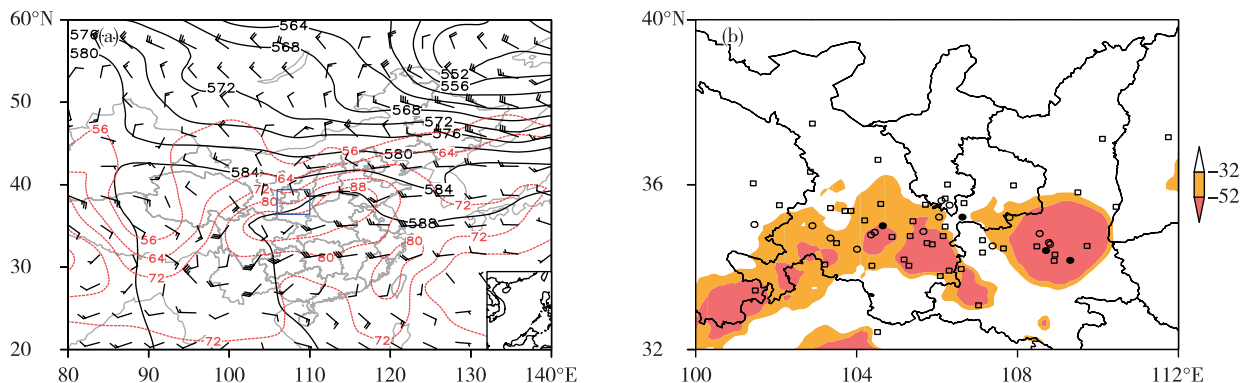


图 2 2011 年 8 月 15 日 20:00 的系统配置图(a; 实线为 500 hPa 等高线, 单位: dagpm; 红色虚线为 850 hPa 假相当位温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 风矢为 500 hPa 风场, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 蓝色方框为 MCC 形成区)和 15 日 23:30 的 TBB(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 与 15 日 08:00—16 日 08:00 的 24 h 降水量(单位: mm, 方框代表 10~25 mm, 空心圆代表 25~50 mm, 实心圆代表 50 mm 以上)合成图(b)

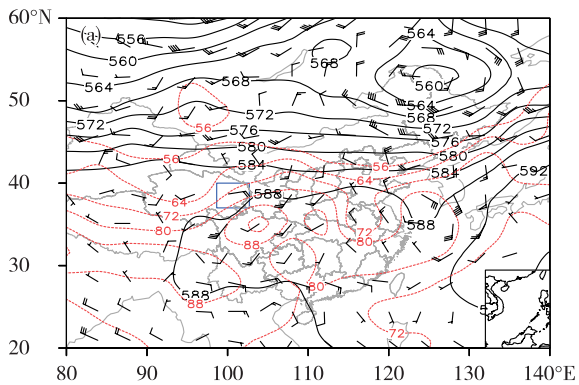
Fig.2 System configuration at 20:00 on 15 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: $^{\circ}\text{C}$; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: $^{\circ}\text{C}$) at 23:30 on 15 and 24-h precipitation (units: mm; the box for precipitation between 10 and 25 mm, the hollow circle for precipitation between 25 and 50 mm, the solid circle for precipitation greater than 50 mm) from 08:00 on 15 to 08:00 on 16 August 2011 (b)

2) 以 2010 年 8 月 10—11 日为例分析第二副型。500 hPa 中高纬地区环流较平, 副高强盛, 呈东西向带状分布, MCC 形成于低值系统底部的平直西风环流中(图 3a)。对应 700 hPa(图略), 来自南海的偏南风与中纬度弱西北风形成一条近似南北向

的中尺度切变线, 850 hPa(图略) 以下东南风输送不断加强。MCC 前部, 700 hPa 以下暖湿空气输送明显, 湿层厚度在 700 hPa 附近; MCC 后部, 700~500 hPa 存在较强冷平流, 且 500~850 hPa 温度差动平流不断增大, 大气不稳定性持续增强, 500 hPa 与

850 hPa假相当位温差达 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷空气从 MCC 后部自高层向低层侵入,触发强不稳定能量释放。

卫星云图上,强降水开始前,青海东部高原、沿副高边缘有多个对流云团形成,并迅速发展合并,最旺盛时(图 3b), $\text{TBB} \leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云罩面积分别为 $14.4 \times 10^4\text{ km}^2$ 和 $15.6 \times 10^4\text{ km}^2$,离心



率接近 1,中心 TBB 达 $-69\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。MCC 从形成到消亡维持了近 16 h,沿 500 hPa 偏西气流向偏东方向缓慢移动,造成青海东部到陇南中到大雨、局部暴雨(图 3b),24 h 最大降水量 71 mm。降水对流性强,陇南有 5 个测站出现短时强降水,最大雨强达 $50\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,出现在 MCC 最旺盛时期的前部。

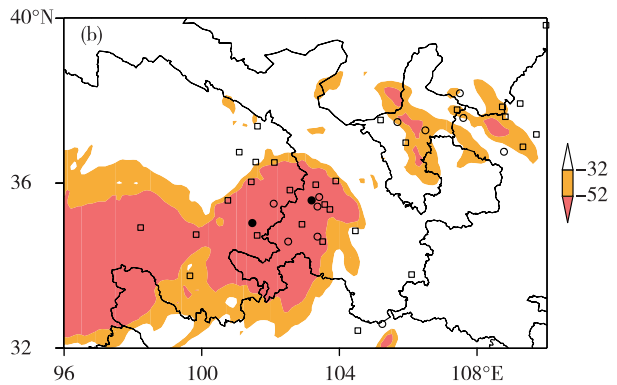


图 3 2010 年 8 月 10 日 20:00 的系统配置图(a;实线为 500 hPa 等高线,单位:dagpm;红色虚线为 850 hPa 假相当位温,单位: $^{\circ}\text{C}$;风矢为 500 hPa 风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;蓝色方框为 MCC 形成区)和 10 日 20:30 的 TBB(填色,单位: $^{\circ}\text{C}$)与 10 日 08:00—11 日 08:00 的 24 h 降水量(单位:mm,方框代表 10~25 mm,空心圆代表 25~50 mm,实心圆代表 50 mm 以上)合成图(b)

Fig.3 System configuration at 20:00 on 10 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: $^{\circ}\text{C}$; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: $^{\circ}\text{C}$) at 20:30 on 10 and 24-h precipitation (units: mm; the box for precipitation between 10 and 25 mm, the hollow circle for precipitation between 25 and 50 mm, the solid circle for precipitation greater than 50 mm) from 08:00 on 10 to 08:00 on 11 August 2010 (b)

3)以 2010 年 7 月 31 日—8 月 1 日为例分析第三副型。500 hPa 高纬地区为一低值系统,副高断裂成两块,一块留在海上,另一块位于高原到河套地区,MCC 形成于两高之间(图 4a)。对应 700 hPa(图略)上两高之间的风场存在明显扰动,850 hPa(图略),来自冷涡后部的偏北风与来自孟加拉湾的西南风形成一条中尺度切变线,且稳定少动。与前两类不同的是,并未出现显著湿区,而与大陆高压相伴,中低层形成一个显著的假相当位温高值区,高值中心强度持续增强,较前两类高 $10 \sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$,500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差达 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷空气沿低层冷涡后部偏北气流向西南方向侵入并持续渗透,触发强的不稳定能量持续释放。

卫星云图上,强降水开始前,在高空槽云系前、850 hPa 切变线东南侧风场辐合的地方形成对流云团,并迅速发展加强,成熟时 $\text{TBB} \leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云罩面积分别为 $5.1 \times 10^4\text{ km}^2$ 和 $8.2 \times 10^4\text{ km}^2$,离心率接近 1,中心 TBB 为 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。之后稳定少动,在缓慢东南移过程中先后 2 次加强,约 7 h(图 4b)后达到最盛。MCC 从形成到消亡维持了近

17 h,先沿 500 hPa 偏西北风向东南方向缓慢移动,后沿 500~850 hPa 之间的平均偏东北气流向西南方向移动,造成山西南部 and 陕西中部中到大雨、部分地区暴雨(图 4b),最大 24 h 降水量 96 mm。降水对流性强,山西南部 and 陕西中部有多个测站出现短时强降水,最大雨强达 $72\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,出现在 MCC 最旺盛时期的南侧。MCC 具有后向传播特点。

综上,三个副型均形成在 200 hPa 反气旋前沿辐散区、中层高湿区或低层高位温区,水汽向云区的卷入和高不稳定能量持续增强,使得 MCC 发展和稳定维持;冷空气从 MCC 后部侵入,以及高层辐散、低层中尺度切变线或涡旋引起的强烈辐合使得大气对流不稳定持续增强,是 MCC 和对流性强降水发生发展的主要机制。但水汽来源、湿层厚度及不稳定度等存在明显差异,造成三个副型的降水强度及持续时间明显不同。

2.2.2 200 hPa 深厚低槽型

此型共有 13 个,以 5—6 月居多。特点:200 hPa 上中高纬地区为一大的低压系统或低压槽,MCC 形成在槽前气流辐散中心(图 1b)。

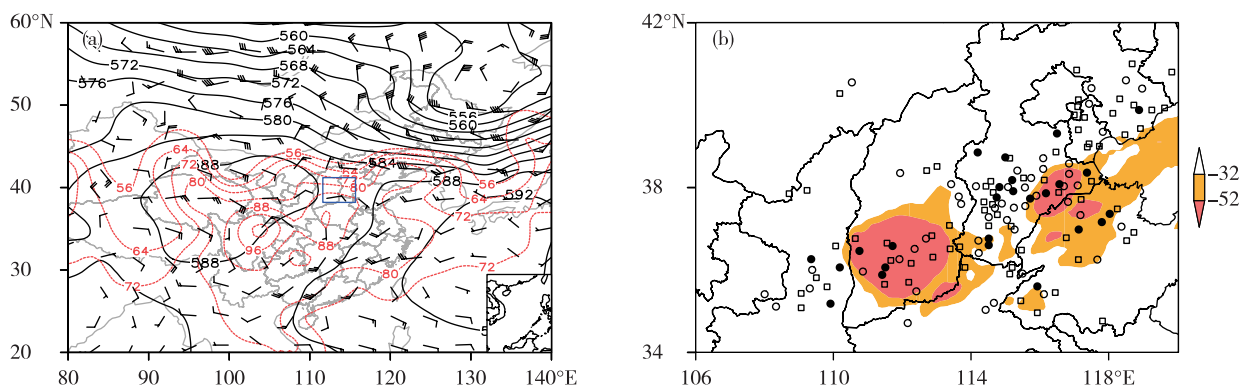


图4 2010年7月31日20:00的系统配置图(a;实线为500 hPa等高线,单位:dagpm;红色虚线为850 hPa假相当位温,单位:°C;风矢为500 hPa风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;蓝色方框为MCC形成区)和8月1日01:30的TBB(填色,单位:°C)与7月31日08:00—8月1日08:00的24 h降水量(单位:mm,方框代表10~25 mm,空心圆代表25~50 mm,实心圆代表50 mm以上)合成图(b)

Fig.4 System configuration at 20:00 on 31 July (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: °C; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: °C) at 01:30 on 1 August and 24-h precipitation (units: mm; the box for precipitation between 10 and 25 mm, the hollow circle for precipitation between 25 and 50 mm, the solid circle for precipitation greater than 50 mm) from 08:00 on 31 July to 08:00 on 1 August 2010 (b)

1)以2007年7月29—30日为例分析第一副型。500 hPa副高强盛且向北伸展,受贝加尔湖西侧深厚西风槽阻挡,在贝加尔湖东侧形成阻塞高压,河套地区则形成一切断低压,MCC形成在切断低压与留在海上的副高之间的西南气流中(图5a)。MCC发展期间,辐合中心向中层伸展,辐合层加厚,高层辐散中心加强,对流不稳定持续加强,强冷空气沿槽后西北气流向MCC区侵入。

卫星云图上,对流云团首先形成在500 hPa副高边缘、中低层风场明显辐合的地方,并不断发展

加强,最旺盛时(图5b),TBB ≤ -52 °C和 ≤ -32 °C的冷云罩面积分别为 $14.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $25.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,离心率为0.8,中心TBB达 -73 °C。之后在其后部有强对流云团发展与之合并。MCC从形成到消亡维持了近18 h,先稳定少动,后沿500~700 hPa强西南气流向东北方向移动,造成山西中南部、河南北部、河北南部等地大范围大到暴雨、部分地区大暴雨、局部特大暴雨(图5b),24 h降水量最大303 mm。降水对流性很强,最大雨强达 $79 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,期间多次出现短时强降水和降雨强度

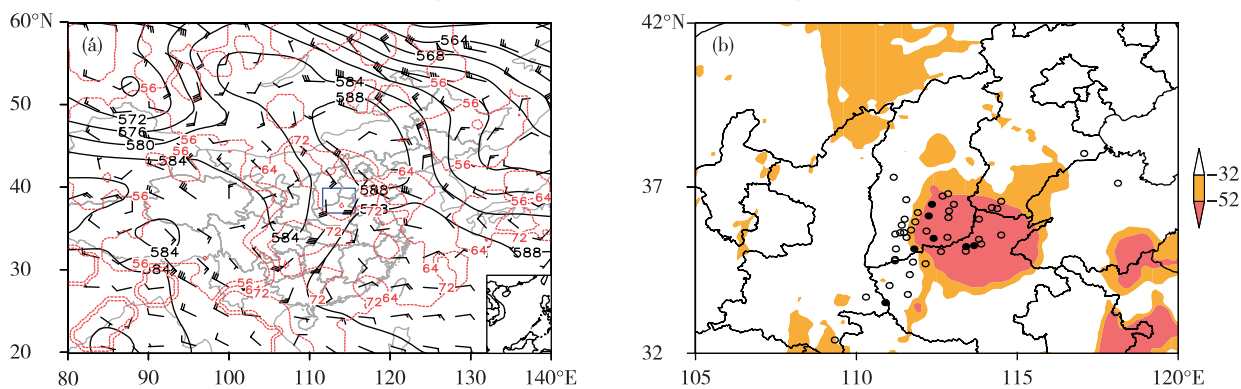


图5 2007年7月29日20:00的系统配置图(a;实线为500 hPa等高线,单位:dagpm;红色虚线为850 hPa假相当位温,单位:°C;风矢为500 hPa风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;蓝色方框为MCC形成区)和29日18:00的TBB(填色,单位:°C)与29日08:00—30日08:00的24 h降水量(单位:mm,空心圆代表50~100 mm,实心圆代表100 mm以上)合成图(b)

Fig.5 System configuration at 20:00 on 29 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: °C; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: °C) at 18:00 on 29 and 24-h precipitation (units: mm; the hollow circle for precipitation between 50 and 100 mm, the solid circle for precipitation greater than 100 mm) from 08:00 on 29 to 08:00 on 30 July 2007 (b)

的加强。

2) 以 2011 年 5 月 19—20 日为例分析第二副型。500 hPa 中高纬地区为一槽一脊型, 中纬度环流较平, 随着高空锋区的南压, 以及来自孟加拉湾的西南气流向北输送, 在青海东部到陇南出现风场扰动, MCC 形成在此处(图 6a)。对应 700 hPa(图略)形成一个中尺度低涡, 涡前西南气流不断加强, 500~700 hPa 存在一暖舌, 500 hPa 与 850 hPa 温度差较小, 大气存在弱的对流不稳定。

卫星云图上, 强降水开始前, 在中低层风场扰动和明显辐合的地方有对流云团形成, 之后在东移过程中迅速发展加强, 最旺盛时(图 6b), TBB ≤ -52 °C 和 ≤ -32 °C 的冷云罩面积分别约 14.4×10^4 km² 和 27.3×10^4 km², 离心率为 0.92, 中心 TBB 为 -56 °C。MCC 沿 500 hPa 偏西气流向偏东方向移动, 造成陇南到陕西交界小到中雨、局部大雨(图 6b), 24 h 最大降雨量 37 mm, 降雨强度小, 持续时间短。

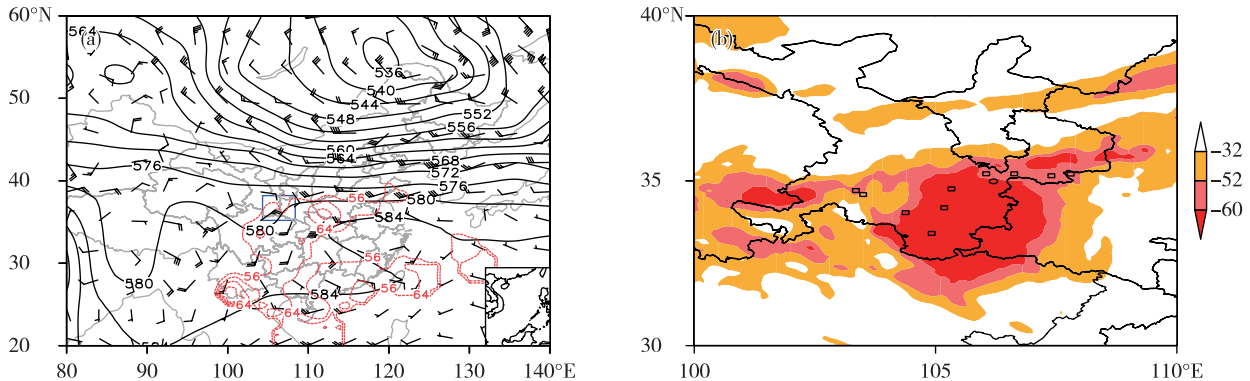


图 6 2011 年 5 月 19 日 20:00 的系统配置图(a; 实线为 500 hPa 等高线, 单位: dagpm; 红色虚线为 850 hPa 假相当位温, 单位: °C; 风矢为 500 hPa 风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$; 蓝色方框为 MCC 形成区)和 19 日 18:00 的 TBB(填色, 单位: °C)与 19 日 08:00—20 日 08:00 的 24 h 降水量(单位: mm; 方框代表 10~25 mm, 空心圆代表 25 mm 以上)合成图(b)

Fig.6 System configuration at 20:00 on 19 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: °C; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $m \cdot s^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: °C) at 18:00 on 19 and 24-h precipitation (units: mm; the box for precipitation between 10 and 25 mm, the hollow circle for precipitation greater than 25 mm) from 08:00 on 19 to 08:00 on 20 May 2011 (b)

2.2.3 200 hPa 急流或急流分支型

此型共有 7 个, 主要出现在 6 月和 8 月。特点: 200 hPa 中高纬地区形成西北急流, 急流常出现分支, MCC 形成在分支区、西北气流前沿的辐散区(图 1c)。

1) 以 2007 年 8 月 8—9 日为例分析第一副型。500 hPa(图 7a) 中高纬地区为一槽一脊型, 中纬度环流较平, 多短波槽活动。700 hPa(图略), 在 $32^{\circ} \sim 36^{\circ}N$ 、 $102^{\circ} \sim 108^{\circ}E$ 附近形成一个约 $440 \text{ km} \times 660 \text{ km}$ 的中尺度气旋式涡旋, 且稳定少动, 涡旋区空气接

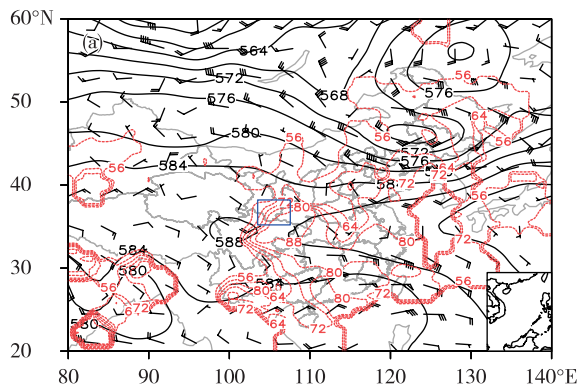
可见, 200 hPa 低槽背景下, 第一副型 500 hPa 存在东阻形势、湿层深厚、切断低压东南侧低层辐合持续增强以及强冷空气从 MCC 后部大举侵入。因此, 对流强度和降水强度更大, 降水持续时间更长, 降雨总量也更大。第二副型能量、水汽以及不稳定性均较弱, 因此对流强度和降水强度均较小, 持续时间也短, 降水总量小。

另外, 统计分析了此型下 MCC 形成时的背景场特征, 发现第一副型下, 500 hPa 以下存在 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风, 500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差在 $-10 \sim -6$ °C 之间, 而第二副型下, 一般在 700 hPa 以下存在 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风, 500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差在 $-8 \sim -5$ °C 之间。第一副型造成的降水多以区域大雨、分散性暴雨为主, 而第二副型则以个别站大到暴雨为主。但 MCC 生成在不同区域, 降水强度还存在明显差异。

近饱和, 对应 850 hPa 为一暖中心。500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差 ≤ -14 °C, 大气存在强对流不稳定。

卫星云图上, 强降水开始前, 从青藏高原到陕西一带、沿 $32^{\circ}N$ 不断有对流云团的生消, 且沿 500 hPa 偏西风自西向东移动, 发展缓慢, 这些对流云团像“列车”一样不断移过陇南和陕西南部, 并在 700 hPa 中尺度涡旋前的辐合上升区发展成熟(图 7b), TBB ≤ -52 °C 和 ≤ -32 °C 的冷云罩面积分别为 $10.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $11.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 离心率为 0.76, 中心

TBB 达 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。MCC 从形成到消亡维持了近 8 h, 先稳定少动, 后沿 500~700 hPa 偏西北气流向东南方向移动。造成甘肃到陕西南部大范围中到大雨、部分地区暴雨(23 个测站)、4 站大暴雨(图 7b),



24 h 最大降水量 160 mm。陇南降雨以稳定性为主, 陕西降雨以混合性为主, 但对流性很强, 最大雨强达 $89\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 期间多次出现短时强降水和降雨强度的加强。

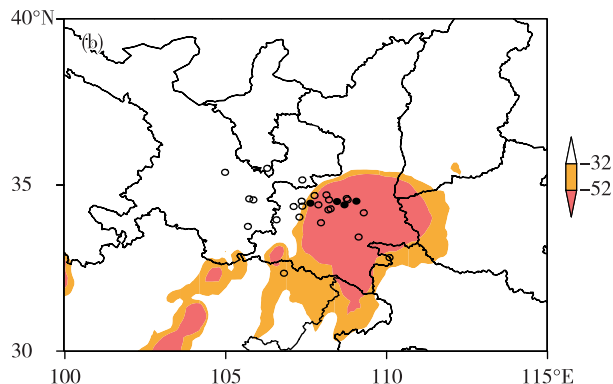


图 7 2007 年 8 月 8 日 20:00 的系统配置图(a; 实线为 500 hPa 等高线, 单位: dagpm; 红色虚线为 850 hPa 假相当位温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 风矢为 500 hPa 风场, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 蓝色方框为 MCC 形成区)和 8 日 23:30 的 TBB(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)与 8 日 08:00—9 日 08:00 的 24 h 降水量(单位: mm, 空心圆代表 50—100 mm, 实心圆代表 100 mm 以上)合成图(b)

Fig.7 System configuration at 20:00 on 8 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: $^{\circ}\text{C}$; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: $^{\circ}\text{C}$) at 23:30 on 8 and 24-h precipitation (units: mm; the hollow circle for precipitation between 50 and 100 mm, the solid circle for precipitation greater than 100 mm) from 08:00 on 8 to 08:00 on 9 August 2007 (b)

2) 以 2010 年 6 月 22—23 日为例分析第二副型。500 hPa 中高纬地区为两槽一脊型(图 8a), 随着东亚大槽向南伸展, 槽底部的风场上形成一个约 $440\text{ km}\times 590\text{ km}$ 的切断式中尺度气旋式涡旋, MCC 形成在此处。在低层(图略), 中尺度气旋式涡旋减

弱为中尺度切变线, 且具有明显的前倾结构, 大气具有一定的对流不稳定性。与前几类不同的是没有明显的水汽输送通道, 但在低层 850 hPa 存在一高能区。

卫星云图上, MCC 在 500 hPa 中尺度涡旋附近

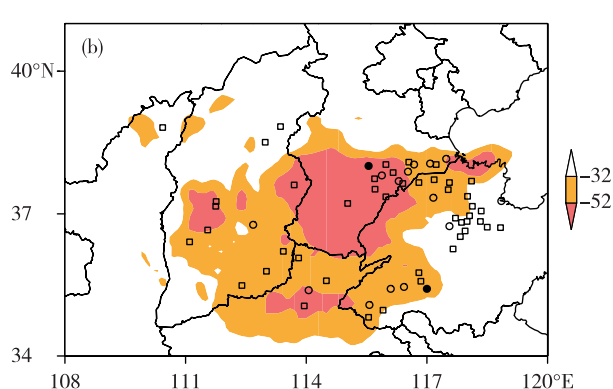
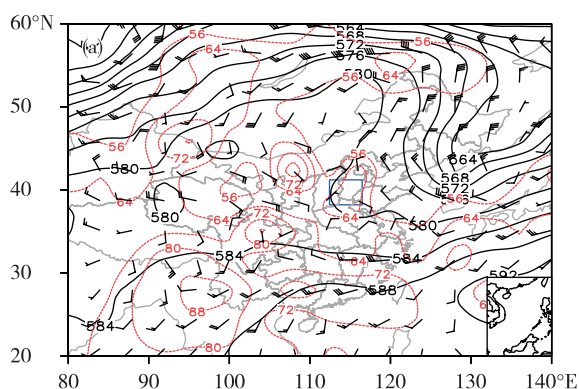


图 8 2010 年 6 月 22 日 20:00 的系统配置图(a; 实线为 500 hPa 等高线, 单位: dagpm; 红色虚线为 850 hPa 假相当位温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 风矢为 500 hPa 风场, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 蓝色方框为 MCC 形成区)和 22 日 16:00 的 TBB(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)与 22 日 08:00—23 日 08:00 的 24 h 降水量(单位: mm, 方框代表 10~25 mm, 空心圆代表 25~50 mm, 实心圆代表 50 mm 以上)合成图(b)

Fig.8 System configuration at 20:00 on 22 (a; the solid line for contour line at 500 hPa, units: dagpm; the dotted red line for pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa, units: $^{\circ}\text{C}$; wind barb for wind field at 500 hPa, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; the blue box for generating area of MCC) & TBB (colored, units: $^{\circ}\text{C}$) at 16:00 on 22 and 24-h precipitation (units: mm; the box for precipitation between 10 and 25 mm, the hollow circle for precipitation between 25 and 50 mm, the solid circle for precipitation greater than 50 mm) from 08:00 on 22 to 08:00 on 23 June 2010 (b)

形成、发展,成熟时(图 8b) TBB ≤ -52 °C 和 ≤ -32 °C 的冷云罩面积分别为 6.4×10^4 km² 和 10.9×10^4 km², 离心率为 0.7, 中心 TBB 为 -68 °C。MCC 沿 500~700 hPa 偏西北气流向东南方向移动, 移动速度较快, 造成山西中东部、河南北部、河北南部等地小到中雨, 个别测站大到暴雨(图 8b), 降水对流性弱, 雨强小。

综上所述, 200 hPa 西北急流或急流分支背景下, 第一副型 500 hPa 副高南侧形成偏东风急流, 东风扰动不断加强, 使得中尺度对流云团不断生消, 像“列车”一样不断移过暴雨区, 具有类似“列车效应”的特点, 而 MCC 也稳定少动, 因此暴雨、大暴雨区非常集中。而第二副型与前几类明显不同, 没有明显的水汽输送通道, 午后太阳辐射造成的局地增温是不稳定能量的主要来源, 因此, 降水强度小, 持续时间短, 总雨量也明显小于其他几类。

3 分型 MCC 结构特征差异的诊断分析

为进一步了解不同分型 MCC 的空间结构特征差异, 采用 NCEP/NCAR FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 计算分析 MCC 形成发展过程中水汽与能量扰动特征; 利用 L 波段探空秒数据和自动站加密观测数据, 分析气象要素的垂直结构以及边界层入流、冷池流出特征及在 MCC 发展过程中的作用, 从而建立 MCC 强降水预报物理模型。

3.1 中低层水汽与能量扰动特征

研究^[19-20]表明, 利用波流相互作用理论可以解释暴雨中尺度对流系统形成机理。为此常计算分析中尺度对流系统演变过程中的扰动发展特征。区域扰动的变化能很好地解释强天气的落区; 而扰动强度则与天气强度密切相关。

本文以 MCC 生命史内所经过区域、向外增大

$3^\circ \times 3^\circ$ 的矩形为计算区域, 利用 NCEP/NCAR FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 计算水汽(比湿)和能量(θ_{se})的区域平均, 用区域内格点值减去平均值, 求取扰动值。选取 MCC 形成前(对流云团发展尚未达 MCC 标准)、发展成熟期(达到 MCC 标准并持续)、消亡期(不再够 MCC 标准)等 3 个时刻, 分析水汽和能量扰动的演变特征, 以揭示不同分型 MCC 在不同生命阶段对水汽和能量需求的差异。

$$A' = A - \bar{A} \quad (1)$$

式中 A 代表比湿或假相当位温, \bar{A} 为该物理量的区域平均, A' 为该物理量的扰动。

分析发现, 无论是哪种环流背景下, MCC 生命期内所经区域, 550 hPa 以下均存在水汽和能量正扰动区, 两侧为负扰动, 正负扰动之间梯度较大。MCC 形成在低层比湿和能量扰动的正值中心附近, 在低层扰动梯度大值区右侧、中层扰动梯度大值区左侧靠近中心的区域发展成熟, 而随着扰动的减小趋于消亡。但不同分型、不同生命期内的扰动正值中心所在高度、中心强度、正扰动的厚度以及垂直结构不同(表 2)。

另外, 不同分型下还存在其他差异: 12 型, 从青藏高原到陕西为一扰动正值带, 其间分布着多个正中心并稳定维持, 这是 MCC 后部不断有新的对流云团形成、发展并与其合并的重要原因; 13 型, 在 MCC 后向传播过程中, 2 次出现正值中心。22 型, 正值中心强度和正扰动厚度更大, 这可能是对于 5 月份的北方, 对流云团发展成 MCC, 对水汽和能量在短时间内增幅的要求更高。31 型, 在 MCC 发展期, 其上游存在多个水汽和能量的正扰动中心, 而且越往上游中心强度越大, 这是造成 MCC 后部不断有新对流云团形成并移过强降水区、形成类似“列车效应”, 从而使强降水持续的重要原因。

表 2 扰动物理量特征对比

Table 2 Characteristic comparison between physical parameters of disturbance

分型	形成期	发展成熟期	消亡期	概述
11	750~1 000, 750~1 000	550~850, 550~800	750 hPa 以上 0~0.5,	正扰动中心位置随高度略西倾, 强度减弱; 消亡期扰动迅速减弱, 低层变为负值。
	1.5~5, 5~15	0.5~1, 2~5	0~2; 750 hPa 以下 -3~	
	2.5, 2.5	3.2, 2.7	-2, -10~-3	
12	750~1 000, 700~1 000	550~1 000, 600~1 000	750 hPa 以上 0.5~1.0,	正扰动中心位置随高度不变, 强度减弱; 成熟期扰动加强; 消亡期扰动减弱, 低层变为负值。扰动强度较第一类强, 消亡期减弱幅度大, 降水强度较第一类大。
	1~3, 5~10	1~8, 4~30	0~1; 750 hPa 以下 -3~	
	2.5, 3.0	4.7, 4.1	-2, -20~-5	

续表

分型	形成期	发展成熟期	消亡期	概述
13	850~1 000,900~1 000	550~850,550~750	700 hPa 以上 0.1~0.6,	正扰动中心位置随高度先西倾后东南倾,强度较前两类小,但梯度大,成熟期扰动加强;消亡期扰动减弱慢,低层为负。降水强度较前两类大。
	0.5~2,3~5	0.5~2.5,2~8	1~2;700 hPa 以下-6~	
	1.5,1.0	3.2,2.2	-2,-10~-5	
21	700~1 000,900~1 000	600~1 000,600~1 000	700 hPa 以上 0.3~0.6,	正扰动中心位置随高度不变,强度减弱;成熟期正扰动厚度加大;消亡期扰动减弱慢,低层为负。正扰动厚度增幅大,降水强度更大。
	1~4,3~100	1~2,2~5	0.5~1.5;700 hPa 以下	
	3.0,1.0	4.1,4.1	-1.0~-0.5,-3~-2	
22	500~1 000,550~1 000	550~1 000,700~1 000	比湿扰动整层在 0 左右,	正扰动中心位置随高度西倾,强度减弱;成熟期扰动变化不大;消亡期整层为 0 或负。正扰动厚度和强度较前几类都大,但梯度小,减弱迅速,降水强度小,时间短。
	0.8~8,4~25	0.8~8,5~20	能量扰动整层为负	
	5.5,4.7	4.7,3.0		
31	700~1 000,650~1 000	550~1 000,700~1 000	700 hPa 以上 0.3~1,0~	正扰动中心位置随高度西倾,强度减弱;成熟期正扰动强度增大、厚度加大;消亡期迅速减弱,低层为负。降水强度大。
	3~6,10~20	5~12,20~50	1;700 hPa 以下-4~-1,	
	3.0,3.5	4.7,3.0	-10~-4	
32	700~1 000,700~1 000	550~650,550~650	比湿扰动 750 hPa 以上	正扰动中心位置随高度不变,强度减弱;消亡期能量扰动整层为负。扰动小,厚度小,减弱快,雨量和强度均小,持续时间短。
	2~5,2~10	1.2~2,3~4	0~1,以下-3~-2;能量	
	3.0,3.0	1.2,1.2	扰动整层为负	

注:表中每个分型第一行分别为比湿和能量扰动正值中心或梯度大值区所在高度(单位:hPa);第二行分别为比湿和能量扰动正值中心强度(单位分别为 $g \cdot kg^{-1}$ 和 $^{\circ}C$);第三行分别为比湿和能量正扰动的厚度(单位:km)。

3.2 气象要素垂直结构演变

L 波段探空秒数据能更精细地刻画云系及环境的垂直结构特点。该探空业务从 2011 年开始,因此,选取 2011 年 8 月 15 日(代表第一型)和 5 月 19 日(代表第二型)等 2 个个例,利用 MCC 成熟时中心位置所在测站的 L 波段探空秒数据,分析 MCC 发展演变过程中,气象要素的垂直结构变化。相对湿度 80% 为云阈值,小于 40% 为干层,大于 70% 为湿层,40%~70% 为干湿过渡层。

3.2.1 200 hPa 南亚高压稳定型

MCC 强降水前(图 9a),云系较少,云层较薄,在 2.2~2.7 km 之间出现分层现象,云体结构松散。湿层在 3.2 km 以下,3.2~4.1 km 为干湿过渡层,4.1 km 以上为深厚干层。0 $^{\circ}C$ 层位于 6.8 km。4.5 km 以下存在 5 处逆温层。风场上,1.5~3 km 之间风随高度逆转,存在冷平流;3~12 km 之间为深厚的西南气流;12 km 以上风随高度顺转,存在暖平流;风速随高度先增后减。0~6 km 风垂直切变属中等强度。临近强降水(图 9b),云系发展,分层现

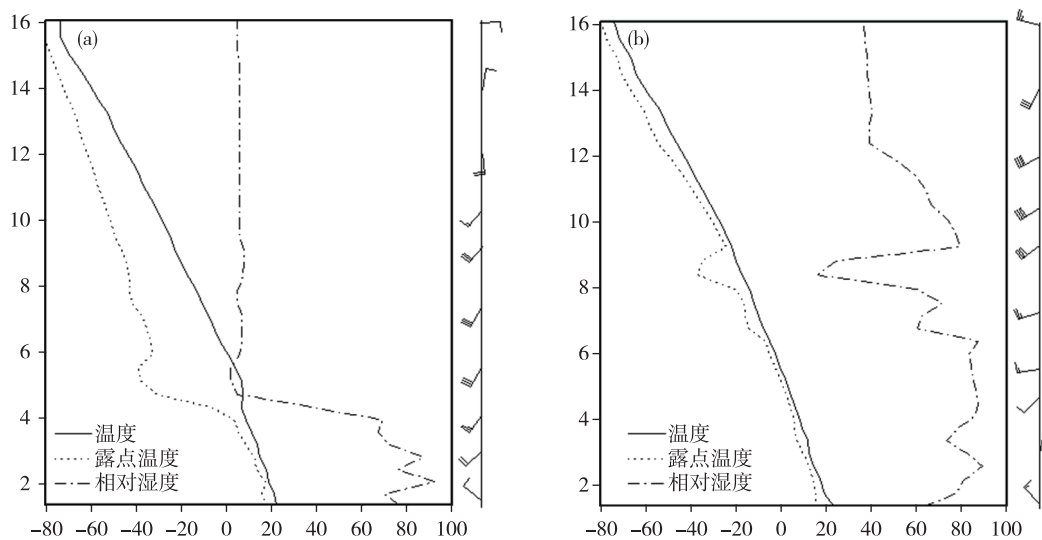


图9 2011年8月15日平凉L波段探空秒数据(a. 08:00, b. 20:00)

Fig.9 L-band second-level radiosonde data of Pingliang Station on 15 August 2011 (a. 08:00, b. 20:00)

象消失,云体结构变得密实,云顶高度伸展到 6.2 km,云层显著增厚,云内水汽含量明显增大。湿层向上伸展到 6.2 km,7.5~8 km 之间以及 12 km 以上为干层,而干湿过渡层增厚,同时 0 °C 层高度下降到 5 km,逆温层消失。风场上,低层为暖平流,高层为冷平流,风速随高度增大,0~6 km 风垂直切变减小。

3.2.2 200 hPa 低槽型

MCC 强降水前(图 10a),云系更少,云层更薄,在 3.5~4.2 km 之间出现分层现象,湿层达 4.1 km,4.1~13 km 之间为干湿过渡层,13 km 以上空气干燥。0 °C 层高度位于 4.7 km,4.1 km 以下存在 2 处逆温层。风场上,1.5~4.1 km 之间风随高度顺转,为暖平流,4.1 km 以上为西南风,风速随高度增大;0~6 km 风垂直切变较大。临近强降水(图 10b),云

系迅速发展,云顶高度伸展到 9.8 km,云体结构变密,云中水汽含量明显增大;湿层厚度伸展到 11 km,干湿过渡层变薄,11.7 km 以上为干层。同时 0 °C 层高度下降到 4 km。风场上,低层暖平流加强,高层冷平流维持,0~6 km 风垂直切变减小。

可见,云系分层现象消失,云顶向上伸展,云体加厚,云内水汽含量增加,是 MCC 发展的先兆信息;而云顶高度下降,凝结高度降低,逆温层消失,是 MCC 持续发展并即将达到成熟的提示。但不同分型下,这种垂直结构特征的变化存在差异。另外,对于所选取的 200 hPa 高空急流或急流分支型的个例(第三型),利用加密探空资料分析了气象要素的垂直结构,发现 MCC 发展期间,低层暖平流和高层冷平流持续加强,但凝结高度下降不明显。

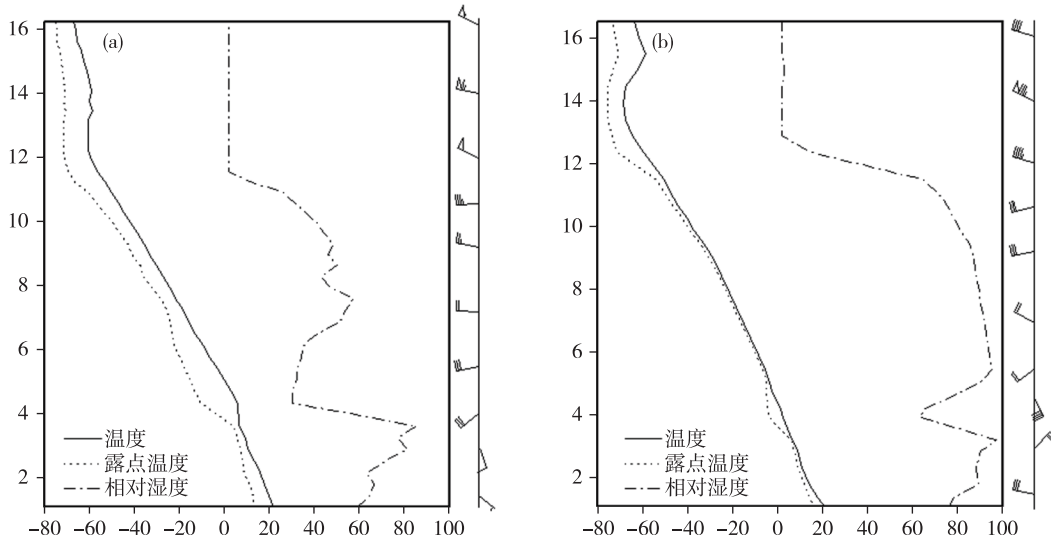


图 10 2011 年 5 月 19 日武都 L 波段探空秒数据(a. 08:00, b. 20:00)

Fig.10 L-band second-level radiosonde data of Wudu Station on 19 May 2011 (a. 08:00, b. 20:00)

3.3 边界层入流、地面冷池及出流的作用

ROMERO et al.^[21] 研究了一系列对流系统的生命史及相互作用,认为对流产生的冷堆和外流对对流的传播非常重要;肖现等^[22] 的研究也认为,冷池和环境风场相互配合,对对流风暴的发展传播具有重要影响。为揭示冷池和中尺度高压在 MCC 发展演变过程中的作用,利用地面自动站加密观测和 L 波段探空秒数据等,分别分析地面温度、露点、风场、海平面气压及边界层入流变化特征。

3.3.1 200 hPa 南亚高压稳定型

1)11 型(图 11a)。地面存在稳定少动的冷锋,锋前暖中心强度稳定增强。受上游稳定性降水蒸发影响,在暖中心前部形成一冷池,中心强度最强

时较周围温度偏低 8 °C。对应海平面气压场上,从四川到山西为一低压,低压稳定维持,中心强度增强;在冷池消失的地方,形成一个中尺度高压,维持了 4 h 后减弱。MCC 形成在锋面附近靠近暖中心一侧、低压中心附近,而在冷池和中尺度高压后部、暖中心附近发展成熟。

2)12 型(图 11b)。整个江淮和长江中下游地区受强盛副高控制,随着副高边缘暖湿气流的输送和太阳辐射增强,青海到甘肃一带气温迅速升高,中尺度对流云团在升温最大的区域形成并发展。之后,沿 31°N 从高原到甘肃有多个暖中心形成并维持,在这些暖中心附近不断有中尺度对流云团形成、东移,北侧是具有多个冷中心的带状冷气团。

受副高北侧短波槽降水蒸发影响, MCC 下方始终维持一个 $20\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷中心,冷池最强时较周围温度低 $8\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时在 MCC 成熟区,始终存在一个温度密集带。对应海平面气压场上,从青藏高原到华北,维持稳定的东高西低形势,华北位于高压后部回流区,而高原到甘肃南部为一低压带,其中分布着多个低压中心, MCC 形成发展的区域始终为一低压中心。在 MCC 后部新生对流云团前沿,形成一个中尺度高压,维持了近 4 h。

3) 13 型(图 11c)。与 500 hPa 副高断裂为 2 块相对应,海上和大陆分别出现 2 个暖区,大陆暖中心和其北侧的冷区强度持续增强, MCC 在温度梯度大值区形成、发展并稳定维持。两高之间的切变区域形成一个稳定的暖中心并持续加强,是 MCC 后向传播后得以再次发展加强并稳定维持的重要原因。受高空槽降水蒸发影响,在 MCC 前侧形成一个不断

增强的冷中心,中心强度最强时较周围温度偏低 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,该冷池稳定维持了 6 h。对应气压场上, MCC 在气旋附近形成,并在两高之间暖低区获得 2 次发展。在 MCC 再次发展的区域前侧形成一个中尺度高压,但仅维持 2 h,中心强度和高压尺度均较小。

可见,在 200 hPa 南亚高压稳定的环流背景下,冷池与西路冷空气从两侧夹挤,与暖气团形成长时间对峙,使得暖中心强度持续增强并稳定维持,是 MCC 发展的重要能量来源;冷池与中尺度高压产生的干冷空气外流,持续从 MCC 前侧进入,与 MCC 前部边界层西南暖湿入流(图 12a-c) 交汇,加强了 MCC 内部中尺度环流以及水汽的凝结,造成 MCC 稳定维持。所不同的是,12 型地面不存在明显冷锋,13 型冷池强度强,持续时间长,而中尺度高压强度弱、持续时间短。

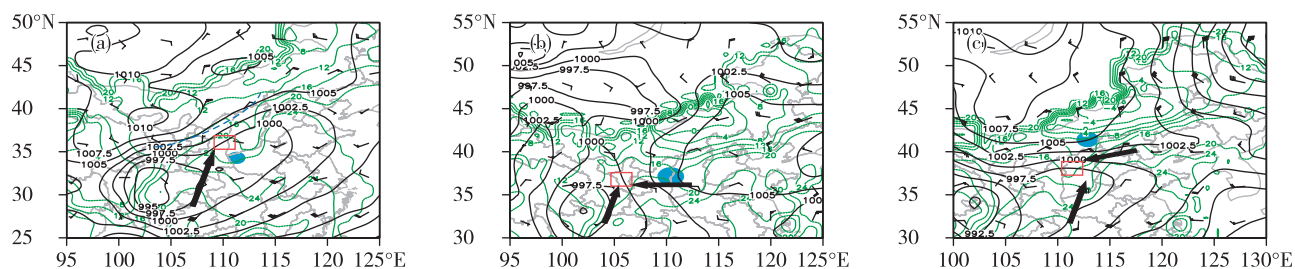


图 11 地面气压(实线,单位:hPa)、露点(绿色虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、冷池(蓝色椭圆阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)以及 20:00 的 850 hPa 风场(单位: $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)(黑色箭头为边界层入流,红色方框为 MCC 成熟时位置,蓝色虚线为锋面位置;a.2011 年 8 月 15 日 17:00,b.2010 年 8 月 15 日 14:00,c.2010 年 7 月 30 日 17:00)

Fig.11 Surface pressure (solid line, units: hPa), dew point (dotted green line, units: $^{\circ}\text{C}$), cold pool (elliptical blue shade area, units: $^{\circ}\text{C}$), and wind field (unit: $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 20:00 (the black arrow for boundary layer inflow, the red box for location of mature MCC, the blue dotted line for location of surface front; a. 17:00 on 15 August 2011, b. 14:00 on 15 August 2010, c. 17:00 on 30 July 2010)

3.3.2 200 hPa 低槽型

分析表明,在 200 hPa 深厚低槽环流背景影响下,两个副型地面(图略)均无冷池和中尺度高压形成。MCC 在低层偏南风入流卷入处和温度梯度大值区形成(图 12d,e);入流风速和温度梯度的加大是 MCC 发展成熟的重要因素。所不同的是,21 型地面存在中尺度露点锋,500 hPa 存在阻塞形势且副高稳定少动造成低空偏南风暖湿入流和边界层东南风暖湿入流较 22 型强盛(图 12d)。

3.3.3 200 hPa 西北急流或急流分支型

在 200 hPa 西北急流或急流分支型的环流背景下,两个副型地面(图略)均无中尺度高压形成。MCC 在边界层入流辐合处以及地面温度梯度大值区形成(图 12f,g),温度梯度持续加大和稳定南压

是 MCC 发展维持的重要因素。所不同的是,31 型虽然有冷池形成,但冷池强度弱,持续时间短;而 32 型边界层入流较弱,因此, MCC 虽然持续时间较长,但降水较弱。

3.4 MCC 大暴雨预报物理模型

从以上天气学分析和水汽、动热力结构特征的对比诊断,揭示了 MCC 形成的物理机制差异,从而建立 MCC 强降水预报物理模型(图 12)。

4 结论

通过综合分析,建立了黄河中游地区 MCC 强降水预报的物理模型。

1) 黄河中游地区的 MCC 主要生成在夏季,多在傍晚至次日凌晨发展、成熟,具有云顶亮温低、生

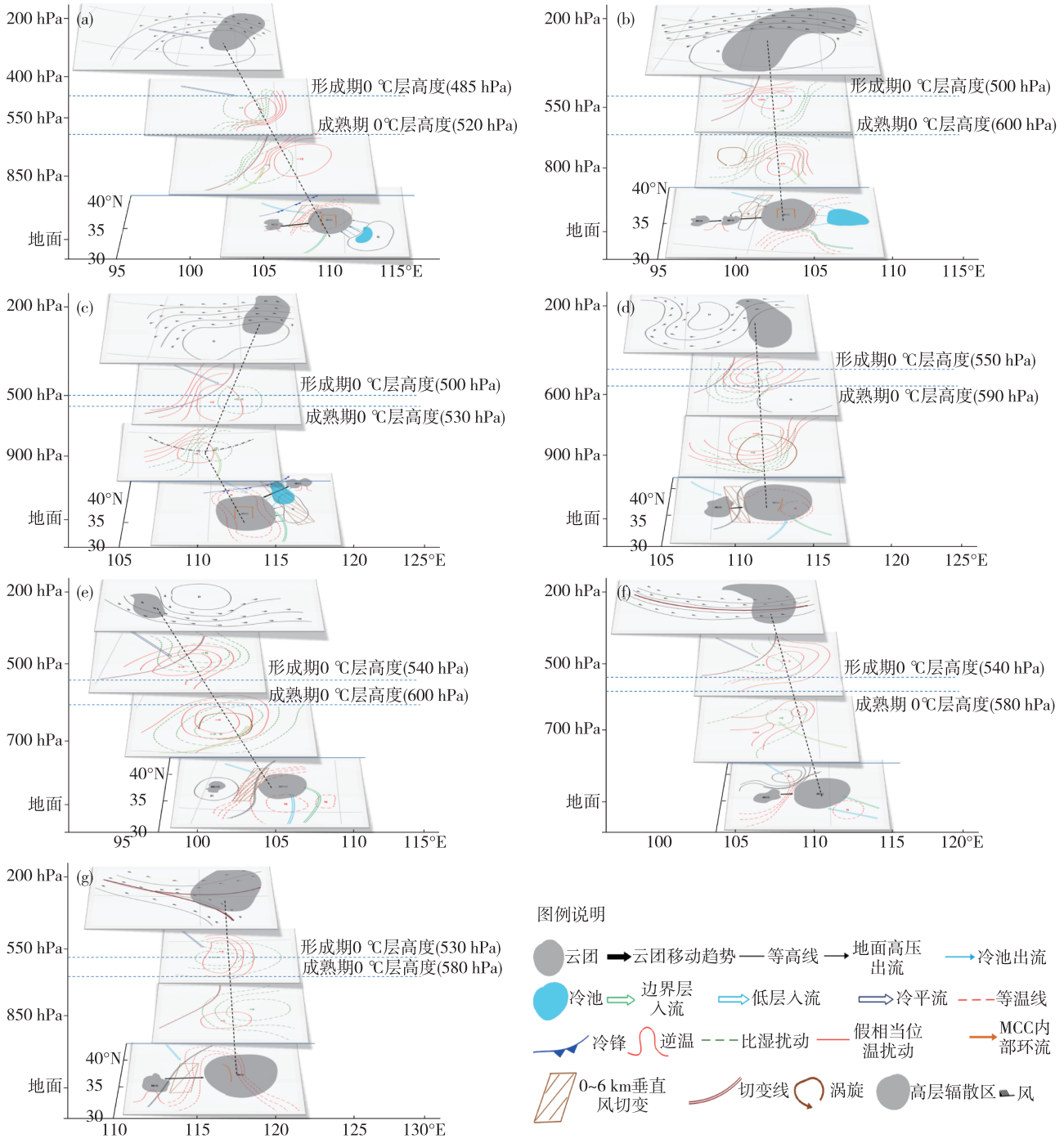


图 12 MCC 强降水预报物理模型(a.11 型, b.12 型, c.13 型, d.21 型, e.22 型, f.31 型, g.32 型)

Fig.12 Physical models of heavy MCC precipitation (a. Type 11, b. Type 12, c. Type 13, d. Type 21, e. Type 22, f. Type 31, g. Type 32)

命史长、移动缓慢等特点；多数向偏东方向移动，个别由于受 500 hPa 东阻形势影响存在后向传播特点；MCC 降水以暴雨及以上量级为主，强度大，地域特征明显。

2) 依据 200 hPa 环流形势特点将 MCC 分为南亚高压稳定型、高空深厚低槽型、高空西北急流或急流分支型等 3 个环流型，结合 500 hPa 形势特点，

又将第一型分为 3 个副型，第二型和第三型各分为 2 个副型。不同的天气学分型下，MCC 生成区域、发展强度及造成的降水存在明显差异。

3) 水汽和能量扰动诊断揭示，MCC 形成在低层比湿和能量扰动的正值中心附近，在低层扰动梯度大值区右侧、中层扰动梯度大值区左侧靠近中心的区域发展成熟。扰动正值中心所在高度、中心强

度、正扰动厚度等物理因子与 MCC 发展以及降水强度关系密切。

4) L 波段探空秒数据分析表明,云系分层现象消失,云顶向上伸展,云体加厚,云内水汽含量增加,是 MCC 开始发展的先兆信息;若云顶高度开始下降,云内水汽含量接近饱和,同时湿层厚度加大,凝结高度降低,逆温层消失,0~6 km 风垂直切变减小,是 MCC 达到成熟、强降水开始的前兆。但不同分型下,这种垂直结构特征的变化存在一定差异。

5) 地面加密观测和低层风场分析揭示:

a) 第一主型, MCC 形成在地面温度梯度大值区、低压中心附近,在暖中心和低压中心叠加的区域发展成熟。受高空槽降水蒸发影响, MCC 前侧地面出现冷池;受低空次级环流下沉支影响,在风暴前侧形成中尺度高压,但中尺度高压的作用明显小于冷池的作用。冷池强度和维持时间与 MCC 降水强度以及维持时间密切相关,冷池强度和边界层入流风速越大, MCC 降水强度越大;冷池和边界层入流维持时间越长, MCC 及降水的维持时间也越长。

b) 第二和第三主型,地面基本无冷池和中尺度高压形成。MCC 在边界层偏南风入流卷入处和温度梯度大值区形成;入流风速和温度梯度的加大是 MCC 发展成熟的重要因素,中尺度露点锋对 MCC 强降水的触发作用不可忽视。MCC 降水与边界层入流关系密切。

在主型相似特征下,各个副型仍存在一定差异。

参考文献:

- [1] 马禹,王旭,陶祖钰.中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J].自然科学进展,1997,7(6):701-706.
- [2] 赵桂香,王晓丽,吴洪.黄河中游地区中尺度对流系统的统计特征[J].干旱气象,2016,34(6):1016-1026.
- [3] 覃丹宇,江吉喜,方宗义,等. MCC 和一般暴雨云团发生发展的物理条件差异[J].应用气象学报,2004,15(5):590-600.
- [4] 侯建忠,孙伟,杜继稳.青藏高原东北侧一次 MCC 的环境流场及动力分析[J].高原气象,2005,24(5):805-810.
- [5] 黎惠金,李向红,黄芳,等.广西一次特大暴雨的 MCC 演变过程及结构特征分析[J].高原气象,2013,32(3):806-817.
- [6] 赵桂香,王晓丽,王一颀.黄河中游地区初春与盛夏 MCC 结构特征比较分析[J].高原气象,2017,36(6):1638-1654.
- [7] 高帆,张永婧,李瑞,等.2015年8月3日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):96-101.
- [8] 赵桂香,薄燕青,邱贵强,等.黄河中游一次大暴雨的观测分析与数值模拟[J].高原气象,2017,36(2):436-454.
- [9] 黄治勇,谌伟,张文,等.长江中下游深秋季节一次 MCC 过程的成因[J].长江流域资源与环境,2012,21(8):1025-1031.
- [10] 侯淑梅,孙鹏程,杨璐瑛,等.环境场条件对雷暴传播运动影响实例分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):58-70.
- [11] 杨忠明,吴浙红,王兴菊.贵州中南部 2 次 MCC 致洪暴雨的综合分析[J].干旱气象,2013,31(2):362-372.
- [12] 杨晓霞.副热带高压边缘连续两次强降水形成机制分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):62-72.
- [13] 张立祥,李泽椿.一次东北冷涡 MCS 边界层特征数值模拟分析[J].气象学报,2009,67(1):75-82.
- [14] 朱义青,郭宝阳,王玉亮,等.一次低槽冷锋暴雨数值模拟和诊断分析[J].山东气象,2016,36(3):13-19.
- [15] 赵桂香,赵建峰,杨东,等.山西一次大暴雨过程云图及环境场的特征分析[J].高原气象,2013,32(6):1747-1757.
- [16] 井喜,屠妮妮,井宇,等.中国 MCC 时空分布与天气学特征分析[J].高原气象,2013,32(6):1597-1607.
- [17] MADDOX R A. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Ameteor Soc, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [18] MADDOX R A. Large-scale meteorological conditions associated with mid-latitude mesoscale convective complexes [J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(7): 1475-1493.
- [19] 高守亭,孙建华,崔晓鹏.暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究[J].大气科学,2008,32(4):854-866.
- [20] 冉令坤,齐彦斌,郝寿昌.“7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J].大气科学,2014,38(1):83-100.
- [21] ROMERO R C, DOSWELL C A III, RIOSALIDO R. Observations and fine-grid simulation of a convective outbreak in northeastern Spain: Importance of diurnal forcing and convective cold pools[J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(9): 2157-2182.
- [22] 肖现,陈明轩,高峰,等.弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].大气科学,2015,39(1):100-124.