

薛春芳, 侯建忠, 陈小婷, 等. 青藏高原东北侧 MCC 特征分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 214–224, [XUE Chunfang, HOU Jianzhong, CHEN Xiaoting, et al. Characteristics Analysis of MCC in the Northeast Side of Tibet Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(2): 214–224], DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0214

## 青藏高原东北侧 MCC 特征分析

薛春芳<sup>1</sup>, 侯建忠<sup>2</sup>, 陈小婷<sup>2</sup>, 井宇<sup>2</sup>, 薛荣<sup>3</sup>

(1. 陕西省气象局, 陕西 西安 710014; 2. 陕西省气象台, 陕西 西安 710014;  
3. 陕西省西安市气象台, 陕西 西安 710016)

**摘要:**从卫星云图、环流形势、水汽输送和冷平流作用等方面出发,对2000—2015年发生在青藏高原东北侧的中尺度对流复合体(MCC)进行综合分析,寻求该区域MCC特征,以有效提高该地区此类天气的预报、预警及防灾减灾服务能力。结果表明,2000—2015年,青藏高原东北侧MCC出现在秦岭南侧的占66%,多形成于后半夜;秦岭北侧的占34%,基本发生于傍晚至凌晨。MCC多出现在200 hPa南亚高压反气旋的东北侧;对流层中低层,甘南、四川东部地区有低涡或切变配合;地面上,四川东部及陕南多为稳定少动的热低压控制。MCC发生时,南亚高压、低涡或切变相应东移,地面热低压北移,其北侧的冷高压同步南压明显。秦岭南侧的MCC多以对流单体发展或对流云团合并加强形成,此类MCC北伸、东移特征明显;秦岭北侧的MCC多为冷锋云系前部暖区的对流云团发展形成,该类MCC东移特征明显。青藏高原东北侧MCC的强降水往往出现在TBB梯度最大一侧,最大小时降雨量与TBB最低时段匹配较好。

**关键词:**青藏高原东北侧; MCC; 合成分析; 西南涡(武都涡); 高空反气旋环流; 地面冷锋或冷平流

**文章编号:**1006-7639(2017)-02-0214-11 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0214

**中图分类号:**P458.2

**文献标识码:**A

### 引言

中尺度对流系统是形成暴雨的主要系统之一,是暴雨的直接制造者,而MCC又是中尺度对流系统中范围最大、最强的降水系统。1980年,Maddox首先用红外云图确定中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complexes,简称MCC)的定义和物理特征<sup>[1]</sup>,我国许多气象工作者对华南、西南、华北、华东、东北和青藏高原东南部等区域MCC的气候特征和形成、发展演变特征以及预报进行了广泛而深入的分析研究<sup>[2-19]</sup>,取得了不少成果,其中部分研究成果已在暴雨预报中发挥了显著作用。然而,不同地区的MCC物理特征和形成条件、生命史以及降水特征等存在较大差异,且有明显的地域特点,因此针对不同地区有必要进行再分析研究。

在陕西预报业务中发现,青藏高原东北侧的重大暴雨灾害事件中常伴有MCC的直接参与<sup>[19-20]</sup>。

如2007年8月8日(简称“07.08.08”,其余类似)发生在陕西关中的一次MCC暴雨天气过程,致使陕西32站出现暴雨,关中地区8个县(市)日降水量突破1961年以来的最大值,礼泉日降水量达215.0 mm,直接经济损失超过8亿元。就青藏高原东北侧及其周边地区而言,有关MCC的研究多偏重于个例分析<sup>[19-21]</sup>。因此有必要对该区域MCC的气候规律、生成环境及物理量场等方面进行系统分析和研究,以有效提高该地区此类天气的预报预警能力。

### 1 资料与方法

利用2000—2015年GMS-5卫星云图和FY-2系列卫星云顶亮温(TBB)逐时资料,以及所选天气过程的降水量逐时资料,依照MCC标准<sup>[22]</sup>,对发生在四川东北部、甘肃东南部和东部及陕西境内的暴雨过程进行分析,筛选出MCC个例,采用合成分析方法,从时空分布、环流场、冷平流及水汽输送等方

收稿日期:2016-02-25;改回日期:2016-10-14

基金项目:公益性行业(气象)科研专项“西北地区复杂地形下雷暴及短时强降水预报预警关键技术研究”(GYHY201306006)和国家自然科学基金“黄河中游地区突发性大暴雨MCC结构特征研究”(41475050)共同资助

作者简介:薛春芳(1967-),女,硕士,高级工程师,主要从事天气气候研究。E-mail:xuecf2002@163.com

面进行分析。

## 2 青藏高原东北侧 MCC 的时空特征

通过对 2000—2015 年青藏高原东北侧及周边地区 GMS-5 或 FY-2 系列卫星云图及降水逐时资料比对分析发现,满足 MCC 条件的过程共有 15 次(表 1),平均每年出现 1.0 次。其中,2000—2004 年和 2008 年、2014 年均未出现 MCC,2005 年、2009 年和 2012 年各出现 1 次,其余年份各出现 2 次。从月分布特征来看,6 月 4 次,7 月 7 次,8 月 4 次,其中 6 月上旬、7 月中旬和 8 月下旬均未出现,7 月上旬最多为 5 次,其余为 2 次。就日变化而言,MCC 生成、成熟出现在后半夜至上午 7 次,上午至下午 4 次,傍晚至凌晨 4 次。

就地域而言,青藏高原东北侧的 MCC 空间分

布呈南多北少,秦岭以北的甘肃东部、陕北、关中地区发生 MCC 天气过程 5 次,而秦岭以南的四川东北部、甘南、陕南地区出现 10 次,可见青藏高原东北侧秦岭以南区域 MCC 相对高发。另外还发现,该区域有时会连续两日出现 MCC,如 2011 年 7 月 5—6 日、2015 年 6 月 28—29 日。值得注意的是,在秦岭以北出现的 5 次 MCC 过程中,4 次发生、加强在傍晚至凌晨时段,特征明显,这与华北、黄河中游及江苏北部等区域的 MCC<sup>[8,10,17]</sup>多形成于上半夜相类似;秦岭以南的 MCC 在后半夜发生、加强和成熟占多数(6 次),这与青藏高原东南部<sup>[6]</sup>的 MCC 多形成于上半夜有所不同。秦岭南侧及陕北的 MCC 在夜间发生加强的特征与巴山夜雨和鄂尔多斯盆地夜暴雨多的特征有一致性<sup>[23]</sup>。

表 1 2000—2015 年青藏高原东北侧 MCC 发生时段、最大降水及影响系统统计

Tab. 1 The statistics of the occurrence time, daily maximum precipitation, moving path and weather influence system of MCC over the northeast side of the Tibetan Plateau from 2000 to 2015

日期	出现地域	出现时段	日最大 降雨量/mm	移动方向	冷空气影响路径 (700,850 hPa)	700 hPa 影响系统
2005-07-01	甘肃中东部	18:00—02:00	57	东移为主	西侧侵入 MCC	甘肃东部切变
2006-07-22	陇南东、陕南西部	03:00—11:00	87	北伸为主	东、北侧侵入 MCC	汉中切变
2006-08-14	陕西关中、陕南东部	22:00—04:00	140	西北向东南移	西、北侧侵入 MCC	关中西部切变
2007-07-05	川东北、陕南西部	00:00—10:00	172	北伸、东移	西、北侧侵入 MCC	甘肃东部切变
2007-08-08	陕西关中南中部	20:00—04:00	215	东移加强	西、北侧侵入 MCC	甘南低涡
2009-06-19	川东北、陕南西部	06:00—14:00	102	北伸、东移	北侧侵入 MCC	甘南低涡
2010-08-01	陕北西南、陇东北部	00:00—07:00	103	东北向西南移	北、东侧侵入 MCC	陕北南部切变
2010-08-11	陕西关中东、山西南部	16:00—02:00	123	东移为主	北侧侵入 MCC	甘南低涡
2011-07-05	川东北、陕南西部	03:00—10:00	118	加强北伸、东移	西北侧侵入 MCC	甘南低涡
2011-07-06	川东北、陕南中部	08:00—15:00	121	合并北伸、东移	西侧补充冷空气	甘南低涡
2012-07-07	川东北、陕南西部	00:00—10:00	79	加强北伸	西北侧侵入 MCC	甘南切变
2013-06-20	陇南东、陕南西部	02:00—12:00	77	北伸加强、东移	东西两侧侵入 MCC	甘南切变
2013-07-22	川东北、陕南大部	02:00—08:00	85	加强北伸	西、北侧侵入 MCC	甘南切变
2015-06-28	川东北、陕南西部	05:00—15:00	142	北伸、东移	东北侧侵入 MCC	甘南辐合线
2015-06-29	川东北、陕南南部	09:00—16:00	126	东移为主	东侧补充冷空气	甘南切变

## 3 青藏高原东北侧 MCC 的环境场特征

### 3.1 地面环境场特征

地面图能够综合反映天气系统、要素变化以及冷空气的位置、强弱和移向等特征。选取 MCC 发生

前和发生时特征较好的陇东、陕南西部型和关中东、陕南东部型 2 类个例分别进行地面形势合成分析。

分析发现,多数青藏高原东北侧 MCC 的地面环境场(图略),MCC 无论是出现在秦岭南侧还是北侧,在其发生的前一时次,四川中东部、陕南一带均为一闭合热低压中心或低压区,甘肃中东部、陕西关

中境内或山西中南部均受冷高压中心或高压带控制,而在 MCC 发生至加强时,其冷高压中心或高压带控制区南压加强十分明显。这种地面形势场分布和演变特征在陇东、陕南西部及关中东、陕南东部 MCC 发生前和发生时的地面形势合成图(图 1)中表现得非常清楚;同时在 MCC 发生和加强时,影响 MCC 的冷高压或高压带与热低压或低压区具有一定的相向运动特征,即原有的地面冷高压加强、南压(或南移)、东移(或西伸)较明显,而位于四川一带的热低压相对稳定并略有加深、北抬、东移,使其冷高压与热低压之间形成一气压梯度密集带。上述地面形势演变特征在青藏高原东北侧的其他类 MCC 发生前、发生时的合成图中都类似存在(图略)。图 1 基本清晰地反映出多数青藏高原东北侧 MCC 过程中,其地面冷高压及热低压移动和加强(加深)时的演变特征,具有一定的代表性和共性。如:“05.07.01”甘肃兰州附近、“07.08.08”陕西关中、“11.07.05”陕南西部等发生的 MCC 过程均有此特征出现,且 MCC 多出现在气压梯度密集带南侧。当 MCC 在秦岭南侧时,其位置偏向于暖空气一侧,冷空气主体多在甘肃中东部,经过甘肃武都

进入秦岭南侧的陇南、陕南西部一带;当 MCC 在秦岭北侧时,其位置偏向于冷空气一侧(图略)。总体而言,影响青藏高原东北侧 MCC 的冷空气移动路径有 2 条:一是经甘肃中部、东部,沿西北—东南方向侵入秦岭南侧或进入关中;二是从陕西东侧经山西进入陕西关中境内或进入陕南。可见,地面冷空气对青藏高原东北侧的 MCC 生成、发展和加强起着非常重要的作用,密切关注地面热低压位置和冷锋移动路径对青藏高原东北侧的 MCC 预报具有一定指示意义。

进一步分析地面锋区配置发现,多数青藏高原东北侧的 MCC 生成、发展类同于华北平原的 MCC,位于冷锋前的暖区中<sup>[8]</sup>或有明显冷锋配合<sup>[19]</sup>。青藏高原东北侧同一区域连续两日出现 MCC 时,其冷锋移动路径和影响作用有明显差异(表 1),第一次出现 MCC 时,冷空气对 MCC 加强、发展起主导作用,其小时最大雨强偏强、强降水范围偏小且落区偏向冷锋一侧;第二次出现 MCC 时,冷锋已完全侵入,暖湿空气再次显著加强,其小时最大雨强相对偏小、强降水范围明显扩大。如 2011 年 7 月 5—6 日出现在川东北、陕南的 MCC。

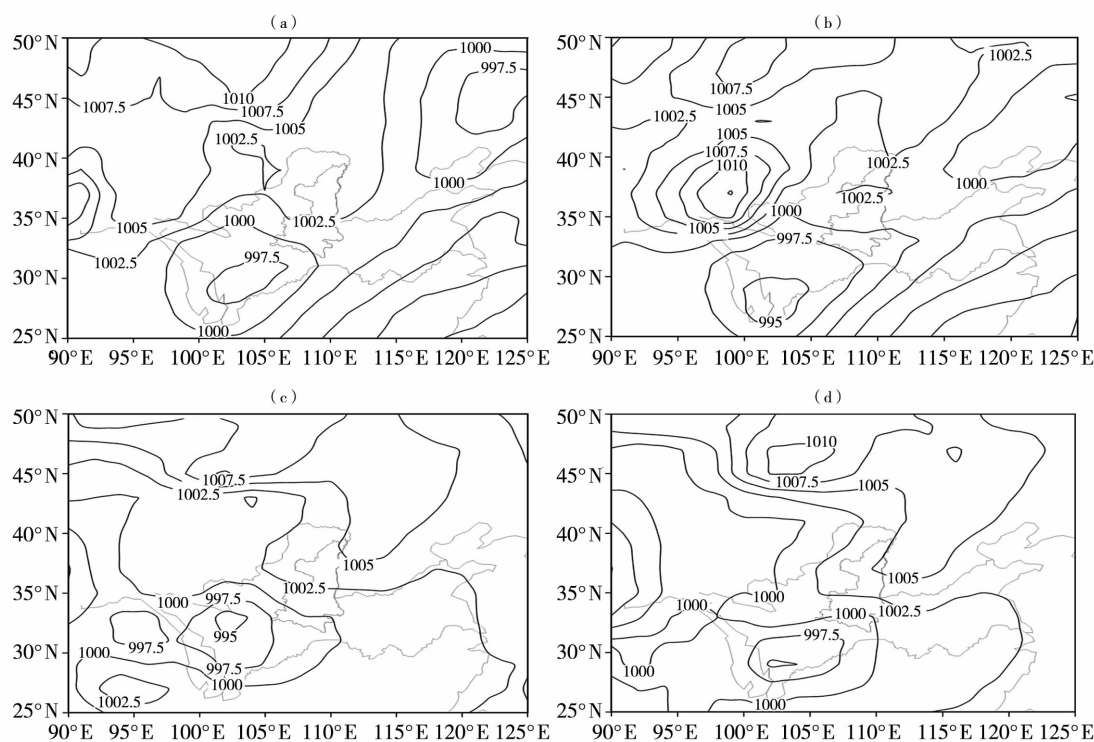


图 1 陇东、陕南西部(a,b)和关中东、陕南东部(c,d)MCC 发生前(a,c)和发生时(b,d)地面形势(单位:hPa)合成

Fig. 1 The composite chart of surface pressure (Unit:hPa) in the east of southern Shaanxi and eastern Gansu (a, b), in the east of central Shaanxi plain and east of southern Shaanxi (c, d) before the occurrence (a, c) and during the development (b, d) of MCC

### 3.2 200 hPa 高空环流特征

对 15 次 MCC 过程前一时次和 MCC 发生、加强时刻的对流层高层 200 hPa 环流分别做合成分析。在 MCC 发生前(图 2a), 200 hPa 上 MCC 发生区基本位于反气旋的东北侧, 风向为明显辐散, 其右侧有一支风速为  $25 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高空偏西风急流带, 急流带位于  $33^\circ\text{N}—35^\circ\text{N}$  附近, 并在接近 MCC 发生区时出现一个向南偏转分支且反气旋旋转, 风速迅速减小, 在该反气旋旋转西侧为一高压中心(南亚高压中心), MCC 的强对流区就发生在南亚高压北侧强偏西风 and 南侧偏东北风的强辐散区域。如“06.08.14”的 MCC 过程是出现在强偏西风和南侧偏东北风的强辐散区域; “07.08.08”、“10.08.11”、“12.07.07”等的 MCC 过程出现在向南偏转分支、反气旋旋转的强辐散区域。“11.07.05”的 MCC 过程则出现在较强偏西北急流中反气旋旋转强辐散区域。在 MCC 加强时南亚高压增强明显, 表现为南亚高压中心明显东移、偏西风急流风速加强, 中心东北侧的北风分量也加大(图 2b), 表明在 MCC 发生、加强时, 高层反气旋旋转和强辐散仍不断增强。这一特征与井喜等<sup>[24]</sup>和任素玲等<sup>[25]</sup>“青藏高原东侧气流分支辐散型多发生在南亚高压东北侧的强高空辐散区”的结论相一致。

### 3.3 700 hPa 和 850 hPa 低空环流特征

选取 13 次较典型的 MCC 出现前一时次 700 hPa 环流做合成(图 3a)。可以看出, 在 MCC 出现前一时次, 700 hPa 在甘肃武都、合作和榆中一带有明显的气旋性低压辐合区, 其北侧多为偏北风或偏东北风, 风速一般为  $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而南侧和东侧贵州、重庆西部、四川东部一带有明显的偏南风或西南急流配合, 风速一般为  $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 一直北伸至低压辐合区。在 MCC 发生、出现时(图略), 气旋性低压辐合区有所东移和南压。进一步比较发现, 低压辐

合区的位置对 MCC 出现地域有一定的指示意义。当低压环流区域在甘肃武都与陕西汉中一带, MCC 一般出现在秦岭以南的陇南、陕南西部或陕南区域; 当 MCC 出现在秦岭以北时, 对流层中低层的低压环流或切变位置偏北, 其位置位于甘肃合作、榆中和武都之间或是在合作与武都、平凉一带, 而始于孟加拉湾的偏南或西南急流越过秦岭, 一直延伸到以北的 MCC 发生区域, 同样有一定的风速和风向辐合存在。这些现象或特征与方宗义等<sup>[15]</sup>和翟国庆等<sup>[26]</sup>“中尺度对流系统通常发生在高温高湿的西南风低空急流的最北端和对流层中层短波槽的前方”的结论相一致。另外, MCC 发生和加强时, 上述低涡环流或切变明显加强和发展, 其中 9 次 MCC 过程中, 低涡或切变后部的偏北风比其前部的偏南风加强特征显著, 如 2007 年 8 月 8 日 20:00 陕西关中的 MCC, 甘肃合作站由静风猛增为  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏北风, 而甘肃武都、陕西汉中站仍维持  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏南风; 2011 年 7 月 5 日 08:00 四川东北部和陕西汉中的 MCC, 甘肃榆中站的偏北风由  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平凉站由  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏南风转换成  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏北风, 而陕西汉中、四川达州站的偏南风由  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  加强到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这类低涡后部北风增强特征明显的 MCC 相对稳定, 北伸不明显。然而, 也有少数 MCC 在发生、加强时, 其后部的偏北风与前部的偏南风均出现明显加强或前部的偏南风加强相对明显, 如 2013 年 7 月 22 日 08:00 甘肃陇南、陕南西部的 MCC 过程, 甘肃榆中站由静风状态转为  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏北风, 平凉站的偏北风由  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  加强到  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 陕西汉中的偏南风由  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  加强至  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这类低涡前部偏南风增强特征明显的 MCC 其北伸、东移现象相对明显, 其暴雨走向也具有明显的南北向特征。

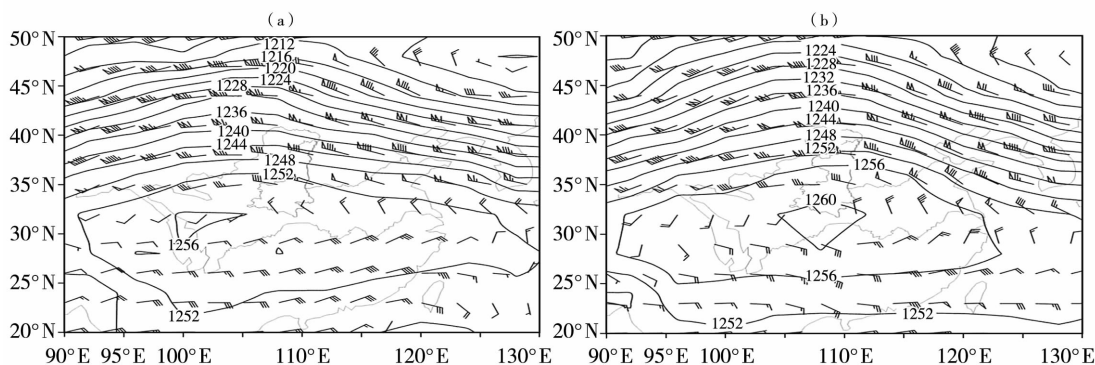


图 2 MCC 发生前(a)、发生时(b)200 hPa 位势高度(实线,单位:dagpm)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )合成

Fig. 2 The composite charts of geopotential height (solid lines, Unit:dagpm) and wind field (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on 200 hPa before the occurrence (a) and during the development (b) of MCC

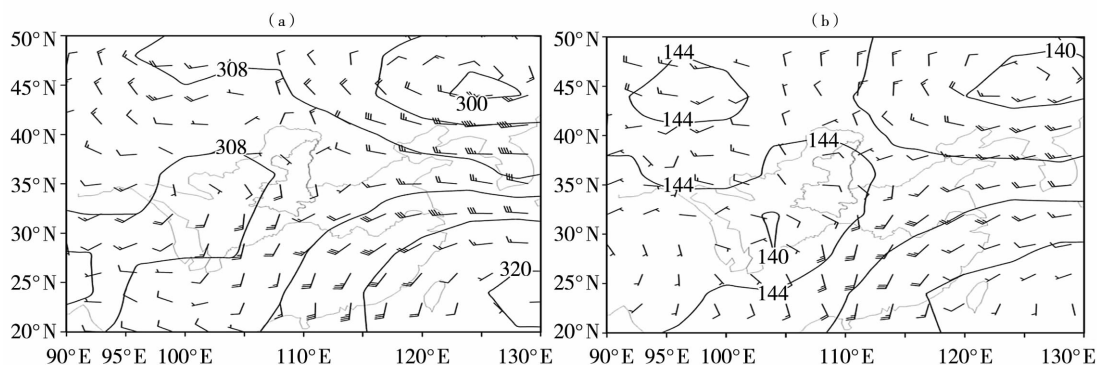


图3 MCC发生前700 hPa(a)和发生时850 hPa(b)位势高度(实线,单位:dagpm)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )合成

Fig. 3 The composite charts of geopotential height (solid lines, Unit:dagpm) and wind field (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on 700 hPa before the occurrence of MCC (a) and 850 hPa during the development of MCC (b)

选取10次较为典型MCC发生和加强时的850 hPa环流做合成(图3b)。MCC发生前一时次(图略),850 hPa贵州、重庆西部、四川东部一带有明显的偏南或偏东南气流配合,而在秦岭南侧的汉江河谷或关中南部的偏东风或偏东南风特征仍然清晰可见,这种一直吹至MCC发生区域的偏东或东南气流为青藏高原东北侧MCC的生成、发展提供了低层辐合、抬升条件。在MCC发生、加强时(图3b),850 hPa四川东北部一带的低涡环流更加清晰,其中心为140 dagpm,陕西南部到四川东部有偏南或偏东南气流配合,且有一定的偏东南风速、风向辐合,而在低涡东南侧有明显的偏南气流,风速基本维持在 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,并一直北伸至低涡辐合区。与700 hPa相似的是,其低涡后部的偏北风同样出现加强现象。如2011年7月5日08:00甘肃平凉站由 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏东北风增加为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,武都站由 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏东风转为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西北风。然而,低涡前部的偏东风或偏东南风,其风速变化不大或略有减小,风向多为顺转,水汽输送增强。进一步比较MCC发生区域、强降水落区与850 hPa偏东风强弱关系发现,当850 hPa偏东风较强时,往往预示着MCC发生、加强的区域偏西,多出现在四川东北部、甘肃东部、陕西西部,其中陕西境内强降水区域的降水常显偏弱,如“13.06.20”陇南东部及陕西南部MCC、“13.07.22”陕西南部MCC、“12.07.07”陕西南部MCC和“15.06.28”陕西南部MCC生成、加强时,汉中、安康的偏东风达 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,使得MCC强降水和暴雨落区偏西,甚至强降水中心出现在甘肃境内。可见,关注850 hPa偏东气流的强弱对预报MCC出现的区域及强降水中心落区有较好的指示意义。

## 4 MCC发生、发展和加强的物理条件

### 4.1 MCC发生的辐散、辐合条件

对于MCC的发生、发展,高层必须有大规模的强辐散配合和存在。前面分析显示,在对流层高层200 hPa存在反气旋性环流,这有利于MCC区域高层辐散的维持和垂直上升运动的发展,其负涡度值越小表明未来的高空辐散和整层的垂直上升运动越强。

统计青藏高原东北侧15次MCC的前一时次200 hPa涡度(图4)发现,涡度值均维持在 $-60 \times 10^{-6} \sim -40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 范围,其中负涡度 $< -60 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 有10次,并有一定的垂直厚度(8次个例中强负涡度可向下延伸到500 hPa高度层,此高度层的涡度仍可达 $-40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )。在MCC发展加强到最强时段时,在15次MCC过程中,200 hPa的负涡度中心位置均出现东移和南压现象,只是不同个例东移或南压程度有所差异; $< -60 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 负涡度值范围进一步扩大或负涡度值降低,如“09.06.19”、“13.07.22”等MCC过程,发生时(图4b、图4d)较发生前一时次(图4a、图4c)负涡度区东移南压明显,且涡度值已下降到 $-70 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,表明高层辐散增强非常明显。另外对比MCC的位置发现,200 hPa负涡度中心位置正处在MCC区的右侧,而对流层低层多为气旋性涡度环流控制,强的正涡度中心位置正位于MCC区的左侧,同时MCC的暴雨区与低层正涡度区对应十分吻合。

### 4.2 冷空气对陕西MCC的发展、加强作用

冷空气为MCC发展和强降雨提供动力抬升和水汽凝结条件,对中尺度的对流发展起着触发作用。MCC是一个范围广、持续久、雨强大的对流系统,具有高湿、高能特征。为了有效揭示冷空气在青藏高

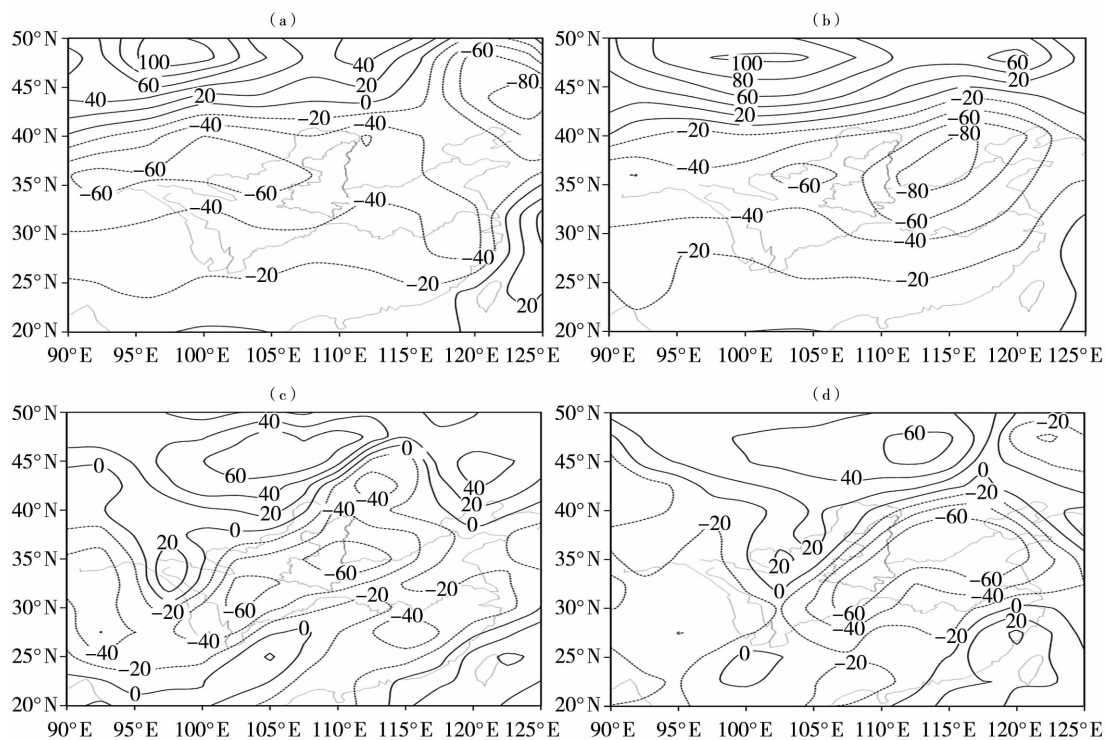


图4 MCC发生前一时次(a,c)、发生时(b,d)200 hPa 涡度(单位: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )

(a) 2009年6月18日20:00; (b) 2009年6月19日08:00; (c) 2013年7月21日20:00; (d) 2013年7月22日08:00

Fig. 4 The 200 hPa vorticity before the occurrence (a, c) and during the development (b, d) of MCC (Unit: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )

(a) 20:00 BST 18 June 2009, (b) 08:00 BST 19 June 2009, (c) 20:00 BST 21 July 2013, (d) 08:00 BST 22 July 2013

原东北侧 MCC 生成、发展、加强过程中的影响路径和关系,选用对流层中低层 700 hPa、850 hPa 的温度平流项来分析冷空气对 MCC 的作用及影响。由表 1 看出,15 次 MCC 过程中几乎都存在冷空气的作用和影响,尤其在 MCC 生成前一时次表现最为显著,对流层中低层有明显的冷平流配合,其值一般在  $-20 \times 10^{-3} \sim -10 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有的过程最强时 700 hPa 冷平流中心值达  $-30 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 5a、图 5c)。不同的 MCC 过程其冷平流出现高度有所区别。若 MCC 出现在秦岭以南时,冷空气多经甘肃东南部翻越秦岭西端侵入秦岭南侧,一般在 700 hPa 冷平流表现明显;若 MCC 出现在秦岭以北的甘肃、关中、陕北和山西南部时,冷空气多经甘肃东部、陕北南部或山西北部、中南部侵入陕西关中,850 hPa 上冷平流表现明显(图 5b)。这与覃丹宇等<sup>[13]</sup>的“冷空气从对流层低层楔入 MCC 底部”的结论较为相似。但对同一区域连续第二天出现 MCC 时,则主要是由偏南暖湿气流二次加强与冷锋补充的冷空气共同作用所致(图 5d)。

综上所述,冷平流对青藏高原东北侧的 MCC 发生在一定程度上起到触发作用。首先,冷平流从对流层低层侵入甘南的低涡或切变线,使得武都涡区

斜压性加强<sup>[27-29]</sup>,同时冷暖平流的叠加加大了 MCC 区域温度垂直递减率,增加了大气的的不稳定度,激发 MCC 对流的加强;其次,冷平流起到冷垫作用,利于暖湿气流强迫抬升,促使低层大气出现大范围辐合。青藏高原东北侧 MCC 的环流结构与覃丹宇等<sup>[13]</sup>揭示的“对流层上部是一中尺度反气旋式辐散环流,而在对流层下部则是一气旋式辐合环流结构”较为一致。所不同的是,青藏高原东北侧多数 MCC 对流层低层的后方入流是冷而干的气流,这有同于 Smull 等<sup>[30]</sup>指出的“位于对流层中部干而下沉的后方入流”。因此,高度关注对流层中低层冷平流的路径和强弱是准确预测青藏高原东北侧 MCC 落区的一个关键因子。

#### 4.3 水汽特征分析

MCC 的发生、发展对水汽条件的要求很高,都是发生在高湿、高温的环境场下。分析青藏高原东北侧 MCC 引发的暴雨水汽场(图略)发现,水汽的水平输送主要集中在对流层中低层 850—700 hPa,即主要通过 850—700 hPa 的偏南暖湿气流将水汽输送至暴雨区,既增加了 MCC 区域大气的的不稳定度,又为 MCC 引发的暴雨提供了充足、源源不断的水汽和能量<sup>[12]</sup>。因此,选取既代表水汽

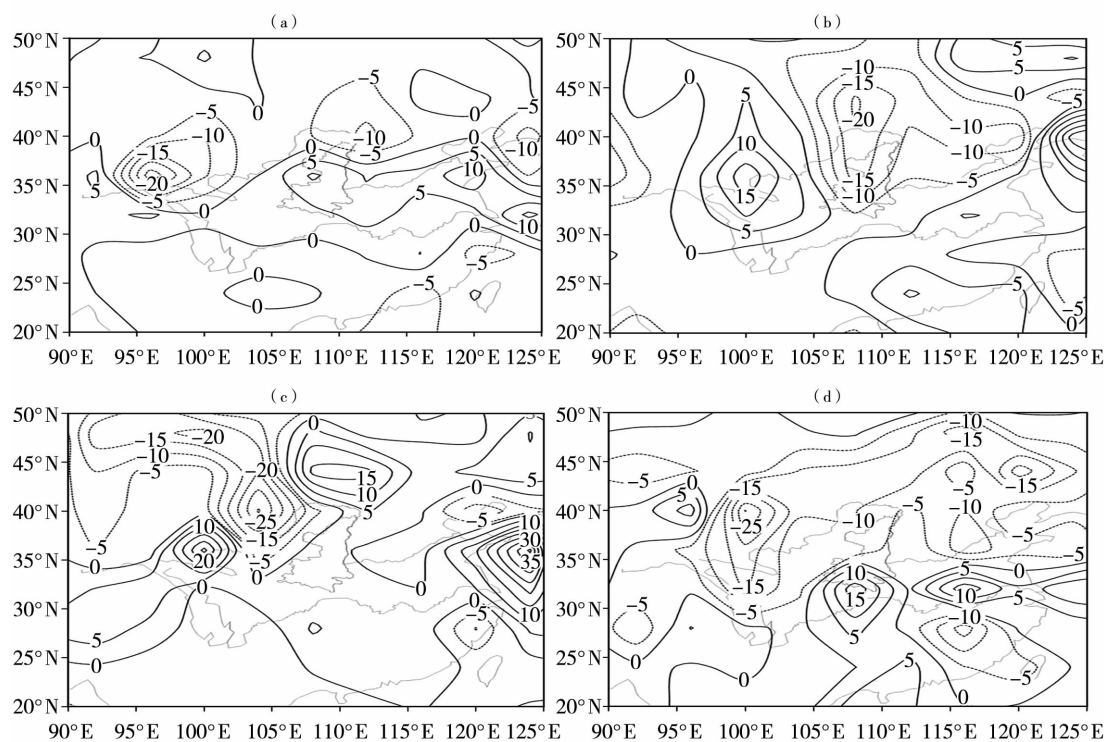


图5 MCC发生前一时次700 hPa(a,c)和850 hPa(b,d)温度平流(单位: $10^{-3}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 2005年7月1日08:00; (b) 2007年8月8日20:00; (c) 2011年7月4日20:00; (d) 2011年7月6日08:00

Fig. 5 The 700 hPa (a, c) and 850 hPa (b, d) temperature advection before the occurrence of MCC (Unit:  $10^{-3}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 08:00 BST 1 July 2005, (b) 20:00 BST 8 August 2007, (c) 20:00 BST 4 July 2011, (d) 08:00 BST 6 July 2011

输送又反映低层大气辐合状况的水汽通量散度予以分析。

经统计,15次MCC过程中,均存在明显的水汽辐合区域,只是不同过程之间水汽辐合强度有所差异,其中700 hPa高度上水汽通量散度辐合明显的过程有4次,如“07.07.05”、“15.06.28”(图6a)等,而850 hPa高度上水汽通量散度辐合明显的有6次,如“10.08.01”、“12.07.07”、“13.06.20”(图6b)等。然而对于暴雨范围广、雨强大的MCC过程,在850、700 hPa高度上水汽通量散度辐合均十分明显的有5次,如“07.08.08”、“13.07.22”(图6c和图6d)等。2013年7月22日08:00,700 hPa水汽通量辐合中心出现在四川东北部、陕南及关中地区,中心值为 $-30 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6c);850 hPa上四川东北部和陕南西部、关中大部为一水汽通量辐合带,中心值达 $-50 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6d)。需要强调的是,这次MCC过程中陕北也出现了大范围的强降水,水汽通量辐合中心较其他个例略偏北,说明对流层中层的水汽通量辐合中心对陕北的大范围降水有一定的指示意义。

## 5 MCC云团特征

### 5.1 MCC云团移动规律及特征

青藏高原东北侧15次MCC过程的云图及其演变显示,多数MCC云团是由小块积云团从四川东北部北伸、东移发展或合并加强形成的。其中,伴随冷锋云系东移过程中,由冷锋前部暖区新生对流云团发展加强成MCC的有5次(图7a和图7e),此类MCC在秦岭北侧、南侧均可出现,其降水具有雨强大、范围广、过程雨量大的特征,如“07.08.08”陕西关中的MCC东移快速加强,有8站日降水量创建站以来的最大值;由对流单体发展加强形成MCC的有5次,这类MCC往往出现在川东北、陕南地区,其中四川东北部居多,其主体多在大巴山以南发展、加强,其中一类多在原地发展、加强且略有东移,相对稳定少动(图7b和图7f),而另一类则有明显径向和北伸、东移特征(图7c和图7g);由2个以上对流云团合并加强形成的MCC有4次(图7d和图7h),基本发生在秦岭以南区域,其北伸、加强特征明显。上述分析发现,造成MCC明显北伸的主要原因是700 hPa上有明显偏南急流配合,如“12.07.07”、“13.06.20”等MCC过程中,其偏南气流均超过 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



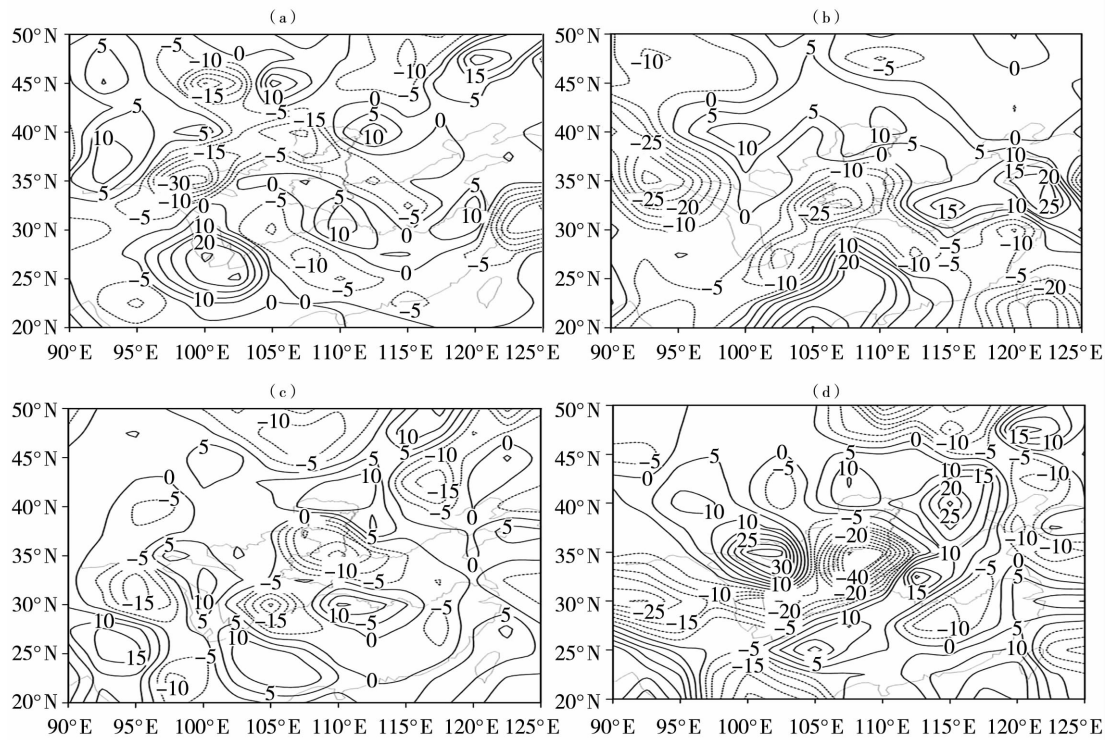


图6 MCC过程中700 hPa(a,c)和850 hPa(b,d)水汽通量散度(单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 2015年6月28日08:00;(b) 2013年6月19日08:00;(c) 2013年7月22日08:00;(d) 2013年7月22日08:00

Fig. 6 The vapor flux divergence on 700 hPa (a, c) and 850 hPa (b, d) during the process of MCC (Unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 08:00 BST 28 June 2015, (b) 08:00 BST 19 June 2013, (c) 08:00 BST 22 July 2013, (d) 08:00 BST 22 July 2013

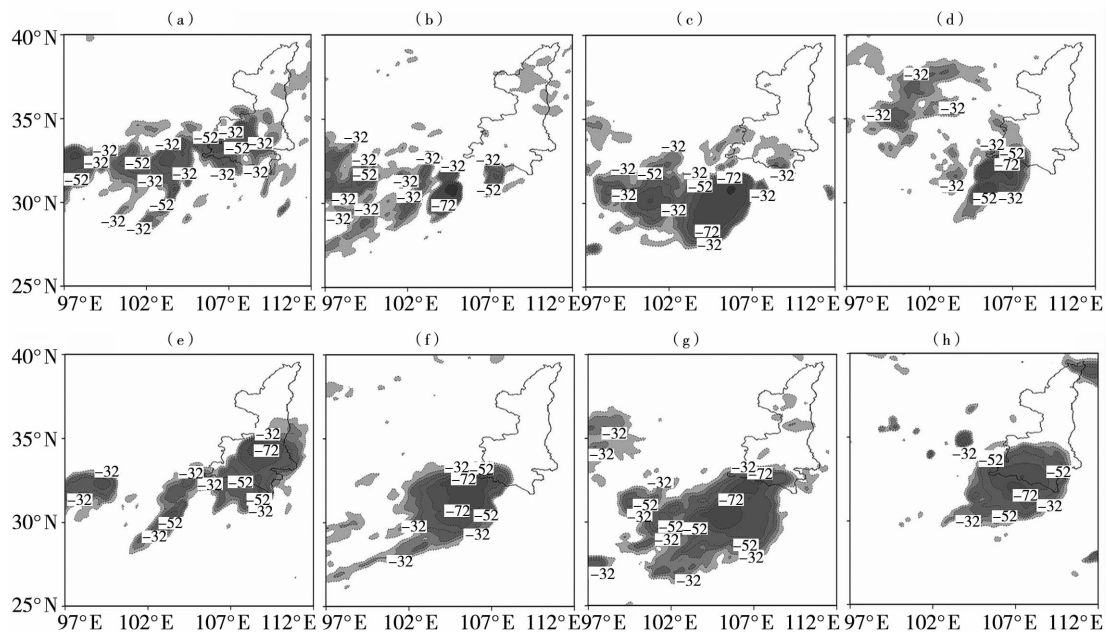


图7 MCC过程中TBB云图特征(单位:°C,等值线间隔为10)

(a) 2007年8月8日20:00;(b) 2011年7月5日02:00;(c) 2012年7月7日00:00;(d) 2015年6月28日05:00;  
(e) 2007年8月8日23:00;(f) 2011年7月5日08:00;(g) 2012年7月7日04:00;(h) 2015年6月28日14:00

Fig. 7 Characteristics of TBB cloud image from FY-2E satellite (Unit:°C, the interval of isolines is 10)

(a) 20:00 BST 8 August 2007, (b) 02:00 BST 5 July 2011, (c) 00:00 BST 7 July 2012, (d) 05:00 BST 28 June 2015,  
(e) 23:00 BST 8 August 2007, (f) 08:00 BST 5 July 2011, (g) 04:00 BST 7 July 2012, (h) 14:00 BST 28 June 2015



## 5.2 MCC 云团 TBB 与强降水特征

分析 15 次 MCC 的云顶亮温(TBB)与强降水时段及落区的相关关系发现,最大小时降雨量与 TBB 的最低时段对应较好。当青藏高原东北侧 MCC 云团迅速发展到最强(即  $-54^{\circ}\text{C}$  冷云面积最大、TBB 最低)时,TBB 多会出现快速下降现象,此时往往也是对流最为强盛、小时雨量最大、TBB 值最低时段(图 8)。如“07. 08. 08”陕西关中的 MCC 过程(图 8a),云团突然发展加强,TBB 最低值从 8 日 20:00 的  $-45^{\circ}\text{C}$  快速降为  $-72^{\circ}\text{C}$ ,8 日 23:00—9 日

00:00MCC 云团面积达到最大,咸阳 8 日 23:00 小时雨量达  $63.4\text{ mm}$ ;9 日 00:00,咸阳东部的高陵小时雨量为  $92.1\text{ mm}$ 、泾河为  $6.0\text{ mm}$ 、三原为  $46.0\text{ mm}$ ,这一时段 TBB 中心强度一直维持在  $-74^{\circ}\text{C}$ ;9 日 01:30,MCC 开始减弱,TBB 中心强度回升到  $-55^{\circ}\text{C}$  左右,强降水快速减弱并趋于稳定;9 日 03:00,MCC 云团减弱明显,关中地区已无  $>10.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水。另外还发现,强降水多出现在 MCC 的北侧或东北侧边界处(图 7e、图 7f、图 7g),此处 TBB 等值线最为密集。

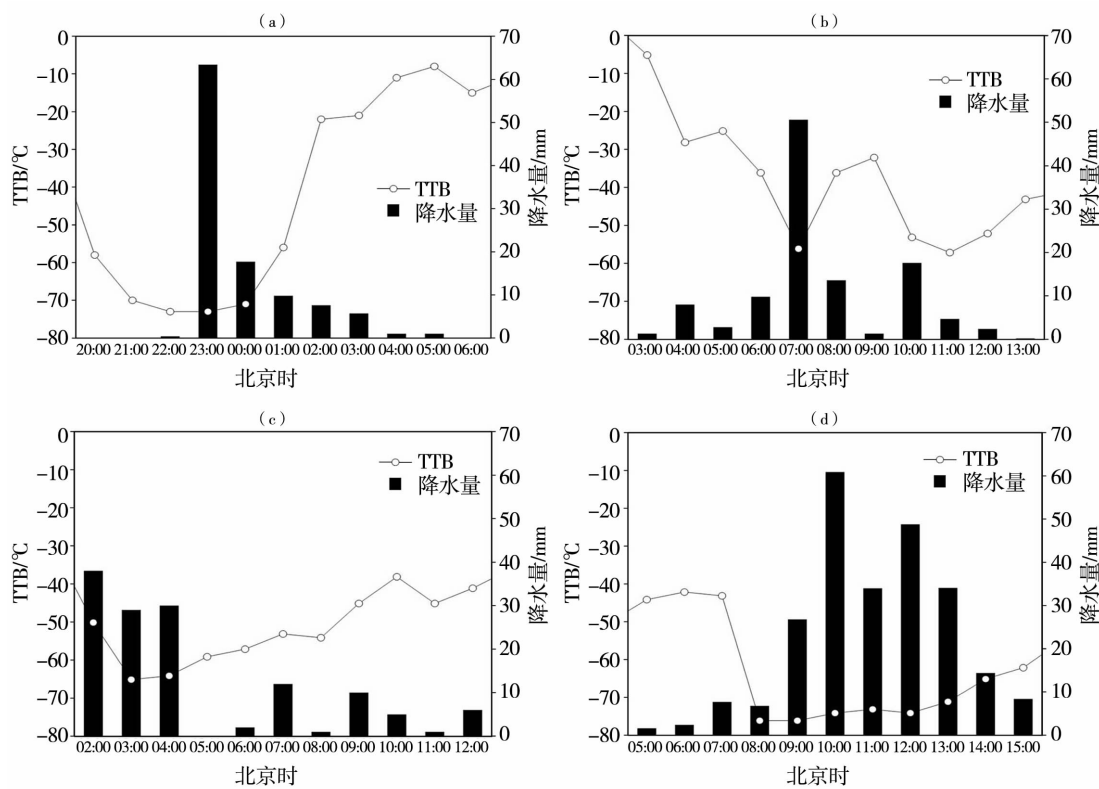


图 8 MCC 云团 TBB 及落区强降水逐时演变特征

(a) 陕西咸阳 2007 年 8 月 8 日 20:00—9 日 06:00; (b) 陕西南郑 2011 年 7 月 5 日 03:00—13:00;  
(c) 甘肃天水仙人崖 2013 年 6 月 20 日 02:00—12:00; (d) 陕西南郑法镇 2015 年 6 月 28 日 05:00—15:00

Fig. 8 The hourly evolution of precipitation and TBB for MCC

(a) From 08:00 BST to 06:00 BST 9 August 2007 in Xianyang of Shaanxi, (b) From 03:00 BST to 13:00 BST 5 July 2011 in Nanzheng of Shaanxi, (c) From 02:00 BST to 12:00 BST 20 June 2013 in Xianrenya of Gansu, (d) From 05:00 BST to 15:00 BST 28 June 2015 in Fazhen of Shaanxi

进一步分析发现,青藏高原东北侧多数 MCC 引发的强降水一般发生在 TBB 等值线密集区一侧,这与已有研究结论基本一致<sup>[15]</sup>。另外,当 MCC 出现在不同区域时,TBB 等值线非常密集区相对 MCC 云团的方位有一定差异,其中当 MCC 出现在秦岭北侧时,TBB 梯度大的区域多出现在 MCC 云团北侧或东侧(图 7e),这可能与冷平流的影响路径及 MCC 加强移动路径有关,这尚需在今后实际业务中进一步

验证;当 MCC 出现在秦岭南侧时,TBB 梯度大的区域出现在 MCC 云团东北侧(图 7f 和图 7g),这可能与对流层中低层有较强的偏西南急流有关。

## 6 结 论

(1) 2000—2015 年,青藏高原东北侧的 MCC 过程共有 15 次,7 月最多。其中,秦岭南侧的 MCC 约占 66%,有时也会连续两日出现在同一区域,多形

成于后半夜,这与青藏高原东南部的 MCC 形成于上半夜不同;秦岭北侧的 MCC 约占 34%,基本发生在傍晚至凌晨。

(2)青藏高原东北侧 MCC 多出现在 200 hPa 南亚高压的东北侧,风向辐散明显,强的正涡度中心正好位于 MCC 区的左侧;700 hPa 甘南、四川东部地区都有低涡或切变存在,其东侧有始于孟加拉湾经贵州、重庆西部、四川东部的偏南急流配合;850 hPa 有明显的偏东或偏东南气流存在;地面上四川东部及陕南南部多为稳定少动的热低压,MCC 一般出现在高低压之间气压梯度密集带南侧。另外,当 MCC 出现在秦岭南侧时,其位置偏向于暖空气一侧;当 MCC 在秦岭北侧时,其位置偏向于冷空气一侧。

(3)冷平流对青藏高原东北侧的 MCC 发生、发展起着触发和加强作用,冷平流多从西侧、北侧侵入 MCC 区域来影响和产生作用。因此,密切关注对流层中低层冷平流的路径和强弱是准确预测该区域 MCC 出现的一个关键因子。

(4)MCC 的水汽输送主要集中在对流层中低层 850—700 hPa,多以 700 hPa 的偏南或偏东南暖湿气流将水汽输送至 MCC 暴雨区域,而对于暴雨范围广、雨强大的 MCC 过程,850、700 hPa 两层水汽输送都十分明显。

(5)发生在秦岭南侧的 MCC 云团,多由对流单体发展加强或合并加强形成,这类 MCC 云团北伸加强、东移特征明显;发生在秦岭北侧的 MCC 云团,多与冷锋云系前部暖区对流云团发展加强有关,该类 MCC 云团东移加强特征明显,强降水的雨强大。另外,强降水往往出现在 MCC 东北侧边界处,该处 TBB 等值线最为密集,最大小时降雨量与 TBB 最低时段匹配较好。

## 参考文献

- [1] Maddox A Robert. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980,61(11):1374-1387.
- [2] 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.
- [3] 韦惠红,徐双柱,郭英莲,等. 长江中游两次 MCC 过程环境流场及物理条件分析[J]. 气象科技,2013,41(6):1061-1067.
- [4] 丁结英,高松,常越. MCC 转为带状 MCSs 过程中水平涡度的变化与暴雨的关系[J]. 热带气象学报,2013,29(4):540-550.
- [5] 王宁,王秀娟,张硕,等. 吉林省一场持续性暴雨成因及 MCC 特征分析[J]. 气象,2016,42(7):809-818.
- [6] 杨本湘,陶祖钰. 青藏高原东南侧 MCC 的地域特点分析[J]. 气象学报,2005,63(2):236-242.
- [7] 杨忠明,吴哲红,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(1):362-372.
- [8] 吕艳彬,郑永光,李亚萍,等. 华北平原中尺度对流复合体发生的环境和条件[J]. 应用气象学报,2002,13(4):406-412.
- [9] 曲晓黎,段宇辉,秦宝国,等. 河北省中南部一次 MCC 造成的暴雨过程分析[J]. 干旱气象,2011,29(1):69-74.
- [10] 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.
- [11] 梁军,李燕,黄艇. 2013 年辽东半岛 2 次切变线暴雨的对比分析[J]. 干旱气象,2015,33(1):822-829.
- [12] 康凤琴,肖稳安. 我国南方 MCC 的涡度、水汽和热量收支平衡[J]. 高原气象,2001,20(3):332-339.
- [13] 覃丹宇,方宗义,江吉喜,等. MCC 和一般暴雨云团发生发展的环境场差异[J]. 应用气象学报,2004,15(5):590-600.
- [14] 苗爱梅,董春卿,张红雨,等. “0811”暴雨过程中 MCC 与一般暴雨云团的对比分析[J]. 高原气象,2012,31(3):731-744.
- [15] 方宗义,覃丹宇. 暴雨云团的卫星监测和研究进展[J]. 应用气象学报,2006,17(5):583-593.
- [16] 崔立国,邱海龙. 盛夏东北地区北部两次 MCC 活动云场和环境场特征分析[J]. 黑龙江气象,2006,34(2):1-4.
- [17] 井喜,范丛勇,王雄,等. 江苏北部一次由 MCC 引发的致洪暴雨综合分析[J]. 暴雨灾害,2009,28(1):1-7.
- [18] 井喜,陈见,胡春娟,等. 广西和贵州 MCC 暴雨过程综合分析[J]. 高原气象,2009,28(2):335-351.
- [19] 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.
- [20] 郭大梅,许新田,刘勇,等. 陕西中南部一次突发性大暴雨过程分析[J]. 气象,2008,34(9):41-46.
- [21] 井宇,井喜,王瑞,等. 黄河中游一次 MCC 致洪暴雨综合诊断分析[J]. 气象,2008,34(3):56-62.
- [22] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社,2005:443-452.
- [23] 贺勤,邱东平,刘正奇,等. 鄂尔多斯盆地夜暴雨多[J]. 气象,1997,23(7):46-50.
- [24] 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):158-167.
- [25] 任素玲,许建民,蒋建莹. 与对流层高度反气旋有关的强降水卫星图像特征[A]. 2013 年卫星遥感应用技术交流论文集[C]. 北京:气象出版社,2014:53-66.
- [26] 翟国庆,丁华君,孙淑清,等. 与低空急流相伴的暴雨天气诊断研究[J]. 大气科学,1999,23(1):112-118.
- [27] 白肇烨,徐国昌. 中国西北天气[M]. 北京:气象出版社,1988:218-229.
- [28] 潘旻,李建,宇如聪,等. 东移西南低涡空间结构的气候学特征[J]. 气候与环境研究,2011,16(1):60-70.
- [29] 李国平. 青藏高原气象学动力学[M]. 北京:气象出版社,2002:24-25.
- [30] Smull B F, Houze R A. A midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain: radar and satellite observation[J]. Mon Wea Rev, 1985,113:117-133.

## Characteristics Analysis of MCC in the Northeast Side of Tibet Plateau

XUE Chunfang<sup>1</sup>, HOU Jianzhong<sup>2</sup>, CHEN Xiaoting<sup>2</sup>, JING Yu<sup>2</sup>, XUE Rong<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China; 2. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014, China; 3. Xi'an Meteorological Observatory of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** To effectively improve the ability of forecast and early warning, disaster preventing and reducing, mesoscale convective complexes (MCC) occurring in the northeast side of Tibet Plateau were comprehensively analyzed during 2000–2015 from satellite cloud images, circulation situations, water vapor transport, cold advection effects, etc. The results showed that MCC appearing in the south of Qinling Mountains accounted for 66% of all processes during 2000–2015, and they mostly formed from the midnight to morning, while MCC occurring in the north of Qinling Mountains accounted for 34%, and they mostly formed from the early evening to early morning. Before the generating of MCC, they mostly appeared in the northeast of SAH (south Asian high) on 200 hPa, the low vortex or shear line cooperated in the middle and lower troposphere over southern Gansu to eastern Sichuan, and the stable surface thermal low pressure controlled over eastern Sichuan and southern Shaanxi. The SAH and low vortex or shear accordingly moved eastward when MCC occurred, while the surface thermal low pressure moved northward and its northern cold high obviously moved southward at the same time. MCC in the south of Qinling Mountains mostly formed in the development of convection cells or the consolidation of convective cloud clusters, and the characteristics of the stretching northward and moving eastward for MCC were obvious. However, MCC in the north of Qinling Mountains mostly formed in the development of convective clouds in warm area at the front of cold front cloud system, and the moving eastward of MCC was significant. The heavy rain caused by MCC in the northeast side of Tibet Plateau often appeared in the maximum gradient side of TBB, the period of maximum hourly rainfall matched better with the lowest TBB.

**Key words:** the northeast side of Tibet Plateau; MCC; synthetic analysis; the southwest vortex; high level anticyclone circulation; surface cold front or cold advection

## 欢迎订阅 2017 年《干旱气象》

《干旱气象》由中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办,是我国干旱气象领域科学研究的专业性学术期刊,反映有关干旱气象监测、预测和评估的最新研究成果,充分展示干旱气象领域整体的研究和应用水平。期刊主要刊载干旱气象及相关领域有一定创造性的学术论文、研究综述、简评,国内外干旱气象发展动态综合评述、学术争鸣以及相关学术活动。具体包括:国内外重大干旱事件分析、全球及干旱区气候变化、干旱气象灾害评估及对策研究、水文、生态与环境、农业与气象、可再生能源开发与利用、地理信息与遥感技术的应用等。本刊还免费刊载干旱气象研究成果、研究报道、学术活动、会议消息等。《干旱气象》已被《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技论文统计源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、教育阅读网、台湾华谊线上图书馆等全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强,适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为双月刊,国内外公开发行。2017 年正刊 6 期,每期定价 36 元,全年 216 元。欢迎广大读者订阅,并可以随时邮局款汇购买,款到开正式发票。

编辑部地址:甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部

邮政编码:730020 联系电话:0931-2402270 电子信箱:ghs\_ghqx@sina.com

银行汇款:兰州市工商银行拱星墩分理处 户 名:中国气象局兰州干旱气象研究所

帐 号:2703001509026401376

邮 汇:兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部