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, [ZHAO Guixiang, WANG Xiaoli, WU Hong. Statistical Characteristics of Mesoscale Convective Systems over the Middle Reaches Area of the Yellow River During 2005-2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6):1016-1026], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1016

黄河中游地区中尺度对流系统的统计特征

赵桂香[1],王晓丽[1],吴 洪[2]

(1. 山西省气象台,山西 太原 030006;2. 中国气象局干部培训学院,北京 100081)

摘 要:利用2005—2014年逐时FY-2E卫星资料、实况观测资料和NCEP再分析资料,采用统计方法对黄河中游地区中尺度对流系统(MCS)的特征进行了分析,包括中尺度对流复合体(MCC)、持续拉长状对流系统(PECS)、β中尺度对流复合体(MβCCS)和β中尺度持续拉长状对流系统(MβECS)等4类。结果表明:(1)甘肃中南部、山西中南部和陕西中北部以及蒙、晋、陕3省(区)交界处为MCS高发区;一年内5—10月均有形成,夏季更易发展成熟,MCC和MβECS是该区影响夏季降水的主要MCS。(2)MCS具有明显的日变化特点,多成熟于午后或傍晚到次日凌晨;大多数MCS表现出生成快、消亡慢的特点,其移动方向以偏东和偏东南方向为主,且圆形状的较拉长状的移动少。(3)圆形状的MCS的平均TBB较拉长状的低,其中MCC发展最旺盛、强烈,且8月最强,而MβECS的发展受季节影响不大。成熟时的平均离心率,MCC和PECS较美国的偏大;与黄河下游地区相比,MCC偏大,PECS则偏小。(4)MCS造成的降水特征复杂,地域差异明显,多个合并后的对流系统造成的降水范围更大、强度更强、持续时间更长;暴雨主要出现在左后象限,最大雨强出现在成熟阶段,一般>50 mm·h^{-1};生成于不同区域、不同类型的MCS,其雨区和云区面积比的差异较大。(5)MCS具有明显的年际变化特点,其中最多年2011年和最少年2009年的环流形势表现出几乎相反的特点,除与副热带高压、500 hPa中纬度位势高度距平、低层暖湿气流输送和聚集等有关外,还与500 hPa冷涡活动密切相关。

关键词:MCS;黄河中游;统计特征;差异

文章编号:1006-7639(2016)-06-1016-11 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1016

中图分类号:P458.2 **文献标识码**:A

引 言

自1980年代,美国学者Maddox[1]发现和总结了中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex,MCC)并提出具体标准以来,国内外一些学者[2-12]针对不同区域,从气候特征、天气学特征以及环境条件等方面开展了分析研究,得出了许多有意义的结论。方丽娟等[9]认为东北地区MCC常形成于7—8月,具有夜发性特征。井喜等[13]分析了2005—2011年中国MCC时空分布特征指出,6月是MCC高发期,一日内00:00—03:00最易生成,且多数MCC稳定少动。研究表明,青藏高原东部大部分MCC降水产生在后半夜,最大雨强出现在MCC初始发展阶段的右前象限[14],高原东南部的MCC则主要发生在上半夜,生命史短,发展变化快,雨量以中雨为主[15];而我国南方地区的MCC暴雨多产生在成熟阶段,云顶最低温度普遍在-80 ℃以下[16]。可见,不同区域MCC形成时间、生命史以及降水特征等明显不同。然而,MCC只是中尺度对流系统(Mesoscale Convective Systems,MCS)的一种,其特征并不能反映所有MCS的特征,因此,一些学者[17-20]从个例分析的角度对暴雨过程中MCS特征及成因进行了研究。Jirak等[21]将MCS划分为MCC、持续拉长状对流系统(Persistent Elongated Convective

收稿日期:2016-09-14;**改回日期**:2016-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目"黄河中游地区突发性大暴雨MCC结构特征研究"(41475050)资助

作者简介:赵桂香(1965-),女,硕士,正研高工,主要从事灾害天气预报和气候分析技术研究. E-mail: liyun0123@126.com

Systems,PECS)、β 中尺度对流复合体(Meso - βscale MCC,MβCCS)和 β 中尺度持续拉长状对流系统(Meso - βscale PECS,MβECS)等 4 类。按照这种分类标准,MCC 和 PECS 无论时间和空间分布还是发生前的背景场均存在显著差异[21-22]。还有学者[23-28]从气候统计出发,分析了 MCS 的地域分布和月际分布特征、日变化规律以及移动路径等,得出了许多有意义的结论。曾波等[25]利用上述标准[21]对 2008—2010 年我国东部地区夏季 MCS 统计分析指出,拉长状的 MCS 是该地区夏季主要的对流系统,7 月最多,一般自西向东移动。王磊等[26]对 2005—2011 年夏季东北地区冷涡背景下的 MCS 分析发现,6 月最多,自西向东偏北方向移动。卓鸿等[27]研究指出,MCC 和 PECS 是影响黄河下游地区夏季降水的主要 MCS,其中 PECS 成熟较快、消亡较慢,平均最低 TBB 较 MCC 低,生命史更长;MCS 具有明显的年际变化特点。可见,不同类型 MCS 无论形状、生命史、移动方向,还是降水等特征,都存在较大差异,且具有明显的地域特点。

黄河中游地区地处我国西北部高原地区,四周为高山所包围,平均海拔 1 500 ~ 3 500 m,流域内地形极其复杂。马禹等[28]分析指出,黄河中游地区也为 MCS 的高发区,常导致暴雨、大暴雨引发洪水泛滥,给国民经济和人民生命财产带来严重损失。近年来,国内一些学者对该区域 MCS 的研究多集中于典型 MCC 个例分析,而利用 2011 年以后最新气象资料和高分辨率卫星资料(不仅针对夏季,也包括春季和秋季,且针对 4 类 MCS)进行系统研究的较少,不同类型 MCS 时空分布如何?发展移动以及造成的降水特征有何差异?还有待进一步深入研究。本文利用 2005—2014 年 5—10 月 FY - 2E 高分辨率 TBB 和卫星云图逐时或逐 30 min 资料,以及常规观测、地面自动气象站观测和 NCEP/NCAR(1° × 1°)再分析等资料,详细分析了黄河中游地区不同类型 MCS 成熟时中心位置、TBB、生命史、移动路径和年、月、日变化特征,以及降水特征、典型偏多和偏少年环流形势差异等,以便认识该区域 MCS 的统计事实,了解与其它地区 MCS 特征差异尤其是降水特征差异,为进一步做好暴雨预报服务提供重要参考。

1　资料和方法

1.1　资　料

所用资料为黄河中游地区(地理位置104°27′E—113°39′E、33°45′N—40°11′N,行政区域包括内蒙中南部、山西、陕西、宁夏、甘肃东部和河南西北部)2005—2014 年 5—10 月逐日常规气象观测资料、近 400 个地面自动气象站逐时观测资料、FY - 2E 逐时或逐 30 min(1° × 1°)TBB 和卫星云图资料,以及 NCEP/NCAR(1° × 1°)逐 6 h 再分析资料等。

1.2　中尺度对流系统的确定

目前,国内外大多采用 Maddox[1] 和 Jirak 等[21]的标准来确定 MCS,本文也采用此标准。具体方法:以 -52 ℃的 TBB 线作为特征线,对卫星资料进行增强处理,采用近似椭圆的方法[27],分别以 TBB 线 -52 ℃和 -32 ℃所围面积计算冷云罩面积;离心率为短轴与长轴之比;并统计 MCS 成熟且面积达到最大时的中心经纬度。另外,在初步筛选出的样本中,计算发现,只要 -52 ℃冷云罩面积达到要求时,-32 ℃冷云罩面积均会超过标准,因此,-32 ℃冷云罩面积要求不再列入标准中。最终根据表 1 标准来确定 MCS。

MCS 的生命史可划分为形成期、成熟期和消亡期。其中,形成期是指从出现 -52 ℃冷云罩到面积分别达到 50 000 km^2 或 30 000 km^2,且离心率满足表 1 标准的持续时间;成熟期是指 -52 ℃冷云罩面积分别 >50 000 km^2或 >30 000 km^2,且离心率满足表 1 标准的持续时间;消亡期是指 -52 ℃冷云罩面积分别 <50 000 km^2或 <30 000 km^2,且离心率满足表 1 标准的持续时间。

表 1　MCS 分类标准

Tab. 1　Classification standard of MCS

种类	水平尺度/km^2	持续时间/h	离心率
MCC	-52 ℃冷云罩面积≥50 000	≥6	≥0.7
PECS	-52 ℃冷云罩面积≥50 000	≥6	0.2≤离心率 <0.7
MβCCS	-52 ℃冷云罩面积≥30 000	≥3	≥0.7
MβECS	-52 ℃冷云罩面积≥30 000	≥3	0.2≤离心率 <0.7

另外,在进行样本统计时作了如下约定:如果MCS不是在研究区域内形成,而是在发展过程中移入并影响研究区域,则统计为1个样本,或在后期变化过程中,与其它新生或之前减弱消亡的对流云团合并,再次发展加强达到以上标准并影响研究区域,则不再重复统计样本数,但可作为特殊个例进行技术分析。

1.3 雨区与云区面积比的计算

借鉴钟晓平等[14]的方法进行雨区与云区面积百分比(C,单位:%)计算,其公式如下:

$$C = \frac{N(t)}{N(0,t)} \times 100\% \tag{1}$$

云区是指MCS发展成熟且面积达到最大时,-32 ℃线所包围的区域。然而MCS是移动的,因此,式(1)中$N(t)$为MCS生命史内云区中所包含的降雨站点数,$N(0,t)$为生命史内云区中所包含的站点总数。C可反映降水云系在整个生命史内的降水覆盖率,对做好降水天气的落区预报和面雨量预报具有重要意义。

1.4 最大雨强和平均最大雨强的计算

经分析发现,黄河中游地区MCS的发展成熟时间大多在下午、傍晚到次日凌晨。为了使降水特征分析更加准确可靠,采用当日08:00—次日08:00(北京时,下同)的累积雨量作为24 h降水量来分析。同时采用业务降水等级标准,即0.1~9.9 mm为小雨,10.0~24.9 mm为中雨,25.0~49.9 mm为大雨,50.0~100.0 mm为暴雨,>100.0 mm为大暴雨。

最大雨强(I_{max})是指云区24 h内雨强的最大值,可反映极端强降水情况。平均最大雨强($\bar{I}_{max}$)指的是某区域某类MCS所有个例最大雨强的平均值,可反映不同类型MCS造成短时强降水的区域特征。其公式如下:

$$\begin{cases} I_{max} = \max(I_i) \\ \bar{I}_{max} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (I_{max})_j}{N} \end{cases} \tag{2}$$

式中,I_i为i个站点出现的雨强,单位:mm·h^{-1};j是样本序号;$(I_{max})_j$是某个样本的最大雨强,单位:mm·h^{-1},N为某类MCS在某个区域的样本数。

2 黄河中游地区MCS特征分析

经统计,2005—2014年5—10月,黄河中游地区共形成了84个MCS,其中MCC最多,有29个,占34.5%;MβECS次之,有27个,占32.1%;MβCCS有17个,占20.2%;PECS最少,仅11个,占13.9%。

2.1 空间分布特征

从各类MCS成熟时所在中心经纬度分布来看(图1),黄河中游各省区均有出现,其中甘肃中南部(图中A区)、山西中南部和陕西中北部(图中B区)以及蒙、晋、陕3省(区)交界(图中C区)为MCS的高发区,且前2个区域发生概率更高,而宁夏仅有1次。从分类来看,约70%的MCC集中在甘肃南部、山西中南部以及内蒙与山西交界,PECS常成熟于山西吕梁山北段(60%以上),MβCCS有82.3%分布在陕西关中、山西南部以及蒙晋陕3省(区)交界处,而MβECS则多数集中在陕北和山西地区,少量分散在甘肃陇中地区。可见,MCS的分布具有明显的地域特征,且不同类型的MCS分布地域差异明显,这与不同地理位置的环流背景、水汽和能量输送等密切相关。分析发现,受地形和大气环流等共同影响,5—9月,甘肃陇南、陕西和山西常位于200 hPa反气旋前沿,此处最易激发中尺度对流系统[29-30];加之青藏高原大地形影响,上述区域易形成能量高值区,同时来自孟加拉湾和南海的水汽也不断向上述地区输送并产生辐合[31-34],较易形成MCS。相比之下,宁夏、山西东北部以及与内蒙交界处,能量与水汽条件较差,不利于MCS的形成。

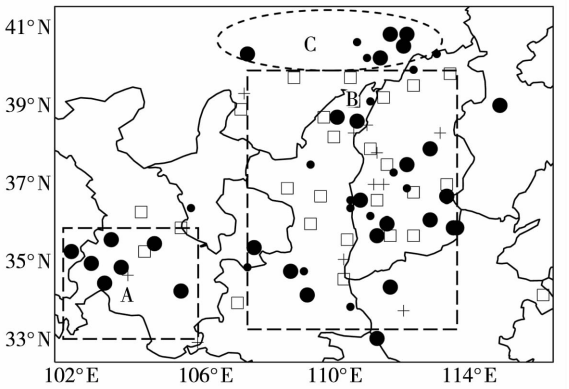

图1 2005—2014年5—10月黄河中游地区MCS的分布
(大圆点为MCC,小圆点为MβCCS,方框为MβECS,十字为PECS)

Fig. 1 The spatial distribution of MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005-2014
(The big dots for MCC, small dots for MβCCS, the boxes for MβECS, the cross for PECS)

2.2 时间分布特征

2.2.1 年际变化

图2给出2005—2014年黄河中游地区不同类

型 MCS 的年变化特征。可看出,黄河中游地区的 MCS 具有明显的年际变化特征,10 a 间围绕着 8 个上下波动,且总体上呈现多—少—多的变化规律,年际差异较大,其中 2009 年最少,只在 5 月和 7 月各形成 1 个 MβECS;2011 年为典型偏多年,出现了 13 个,是 2009 年的 6.5 倍。不同类型的 MCS,其年际变化特点也不同。2005—2014 年,MCC 平均 2.9 个·a^{-1},2007 年、2010 年和 2011 年最多,各有 5 个,而 2009 年则没有形成;PECS 平均 1.1 个·a^{-1},2011 年最多有 3 个,2007 年、2008 年、2009 年和 2014 年均没有形成;MβCCS 平均 1.7 个·a^{-1},最多的年份可形成 3 个,而 2007 年和 2009 年则没有形成;MβECS 平均 2.7 个·a^{-1},每年均有形成,一般在 2 ~4 个之间。MCS 的这种年际变化特点与大气环流背景有着密切的关系。

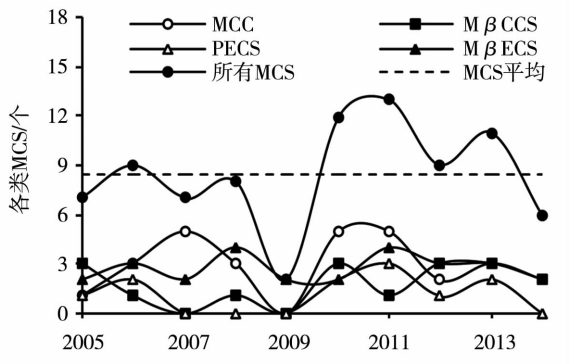

图 2　2005—2014 年 5—10 月
黄河中游地区各类 MCS 的年变化

Fig. 2　The annual changes of different types MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 – 2014

2.2.2　月际变化

统计发现(图 3),黄河中游地区中尺度对流系统 5—10 月均有形成,5 月最多,有 25 个,占总数的 29.8%,6 月、7 月相当,各有 20 个,各占 23.8%,9 月和 10 月最少,各有 1 个。从 MCS 分类来看,MCC 为 8 月最多,PECS 为 7 月最多,说明盛夏 7—8 月对流云团更易发展成较大尺度的对流系统;MβCCS 为 6 月和 7 月最多,而 MβECS 则是 5 月最多。研究表明[35],较大尺度的 MCS 易生成在大气斜压性较弱的环境下,且对能量和水汽的要求更高,因此 7—8 月最易形成;5 月,研究区还处在春夏过渡季节,水汽条件虽然开始逐步转好,温度回升,但大气环流通常调整较快,径向度较大,大气斜压性较强,因此,不易形成较大尺度的 MCS。另外,圆形状的系统(离心率大)比拉长状的系统(离心率小)对能量和水汽要求更高,因此 6 月和 7 月形成的 MβCCS 最多。可见,不同类型 MCS 的月际分布特征有明显差异,其中 MCC 和 MβECS 是黄河中游地区夏季降水的主要 MCS。

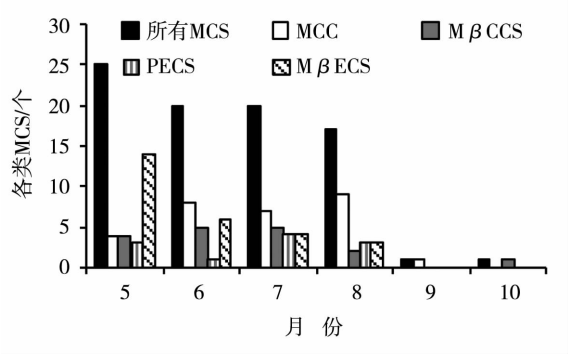

图 3　2005—2014 年 5—10 月黄河
中游地区各类 MCS 月分布特征

Fig. 3　The monthly distribution of different types MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 – 2014

2.2.3　日变化

统计发现(图略),黄河中游地区 MCS 多成熟于午后或傍晚到次日凌晨,其中 16:00—19:00 和 20:00—次日 02:00 各出现一峰值,02:00—04:00 又出现一小峰值,总体上成熟于傍晚到次日凌晨的概率最高,达 63.1%,而上午最少,仅为 4.8%。从分类来看,MCC、MβCCS 和 MβECS 均为成熟于傍晚到次日凌晨的最多,而 PECS 为午后最多。可见 MCS 具有明显的日变化特点,且不同尺度的对流系统成熟时间有所差异,这与该区域午后迅速升温、热力对流持续加强等有关。

2.2.4　生命史

表 2 是 2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区 MCS 的生命史。可看出,MCS 生命史长度平均为 12.0 h,其中 MCC 最长,平均为 15.3 h,其次是 PECS,为 14.2 h,MβCCS 最短,仅为 9.1 h,可见,较大尺度的圆形状 MCS 的生命史较拉长状的更长,而较小尺度的 MCS 则是拉长状的较圆形状的要长。从生命史各阶段来看,MCS 从产生到形成平均为 3.1 h,从发展到成熟平均为 5.2 h,从成熟到消亡平均为 3.9 h,生成比减弱快,这些系统达到标准后平均能维持 5.2 h,比我国中东部地区的 MCS 持续时间短[25]。对比不同类型 MCS 发现,大尺度的 MCS 各阶段的历时都比小尺度的长。此外,各类 MCS 个体生成、成熟、消亡的时间跨度均较大,如 MCC 形成时间一般为 1 ~8 h,成熟时间为 5 ~14 h,消亡时间

为2~10 h,这与其它地区的MCS特征[16,28]存在一些差异。

另外,也有人将MCS的生命史分为从生成到成熟、成熟到消亡2个阶段[1,21,27],即成熟维持期和成熟到消亡期。按照此标准分析(表2中灰色填充)发现,黄河中游地区MCS的平均生命长度为9.0 h,较黄河下游地区短2.1 h[27],其中MCC平均为11.5 h,较黄河下游地区长0.4 h,较美国长0.6 h[21],而PECS平均为11.4 h,较黄河下游地区短1 h,比美国长0.8 h;MCC从成熟到消亡大多在10 h以上,最长为21 h,而PECS则主要集中在10~13 h。对于生命史的2种算法,均表现出生成快、消亡慢的特点,且PECS更为明显。这可能与MCS形成的环境场条件有关。

表2 2005—2014年5—10月黄河中游地区MCS的生命史(单位:h)

Tab.2 Life time of different types MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005-2014 (Unit:h)

类型	生成		发展到成熟		成熟到消亡		整个生命史		整个生命史2	
	平均	最长	平均	最长	平均	最长	平均	最长	平均	最长
MCC	3.9	8	7.1	14	4.4	10	15.3	28	11.5	21
PECS	3	5	6.9	14	4.5	7	14.2	21	11.4	18
MβCCS	2.6	5	3.5	5	2.9	5	9.1	13	6.4	10
MβECS	2.5	5	3.4	4	3.7	6	9.4	12	7.1	10
所有MCS	3.1	8	5.2	14	3.9	10	12.0	28	9.0	21

2.3 云顶亮温(TBB)和离心率

云顶最低亮温可以反映夜间MCS对流发展的高度[36]。为了解不同类型MCS对流发展的差异,统计并计算了各类MCS的最低、平均TBB和离心率(表3)。可以看出,5—10月MCS中MCC的平均TBB最低(-71.9 ℃),PECS次之,MβECS最高(-62.5 ℃)。从各月来看,平均TBB除了7月MCC与PECS相当外,其余各月MCC均较PECS、MβCCS、MβECS偏低,表明黄河中游地区的MCC比其它类型的MCS发展都要旺盛、强烈,且8月最强,7月次之,5月最弱;但就个体而言,MCC、PECS以及MβCCS的最低TBB均出现在7月,8月次之。可见,多数MCS最低、平均TBB的月分布差异明显,大尺度圆形状的较拉长状的TBB值低,发展更旺盛,而拉长状的小尺度MCS的发展受季节影响不大。

就夏季而言,MCC的平均TBB为-72.9 ℃,比南方地区高出7.1 ℃[16],而比黄河下游地区低1.9 ℃[27],但个别MCC的最低TBB却达到了-91 ℃,比南方地区、黄河下游地区分别低了约7.0 ℃、1.0 ℃。可见,由于能量和水汽等环境条件的差异,不同地区的对流发展存在明显差异。

MCS的离心率反映其形状,不同形状的MCS对能量和水汽等环境条件要求不同,造成的降水特征差异也较大。由表3中离心率可知,黄河中游地区MCC和PECS成熟时期的平均离心率分别为0.86和0.51,分别较美国偏大0.03和0.01[21],前者较黄河下游地区偏大0.01[27],后者则偏小0.04;MβCCS的平均离心率为0.84,与美国和我国黄河下游地区相当;MβECS为0.44,较美国和黄河下游地区均偏小0.09。从各月来看,MCC成熟时期的平均离心率8月最大,为0.87,5月和6月相当,而PECS、MβCCS和MβECS均为6月最大,8月次之。这也说明MCC在8月更易发展旺盛。

2.4 移动路径

分别将4类MCS从形成、成熟到消亡期间的逐小时中心位置点绘制成图(图略),分析其移动路径。发现,MCC的移动方向有偏东北、偏东南、偏东、原地减弱和偏西等5种,其中偏东和偏东南方向最多,偏西方向最少,只有1个;MβCCS的移动方向有偏东北、偏东南和原地减弱等3种,其中偏东南方向最多,有6个;PECS只有2种移动方向,即偏东和偏东南方向,且数量相当;MβECS则以偏东方向为主,偏东南方向次之,只有1个为原地减弱。

综上所述,不同类型MCS的移动方向较为复杂,总体上以偏东和偏东南方向为主,这与中纬度西风带系统的移动路径基本一致,但由于受副热带高压、锋面、台风等较大尺度天气系统的影响,会出现不同的移动路径,少数为偏东北方向和原地减弱,极个别为偏西方向。对比移动路径发现,圆形状的比拉长状的移动少,其中PECS移动最大,MCC移动最小,这可能与激发这些系统的环境天气系统的强弱有关[25]。

表 3　2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区 MCS 的 TBB(单位:℃)和离心率统计

Tab. 3　The statistics of TBB (Unit:℃) and eccentricity for different types MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 - 2014

		MCC		PECS		MβCCS		MβECS	
		TBB	离心率	TBB	离心率	TBB	离心率	TBB	离心率
5 月	最小	-70	0.76	-70	0.26	-72	0.7	-71	0.28
	平均	-65.5	0.83	-62.3	0.36	-64.3	0.78	-62.2	0.42
6 月	最小	-78	0.7	-61	0.55	-68	0.7	-66	0.43
	平均	-69.1	0.83	-61	0.57	-61.8	0.84	-62.3	0.49
7 月	最小	-91	0.7	-92	0.4	-82	0.73	-69	0.4
	平均	-74.3	0.81	-74.2	0.49	-73.8	0.83	-64.5	0.49
8 月	最小	-85	0.72	-73	0.5	-75	0.76	-66	0.21
	平均	-75.1	0.87	-70.3	0.55	-73	0.79	-62	0.27
9 月	最小	-73	1	/	/	/	/	/	/
	平均	-73	1	/	/	/	/	/	/
10 月	最小	/	/	/	/	-61	0.9	/	/
	平均	/	/	/	/	-61	0.9	/	/
夏季	最小	-91	0.7	-92	0.4	-82	0.7	-69	0.21
	平均	-72.9	0.82	-71.1	0.56	-68.7	0.85	-62.9	0.43
5—10 月	最小	-91	0.7	-92	0.26	-82	0.7	-71	0.21
	平均	-71.9	0.86	-68.7	0.51	-67.2	0.84	-62.5	0.44

注:"/"表示无该类 MCS

2.5　降水特征

为全面了解各类型 MCS 的降水特征及其影响程度,根据 2005—2014 年 84 个样本的逐时降雨量和 TBB,计算云区内 24 h 累计雨量、雨强和最大雨强以及雨区与云区面积比等特征量。

2.5.1　24 h 降水量

表 4 给出 2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区不同类型 MCS 的 24 h 降水特征。可以看出,受地形、能量和水汽条件差异影响,在陕西与山西交界形成的中尺度对流系统无论是降水范围还是降水强度均最大,且持续时间也较长,形成于甘肃中南部的 MCS 次之,而在山西与内蒙交界形成的 MCS,无论是降水范围还是降水强度都最小,持续时间也较短。另外,如果 MCS 在发展过程中与其它对流云团合并,形成 MCC 或持续时间更长的对流系统,则造成的降水范围更大、强度更强、持续时间更长,如 2005 年 7 月 1—2 日为典型的多个 MCS 合并的中尺度对流系统,造成甘肃、陕西、山西等地大范围大雨,部分站点暴雨、多站达大暴雨,24 h 降雨量最大达 170 mm,最大雨强达 92 mm · h^{-1},降水持续时间长达 15 h。

2.5.2　降水强度

图 4 是 2005—2014 年黄河中游地区各类 MCS 的最大雨强和平均最大雨强。总体来看,各类型 MCS 最大雨强均 >50 mm · h^{-1},其中圆形状的大于拉长状的,其顺序为 MCC > MβCCS > MβECS > PECS;而平均最大雨强,则是较大尺度的(MCC 和 PECS)大于较小尺度的,其中 MβECS 最小。然而,多个对流系统合并后的最大雨强高达 121 mm · h^{-1},平均最大雨强可达 89.3 mm · h^{-1}(图略),较单个对流系统显著增大,因此,对于多个对流系统合并后的暴雨预报要引起高度重视。

另外,各类 MCS 的最大雨强和平均最大雨强还具有明显的地域特征(图 4)。就 MCC 而言,最大雨强为 B 区 > A 区 > C 区,而平均最大雨强为 B 区 > C 区 > A 区;MβCCS,最大雨强为 C 区 > B 区,而平均最大雨强为 B 区 > C 区;PECS 和 MβECS,最大雨强和平均最大雨强均是 B 区 > A 区。

以上降水特征,不仅与 MCS 生成的区域和类型有关,还与季节密切相关,不同季节、不同区域、不同类型的 MCS,其获得发展的水汽和能量条件差异很大。

表 4 2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区各类 MCS 的 24 h 降水特征

Tab. 4 The characteristics of 24 h rainfall of different types MCS in the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 – 2014

类型	雨量分布特征	平均雨量/mm	最大雨量/mm
MCC	成熟于 C 区和 A 区的 MCC 降水以中雨为主;而成熟于 B 区的则表现为平均大雨、连续多个台站出现暴雨、个别台站达大暴雨	C 区 6.7、A 区 10.5、B 区 27.5	C 区 39、A 区 46、B 区 160
PECS	成熟于 A 区的 PECS 降水以小到中雨为主;而成熟于 B 区的则以中雨为主,个别台站达暴雨或大暴雨	A 区 13.8、B 区 19	A 区 24、B 区 121
MβCCS	成熟于 C 区的 MβCCS 降水以小到中雨为主,个别台站可达暴雨或大暴雨;而成熟于 B 区的则以中到大雨为主,部分台站达暴雨或大暴雨	C 区 10、B 区 21.4	C 区 105、B 区 156
MβECS	成熟于 A 区的 MβECS 降水以小到中雨为主,个别台站可达暴雨;成熟于 B 区的以中到大雨为主,个别台站可出现暴雨或大暴雨	A 区 18.3、B 区 26.2	A 区 61、B 区 164

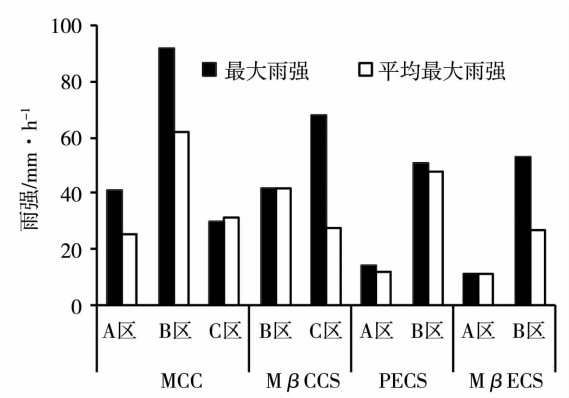

图 4 2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区各类 MCS 的最大雨强和平均最大雨强

Fig. 4 The maximun rainfall intensity and mean maximun rainfall intensity of different types MCS in the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 – 2014

2.5.3 雨区与云区面积比

根据公式(1)计算得出,黄河中游地区 MCS 的雨区面积占比平均达 81%。总体上,MβCCS 和 PECS 占比较大,其余 2 类相对较小,其中 B 区的 PECS 占比最大,高达 92.5%,B 区的 MβCCS 次之,为 90.3%,而 C 区的 MCC 最小,仅为 58.7%。从分类来看,MCC 是生成于 B 区的最大,为 85.2%,生成于 A 区的次之,生成于 C 区的最小;对于 MβCCS,B 区 > C 区;而对于 PECS 和 MβECS 而言,B 区 > A 区。可见,生成于不同区域不同类型的 MCS,其雨区和云区面积比差异较大。

2.5.4 暴雨和短时强降水

MCS 是造成黄河中游地区暴雨天气的主要中尺度系统,因此,分析不同类型 MCS 的暴雨特征差异,可为做好暴雨预报服务提供重要参考。暴雨是指当日 08:00—次日 08:00 的 24 h 累计降雨量 >50 mm,而短时强降水是指 1 h 降雨量 >20 mm。以 MCS 成熟时的 TBB 最低点为中心点,垂直于长轴画十字线,按长轴顺时针方向的右侧开始,将其划分为 4 个象限(图 5),用以分析暴雨出现区域。

MCC:成熟于 A 区和 C 区的几乎没有出现过暴雨;而成熟于 B 区的出现暴雨的概率达 15.4%,大暴雨的概率仅为 1.7%,平均暴雨强度为 75.9 mm,暴雨出现在第Ⅳ象限的概率为 71.4%,有 3 个样本出现在第Ⅲ象限。从 MCC 成熟开始出现强降水,强降水持续时间与 MCC 成熟期一致,出现短时强降水的概率也较高,一次过程中最多有 16 站(次)出现短时强降水,最大雨强达 92 mm · h^{-1},说明 B 区 MCC 造成的降水持续时间长且雨强大。

MβCCS:成熟于 C 区的没有出现过暴雨,但出现过大暴雨,其概率为 1.4%;而成熟于 B 区的出现暴雨的概率为 9.0%,大暴雨的概率为 0.8%,平均暴雨强度分别为 59.1 mm 和 156.0 mm,暴雨主要出现在第Ⅲ和第Ⅳ象限,出现短时强降水的概率明显低于 MCC,短时强降水一般在 40 ~ 50 mm · h^{-1} 之间,最大雨强为 68 mm · h^{-1},说明 B 区的 MβCCS 造成的暴雨主要以短时强降水为主。

PECS:成熟于 A 区的没有出现过暴雨;成熟于 B 区的出现暴雨的概率为 6.6%,大暴雨概率为 0.4%,平均暴雨强度分别为 53 mm 和 70.3 mm,暴雨主要出现在第Ⅱ和第Ⅲ象限,出现短时强降水的概率低于 MCC,但明显高于 MβCCS,多数短时强降水 >37 mm · h^{-1},最大雨强为 51 mm · h^{-1},可见 B 区的 PECS 造成的暴雨主要以短时强降水为主,但持续时间较 MβCCS 的长。

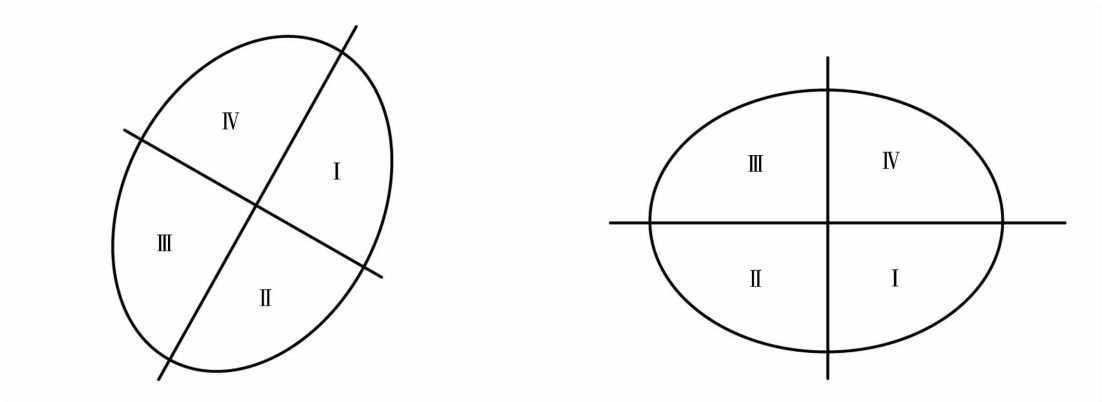

图 5　2005—2014 年 5—10 月黄河中游地区 MCS 的象限划分

Fig. 5　The quadrant division of MCS over the middle reaches area of the Yellow River from May to October during 2005 – 2014

MβECS:成熟于 A 区和 B 区的出现暴雨的概率分别为 3.4% 和 5.6%,大暴雨只出现在 B 区,其概率为 2.7%,平均暴雨强度分别为 63 mm 和 57.5 mm,暴雨主要出现在第Ⅱ和第Ⅲ象限,出现短时强降水的概率较低,短时强降水一般在 20 ~ 34 mm · h^{-1} 之间,最大雨强为 53 mm · h^{-1}。分析发现,在消亡期降水仍会持续,因此 MβECS 造成的暴雨还应关注后续降水。

多个合并的对流系统:出现暴雨的概率为 10.1%,出现大暴雨的概率较 MCS 高,为 2.5%,平均暴雨强度为 68.7 mm,平均大暴雨强度为 131.3 mm。

3　典型偏多、偏少年的大气环流特征

由图 2 可知,2009 年和 2011 年分别为黄河中游地区 MCS 的典型偏少年和偏多年,分别对其夏季(6—8 月)以及各月 500 hPa 位势高度场、850 hPa 温度场及风场进行合成分析(图 6)。可看出,2009 年夏季,500 hPa 上,以 5 850 gpm 指示的副热带高压脊线与 91.5°E 相交于 29°N(图 6a),副热带高压偏北、偏西,整个中高纬度地区以偏西北风为主,锋区位置偏北,冷涡系统活跃,黄河中游地区位于弱脊中,受偏西北气流影响,位势高度较常年明显偏高,正距平中心位于湖北到四川一带,中心强度达 5.0 gpm(图 6c);850 hPa 上,偏南暖湿气流较 2011 年偏弱,暖脊区偏北,高层冷空气沿冷涡东北方向向黄河中游地区灌入(图 6a),这种环流形势不利于水汽和能量向该地区输送和集聚,因此,不利于 MCS 的形成,降水多以局地对流性降水为主。2011 年夏季,500 hPa 上,副热带高压脊线与 98°E 相交于 27°N(图 6b),副热带高压偏南、偏东,东亚中纬度地区为一西风槽;锋区位置较 2009 年明显偏南,冷涡系统不活跃。黄河中游地区位于槽区,其位势高度较常年明显偏低,负距平中心位于黄河中游山西与陕西交界,中心强度达 – 3.0 gpm(图 6d)。而 850 hPa 上,偏南暖湿气流较强(图 6b),暖脊区也较 2009 年偏南。这种环流形势极有利于水汽和能量向该地区输送和集聚,因此,有利于 MCS 的形成和发展,对应夏季降水偏多,且大范围降水天气过程较多。可见,2009 年和 2011 年大气环流形势明显不同,导致该区域 MCS 的多少及类型也存在显著差异。

就夏季各月环流形势来看,也具有明显差异。6 月(图略),副热带高压远距海上,黄河中游地区均为偏西北气流影响,但 2009 年偏西北气流较 2011 年明显偏强,冷涡系统也偏强;对应距平场上,2009 年位势高度偏高,2011 年则为 0 距平区,低层暖湿气流虽然均较强盛,但 2009 年向黄河中游地区的水汽输送明显偏弱。总体上,2011 年 6 月较为有利于 MCS 的形成,而 2009 年 6 月则不利于 MCS 的形成。因此,2009 年 6 月无 MCS 形成,2011 年 6 月则有 3 个 MCS。

7 月(图略),500 hPa 上,黄河中游地区 2009 年为弱脊控制,偏西北气流较弱,但位势高度显著偏高,而 2011 年虽然位于槽区(该槽区较宽广,南北跨度也较大),但低层水汽和能量输送明显偏弱,位势高度负距平中心位于我国内蒙古与蒙古国交界,位置明显偏北,说明水汽和能量输送以及辐合也偏北。可见,2009 年 7 月不利于黄河中游地区 MCS 的形成,而 2011 年 7 月不利于较大尺度的 MCS 形成,因此,2009 年 7 月没有 MCS,2011 年 7 月则有 2 个小尺度的拉长状对流系统形成。另外,这两年 7 月与 6 月的明显差异还在于冷涡系统不活跃。

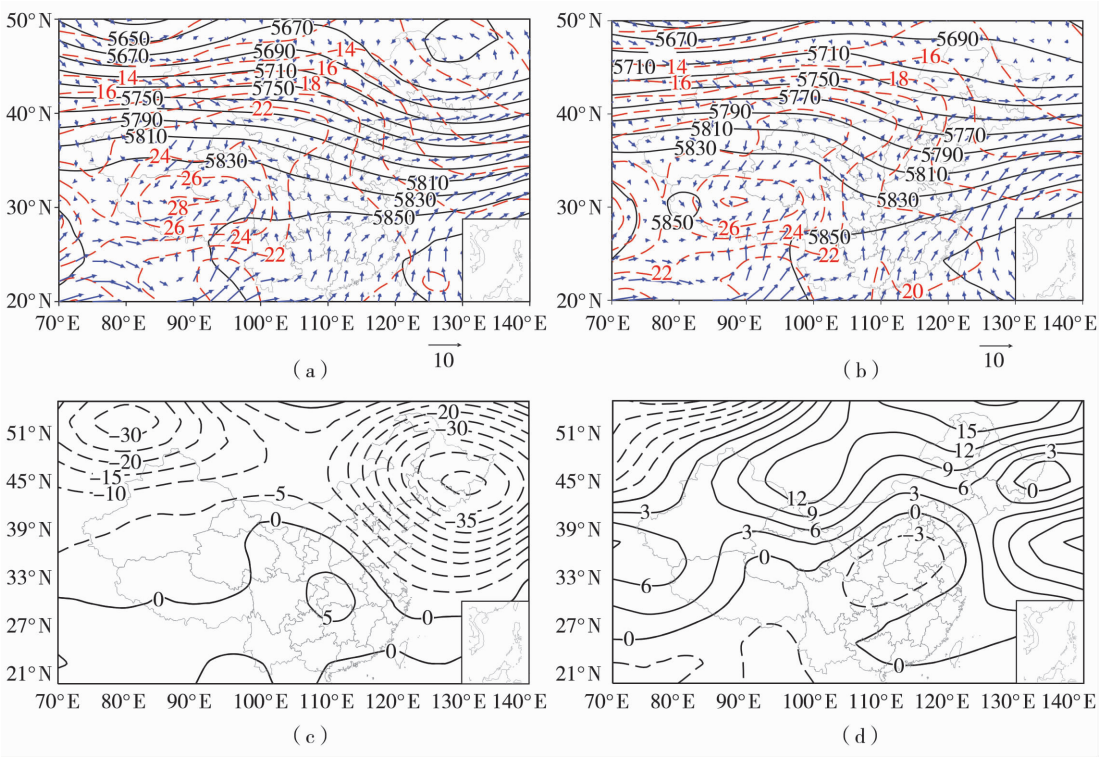

图 6 2009 年(a、c)和 2011 年(b、d)夏季 500 hPa 位势高度场(黑色实线,单位:gpm)、850 hPa 温度场(红色虚线,单位:℃)和风场(蓝色箭头)合成(a、b)及 500 hPa 高度距平场(c、d,单位:gpm)

Fig. 6 The geopotential height field on 500 hPa (the black solid lines, Unit: gpm), temperature (the red dotted lines, Unit: ℃) and wind (the blue arrows) fields on 850 hPa (a, b), and the geopotential height anomaly on 500 hPa (c, d, Unit: gpm) in summer of 2009 (a, c) and 2011 (b, d)

8 月(图略),500 hPa 上,2009 年锋区偏南,黄河中游地区环流较平,受偏西气流控制,位势高度显著偏高,正距平达 5 ~ 10 gpm,而整个黄河中下游和长江中下游地区为一 10 gpm 的正距平中心控制,对应黄河中游地区低层能量和水汽输送显著偏弱;同时,副热带高压显著偏强,西伸脊点为 91°E,呈带状分布。2011 年则不同,锋区略偏北,黄河中游地区位于槽区,低层水汽和能量输送较 2009 年明显偏强,位势高度明显偏低,大部分地区的距平为 -50 ~ -10 gpm,负距平中心位于黄河下游地区。可见,2009 年 8 月不利于 MCS 的形成,2011 年 8 月则有利于 MCS 的形成,因此,2009 年 8 月没有 MCS,2011 年 8 月则有 4 个 MCS,明显多于常年均值。

综上所述,黄河中游地区的 MCS 不仅与副热带高压位置及强弱、中纬度系统、低层水汽和能量输送与集聚有关,还与较高纬度的冷涡系统(或极地冷空气)活动有关,这种差异特点与其它地区明显不同[5-6,27],尤其在 6 月和 7 月表现得更为明显。

4 结 论

(1)黄河中游地区不同类型 MCS 分布的地域差异明显,甘肃中南部、山西中南部和陕西中北部以及蒙、晋、陕 3 省(区)交界为 MCS 的高发区,且前 2 个区域发生概率更高。这与不同地理位置的环流背景、水汽和能量输送条件等密切相关。

(2)2005—2014 年黄河中游地区 MCS 具有明显的年际、月际分布以及日变化特征。10 a 间 MCS 总体上呈现多—少—多的年分布规律,其中 2009 年最少,2011 年最多。一年内 5—10 月均有形成,夏季最多;从类型上看,MCC 和 MβECS 是该区夏季降水的主要 MCS。MCS 多成熟于午后或傍晚到次日凌晨。另外,MCC 较其它类型生命史更长,多数 MCS 表现出生成快、消亡慢的特点,达到标准后平均能维持 5.2 h,且不同个体生成、成熟、消亡的时间跨度均较大。

(3)黄河中游地区 MCS 的平均 TBB,圆形状的 MCS 较拉长状的更低,且季节差异明显,但 MβECS 的发展受季节影响不大。其中 MCC 比其它类型发展旺盛、强烈,且 8 月最强。黄河中游地区 MCS 成熟时的平均离心率,MCC 和 PECS 均较美国的大,但与黄河下游地区相比,MCC 偏大,而 PECS 则偏小;MβCCS 与美国和黄河下游地区的相当,而 MβECS

较美国和黄河下游地区的偏小。

(4)黄河中游地区不同类型 MCS 的移动方向最多有 5 种,总体上以偏东和偏东南方向为主,少数为偏东北方向和原地减弱。另外,圆形状的比拉长状的移动少。

(5)MCS 造成的降水特征复杂,地域差异明显。日降水量分布特征表现为,形成在陕西与山西交界的 MCS 无论是降水范围还是降水强度都是最大的,且持续时间也较长。在发展过程中如出现多个对流系统合并,则造成的降水范围更大、强度更强、持续时间更长。生命史内 MCS 的雨区面积占比平均达 81%,其中生成于 B 区的 PECS 占比最大,达 92.5%。各类 MCS 的暴雨和短时强降水的特征差异较大,且具有明显的地域性特点,值得关注的是 MβECS 在消亡期降水仍会持续。

(6)MCS 典型偏多年和偏少年的环流形势对比分析表明,黄河中游地区的 MCS 不仅与副热带高压位置及强弱、中纬度系统、低层水汽和能量输送与集聚有关,还与较高纬度的冷涡系统(或极地冷空气)活动有关,这种差异特点与其它地区明显不同,尤其在 6 月和 7 月表现得更为明显。

限于文章篇幅和分析重点,文章主要对中尺度对流系统的统计特征进行了分析,关于形成这些特征的原因,有待选取典型个例进行深入研究。

参考文献

[1] Maddox R A. Meso - scale Convective Complexes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1980,61:1374 - 1387.

[2] Velasco L, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in Americas[J]. Journal Geogrophysical Research,1987,192:9591 - 9613.

[3] Miller D, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region[J]. Monthly Weather Review, 1991,119:2978 - 2992.

[4] Laing A, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in Africa [J]. Monthly Weather Review,1993,121:2254 - 2263.

[5] 李玉兰,王婧熔,郑新江,等. 我国西南—华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究[J]. 大气科学,1989,13(4):417 - 422.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 井喜,井宇,李明娟,等. 淮河流域一次 MCC 的环境流场及动力分析[J]. 高原气象,2009,28(6):349 - 357.

[9] 方丽娟,于学泉,王元,等. 中国东北地区中尺度对流复合体的时空分布特征[J]. 气象与环境学报,2013,29(3):35 - 41.

[10] 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, 1094.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 钟晓平,杨淑群,朱远琼. 青藏高原东部地区中尺度对流复合体的降水特征[J]. 高原气象,1994,13(2):113 - 121.

[15] 杨本湘,陶祖钰. 青藏高原东南部 MCC 的地域特点分析[J]. 气象学报,2005,63(2):236 - 242.

[16] 项续康,江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体[J]. 应用气象学报,1995,6(1):9 - 17.

[17] 刘勇,郭大梅,胡启元. 2012 年 7 月 27 日陕北佳县特大暴雨天气的成因[J]. 干旱气象,2014,32(3):424 - 430.

[18] 徐娟,纪凡华,韩风军,等. 2012 年盛夏山东西部一次短时强降水天气的形成机制[J]. 干旱气象,2014,32(3):439 - 445.

[19] 朱义青,胡顺起,张品竹,等. 山东南部一次大暴雨过程的中尺度特征及成因分析[J]. 干旱气象,2015,33(1):119 - 127.

[20] 李玲萍,狄潇泓,刘新伟,等. 河西走廊东部“6.27”突发性暴雨特征与成因[J]. 干旱气象,2015,33(6):941 - 947.

[21] Jirak I L, Cotton W R, Mcanelly R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development[J]. Monthly Weather Review, 2003,131(10):2428 - 2449.

[22] Anderson C J, Arritt R W. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993[J]. Monthly Weather Review, 1998,126(3): 578 - 599.

[23] 费增坪,郑永光,洪庆. 2003 年淮河大水期间 MCS 的普查分析[J]. 气象,2005,31(12):18 - 22.

[24] 卓鸿. 山东省及周边地区夏季中尺度对流系统时空分布和典型个例分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2010.

[25] 曾波,谌芸,肖天贵. 我国中东部地区夏季 MCS 统计分析[J]. 气象,2013,39(2):180 - 185.

[26] 王磊,谌芸,张仙,等. 冷涡背景下 MCS 的统计分析[J]. 气象,2013,39(11):1385 - 1392.

[27] 卓鸿,赵平,李春虎,等. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布[J]. 大气科学,2012,36(6):1112 - 1122.

[28] 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.

[29] 赵桂香. 不同环流背景下暴雨云团与降水特征比较[A]. 全国卫星资料应用技术交流会论文集[C]. 南昌,2011.

[30] 井喜,李社宏,屠妮妮,等. 中国 MCC 致洪暴雨的研究[A]. 中国气象学会年会论文集[C]. 北京,2010.

[31] 赵桂香,程麟生. 2001 年 7 月山西中部一次罕见暴雨过程的诊断分析[J]. 高原气象,2006,25(6):1083 - 1091.

[32] 刘瑞芳,李萍云,陈小婷,等. 一次中尺度对流复合体致洪暴雨成因分析[J]. 成都信息工程学院学报,2012,27(3):306 - 313.

[33] 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 - 63.

[34] 师锐,何光碧,龙柯吉. 一次四川盆地低涡型特大暴雨过程分析[J]. 干旱气象,2015,33(5):845 - 855.

[35] 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.

[36] 江吉喜,项续康,范梅珠. 青藏高原夏季中尺度强对流系统的时空分布[J]. 应用气象学报,1996,7(4):473 - 478.

Statistical Characteristics of Mesoscale Convective Systems over the Middle Reaches Area of the Yellow River During 2005 – 2014

ZHAO Guixiang[1], WANG Xiaoli[1], WU Hong[2]

(1. *Shanxi Meteorological Observatory*, *Taiyuan* 030006, *China*;
2. *China Meteorological Administration Cadres Training Institute*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Based on the hourly TBB and cloud images of FY – 2E, meteorological observation data, and NCEP reanalysis data with 1° × 1° spatial resolution from May to October during 2005 – 2014, the climatic characteristics of mesoscale convective systems (MCS) over the middle reaches area of the Yellow River were analyzed, including mesoscale convective complex (MCC), persistent elongated convective systems (PECS), meso – βscale MCC (MβCCS) and meso – βscale PECS (MβECS). The results are as follows: (1) MCS tended to occur over the middle and south of Gansu, the middle and south of Shanxi, the middle and north of Shaanxi, and the border of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia. MCS over the middle reaches area of the Yellow River formed from May to October, and was easy to develop the mature in summer. MCC and MβECS were main MCS causing precipitation in summer. (2) The daily variation of MCS was obvious, and usually formed and matured in the afternoon and the evening to early morning of the next day. Most MCS generated fast and dissipated slowly, and were mainly move to the easterly and southeasterly, but the moving of round shape MCS was less than the elongated shape's. (3) The average TBB for the round shape MCS was lower than the elongated shape MCS. The development of MCC was most vigorous and strong, and it was the strongest in August, while that of MβECS wasn't obviously influenced by the seasonal change. The average eccentricity of the mature MCC and PECS over the middle reaches area of the Yellow River were greater than that in USA, and the former was greater than in the lower reaches area of the Yellow River, while the latter was smaller. (4) The characteristics of rainfall caused by MCS were complex over the middle reaches area of the Yellow River, and there were obvious regional differences. There was wider, stronger and longer precipitation when the multiple MCS merged. The rainfall in the center of cloud area was obviously greater than in other region of cloud area. The heavy rain mainly occurred in the left and backward quadrant of MCS. The most precipitation intensity of MCS was generally greater than 50 mm · h^{-1}. The ratios of rain areas and cloud areas for the different types and regions MCS were significantly different. (5) There were obvious inter – annual variation characteristics of MCS. The number of MCS was more in 2011 and less in 2009 than the normal year, and the circulation situation in 2011 was nearly opposite to 2009, which were related not only to the subtropical high, geopotential height anomaly on 500 hPa in the middle latitude and transportation and gather of warm and moisture airflow in lower layer but also to the cold vortex systems on 500 hPa.

Key words: MCS; the middle reaches of the Yellow River; statistical characteristics; difference