

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, 36 (6): 1112–1122, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11174.
Zhuo Hong, Zhao Ping, Li Chunhu, et al. Analysis of climatic characteristics of mesoscale convective system over the lower reaches of the Yellow River during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1112–1122.

夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布

卓鸿¹ 赵平² 李春虎³ 蒲章绪³

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 山东省气象局, 济南 250031

摘 要 利用 1996–2008 年逐小时卫星资料、NCEP 再分析资料及统计方法, 研究了位于黄河下游地区的中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 的气候特征, 其中包括中尺度对流复合体 (Mesoscale Convective Complex, 简称 MCC)、持续拉长状对流系统 (Permanent Elongated Convective System, 简称 PECS)、 β 中尺度对流复合体 (Meso- β Scale MCC, 简称 M β CCS)、 β 中尺度持续拉长状对流系统 (Meso- β Scale PECS, 简称 M β PECS) 4 类。结果表明: MCC 和 PECS 是黄河下游地区影响夏季降水的主要 MCS, 其中 7 月份 MCC 最多, 并且 MCC 的数量明显大于 PECS; 与发生在美国的 MCS 比较, 发生在黄河下游地区的 MCC 和 PECS 在成熟期的面积和平均偏心率较大、生命史较长, 但 M β CCS 和 M β PECS 的生命史较短、平均偏心率变化不大; 黄河下游地区 PECS 表现出成熟较快和消亡较慢的特征, 其最低相当黑体温度 (BlackBody Temperature, 缩写为 TBB) 平均值为 -72°C , 比 MCC 低 1°C 左右, 生命史比 MCC 长 0.9 h; 在 MCC 的形成、成熟及消亡期, 其日循环特征均表现为明显的双峰特征, 而 PECS 却呈现出单峰特征; 黄河下游地区 MCC 的发生时间主要集中在 2 个时段, 一个是在下午形成, 傍晚成熟, 凌晨消亡, 另一个则在后半夜形成, 凌晨成熟, 上午甚至中午才消亡; MCS 具有明显的年际变化特点, 在 MCS 较少的 1999 年, 500 hPa 的副热带高压偏南, 华北地区位势高度较常年明显偏高, 而在 MCS 较多的 2001 年, 副高异常偏强, 华北地区位势高度较常年明显偏低, 850 hPa 上为一低压槽, 黄河下游地区主要受副高边缘的西南气流影响。

关键词 MCC PECS 气候特征 黄河下游

文章编号 1006-9895(2012)06-1112-11

中图分类号 P458.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11174

Analysis of Climatic Characteristics of Mesoscale Convective System Over the Lower Reaches of the Yellow River during Summer

ZHUO Hong¹, ZHAO Ping², LI Chunhu³, and PU Zhangxu³

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Information Center, Beijing 100081

3 Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031

Abstract Mesoscale convective system (MCS), including mesoscale convective complexe (MCC), permanent elongated convective system (PECS), meso- β -scale convective complexe (M β CC), and meso- β -scale PECS (M β PECS), over the lower reaches of the Yellow River during summer from 1996 to 2008 were analyzed using hourly 1996–2008 satellite date,

收稿日期 2011-09-30, 2012-06-02 收修定稿

资助项目 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室项目 2009LASW-B08、2008LASWZI01, 山东省气象局项目 2005sdqxz17

作者简介 卓鸿, 女, 1968 年出生, 副研级高工, 博士, 主要从事中尺度对流系统与台风研究。E-mail: zhuohong_zh@163.com

通信作者 赵平, E-mail: zhaop@cma.gov.cn

NCEP data, and a statistical method. MCC and PECS were the main MCS in this region, and the number of MCC, most of which appear in July, is greater than that of PECS. The mean mature areas ($\leq -52^{\circ}\text{C}$ cold cloud shield), eccentricities (minor axis/major axis), and lifetimes of MCC and PECS that occur in this region are much larger than those of MCS that occur in the United States. However, the mean eccentricities of M β CC and M β PECS resemble those of systems in the United States, and their lifetimes are shorter than those of systems in the United States. PECS have a mean minimum temperature of black body of -72°C , 1°C lower than that of MCC, and a mean lifetime 0.9 h longer than that of MCC, indicating rapid maturing and slow extinction. Two peaks corresponding to the diurnal cycle are clearly seen in the formation, maturation, and extinction period of MCC, but PECS exhibit only one peak. MCC over the lower reaches of the Yellow River occur mainly in two periods. One type forms in the afternoon, matures in the late afternoon, and is extinct in the early morning; the other forms in the late evening, matures in the early morning, and is extinct in the morning, or as late as noon. MCS show obvious yearly variations. For example, in 1999, when there were fewer MCS, the West Pacific subtropical high at 500 hPa leaned southward, and the geopotential at 500 hPa in North China was higher than in normal years. In 2001, however, when there were more MCS, the subtropical high was abnormally strong, the geopotential at 500 hPa in North China was lower than usual, and a trough of low pressure appeared at 850 hPa. Consequently, the lower reaches of the Yellow River region was influenced by the southwest airflow located at the edge of the subtropical anticyclone.

Key words MCC, PECS, Climatic characteristics, lower reaches of the Yellow River

1 引言

早在 1980 年代初, Maddox (1980) 用低于 -32°C 和 -52°C 的卫星红外云图相当黑体温度 (BlackBody Temperature, 缩写为 TBB) 的冷云盖面积来定义中尺度对流复合体 (MCC)。后来的研究进一步表明, 用 -52°C 来划分 MCC 的标准更能反映其在垂直方向上的发展状况 (Augustine and Cotton, 1988; Mcanelly and Cotton, 1989; Cotton et al., 1989; 郑永光等, 2008; 祈秀香和郑永光, 2009)。由于 MCC 是中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 的一种, 并且 MCC 的特征不能反映所有 MCS 的特征, 因此一些学者也关注 MCS 的研究, 如 Anderson and Arritt (1998) 研究了持续拉长状的对流系统 (PECS, 即较大尺度的 non-MCC), 并用 -52°C 为标准将较大尺度的 MCS 划分成 MCC 和 PECS 这两类, 其中除了偏心率以外, PECS 的标准仍然和 Maddox (1980) 定义的一致。随后, Jirak et al. (2003) 综合考虑时间和空间尺度特征, 进一步将较小尺度的 MCS 分成 β 中尺度对流复合体 (Meso- β scale MCC, 简称 M β CCS) 和 β 中尺度持续拉长状对流系统 (Meso- β scale PECS, 简称 M β ECS) 这两类, 而将整个 MCS 分为四类, 即 MCC, PECS, M β CCS 和 M β ECS (表 1)。按照 Jirak et al. (2003) 的这种分类标准, MCC 和 PECS 无论在时间分布、空间分布还是发生前的背景场都有显著差异 (Anderson and Arritt, 1998; Jirak et al.,

2003)。此外, 对不同区域 MCC 的气候特征分析也在进行, 例如 Rodgers et al. (1983)、Augustine and Howard (1991) 分别使用 1 年和 2 年的卫星资料对美国的 MCC 进行研究, Laing and Fritsch (1993a, 1993b) 对非洲和印度等地区 MCC 分布、结构及发生的大尺度环境也进行了气候学研究。

表 1 根据卫星红外云图的 MCS 分类 (Jirak et al., 2003)
Table 1 Types of MCS on the basis of the satellite IR cloud image (Jirak et al., 2003)

MCS 种类	水平尺度	维持时间	形状
MCC	-52°C 的冷云盖面积 $\geq 50000\text{ km}^2$	$\geq 6\text{ h}$	偏心率 ≥ 0.7
PECS	同上	同上	$0.2 \leq \text{偏心率} < 0.7$
M β CCS	-52°C 的冷云盖面积 $\geq 30000\text{ km}^2$	$\geq 3\text{ h}$	偏心率 ≥ 0.7
M β ECS	同上	同上	$0.2 \leq \text{偏心率} < 0.7$

我国疆域辽阔, 地形复杂, 特殊的地理环境和典型的季风气候使我国降水分布特征区域差异较大, 使我国的 MCS 具有显著的区域特征。在研究我国的 MCS 时, 通常将 Maddox (1980) 定义 MCC 维持时间与 Orlanski (1975) 定义的水平尺度标准结合在一起, 将水平尺度为 200~2000 km 的 MCS 定义为 M $_{\alpha}$ CS, 将 20~200 km 的 MCS 定义为 M $_{\beta}$ CS (陶祖钰等, 1998; 马禹等, 1997; 郑永光等, 2008), 但是这些定义没有考虑 MCS 的形状特征。卓鸿等 (2011) 使用 Jirak et al. (2003) 的划分标准对我国

山东的 MCS 进行了研究,发现这种标准也能较好地反映 MCS 的演变过程。Miller and Fritsch (1993) 指出青藏高原东侧的长江上游地区是 MCC 的多发区之一,并且 MCC 发生的高峰期在晚春和初夏,而我国学者的研究指出在我国其他地区和其他时间也常有 MCC 发生(李玉兰等,1989;项续康和江吉喜,1995;郑永光等,2008;段旭等,2004;江吉喜等,1996)。

由于黄河下游地区位于东亚季风区和东部沿海,其北部和西部是华北平原的一部分,易受东北冷涡等来自中、高纬度天气系统的影响,而南部丘陵地区和东部的山东半岛地区易受江淮切变线、台风等来自低纬度的天气系统影响,该区域复杂的地形和天气影响系统使此处 MCS 频发,并受灾较严重,因此一些学者也针对我国黄河下游及附近地区的 MCS 进行了大量研究,如陶祖钰等(1998)、马禹等(1997)的研究说明了黄河下游也是 $M_{\alpha}CS$ 易发区之一,朱官忠和刘恭淑(1998)进一步分析了该区域 MCC 发生的环境条件,郑永光等(2004)研究了发生在黄海及其周边地区的 $M_{\alpha}CS$ 的环境条件,卓鸿等(2004, 2011)研究了黄河下游 $M_{\alpha}CS$ 和 PECS 的发展情况。

综上所述,以上这些研究工作通常偏重于个例和环境场的研究,或者对 MCS 的气候研究使用的卫星资料时间较短,使用较长云图资料,对黄河下游地区从气候学角度上,综合研究 MCS 时空分布特征的还不多。此外,为了有利于不同区域 MCS 之间的比较,也有必要利用 Jirak et al. (2003) 提出的分类方法对中国的 MCS 进行更深入研究(方宗义和覃丹宇,2006)。为此,本文使用 Jirak et al. (2003) 的分类标准,使用 13 年逐时卫星云图资料,比较系统地研究了 MCS 的成熟面积、强度、偏心率、生命史、日变化、月变化、年变化等总体气候特征,以揭示黄河下游地区 MCS 的气候特征。

2 资料与方法

本文使用的资料包括:北京大学物理学院大气科学系接收的日本 GMS-5 和美国 GOES-9 逐时红外云图(1996~2004 年,空间分辨率为 $9.6\text{ km} \times 9.6\text{ km}$)及我国的风云 2 号逐时红外云图卫星资料(2005~2008 年,分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)(www.satellite.cma.gov [2010-12-9])。尽管 2000 年之前共缺少云图资料 12 天,但由于本文所使用的云图

资料长达 13 年,因此资料的缺失并不会影响 MCS 的气候特征分析。此外,1948~2009 年分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的 NCEP 月平均再分析资料也被用于大气环流分析。

由于 MCS 造成的降水一般为深对流降水,强度较强,另外我们的统计结果也显示(图略),符合表 1 的 MCS 日降水量均达到中雨以上,所以本文主要统计 24 h 降水量达到中雨及以上级别的降水过程。与 Maddox (1980) 一致,我们依据卫星红外云图的 TBB 冷云盖面积来定义 MCS。具体做法为:首先,根据山东省 123 个基准站的逐日降水资料(前日 20:00~当日 20:00,在本文中均为北京时间),将造成山东省中雨以上的区域性降水日定义为:同一个区域或相邻区域内 5 个站以上日降水量 $\geq 10\text{ mm}$ 为一个中雨日, $\geq 25\text{ mm}$ 为一个大雨日, $\geq 50\text{ mm}$ 为一个暴雨日, $\geq 100\text{ mm}$ 为一个大暴雨日, $\geq 250\text{ mm}$ 为一个特大暴雨日;然后,获取这些降水日所对应的 MCS 云图,其中 GMS-5 和 GOES-9 的云图来自卫星云图处理系统, FY-2 云图资料来自中国气象局 Micaps 软件系统,我们用 -52°C 的 TBB 线作为特征线对卫星资料进行增强处理以突出 -52°C 冷云区;最后用人工方法确定 -52°C 冷云区在南北方向和东西方向的距离(即纬距和经距),并计算 -52°C 冷云盖的面积,这里经距 (y) 采用公式:

$$y = x \times \cos(l), \quad (1)$$

其中, x 为纬距,约为 110 km ; l 为纬度,此处的纬度为 $35^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$,从公式(1)可以得到 1 经距约等于 90 km ; TBB 线冷云盖面积采用椭圆的面积 (S) 公式:

$$S = \pi \times a \times b, \quad (2)$$

其中, π 为圆周率, a, b 分别是椭圆的长、短半轴。

与 Maddox (1980) 和 Jirak et al. (2003) 的阶段划分一致,将 MCS 的生命史按形成时间、成熟时间和消亡时间划分为 3 个阶段,其中形成时间是指低于 -52°C 的冷云盖面积大于 50000 km^2 (MCC 和 PECS) 或 30000 km^2 ($M\beta\text{CCS}$ 和 $M\beta\text{ECS}$) 的时间,成熟时间是指 -52°C 冷云盖面积达到最大时的时间,消亡时间是指低于 -52°C 冷云盖面积不再满足大于 50000 km^2 或 30000 km^2 的时间。当 MCS 低于 -52°C 的 TBB 线经过山东省造成山东降水时,我们就定义为一次 MCS 过程,并按表 1 的标准将 MCS 分为 MCC, PECS, $M\beta\text{CCS}$ 和 $M\beta\text{ECS}$

进行研究。

3 MCS 基本特征

3.1 MCS 与降水关系

由于我国采用 Jirak et al. (2003) 分类方法开展的研究不多，因此我们与美国的一些研究结果进行比较。在 1996~2008 年夏季，通过资料统计共得到中雨以上降水日 483 d，其中：中雨日、大雨日、暴雨日、大暴雨日的天数分别为 186、167、110 和 20 d，在剔除无云图资料的中雨日 15 d、大雨日 13 d、暴雨日 9 d、大暴雨日 2 d 后，共有中雨以上降水日 444 d（表 2）。在这些降水日中，非 MCS（包括台风及 TBB 高于-52℃的云团）造成的降水天数为 183 d，占降水日总数的 41%，也就是说，山东省中雨以上的区域性降水 59%是由 MCS 造成的，比美国的 74%低（Schumacher and Johnson, 2006）。在山东由 MCS 造成的暴雨和大暴雨的日数占总数的 76%和 72%，与美国的相近。出现我国的中雨、大雨比例比美国的低、而暴雨和大暴雨的比例接近的现象可能是因为我们使用了-52℃的标准，使山东区域满足条件的 MCS 减少，而在美国（Schumacher and Johnson, 2006）使用了-32℃的标准，使 MCS 数量较多。

表 2 不同日降水强度 MCS 的个数

					降水日 无 MCS		
	MCC (个)	PECS (个)	MβCCS (个)	MβECS (个)	无 MCS 日 (d)	总数 (d)	所占 比例
中雨日	29	19	9	9	102	171	60%
大雨日	52	32	19	14	52	154	34%
暴雨日	61	38	10	10	24	101	24%
大暴雨日	21	7	4	0	5	18	28%
合计	163	96	42	33	183	444	41%

3.2 成熟 MCS 的平均面积和偏心率

PECS 成熟时的平均面积以及所有个例中的最大、最小面积均超过 MCC（表 3），其原因可能是 PECS 通常是由几个 MCC 复合而成的，复合后的面积会大于单一的 MCC。从表 3 可以看到，面积最大、偏心率最大的 MCC 和 PECS 均出现在 7 月份，水平尺度分别达到 500~600 km 和 700~800 km，但仍然在 Orlanski（1975）定义的 200~2000 km 中的 α 尺度系统范围内。MCC 和 PECS 的这种特征可能是

因为在 7 月份西太平洋副热带高压（副高）位置北移，黄河下游位于西太平洋副高的边缘，西南暖湿气流的源源不断向此处输送。以前的研究表明，充沛的暖湿空气输送使在低空急流附近的大气稳定度显著降低，有利于中尺度对流系统的发展（赵平和孙淑清，1990）。黄河下游的 MCC 和 PECS 成熟时平均偏心率分别为 0.85 和 0.55，比美国的 0.83 和 0.50 略大（Jirak et al., 2003），而该处的 MCC 的平均面积却远远超过美国的 200000 km²（Jirak et al., 2003），PECS 平均面积甚至是美国 PECS 平均面积的 2 倍（Jirak et al., 2003）。一些研究认为在中国南方成熟的 MCC 中-52℃的冷云罩面积和偏心率均比美国的小（李玉兰等，1989；项续康和江吉喜，1995），但是本文的研究表明发生在黄河下游的 MCC 与南方地区的相比，有更大的冷云罩面积和偏心率，说明了我国 MCC 有很强的区域性特点。此外，在黄河下游，MβCCS 的平均面积大于 MβECS，并且黄河下游的 MβCCS 和 MβECS 偏心率分别为 0.84 和 0.55，与美国的 0.84 和 0.53 基本一致。

3.3 MCS 与 TBB 的关系

云顶最低亮温 TBB 可以反映 MCS 对流发展的高度（江吉喜和项续康，1996）。表 4 是黄河下游地区不同类型的 MCS 平均最低 TBB 及出现的时间与 MCS 成熟时的平均时间间隔。从表 4 来看，夏季 MCC 的平均最低 TBB 为-71℃，总体上比我国南方地区的平均 MCC 最低-80℃（江吉喜和项续康，1996）偏高 9℃左右，但在黄河下游也有有的 MCC 个例出现的最低 TBB 达到-90℃，而比已发现的南方个例中出现的最低 TBB 低约 6℃左右。夏季平均而言，黄河下游 PECS 的平均最低 TBB 比 MCC 低 1℃左右，说明 PECS 的发展比 MCC 更旺盛。逐月看，6 月份 MCC 的平均最低 TBB 比 PECS 的低，说明 MCC 的发展比 PECS 的旺盛，并且也比 PECS 容易达到成熟，7 月份 PECS 比 MCC 发展旺盛，面积扩展速度比 MCC 慢，而 8 月份二者区别不大。PECS 通常在平均最低 TBB 出现 2.2 h 后达到成熟，比 MCC 的 1.7 h 长 0.5 h，而我国南方的 MCC 在云顶最低 TBB 出现 4~6 h 后才成熟（项续康和江吉喜，1995），这说明黄河下游的 MCC 的发展速度比南方的 MCC 快。此外，从整个夏季来看，MβECS 在平均最低 TBB 出现 0.9 h 后达到成熟，比 MβCCS 的 1.5 h 短，这说明形状越圆的大尺度 MCS 冷云罩面积的扩展速度越迅速，但形状越圆的

表 3 黄河下游 MCS 成熟时平均面积（单位： 10^5 km^2 ）和偏心率
Table 3 Statistics of mean areas (10^5 km^2) and eccentricity for each mature MCS in the lower reach of the Yellow River

		MCC		PECS		M β CCS		M β ECS		MCS	
		面积	偏心率	面积	偏心率	面积	偏心率	面积	偏心率	面积	偏心率
6 月	平均	3.66	0.81	4.75	0.57	1.45	0.83	0.68	0.57	3.55	0.70
	最大	10.9	0.92	14.92	0.61	2.80	0.98	0.93	0.61	14.92	0.98
	最小	0.70	0.70	0.62	0.41	0.70	0.73	0.62	0.41	0.62	0.41
7 月	平均	3.46	0.86	4.37	0.54	1.04	0.86	1.02	0.59	3.25	0.71
	最大	17.41	0.99	18.65	0.70	1.87	0.98	2.49	0.82	18.65	0.99
	最小	0.56	0.72	0.62	0.35	0.56	0.73	0.62	0.31	0.56	0.31
8 月	平均	2.88	0.83	3.86	0.54	1.42	0.82	1.08	0.51	2.67	0.68
	最大	13.06	0.98	11.19	0.70	3.73	0.92	2.49	0.70	13.06	0.98
	最小	0.7	0.7	0.68	0.27	0.70	0.68	0.62	0.27	0.56	0.27
整个夏季	平均	3.31	0.85	4.32	0.55	1.27	0.84	1.06	0.55	3.04	0.70
	最大	17.41	0.99	18.65	0.70	3.73	0.98	2.87	0.82	18.65	0.99
	最小	0.56	0.7	0.62	0.27	0.56	0.68	0.62	0.27	0.56	0.27

表 4 不同 MCS 系统最低 TBB ($^{\circ}\text{C}$) 及其出现时间与 MCS 成熟时的时间间隔 (h)
Table 4 Minimum BlackBody Temperature (TBB) ($^{\circ}\text{C}$) of MCS and time interval (h) between the occurring time of minimum TBB and the maturing time of MCS

		MCC		PECS		M β CCS		M β ECS		MCS	
		TBB	间隔	TBB	间隔	TBB	间隔	TBB	间隔	TBB	间隔
6 月	平均	-71	1.3	-69	2.2	-66	1	-64	1	-70	1.6
	最大	-57	4	-58	6	-62	2	-57	1	-57	6
	最小	-89	0	-95	0	-76	0	-71	1	-95	0
7 月	平均	-71	1.8	-73	2.0	-68	1.4	-67	1	-71	1.8
	最大	-57	11	-63	10	-59	3	-58	2	-57	11
	最小	-90	0	-84	0	-79	0	-77	0	-90	0
8 月	平均	-71	1.9	-72	1.9	-68	1.8	-68	0.9	-70	1.7
	最大	-59	11	-64	10	-58	7	-63	2	-58	11
	最小	-84	0	-84	0	-74	0	-74	0	-84	0
整个夏季	平均	-71	1.7	-72	2.2	-68	1.5	-68	0.9	-71	1.7
	最大	-57	11	-58	10	-58	7	-57	2	-57	11
	最小	-90	0	-95	0	-79	0	-77	0	-95	0

小尺度 MCS 冷云罩面积的扩展速度越慢。

3.4 TBB 与降水的关系

由于在云顶亮温、穿透性云顶和降水强度之间有明显的对应关系（卢乃锰和吴蓉璋，1997），因此我们分析了当地面降水出现 $\geq 10 \text{ mm/h}$ 、 $\geq 25 \text{ mm/h}$ 和 $\geq 50 \text{ mm/h}$ 的降水时，对应的穿透性云顶（即上冲云顶）的最低 TBB 值，其中当同一个 MCS 造成相邻 3 个台站、相同量级的强降水连续出现 2

个时次以上的个例被统计。在 13 年的 334 个 MCS 中，我们挑选出对应地面降水 $\geq 10 \text{ mm/h}$ 的最低 TBB 共 74 次，与 $\geq 25 \text{ mm/h}$ 对应的共 86 次，与 $\geq 50 \text{ mm/h}$ 对应的共 28 次，并将造成不同强度降水的 MCS 最低 TBB 进行平均（表 5）。

由于 6 月份 500 hPa 副高的平均脊线位置位于 20°N （朱乾根等，2003），副高边缘的水汽输送不到黄河下游地区，产生 MCS 所需要的水汽主要来

表 5 MCS 平均最低 TBB 与逐时降水量
Table 5 Mean minimum TBB (°C) of MCS and hourly rainfall

		MCC 平均最低 TBB (°C)			PECS 平均最低 TBB (°C)			MβCCS 和 MβECS 平均最低 TBB (°C)		
	逐时降水量	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低
6 月	10~24.9 mm	-66	-59	-69	-64	-57	-71	-67	-62	-74
	25~49.9 mm	-71	-64	-79	-65	-62	-69		无	
7 月	10~24.9 mm	-66	-55	-74	-68	-62	-75	-68	-62	-74
	25~49.9 mm	-71	-59	-84	-71	-62	-79	-68	-65	-71
	≥50 mm	-76	-72	-84	-78	-77	-79		无	
8 月	10~24.9 mm	-67	-62	-77	-68	-64	-74	-67	-58	-74
	25~49.9 mm	-71	-63	-81	-71	-67	-74	-70	-67	-74
	≥50 mm	-74	-64	-84	-76	-74	-79	-72	-67	-74

自西风槽前部的西南气流输送,水汽条件比 7~8 月份差,所以能够产生 50 mm/h 以上地面降水的 MCS 较少,并且若地面产生 25~49.9 mm/h 的强降水,MCC 的平均最低 TBB 要比 PECS 的低。因此,在 6 月份,MCC 要比 PECS 发展得更旺盛才能产生相同强度的降水。不同于 6 月,对 7~8 月的 10~24.9 mm/h 的强降水,MCC 的平均最低 TBB 分别为-66℃和-67℃,而 PECS 的为-68℃;在 7~8 月,当平均最低 TBB 达到-71℃,无论是 MCC 还是 PECS 都会产生 25~49.9 mm/h 的强降水;此外,7、8 月份 MCC 的平均最低 TBB 分别为-74℃和-76℃时,地面产生≥50 mm/h 的强降水,而 PECS 要达到-84℃才能产生这种强降水。因此,总体上,在 7~8 月 PECS 要比 MCC 发展更加旺盛才能产生相同强度的降水。此外,本文的研究结论进一步支持了卢乃锰和吴蓉璋(1997)的结果,他们的研究指出:有些地区的 MCS 没有发展到十分旺盛就可以产生很强的降水,而也有一些地区尽管云团发展得非常旺盛,但是降水却并不很大。本文的研究结果表明,山东沿海地区 7 月的 MCC 最低 TBB 达到-59℃就可以产生≥25 mm/h 的降水,但在内陆地区有时要达到-84℃才能产生相同强度的降水。这说明地面降水强度除了与云顶亮温和穿透性云顶的存在有关外,与水汽输送是否充沛也有很大关系。

4 MCS 的时间变化特征

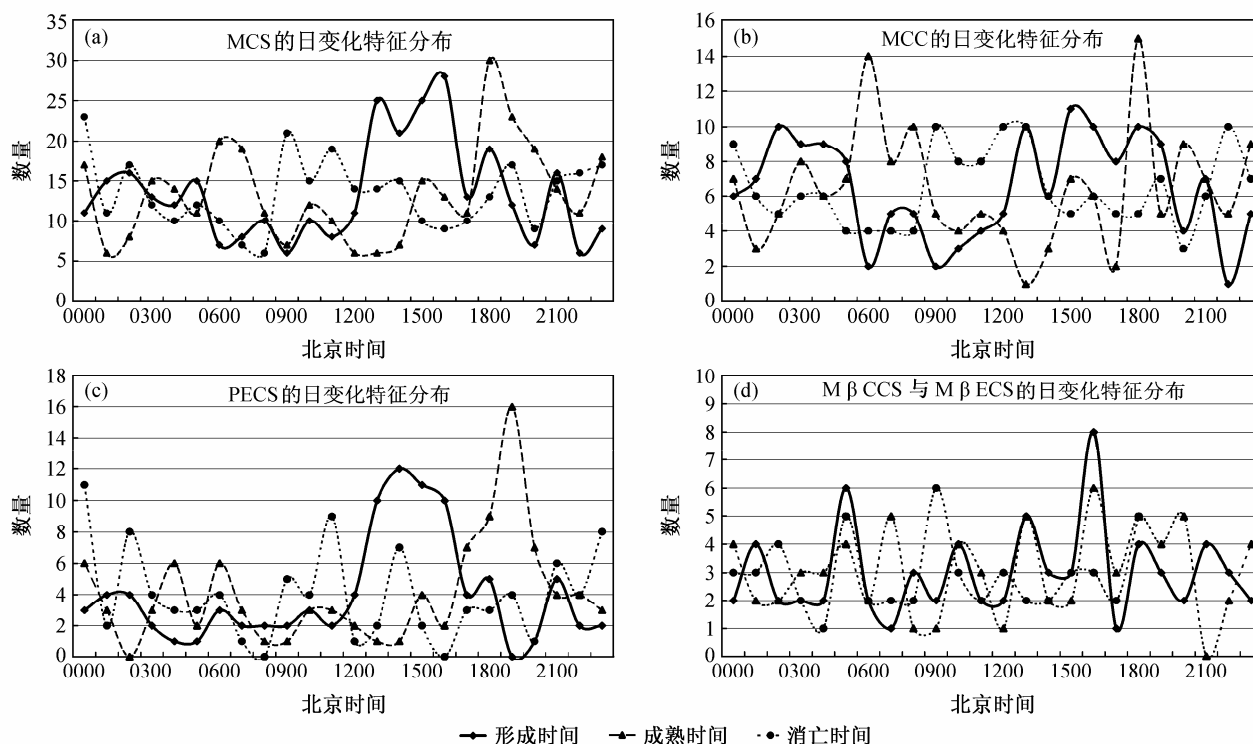
表 6 反映了 MCC、PECS、MβCCS 和 MβECS 的生命史(包括从形成到成熟,从成熟到消亡 2 个阶段)。总体上,夏季 MCC 平均生命史长度为 11.1 h,比 PECS 的生命史短 1.3 h,该结果与美国的研究结论相似(Anderson and Arritt, 1998)。与发生在美

国的 MCC 相比,黄河下游 MCC 的生命史比美国的 MCC 长 0.2 h,而 PECS 的生命史更长,比美国长 1.8 h(Jirak et al., 2003)。MCC 和 PECS 形成—成熟的平均时间分别为 5.1 h 和 6.1 h,MCC 比 PECS 的短 1 h,MCC 和 PECS 成熟—消亡的平均时间分别为 6 h 和 6.9 h,MCC 的比 PECS 的短 0.9 h。MCC 和 PECS 形成—成熟的平均时间均小于成熟—消亡的平均时间,表现出成熟较快、消亡较慢的特征,并且 PECS 比 MCC 的这种特征更明显。MCC 的生命史大多为 6 h 左右,生命史大于 15 h 的数量较少,而 PECS 的生命史大多集中在 6~13 h,也有较多的 PECS 生命史长达 17 h(图略)。

表 6 各类 MCS 在夏季的生命史长度(单位: h)
Table 6 Life time of different types of MCS (unit: h)

	形成—成熟			成熟—消亡			总生命史		
	平均	最长	最短	平均	最长	最短	平均	最长	最短
MCC	5.1	18	1	6.0	21	1	11.1	28	6
PECS	5.5	24	1	6.9	23	1	12.4	37	6
MβCCS	1.8	3	0	2.4	4	1	4.2	5	3
MβECS	1.8	3	1	2.2	4	1	4.0	5	3
所有 MCS	4.7	24	0	5.5	23	1	10.0	37	3

图 1 是 MCS 的形成、成熟和消亡时间的日循环特征分布。在图 1a 中,MCS 的形成时间有一个大的峰值,大部分的 MCS 是在下午 13:00~16:00 形成,另外还有一个小的峰值,少数 MCS 在凌晨 02:00~05:00 形成;成熟时间主要出现在 18:00,其次出现在 06:00~07:00 时;消亡时间主要出现在 00:00 前后和 09:00~11:00 时。由于 MβCCS 和 MβECS 的生命史主要集中在 3~6 h,并且数量较少,因此 MCS 的平均生命史长短主要是由 MCC 和

图1 (a) MCS、(b) MCC、(c) PECS、(d) M β CCS 和 M β ECS 的日变化Fig. 1 Diurnal variations of (a) MCS, (b) MCC, (c) PECS, (d) M β CCS and M β ECS

PECS 来决定。由于 MCC 和 PECS 生命史大多集中在 6~13 h, 因此影响山东的 MCS 的发生主要在 2 个时段, 一种是在下午形成, 傍晚成熟, 凌晨消亡, 另一种是在后半夜形成, 早上成熟, 上午甚至中午才消亡。MCC 的形成、成熟和消亡时间 (图 1b) 的日变化有明显的双峰型特征, 且它们的峰值大小相当。MCC 的形成常常发生在 13:00~19:00 和 02:00~05:00, MCC 成熟时间一般在 18:00 和 06:00~08:00, 消亡时间在 09:00~13:00 和 22:00~00:00 时。一些研究表明, 在午后形成的 MCC 除了与大尺度动力强迫有关之外, 还与下垫面和局地热力环流相关 (Yu et al, 2009), 而在夜间形成、凌晨成熟的 MCC 可能与低空急流的日变化以及地形的影响有关 (He and Zhang, 2010)。He and Zhang (2010) 指出, 由热力环流产生的 MCC 下午在高原东坡产生降水, 然后降水随着对流层中层的气流向东南方向传播, 在后半夜达到华北平原 (即黄河下游地区), 造成黄河下游地区的另一个降水峰值。不同于 MCC, PECS (图 1c) 没有夜发性特征, 它的形成和成熟期主要为单峰型, 通常在 13:00~16:00 形成, 比 MCC 的早 1~2 h, PECS 在 17:00~20:00 成熟, 而消亡主要发生在 23:00~02:00、11:00

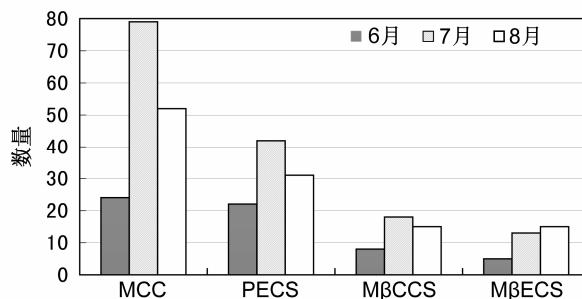


图2 6~8月不同MCS的分布情况

Fig. 2 Monthly variations of different types of MCS

和 14:00 多个时段。M β CCS 和 M β ECS 没有明显的日循环特征 (图 1d)。

在月尺度上, 图 2 给出了 6~8 月 MCC、PECS、M β CCS 和 M β ECS 数量的时间曲线。从图中可以看到, MCC 的数量最多, 其次为 PECS, 这说明在雨季 MCS 能够充分发展成较大尺度系统, MCC 和 PECS 是影响黄河下游地区夏季降水的主要 MCS。此外, 7 月份是 MCS 最多的一个月, 也是 MCC 发生的高峰期, 这可能与 7 月份西太平洋副热带高压北跳, 使黄河下游地区被位于副高边缘的西南低空急流控制, 充沛的暖湿空气输送使 MCS 更容易发生。

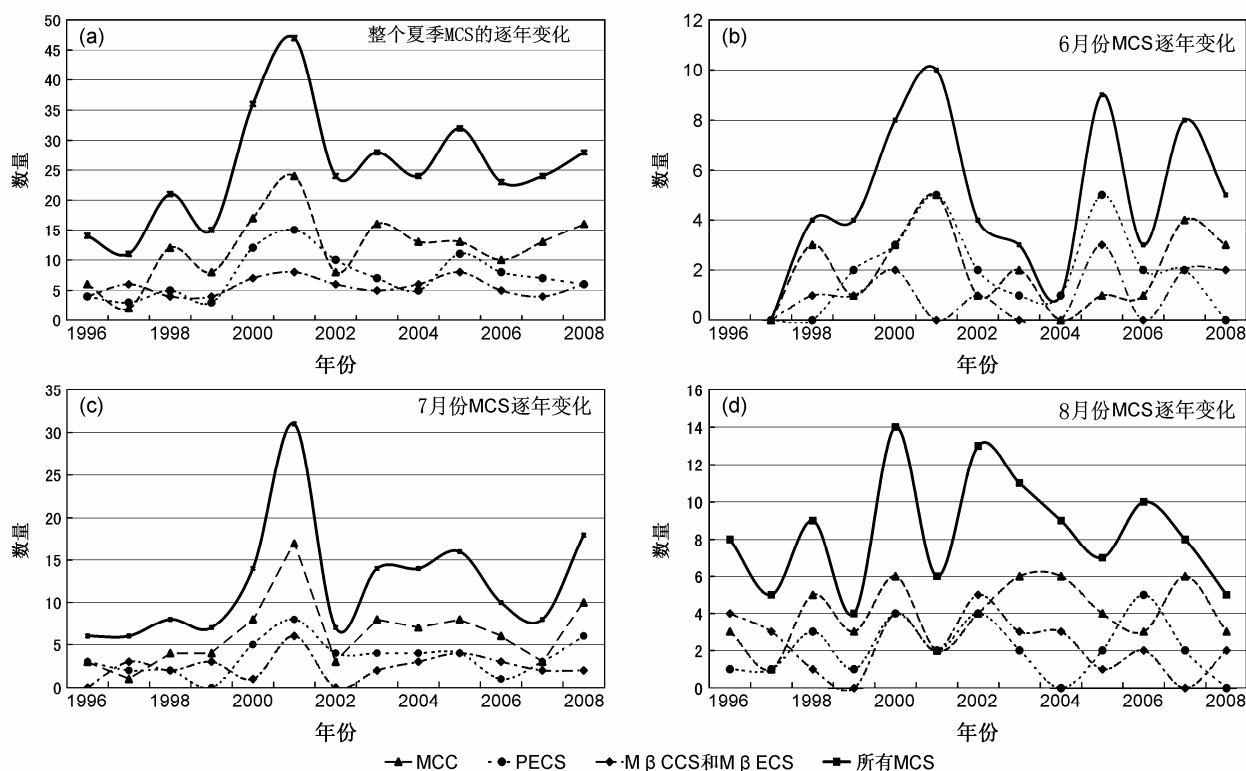


图3 1996~2008年(a)夏季及(b)6月、(c)7月、(d)8月的MCS变化曲线

Fig. 3 Temporal curves of MCS in (a) summer, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug

MCS 具有明显的年际变率。图 3 给出了 1996~2008 年不同季节 MCS 的年际变化曲线。从图中看到, MCS 具有明显的年际变化特点, 最少的年份 MCS 不足 20 个, 而最多的年份 MCS 可以到达 50 个左右。1999 年是 MCS 偏少年, MCC、PECS、M β CCS 和 M β ECS 都在该年的 6、7、8 月偏少; 2001 年是一个典型的 MCS 偏多年, MCC、PECS、M β CCS 和 M β ECS 都在该年的 6、7、8 月均偏多。为了进一步比较在 MCS 偏多和偏少年大气环流年际差异, 我们选择 1999 年和 2001 年进行分析, 结果表明: 在 1999 年夏季平均 500 hPa 位势高度场上 (图 4a1), 以 5850 位势米指示的西太平洋副高脊线与 120°E 相交于 30°N 以南, 指示着一个偏南的副高脊线, 此时黄河下游地区位于西风带的弱脊中, 受西北气流影响; 与多年平均比较, 在 500 hPa 上, 东亚中纬度地区位势高度偏高 (图 4b1), 而我国南方位势高度偏低; 在夏季 850 hPa 位势高度场上 (图 4c1), 具有闭合等高线的高压系统位于华北及沿海地区, 黄河下游受该高压控制; 这种环流形式不利于当地 MCS 发生, 此时山东降水偏少 (在 30 mm 以下), 而长江流域降水偏多 (在 100 mm 以上) (图 4d1)。

在 2001 年夏季 500 hPa 位势高度场上 (图 4a2), 以 5850 位势米指示的西太平洋副热带高压脊与 120°E 相交于 30°N 以北, 指示着一个偏北的副高脊线, 同时东亚中纬度为一个西风槽, 黄河下游地区位于槽前, 此时东亚中纬度地区位势高度较常年偏低 (图 4b2); 在夏季 850 hPa 上, 在华北地区没有一个闭合的高压系统出现, 西太平洋副高脊线向西北延伸, 黄河下游地区位于副高边缘的西南气流中; 这种形式有利于 MCS 发生, 此时山东地区降水偏多, 其中心值超过 60 mm (图 4d2)。很显然, 在 1999 年和 2001 年东亚区域大气环流明显不同, 从而导致了 MCS 的多少也存在显著差异。

5 结论

利用 1996~2008 年的逐小时卫星资料、NCEP 再分析资料和统计学方法, 我们对夏季黄河下游地区 MCS 进行了分类, 并研究了不同类型的 MCS 的面积、强度、日变化、月变化、年变化等特征, 结论如下:

(1) 黄河下游地区降水主要由 MCS 造成的, 其中发生的 MCC 和 PECS 数量比 M β CCS 和 M β ECS

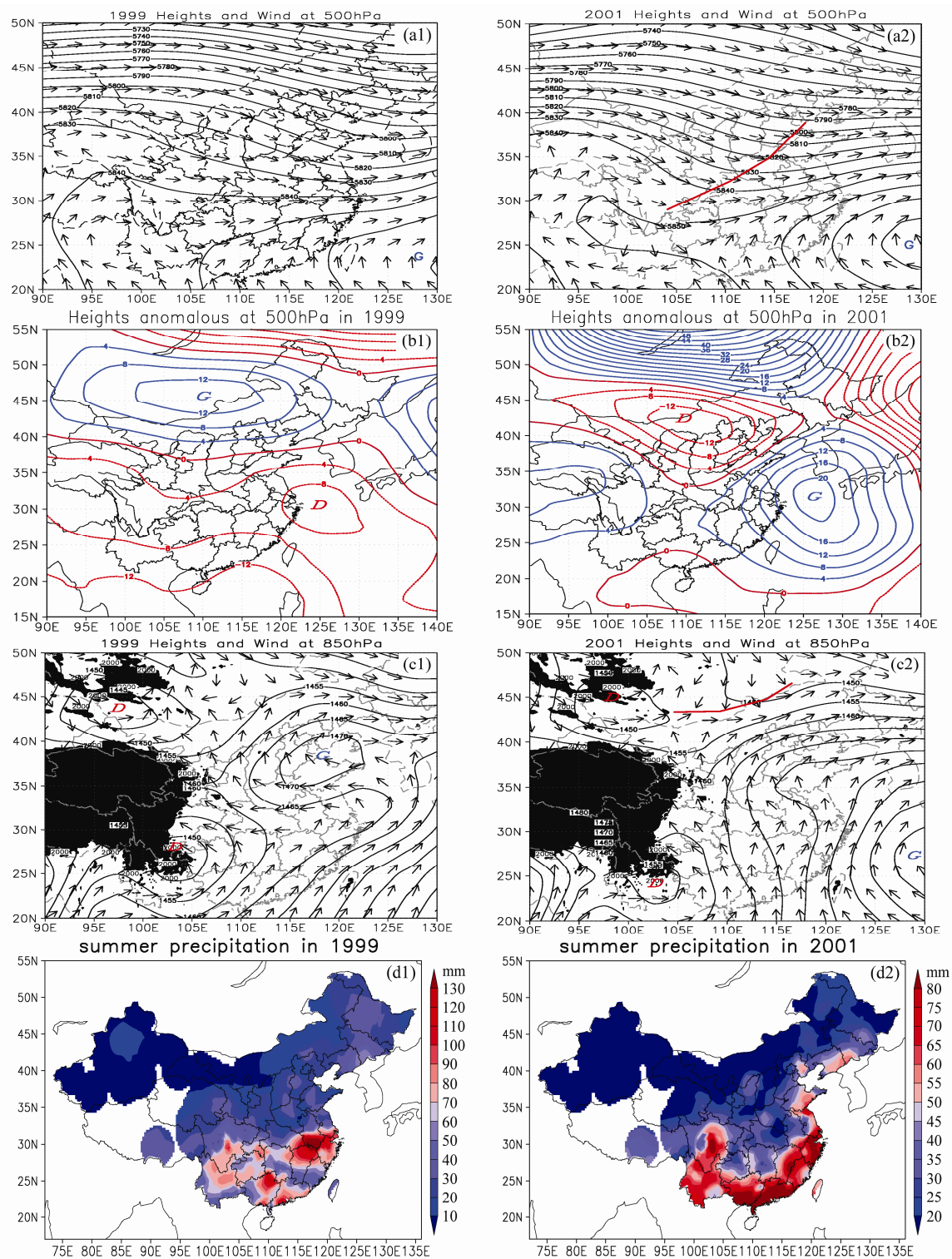


图4 1999年夏季平均 (a1) 500 hPa、(c1) 850 hPa (阴影区为海拔2000 m 以上的地形) 高度场和风场、(b1) 500 hPa 位势高度相对于多年 (1948~2009年) 平均的距平场 (gpm)、(d1) 1999年夏季降水量; (a2)–(d2) 同 (a1)–(d1), 但为2001年。红色粗线为槽线和切变线

Fig. 4 Summer mean (a1) 500-hPa and (c1) 850-hPa (the shaded areas indicate the topography above 2000 m) geopotential height and wind fields in 1999, (b1) difference of 1999 summer mean 500-hPa geopotential height from the climatological mean (1948–2009) (gpm), (d1) summer precipitation in 1999; (a2)–(d2) same as (a1)–(d1) but for 2001. The red thick lines indicate the position of trough and shear line

多, 是影响当地夏季降水的主要 MCS; PECS 的平均成熟面积大于 MCC, 生命史也比 MCC 的长; MCC 和 PECS 成熟时的平均面积和平均偏心率分别为 0.85 和 0.55, 比发生在美国和我国南方 MCC 和 PECS 的偏大。与 MCC 比较, 总体上 PECS 发展更旺盛, 平均最低 Tbb 更低, 冷云罩面积的扩展速度更慢, 但是平均生命史较短, 表现出成熟更快、消亡更慢的特征。

(2) 7 月份是 MCS 和 MCC 发生的高峰期, MCC 和 PECS 的最大面积均出现在 7 月, 这可能与 7 月份西太平洋副热带高压季节性北跳有关, 此时黄河下游地区位于副高西北侧边缘, 源源不断的水汽水汽输送, 有利于 MCS 发展成较大尺度的系统。6 月份, MCC 要比 PECS 发展得旺盛才能产生相同强度的地面降水, 但在 7~8 月份 PECS 要比 MCC 发展得更旺盛才能产生相同强度的地面降水。

(3) 黄河下游地区 MCC 的形成、成熟和消亡时间有明显的日循环特征, 表现为双峰结构, 并且 2 个峰值强度相当, 对应着 2 种不同时段发生的 MCC, 其中一种在下午形成, 傍晚成熟, 凌晨消亡, 另一种是在午夜后形成, 早上成熟, 上午甚至中午才消亡。不同于 MCC, PECS 呈现出单峰结构特征。

(4) MCS 具有明显的年际变化特征, 在 MCS 偏多和偏少的年份东亚大气环流表现出明显差异。在夏季黄河下游 MCS 偏多的年份, 西太平洋副热带高压脊位置偏北, 同时东亚中纬度低压槽也偏强, 此时黄河下游地区位于副高西北侧的西南气流中, 充沛的暖湿气流输送有利于 MCS 发生, 并导致山东降水也偏多。

致谢 感谢国家局气象中心郑永光博士提供的云图资料和卫星云图处理系统。

参考文献 (References)

- Augustine J A, Howard K W. 1988. Mesoscale convective complexes over the United States during 1985 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 685–701.
- Augustine J A, Howard K W. 1991. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 1575–1589.
- Anderson C J, Arritt R W. 1998. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (3): 578–599.
- Cotton W R, Lin M S, McAnelly R L, et al. 1989. A composite model of mesoscale convective complexes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (4): 765–783.
- 段旭, 张秀年, 许美玲. 2004. 云南及其周边地区中尺度对流系统时空分布特征 [J]. *气象学报*, 62 (2): 243–250.
- Duan Xu, Zhang Xiunian, Xu Meiling. 2004. Spatial and temporal distributions of mesoscale convective systems in Yunnan and its periphery areas [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (2): 243–250.
- 方宗义, 覃丹宇. 2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 583–593.
- Fang Zongyi, Qin Danyu. 2006. A review of satellite observed heavy rainfall cloud clusters [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 17 (5): 583–593.
- He H Z, Zhang F Q. 2010. Diurnal variations of warm-season precipitation over Northern China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 1017–1025.
- 江吉喜, 项续康, 范梅珠. 1996. 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*, 7 (4): 473–478.
- Jiang Jixi, Xiang Xukang, Fan Meizhu. 1996. The spatial and temporal distributions of severe mesoscale convective systems over Tibetan in summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 7 (4): 473–478.
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (10): 2428–2449.
- Laing A G, Fritsch J M. 1993a. Mesoscale convective complexes in Africa [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (8): 2254–2263.
- Laing A G, Fritsch J M. 1993b. Mesoscale convective complexes over the Indian monsoon region [J]. *J. Climate*, 6 (5): 911–919.
- 李玉兰, 王婧娟, 郑新江, 等. 1989. 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*, 13 (4): 417–422.
- Li Yulan, Wang Jingrong, Zheng Xinjiang, et al. 1989. The study of the mesoscale convective complex (MCC) over the south-west and south of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 13 (4): 417–422.
- 卢乃锰, 吴蓉璋. 1997. 强对流降水云团的云图特征分析 [J]. *应用气象学报*, 8 (3): 269–275.
- Lu Naimeng, Wu Rongzhang. 1997. Strong convective cloud characteristics derived from satellite cloud picture [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 8 (3): 269–275.
- 马禹, 王旭, 陶祖钰. 1997. 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*, 7 (6): 701–706.
- Ma Yu, Wang Xu, Tao Zuyu. 1997. Geographic distribution and life cycle of mesoscale convective system in China and its vicinity [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 7 (6): 701–706.
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61: 1374–1387.
- McAnelly R L, Cotton W R. 1989. The precipitation life cycle of mesoscale convective complexes over the central United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 784–808.
- Miller D, Fritsch J M. 1993. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 2978–2992.
- Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56: 527–530.
- 祈秀香, 郑永光. 2009. 2007 年夏季我国深对流活动时空分布特征 [J]. *应用气象学报*, 20 (3): 286–290.
- Qi Xiuxiang, Zheng Yongguang. 2009. Distribution and spatiotemporal variations of deep convection over China and its vicinity during the summer of 2007 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (3): 286–290.

- Rodgers D M, Howard K W, Johnston E C. 1983. Mesoscale convective complexes over the United States during 1982 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 2363–2369.
- Schumacher R S, Johnson R H. 2006. Characteristics of U. S. extreme rain events during 1999–2003 [J]. *Wea. Forecasting*, 21: 69–85.
- 陶祖钰, 王洪庆, 王旭, 等. 1998. 1995 年中国的中- α 尺度对流系统 [J]. *气象学报*, 56 (2): 166–177. Tao Zuyu, Wang Hongqing, Wang Yu, et al. 1998. A survey of meso- α -scale convective system over China during 1995 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (2): 166–177.
- 项续康, 江吉喜. 1995. 我国南方地区的中尺度对流复合体 [J]. *应用气象学报*, 6 (2): 9–17. Xiang Xukang, Jiang Jixi. 1995. Mesoscale convective complexes over the South China mainland [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 6 (2): 9–17.
- Yu R C, Li J, Chen H M. 2009. Diurnal variation of surface wind over central eastern China [J]. *Climate Dyn.*, 33: 1089–1097.
- 赵平, 孙淑清. 1990. 非均匀大气层结中大气惯性重力波的发展 [J]. *气象学报*, 48 (4): 397–403. Zhao Ping, Sun Shuqing. 1992. Development of internal inertial gravity waves in the atmosphere with heterogeneous stratification [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 48 (4): 387–403.
- 郑永光, 朱佩君, 陈敏, 等. 2004. 1993–1996 黄海及周边地区 MaCS 的普查分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 40 (1): 66–72. Zheng Yongguang, Zhu Peijun, Chen Min, et al. 2004. Meso- α -scale convective systems over Yellow Sea region during summers of 1993–1996 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 40 (1): 66–72.
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征 [J]. *科学通报*, 53 (4): 471–481. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Zhu Peijun. 2008. The characteristic of distribution and spatiotemporal variations of deep convection over China and its vicinity during summer [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 53 (4): 471–481.
- 朱官忠, 刘恭淑. 1998. 华北南部产生中尺度对流复合体的环境条件分析 [J]. *应用气象学报*, 9 (4): 441–448. Zhu Guanzhong, Liu Gongshu. 1998. Analysis of the environmental conditions for forming mesoscale convective complexes in southern North China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9 (4): 441–448.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2003. *天气学原理和方法* [M]. 北京: 气象出版社, 474–484. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2003. *Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 474–484.
- 卓鸿, 姚秀萍, 郑永光, 等. 2004. 黄河下游春季一次 MaCS 暴雨过程的综合分析 [J]. *气象学报*, 62 (4): 504–511. Zhuo Hong, Yao Xiuping, Zheng Yongguang, et al. 2004. The synthetical analysis of a spring MaCS heavy rain in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 504–511.
- 卓鸿, 赵平, 任健, 等. 2011. 2007 年济南“7. 18”大暴雨的持续拉长状对流系统研究 [J]. *气象学报*, 69 (2): 263–276. Zhuo Hong, Zhao Ping, Ren Jian, et al. 2011. A study of the permanently elongated convective system during the heavy torrential rain event over Jinan on 18 July 2007 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (2): 263–276.