

窦慧敏,丁治英,郭春燕,等.2013—2017年夏季东北冷涡下东北地区 MCS 的统计特征.气象科学,2020,40(3):341-353.

DOU Huimin, DING Zhiying, GUO Chunyan, et al. Statistical characteristics of MCS in Northeast China under northeast cold vortex in summer from 2013 to 2017. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(3): 341-353.

2013—2017 年夏季东北冷涡下东北地区 MCS 的统计特征

窦慧敏^{1,2} 丁治英^{1,3} 郭春燕⁴ 沈新勇¹ 李小凡⁵

(1 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044; 2 温州市气象局,浙江 温州 325000; 3 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; 4 内蒙古气象服务中心,呼和浩特 010051; 5 浙江大学 地球科学学院,杭州 310027)

摘要 利用 2013—2017 年 6—8 月 FY-2E 和 FY-2G 地球静止卫星相当黑体温度(Black Body Temperature, TBB)资料、NCEP/NCAR 再分析资料,对我国夏季东北冷涡下东北地区 MCS 的分布和活动特征进行了统计分析,结果表明:(1) MCS 的活动具有明显的月际变化和日变化特征,6 月对流活动最活跃。MCS 的主要移向是东、东北和东南,平均移动距离 3.99 个经纬距。(2) MCS 成熟时刻的面积、偏心率和生命史均小于江淮地区以及中国中东部,云顶高度低于江淮地区,整个生命史表现出发展快消亡慢的特征,与江淮地区相反。(3) 基于 MCS 的定义得到的 Z 标准,对 2016—2017 年的 MCS 作了统计分析并与 J 标准统计得到的 MCS 进行对比,得出,两种定义下的 MCS 环境场特征基本一致,主要表现为 MCS 多生成于 500 hPa 槽前和槽后,对流层高层 MCS 位于双急流之间靠近北支急流的辐散区,南侧急流高度在 200 hPa,北侧的急流高度在 250 hPa。低层,位于低空急流左侧,低涡南侧、东南侧,有较强的水汽和动量输送。槽前生成的 MCS 南侧中层存在垂直反环流向 MCS 输送干暖空气与位涡,槽后生成的 MCS 两侧均有大值位涡向其输送,同时北侧冷干空气的输送使锋区及上升运动加强,更有利于 MCS 的形成。(4) 两种标准下的 MCS 造成的降水明显不同,在统计强降水方面 Z 标准要优于 J 标准。由于 Z 标准空间与时间尺度较小,统计得到的 MCS 较多;但同时会遗漏部分相对弱的 MCS。

关键词 中尺度对流系统; 统计特征; 动态合成分析; 双急流; 东北地区

分类号: P445

doi: 10.3969/2019jms.0032

文献标识码: A

Statistical characteristics of MCS in Northeast China under northeast cold vortex in summer from 2013 to 2017

DOU Huimin^{1,2} DING Zhiying^{1,3} GUO Chunyan⁴ SHEN Xinyong¹ LI Xiaofan⁵

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Wenzhou Meteorological Bureau, Zhejiang Wenzhou 325000, China; 3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4 Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051, China; 5 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Based on the black body temperature data of FY-2E and FY-2G geostationary satellites,

收稿日期(Received): 2018-07-23; 修改稿日期(Revised): 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530427; 41790471; 41475039); 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室研发计划项目(2015LASW-A07); 国家重点研发计划项目(2016YFC0203301); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB453201)

通信作者(Corresponding author): 丁治英(DING Zhiying). dingzhiying@nuist.edu.cn

the NCEP/NCAR analysis data in summer (from June to August) from 2013 to 2017, and the Jirak's definition on Mesoscale Convective System (MCS), the statistical characteristics of the distribution and activity characteristics of MCS in Northeast China under northeast cold vortex were analyzed. The results are summarized as follows: (1) the distribution of MCS shows obvious monthly variation and diurnal variation, and it is the most active in June. Eastward, northeastward and southeastward are the three main moving directions for MCSs, with an average moving distance of 3.99 longitude and latitudes. (2) The area of MCS maturing time, the eccentricity and life history of MCS in Northeast China are smaller than those in the Yangtze-Huaihe River Basin and the central and East China, and the height of cloud top is lower than that of the Yangtze-Huaihe River Basin. The characteristic of rapid development and slow extinction is opposite to the Yangtze-Huaihe River Basin. (3) The statistical analysis of MCS from 2016 to 2017, selected by reference to Z. standard according to ZHENG's definition of MCS is made and compared with the results obtained by J standard based on the Jirak's definition. It is concluded that the environmental field characteristics of MCS under the two definitions are basically the same. Specifically, most MCSs are generated in front or rear of 500 hPa trough. The upper troposphere MCS is located in the divergence area between the two jet streams, also near the north branch jet. The height of the southern jet stream is 200 hPa, and the northern jet stream height is 250 hPa. At the lower layer, MCS is located on the left side of the low level jet stream and the south and southeast side of the vortex, with strong water vapor and momentum being transported. MCS generated in front of trough is accompanied with dry warm air and potential vorticity being transported from the vertical reverse loop flow at the middle layer in south of the MCS. MCS generated in rear of trough has large potential vorticity in both sides being transported to it. At the same time, the cold and dry air on the north side of the MCS strengthen the frontal area and the upward movement, which is more favorable to the formation of MCS. (4) There are obvious differences in precipitation between MCSs under the two standards. Specifically, Z standard is better than J standard in terms of statistical work of heavy precipitation. More MCSs are obtained due to the smaller space and time scale of Z standard, but some relatively weak MCSs may be omitted.

Key words mesoscale convective system; statistical characteristics; dynamic synthesis analysis; double upper jet; Northeast China

引 言

东北冷涡是一种深厚的高空冷性涡旋,它是大尺度环流形势与东北地区特定的地理环境相互作用的产物,可使控制地区的气层不稳定,产生强烈的对流性天气^[1]。白人海等^[2]研究指出,冷涡系统能够为较强的中尺度天气系统提供有利的天气背景和物理条件,促成其发生。陶诗言等^[3]指出东北低压或冷涡是我国暴雨的特点之一,常常造成东北地区、华北北部暴雨或雷阵雨。由此可见,东北冷涡造成的强对流天气破坏力大,影响广泛。而强对流天气多由中尺度对流系统(Mesoscale Convective system, MCS) 产生。经过分析发现有很大比例的强对流天气是由冷涡影响产生,即我国东北地区的 MCS 的产生易受到东北冷涡影响。且我国影响 MCS 发生发展的大尺度天气系统主要包括东北冷

涡、梅雨锋、江淮切变线等,不同纬度不同地区的主要控制天气系统不同,东北地区 MCS 发生的频率、强度与较低纬度 MCS 不同。

国内外对 MCS 的分类目前主要有两种标准。Maddox^[4]最早用低于-32℃和-52℃的相当黑体温度(Black Body Temperature, TBB) 的冷云盖面积和持续时间来定义中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex, MCC) 。开启了第一种识别标准的研究之后,一些研究学者对 Maddox 标准进行了修订^[5-7]。Jirak, et al^[8]在前人的研究基础上将 MCS 的时间尺度和空间尺度特征进行综合考虑,并将偏心率的不同大小作为划分不同形状的指标,对较小尺度的 MCS 进行分类,分为 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, MCS 总体被分为四类,中 α 尺度的 MCC,

PECS 和中 β 尺度的 M β CCS 和 M β ECS。利用该标准针对我国的 MCS 有大量的分析^[9-13]。随着观测手段的改进,雷达资料更好地被应用到 MCS 的研究中。Geerts^[14] 在研究美国南部的对流系统时将 MCS 明确定义为连续降水区(反射率超过 20 dBZ),长轴至少 100 km,必须存在至少 4 h,并且系统至少连续 2 h 雷达回波反射率必须超过 40 dBZ。Parker, et al^[15] 在此基础上对线性 MCS 进行了分类,按照对流线和层状云降水的相对位置将其分为后向型(TS)、前向型(LS)和并列型(PS)三类。ZHENG, et al^[16] 对 MCS 的识别标准则是 30 dBZ 的雷达回波范围覆盖在 30 km $\times$ 30 km 以上,回波强度最大超过 45 dBZ 并且至少持续 1 h,也就是选择的都是雷达回波较强且持久的对流系统。这就是第二种 MCS 的识别标准,基于最大雷达反射率因子($\max$ dBZ)达到一定强度的范围以及持续时间。然后按照中国东部 MCS 组织形式把 MCS 分为非线性对流系统和线性对流系统,而线性对流系统又具体分为无层状降水的对流线(NS)、尾随层状降水 MCS(TS)、前导层状降水 MCS(LS)和平行层状降水 MCS(PS)、弓形回波 MCS(BE)以及镶嵌线状 MCS(EL)六类,并给出了不同类型 MCS 的环境特征和可能的对流天气。这两种关于 MCS 的标准有哪些优缺点适合于做怎样的研究也是本文关注的问题。

我国对 MCS 的研究多集中在江淮、华南、青藏高原东部等中低纬度地区,针对东北地区^[17],特别是东北冷涡下形成的影响东北地区的 MCS 的大尺度环境场分析很少。因此本文利用 Jirak, et al^[8] 的标准(简称 J 标准,下同)对 2013—2017 年夏季东北冷涡下东北地区 MCS 的时空分布特征以及大尺度环境特征进行统计及合成分析,研究东北地区 MCS 不同于其他地区的统计特征并探究东北冷涡下东北地区 MCS 独特的环流特征和成因,以期对东北地区 MCS 的形成发展有进一步的认识。并利用 ZHENG, et al^[16] 的标准(简称 Z 标准,下同)对发生在 2016—2017 年的 MCS 进行统计,与 J 标准进行对比,分析两者的异同。

1 资料和方法

使用国家卫星气象中心提供的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 2013—2017 年 6—8 月 FY-2E 和 FY-2G 卫星的逐小时 TBB 资料来识别 MCS。6 h 一次 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR 分析资料用于识别冷涡以及分析大尺度环境场。中国自动站与 CMORPH 降

水产品融合的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的逐时降水量资料来判断 MCS 的降水情况,中国气象数据网的 2016—2017 年夏季的全国雷达拼图查看 MCS 的最大雷达组合反射率。

东北地区包括内蒙的呼伦贝尔、通辽、赤峰、兴安盟和锡林郭勒盟以及河北的承德、秦皇岛,本文将范围具体限定在 ($39^\circ \sim 56^\circ \text{N}$, $115^\circ \sim 135^\circ \text{E}$) 内。同时参考孙力等^[18] 将东北冷涡定义为:在 500 hPa 天气图上范围在 ($35^\circ \sim 60^\circ \text{N}$, $115^\circ \sim 145^\circ \text{E}$) 内至少能分析出一条闭合等高线(间隔 40 dagpm)、出现过两根及以上闭合等高线并有冷中心或明显冷槽配合,维持时间一般为 3~5 d 的低压环流系统。

在 J 标准的基础上,基于指出中国大陆 MCC 的偏心率比美国大陆 MCC 系统的 0.7 小的情况^[19-20],对偏心率做适当的修改,即满足表 1 所示的标准,统计得到的 MCS(简称 J-MCS)。同时定义在东北冷涡下,低于 -52°C 的 TBB 线包围的对流云团的中心经过东北地区即为一次东北冷涡下东北地区的 MCS 过程。并利用 MeteoInfo 软件识别 -52°C 云区,计算冷云盖面积。偏心率则利用最小二乘法^[21] 拟合面积最大时刻的 MCS 轮廓的椭圆方程,用所得的长短轴比值来确定。

表 1 MCS 的分类标准(S : TBB $\leq -52^\circ \text{C}$ 的连续冷云罩面积;
 T : 满足尺度标准的时间; e : 最大尺度时的偏心率)

Table 1 Classification criterion of MCS (S : Cloud shield with continuously low IR temperature $\leq -52^\circ \text{C}$; T : Time met for size definition; e : Eccentricity at time of maximum extent)

MCS 类型	尺度标准/ km^2	持续时间/h	形状
MCC	$S \geq 5 \times 10^4$	$T \geq 6$	$e_{\max} \geq 0.6$
PECS	$S \geq 5 \times 10^4$	$T \geq 6$	$0.2 \leq e_{\max} \leq 0.6$
M β CCS	$S \geq 3 \times 10^4$	$T \geq 3$	$e_{\max} \geq 0.6$
M β ECS	$S \geq 3 \times 10^4$	$T \geq 3$	$0.2 \leq e_{\max} \leq 0.6$

2 MCS 的基本特征

2013—2017 年夏季东北冷涡下东北地区发生 MCS 共 77 例, MCC 9 例, PECS 16 例, M β CCS 27 例, M β ECS 25 例,可见 β 尺度的 MCS 更多。从表 2 中 MCS 成熟时刻(TBB $\leq -52^\circ \text{C}$ 的连续冷云罩面积最大时刻)平均面积和 MCS 成熟时刻最低 TBB 来看,持续拉长状对流系统的面积更大, TBB 更低,也就是说持续拉长状对流系统的强度比中尺度对流复合体更强,可能是因为持续拉长状对流系统很多是由一些对流云团组合而成,所以面积更大,强度更

强。通过比较生成到成熟和成熟到消亡两个阶段所用时间(表2)可看出夏季东北地区除 PECS 外,其他 MCS 均表现出发展快消亡慢的特征。PECS 可

能由于后方新云团的并入导致成熟时间延迟,最终生成—成熟的时间大于成熟—消亡的时间。

表2 2013—2017年夏季(6—8月)东北地区各类 MCS 特征参数

Table 2 Characteristics of mean area, eccentricity and life history for mature MCS cases over Northeast China in summer from 2013 to 2017

MCS 类型	成熟面积/ 10^4 km^2	偏心率	TBB/ $^{\circ}\text{C}$	生命史/h	生成—成熟时间/h	成熟—消亡时间/h
MCC	10.74	0.77	-64	7	3.22	3.77
PECS	15.44	0.43	-66.88	9.75	5.31	4.5
M β CCS	5.95	0.75	-62.7	5	1.93	3.07
M β ECS	6.13	0.44	-63	4.36	1.92	2.48

2.1 MCS 的时间特征

2013—2017 年共出现冷涡过程 59 次,其中 6 月最多,共 25 次,MCS 共 77 例,发生在 6 月的有 50 例,从各类型 MCS 发生次数月分布情况(表3)可以看出 6 月生成的 MCS 最多,8 月最少。说明冷涡过程对 MCS 的产生有一定的影响。冷涡发展旺盛,会引导槽后冷空气南下与低层偏南气流构成层结不稳定,可促进 MCS 发生。

表3 2013—2017 年夏季(6—8月)东北地区 MCS 和冷涡发生频数的月分布

Table 3 Monthly distribution of MCS cases and cold vortex over Northeast China in summer from 2013 to 2017

月份	MCC	PECS	M β CCS	M β ECS	冷涡过程
6	5	11	18	16	25
7	3	4	6	8	18
8	1	1	3	1	16

从夏季东北地区 MCS 在不同发展阶段的日变化特征(图1)可知,MCS 生成时间、成熟时间和消亡时间呈现明显的波动特征。从图中可以看出,13 时(北京时,下同)为 MCS 生成时间的一个次高峰,16、17 时达到顶峰,然后逐渐减少,即 MCS 在午后开始生成,然后逐渐增多,傍晚时最多,上午生成的很少。成熟时间的变化与生成时间类似,有一定的滞后,18 时成熟的 MCS 最多,21 时次之,后逐渐减少。消亡时间则不同,MCS 主要在上午消亡,00—02 时为次高峰,09 时达到顶峰,午后较少。因此可得出东北地区 MCS 生命史主要是两种类型:午后形成,傍晚成熟,凌晨消亡和傍晚形成,夜间成熟,上午消亡。

2.2 MCS 空间分布特征

对 MCS 的 500 hPa 环境场进行分类可看出东

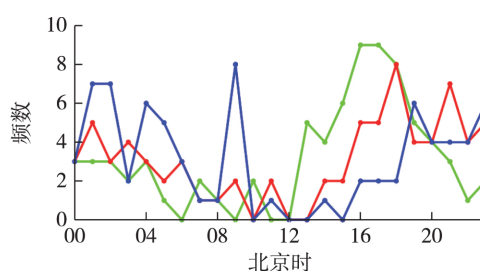


图1 2013—2017 年夏季(6—8月)东北地区 MCS 日变化特征(绿色实线表示生成时间;红色实线表示成熟时间;蓝色实线表示消亡时间)

Fig.1 Characteristics of MCS diurnal variation over Northeast China in summer from 2013 to 2017 (green solid line represents generation time; red solid line represents mature time; blue solid line represents extinction time)

北地区 MCS 相对于东北冷涡的位置分布(表4),可知 MCS 主要位于冷涡南部槽前或者槽后。而从地理位置(图2)来看,MCS 主要生成在大兴安岭背风侧包括小兴安岭、三江平原和松嫩平原在内的黑龙江大部分地区以及河北承德附近,850 hPa 涡旋曲率最大的区域。将 MCS 生成、成熟和消亡的重心位置分别标注在图中,可看出 MCS 成熟时刻的所在的区域与生成区域基本一致,在成熟到消亡阶段,MCS 逐渐集中分布于大兴安岭东侧的广阔平原区,原来黑龙江最北部的 MCS 逐渐移出中国。重心坐标的计算公式采用过仲阳等^[2]研究中提出的方法,具体公式如下:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

其中: n 代表 MCS 轮廓范围内 $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$ 的格点数; x_i, y_i, t_i 分别表示第 i 个格点的经度、纬度和 TBB。

用 MCS 生成时刻的重心和消亡时刻的重心构成的矢量方向表示 MCS 的移向,分为 8 个方向(图

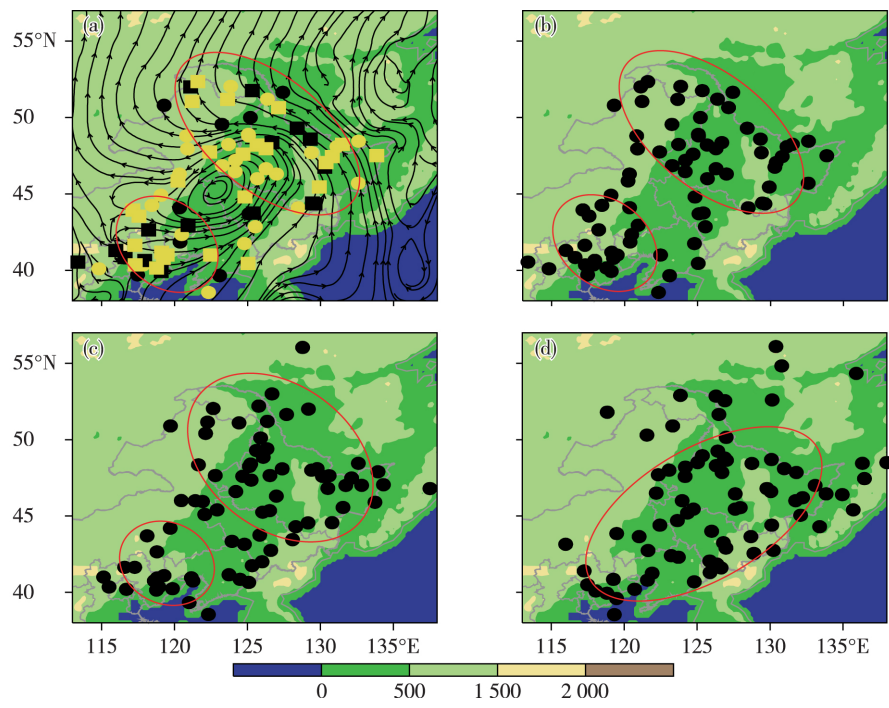


图 2 2013—2017 年夏季(6—8 月)各类型 MCS 生成地区分布(●、●、■和■分别表示 MCC、MβCC、PECS、MβECS 生成时刻的重心位置)和 850 hPa 平均风场(箭头)(a)以及 MCS 生成(b)、成熟(c)、消亡(d)时期的地理分布(●MCS 重心位置)和东北地区的地形高度(阴影,单位: m)

Fig.2 Geographical distribution of generation for MCS cases and the average wind field at 850 hPa (a) (●, ●, ■ and ■ are gravity center position of MCC, MβCCS, PECS and MβECS) and distribution of different stages for MCS cases(●are gravity center position of MCS) and topographic height (the shaded, unit: m) over Northeast China in summer from 2013 to 2017

表 4 2013—2017 年夏季(6—8 月)东北地区 MCS 500 hPa 环境场分型
Table 4 Classification of MCS cases at 500 hPa environment field over Northeast China in summer from 2013 to 2017

类型	与冷涡的相对位置	风向	数目
槽前型	冷涡东南侧、南侧	西南风或偏西风	47
槽后型	冷涡西南侧、南侧	西北风或偏西风	15
冷涡型	冷涡东侧、北侧	南风、东风	4
横槽槽前型	冷涡南侧	西风	2
横槽槽后型	冷涡西侧	北风	3
平直型	冷涡南侧	西风	2
其他	冷涡南侧	西南风或西北风	4

略)。由于东北地区 MCS 处于西风带天气系统的控制之下,再加上多数位于东北冷涡南部的槽前、槽后气流中,所以向正东、东北及东南方向移动的 MCS 达到 84%。用 MCS 生成、成熟时刻重心连成的直线距离表示 MCS 在生成—成熟阶段的移动距离,MCS 成熟、消亡时刻重心连成的直线距离表示 MCS 成熟—消亡阶段的移动距离。东北地区 MCS 不同阶段的移动距离(表 5)表明,除 PECS 外,其他类型 MCS 生成—成熟阶段的移动距离均小于成熟—消亡阶段的移动距离,也就是说 MCS 发展过程

中重心位置基本不变,与前面的结论一致。PECS 可能是由于成熟时间的延迟导致生成—成熟阶段的移动距离增大。

表 5 2013—2017 年夏季(6—8 月)东北地区 MCS 在不同阶段的移动距离(单位:经纬距)
Table 5 Moving distance of MCS cases during different stages over Northeast China in summer from 2013 to 2017

移距	MCC	PECS	MβCCS	MβECS
生成—成熟	1.98	2.81	1.18	1.63
成熟—消亡	2.77	2.67	2.00	2.01
总移距	4.75	5.48	3.18	3.64

3 东北地区 MCS 与其他地区 MCS 的比较

东北地区纬度较高,与低纬度地区相比,中尺度对流系统发生的频率小、强度弱。通过与前人研究成果^[12,23]的对比,可以发现东北冷涡影响下东北地区 MCS 的不同(表 6)。东北地区 MCS 成熟时平均面积 $8.55 \times 10^4 \text{ km}^2$,小于中东部、江淮区域 MCS 的平均面积。东北地区 MCS 的偏心率和生命史与中东部地区接近,比江淮区域要小。东北地区表现出发展快消亡慢的特征,和中东部地区的 MCS 一

致,而与江淮地区完全相反。其他地区统计 MCS 频次得出 7 月生成的 MCS 最多,而东北冷涡下东北地区的 MCS 则表现出 6 月最多的特点,可能与 6 月冷涡活动旺盛有关(表 3)。夏季东北地区 MCS 成熟时最低 TBB 平均为 -64°C ,高于江淮地区成熟时最低 TBB 近 10°C ,也表明中高纬 MCS 的强度确实弱

于低纬度地区。由于对比的区域均处于西风带控制之下,MCS 的移向基本一致,主要是向东。就移动距离而言,东北地区 MCS 比江淮地区移动距离更大,可能是由于较高纬度地区的 500 hPa 平均风速比较低纬度地区更大,受引导气流的影响移动距离较大。

表 6 2013—2017 年夏季(6—8 月)东北地区 MCS 与其他地区特征对比

Table 6 Comparison of MCS characteristics between Northeast China and other regions in summer of 2013—2017

地区	范围	成熟面积/ (10^4km^2)	偏心率	生命史/h	生成—成熟/ h	成熟—消亡/ h	发展最旺盛/ 月份	最低 TBB/ $^{\circ}\text{C}$	移向	移距/ 经纬距
江淮地区	$24^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$	12.3	0.65	7.8			7	-76	东 东北 东南	3.2
中国中东部	$27^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$	9.5	0.54	6.6			7	东偏南		
东北地区	$39^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$	8.5	0.58	6	2.78	3.26	6	-64	东 东北 东南	3.99

注 “空白”表示文献中没有列出数据。

4 两种标准下的 MCS 的比较

Maddox^[4]最早利用红外卫星云图,根据生命史、形状和云顶亮温等参数,定义了中尺度对流复合体(MCC)。之后国内外基于 Maddox 标准,对 MCS 的识别及分类标准做了许多不同程度修改,如减小冷云盖面积,或者减小冷云盖最低温度值等。由于观测手段的改进,雷达资料更多地被应用于研究 MCS,出现了根据 MCS 雷达回波组织形态对 MCS 的分类方法。了解两种标准的优缺点对于 MCS 的研究有重要的意义。因此,参考 Z 标准把满足最大雷达反射率因子(max dBZ)达到或超过 45 dBZ 且持续 1 h 或者 30 dBZ 的范围达到 $30\text{ km}\times 30\text{ km}$ 且持续 3 h 以上的 MCS 定义为 Z 标准下的 MCS(简称 Z-MCS)。由于资料所限,仅针对 2016 和 2017 两年的 MCS,比较两种标准下 MCS 的异同。

4.1 J-MCS 的环境场特征

2016—2017 年 J-MCS 共 35 例,Z-MCS 共 46 例(Z-MCS 的个例较 J-MCS 多的原因是由于两者的定义不同,Z-MCS 包含了更多的空间与时间尺度较小的 MCS,但漏掉了 12 个云顶高度较高,面积较大,雷达回波强度较弱的 MCS),按照 MCS 在 500 hPa 环流场中与东北冷涡的相对位置和风向将 MCS 的环流型分为五类(表 7),其中槽前型、槽后型占总数的比例最大,下面主要分析这两类环境下 MCS 的特征。

表 7 2016—2017 年夏季(6—8 月)东北地区两种标准下

MCS 500 hPa 环境场分型

Table 7 Classification for MCS cases of two criterion at 500 hPa environment field over Northeast China in summer from 2016 to 2017

类型	与冷涡的相对位置	风向	J-MCS	Z-MCS
槽前型	冷涡东南侧、南侧	西南风或偏西风	22	30
槽后型	冷涡西南侧、南侧	西北风或偏西风	9	11
冷涡型	冷涡东侧、北侧	南风、东风	1	3
横槽槽前型	冷涡南侧	西风	2	1
其他	冷涡南侧	西南风或西北风	1	1

4.1.1 槽前型 MCS 形成的环境场

J-MCS 槽前型共 22 例,主要位于东北冷涡南部槽前西南气流或者偏西气流中。以东北冷涡中心为合成中心得到槽前型 500 hPa 环流场(图 3),温度场落后于高度场,有正的相对涡度平流,有利于 MCS 的发展。

以 MCS 重心为中心合成的槽前型高、中、低空环流形势(图 4), $(0,0)$ 即为 MCS 合成重心。因夏季副热带天气系统活跃北上,东北冷涡南部通常受极锋急流和副热带急流的共同影响^[23]。对流层高层 250 hPa 的急流分为两支(合成后风速偏小,所以以 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 代表急流的强度),主要出现在高空槽附近,MCS 位于北支急流左前侧的辐散区(图 4a),高空辐散引起上下层质量调整,有利于上升运动的增强以及 MCS 的形成。500 hPa 有两支正涡度带,

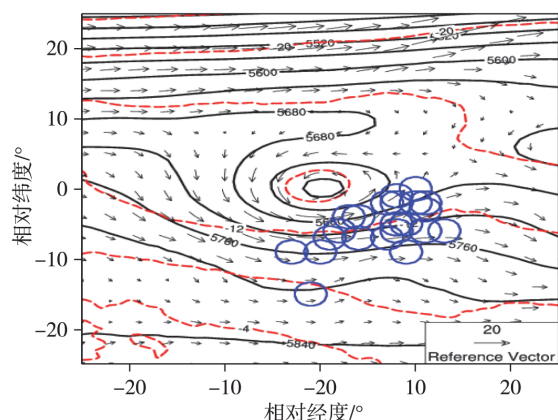


图3 J-MCS 槽前型 500 hPa 位势高度场(实线,单位: dagpm)、温度场(虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及 MCS 重心的位置(空心圆)(0,0)为东北冷涡合成中心,横纵坐标为相对冷涡中心的经纬度,向东向北为正(下同)

Fig.3 The 500 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and MCS's gravity center position of trough front type (hollow circle: are gravity center position of MCS; (0,0) represents synthesis center of Northeast cold vortex, the coordinate is the relative latitude and longitude for cold vortex, the east and the north is positive, similarly hereinafter)

MCS 位于槽前脊后(图 4b)正负涡度转换点上。850 hPa 出现了冷涡系统伴随的低空急流: MCS 位于低流的东南侧以及低空急流左侧(合成后风速偏小,所以以 $\geq 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 代表低空急流的强度)。该急流(图 4c)为 MCS 提供了水汽和动量。东北地区的 MCS 纬度较高,主要受东北冷涡的影响,副热带高压的影响较弱,因此沿东亚大陆边缘的偏南低空急流比较弱。高、低空急流的配置为降水提供了良好条件。整体来看,冷涡较深厚,从低层到高层冷涡的中心位置向西倾斜。

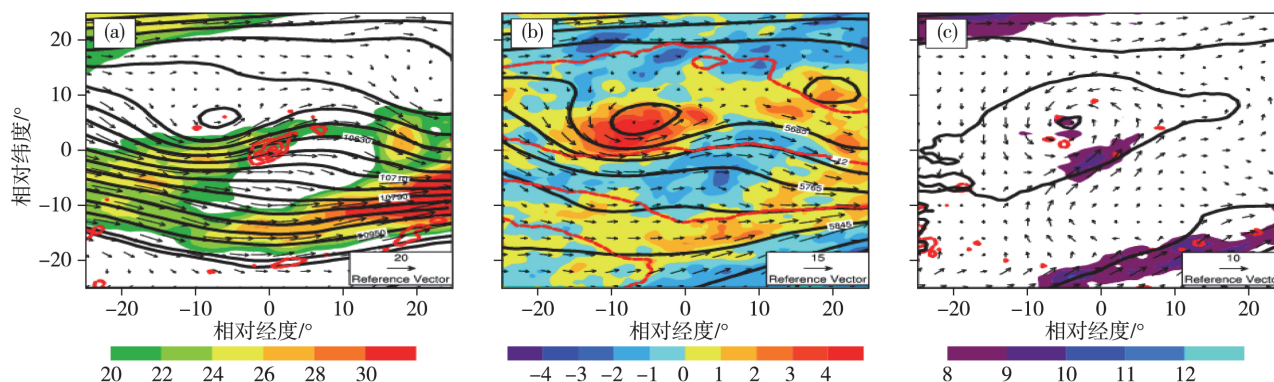


图4 (a) J-MCS 槽前型 250 hPa 位势高度(实线,单位: dagpm,下同)、风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,下同)、高空急流(阴影,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及辐散(虚线,单位: 10^{-5}s^{-1}); (b) 500 hPa 位势高度、风场、温度(虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)以及涡度(阴影,单位: 10^{-5}s^{-1}); (c) 850 hPa 位势高度、风场、低空急流(阴影,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及水汽通量辐合(虚线,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.4 (a) Trough front type of J-MCS: geopotential height (solid line, unit: dagpm, similarly hereinafter), wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, similarly hereinafter), upper jet (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence (dashed line, unit: 10^{-5}s^{-1}); (b) wind field, temperature (dashed line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and vorticity (shadow, unit: 10^{-5}s^{-1}) at 500 hPa; (c) wind field, low level jet (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and water vapor flux convergence (dashed line, unit: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa

沿 MCS 重心做假相当位温、全风速和散度的经向剖面(图 5)。假相当位温与全风速的剖面(图 5a)表明 200~300 hPa 有两个急流中心,与 MCS 南侧 15 纬距处和 MCS 重心处低层的两个锋区对应。南支急流中心位于 200 hPa, MCS 重心南侧 5~20 纬度处,中心风速达 $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,北支急流弱一些,中心位于 250 hPa, MCS 重心北侧 0~5 纬度处,中心风速达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。环流剖面中(图 5b) MCS 重心所在锋区与南部锋区之间存在一个垂直反环流,在 MCS 南侧 5~15 纬度之间下沉,0~5 纬度之间上升,与 MCS 重心南侧的 θ_{se} 低值区(图 5a)对应。垂直方向上 MCS 发生处低层辐合高层辐散,再加上槽前的位置有利于上升运动,所以 MCS 重心处中层有较大的垂直上升速度。

由前面分析, MCS 的产生位置与锋和急流密切相关,锋区附近位涡的变化与 MCS 的发展有关,因此沿 MCS 重心做位涡、湿位涡、相对湿度和锋生函数的经向剖面(图 6)。位涡在垂直方向的变化(图 6a)中, MCS 重心处上升气流将低层低位涡带到高层,300 hPa 以下位涡减小,300 hPa 左右垂直位涡梯度增大。从位温的下降趋势可看到 MCS 南侧 10~20 纬度处高层的副热带锋区以及 MCS 重心附近低层的极锋锋区,伴随沿锋区向下延伸的两个位涡大值区与下沉气流相伴(图 5),显示出对流层高层位涡向低层的渗透。图 5b 中的反环流有利于将南部高层的大值位涡带到低层并向北输送。湿位涡(图 6b)与位涡(图 6a)的情况类似,但 600 hPa 以下湿位涡为负值,即低层存在对流不稳定。相对湿度与等温线分析(图 6c), MCS 处的相对湿度较南北两

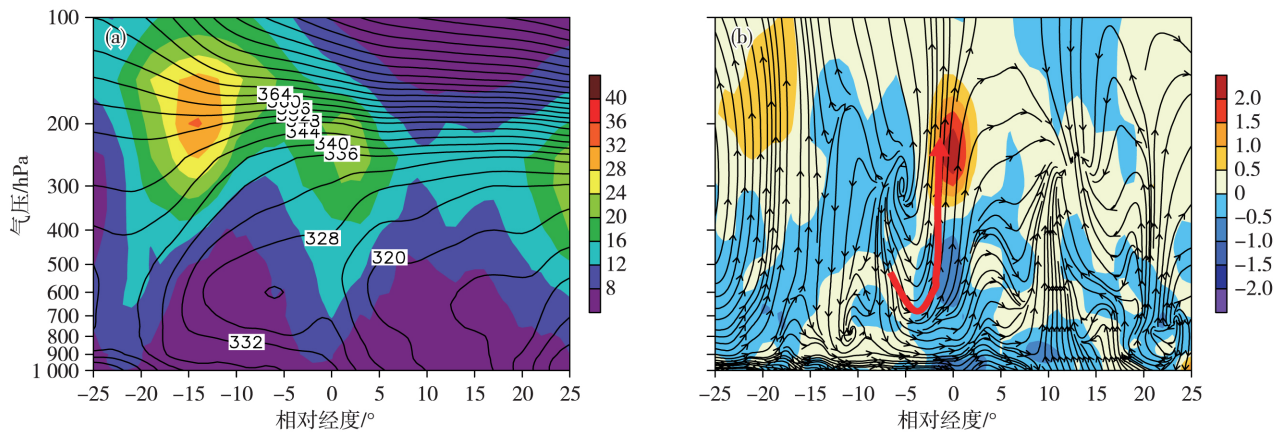


图5 J-MCS 槽前型沿 MCS 重心的假相当位温(实线,单位: K)和全风速(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的经向剖面(a); 散度(阴影,单位: 10^{-5}s^{-1})和 $v-w$ 流场的经向剖面(流线, v 的单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, w 的单位: $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 红色箭头表示垂直环流)(b) (横坐标为相对 MCS 重心纬度)

Fig.5 Trough front type of J-MCS: meridional cross section of pseudo-equivalent potential temperature (solid line, unit: K) and full wind speed (shadow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along the MCS gravity center (a); meridional cross section of divergence (shadow, unit: 10^{-5}s^{-1}) and $v-w$ flow field (streamline, v -unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ w -unit: $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, red arrow indicates vertical circulation) (b) (horizontal axis is latitude relative to MCS gravity center)

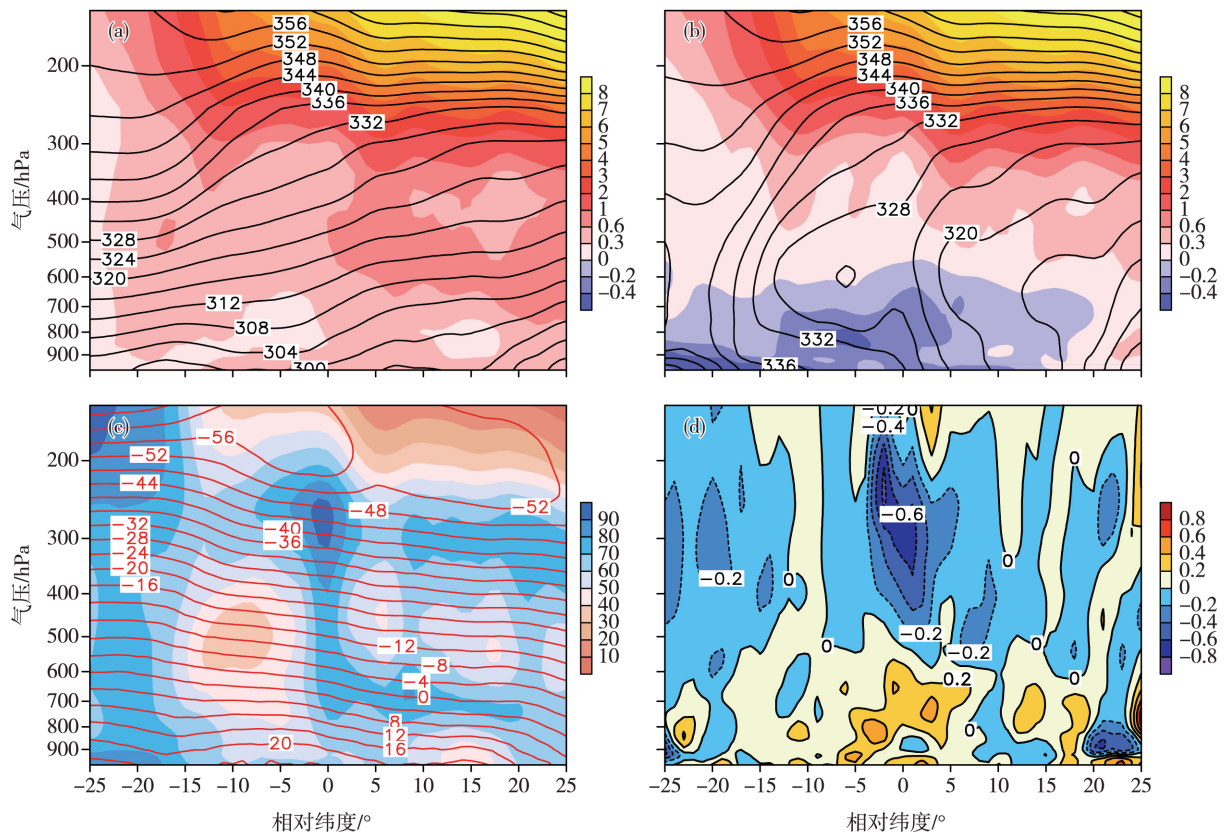


图6 J-MCS 槽前型沿 MCS 重心位涡(阴影,单位: PVU)、位温(实线,单位: K)(a); 湿位涡(阴影,单位: PVU)、假相当位温(实线,单位: K)(b); 相对湿度(阴影,单位: %)、温度(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)经向剖面(c); 锋生函数(阴影,单位: $\text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)(d)

Fig.6 Trough front type of J-MCS: meridional cross section of potential vorticity (shadow, unit: PVU), potential temperature (solid line, unit: K) along the MCS gravity center (a); wet potential vorticity (shadow, unit: PVU), pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K) (b); relative humidity (shadow, unit: %), temperature (solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$) (c); frontogenesis function (shadow, unit: $\text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (d)

侧大,达到 70% 以上,中层 MCS 南侧有明显的干空气团,配合该处的温度场,可看出对流层中层 MCS 南侧的空气团在温湿场的表现为暖干气流,而 MCS 南侧中层垂直反环流的存在正好向 MCS 输送干暖

空气与位涡,促进 MCS 的发展。MCS 重心处锋生函数(图 6d)为正值,计算结果表明是锋生函数中的散度项起主要作用,即高空双急流作用下的强辐散,引起空气质量调整,低层辐合,加上对流不稳定层

结,使得锋生,中低层的反环流将暖干平流带向锋区,有利于锋区加强,从而促进了 MCS 的产生。

4.1.2 槽后型 MCS 形成的环境场

槽后型共 9 例,位于冷涡下方槽后西北气流或者偏西气流中。以东北冷涡中心为合成中心得到的槽后型 500 hPa 环流场(图 7)。

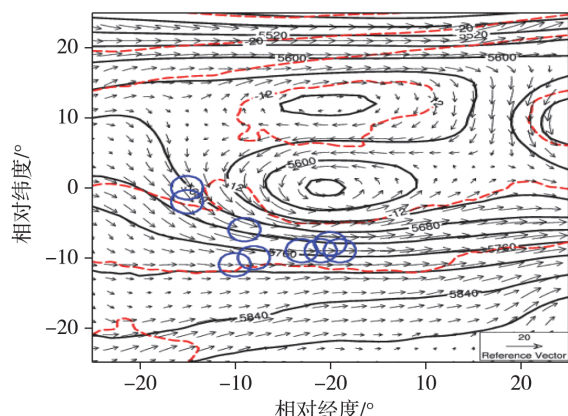


图 7 J-MCS 槽后型 500 hPa 环流场和 MCS 重心的位置, (0,0) 为冷涡合成中心(其他说明同图 3)

Fig.7 The 500 hPa circulation field and MCS's gravity center position of trough rear type of J-MCS; (0,0) represents synthesis center of Northeast cold vortex (Other descriptions are the same as Fig. 3)

图 8 是以 MCS 重心为合成中心得到的槽后型高、中、低空环流形势。250 hPa 双急流出现在高空槽附近,南侧急流较弱,MCS 位于两支急流之间、靠近北支急流右后侧的辐散区(图 8a)。500 hPa, MCS 位于槽后正负涡度转换点上(图 8b),且高度槽落后于温度槽。850 hPa, MCS 位于低空急流左侧(图 8c),急流比槽前型要强,水汽和动量沿低空急流由偏西向偏东方向输送,MCS 处于北部低涡和南部高压之间,气流主要为偏西风,有明显的西北风与西南风的辐合。冷涡比较深厚,从低层到高层冷涡中心的位置基本一致。

图 9 是槽后型沿 MCS 重心的假相当位温、散度

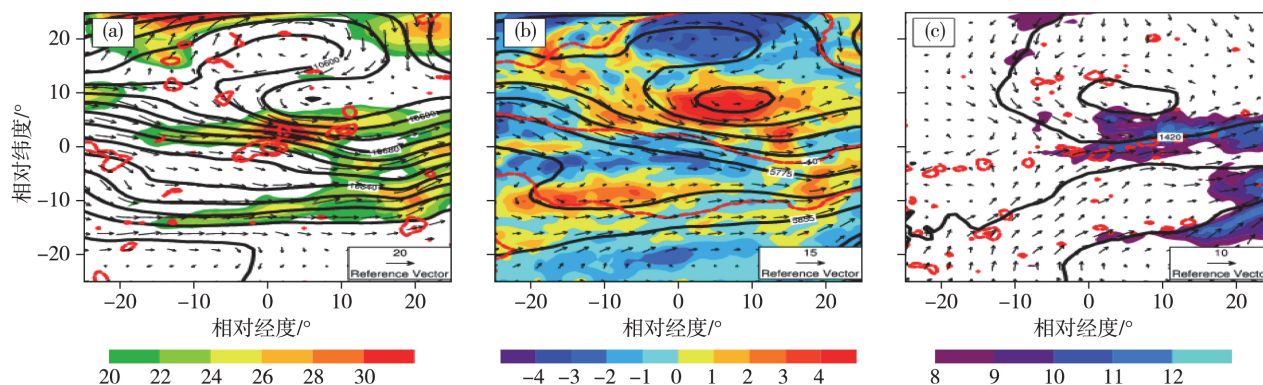


图 8 J-MCS 槽后型 250 hPa (a)、500 hPa (b) 以及 850 hPa (c) 环流场(其他说明同图 4)

Fig.8 The 250 hPa (a), 500 hPa (b) and 850 hPa (c) circulation fields of trough rear type of J-MCS (Other descriptions are the same as Fig. 4)

和环流经向剖面。与图 5a 相反高空 200~300 hPa 两个急流中心的强度表现为南弱北强,发展高度上仍为南高北低,分别对应低层 MCS 南侧 15 纬度处和 MCS 重心处的两个锋区(图 9a)。南支急流中心位于 200 hPa, MCS 重心南侧 10~20 纬度处,中心风速达到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,北支急流中心位于 250 hPa, MCS 重心北侧 0~5 纬度处,中心风速 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。MCS 重心所在锋区南侧 5~10 纬度处的 θ_{se} 低值区与图 9b 的反环流对应。MCS 北侧从极地来的气流先下沉再上升,与南侧反环流的上升支共同构成 MCS 重心的上升支。散度的垂直剖面(图 9b)表现出低层辐合高层辐散,MCS 重心处中高层表现出较强的垂直上升速度,有利于 MCS 的发展、维持。

图 10 是槽后型沿 MCS 重心的位涡、湿位涡、相对湿度和锋生函数的经向剖面图。位涡剖面(图 10a)情况与槽前型类似,MCS 重心处强上升气流区高层位涡值较低,南北两侧为伴随锋区向下延伸的两个位涡大值区,与槽前型不同的是,除了 MCS 南侧的反环流,在 MCS 北部也有一支向南输送的气流(图 9b),这两支环流在 MCS 中心处汇合将南北两侧的大值位涡向 MCS 重心处输送,有利于 MCS 的发展。湿位涡(图 10b)中层的水准梯度较大且 600 hPa 以下为负值。MCS 重心的相对湿度(图 10c)为 60%~70%,较南北两侧更大,中层 MCS 重心南北两侧干空气团比槽前型更加明显,配合温度场可看出对流层中层 MCS 南侧为暖干平流,北侧为冷干平流。北侧干冷空气沿着从极地来的气流先下沉,与南侧沿着对流层中层反环流上升的暖干空气相遇,加强了层结不稳定和抬升运动,使锋区加强,有利于 MCS 的发展,所以槽后型 MCS 的强度要比槽前型 MCS 更强。从锋生函数(图 10d)也可以看出,MCS 重心处向南倾斜的锋区,有明显的大值中心,强于槽前型。

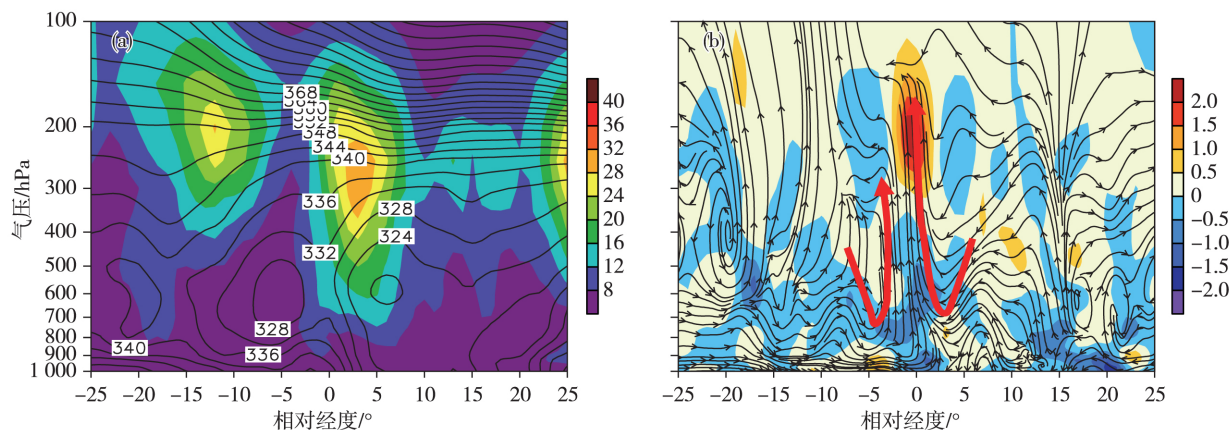


图9 J-MCS 槽后型沿 MCS 重心假相当位温、全风速 (a) 和散度 (b) 及垂直环流的剖面 (其他说明同图 5)

Fig.9 Trough rear type of J-MCS: meridional cross section of pseudo-equivalent potential temperature, full wind speed (a) and divergence, $v-w$ circulation (b) along the MCS gravity center (Other descriptions are the same as Fig. 5)

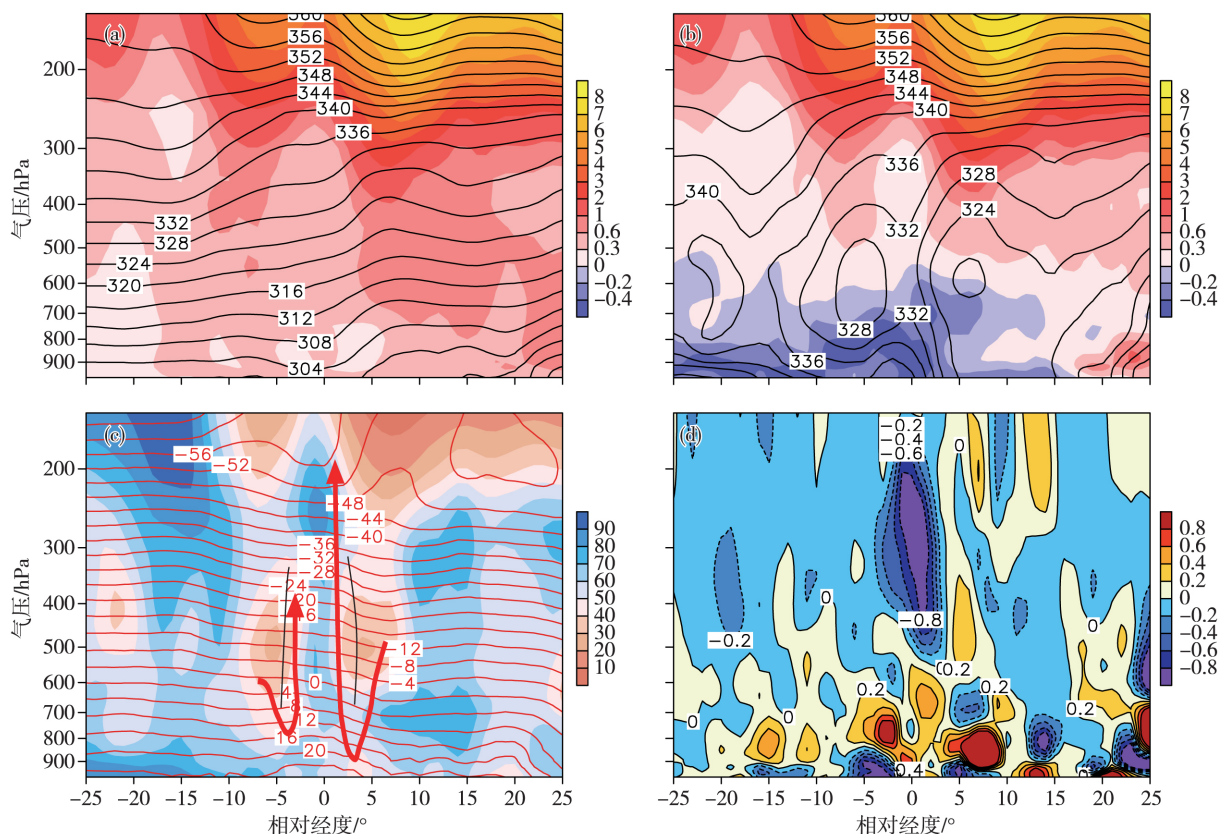


图10 J-MCS 槽后型沿 MCS 重心位涡 (a)、湿位涡剖面 (b)、相对湿度 (c) 以及锋生函数 (d) 的经向剖面 (黑色实线表示暖脊和冷槽, 红色箭头表示垂直环流) (其他说明同图 6)

Fig.10 Trough rear type of J-MCS: meridional cross section of potential vorticity (a) along the MCS gravity center, wet potential vorticity (b), relative humidity (c) and frontogenesis function (d) (Black solid lines indicates warm ridge and cold trough, red arrow indicates vertical circulation) (Other descriptions are the same as Fig. 6)

槽后型 MCS 位于 500 hPa 冷涡南部的槽后, 位置没有槽前型有利, 因此发生数目少于槽前型。但从低层来看, MCS 仍是位于 850 hPa 低涡南部槽前的 (图 8c), 而且是北方的西北气流和南方西南气流交汇的地方, 存在上升运动, 有利于锋和对流的产生。且槽后型 MCS 对应的高空急流更强 (图 9a),

抽吸作用明显, 从锋生函数看也确实有更强的锋生 (图 10d)。从假相当位温的剖面也可看出低层槽后型 MCS 重心及两侧均为不稳定, 比槽前型 MCS 底层的不稳定条件更好。有同时槽后干冷空气的输送使得 MCS 北侧的气流先下沉后上升, 与南侧的暖干空气在 MCS 重心处相遇加强了锋生 (图 10c),

MCS 的强度也变得更强。

从东北地区槽前型和槽后型 MCS 的各项参数(表 8)中可以看出,与槽前型 MCS 相比,槽后型 MCS 成熟时的平均面积更大,整个过程中的最低 TBB 更低,生命史更长,移速更小,说明槽后型 MCS 发展强度更强,与前面得到的结论一致。

经过对比可以发现,MCS 500 hPa 槽前型和槽后型的环境场特征既存在一致性也有一定的差异

表 8 2016—2017 年夏季(6—8 月)东北地区槽前型、槽后型 MCS 各项参数对比

Table 8 Comparison of MCS parameters between trough front type and trough rear type over Northeast China in summer from 2016 to 2017

类型	成熟面积/ (10^4km^2)	最低 TBB/ $^{\circ}\text{C}$	生命史/ h	移速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
槽前型	9.04	-66.47	6.47	49.3
槽后型	10.95	-68.83	6.67	45.6

性。相同之处在于:对流层高层 MCS 位于双急流之间靠近北支急流的辐散区。双急流高度上南高北低,急流中心分别位于 200 hPa 和 250 hPa。500 hPa 有两支正涡度带,MCS 位于正负涡度转换点上。低层,低空急流北侧易形成低涡,MCS 位于低涡与低空急流之间,有较强的水汽和动量向 MCS 重心处输送。垂直方向,MCS 重心处有明显的低层辐合高层辐散,低层 MCS 南侧 15 个纬距处和 MCS 重心处的锋区分别与高空的两个急流中心以及向下延伸的两个位涡或湿位涡大值区对应,MCS 南侧 15 个纬度范围内存在 θ_{se} 低值区并与环流剖面上 MCS 南侧的垂直反环流对应,中层的垂直反环流向 MCS 输送干暖空气与位涡,促进 MCS 的发展。

不同之处在于:槽前型 MCS 位于高空北支急流左前侧的辐散区,高空双急流在强度上南强北弱,槽后型 MCS 位于高空北支急流右后侧的辐散区,双急流在强度上表现为南弱北强,槽后型 MCS 在高空对应的急流更强;低层,槽前型水汽输送的方向是西南—东北向,槽后型由于 MCS 处于北部低涡和南部高压之间则为东西向。环流剖面上,槽前型 MCS 北侧环流以上升为主,槽后型会先在接近 MCS 北部 5 纬距处下沉然后在 MCS 重心处上升,与南侧反环流上升支共同构成 MCS 重心的上升支。同时 MCS 南北两侧的环流将南北两侧的大值位涡向 MCS 重心处输送,促进 MCS 的发展。总的来说由于环境场特征的不同,槽后型 MCS 的强度更强。

对 Z-MCS 的环境场做了相同的分析,发现二者

的环流特征基本一致(图略),更多的细节上的比较将在下面进行。

4.2 两种标准下 MCS 对比

4.2.1 MCS 造成的强降水对比

MCS 产生的主要灾害为强降水。从造成的降水强度方面分析(表 9),J-MCS 产生 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上包括 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水的比例达到 67.7%,而 Z-MCS 产生 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上包括 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水的比例达到 88.6%,两种标准中,Z-MCS 比 J-MCS 更容易造成降水。从环流型看,两种标准下的槽后型产生 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上包括 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水的比例明显大于槽前型,说明槽后型更易造成短时强降水($\geq 20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。

表 9 2016—2017 年夏季北地区两种标准下的 MCS 槽前型、槽后型降水强度的频数及百分比

Table 9 Frequency and percentage of different precipitation intensity of trough front type and trough rear type of different standards of MCS over Northeast China in summer from 2016 to 2017

MCS 产生的降水		$30\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$<10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
槽前型	J-MCS	2(9%)	4(18%)	9(41%)	7(32%)
	Z-MCS	8(27%)	6(20%)	12(40%)	4(13%)
槽后型	J-MCS	2(22%)	2(22%)	2(22%)	3(34%)
	Z-MCS	3(27%)	3(27%)	4(36%)	1(10%)

4.2.2 各种对流参量对比

地面对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE) 及对流抑制能量(Convective Inhibition Energy, CIN) 是不稳定能量的表征,代表热力条件。空气团抬升的起始高度(LPL) 可以表征空气的不稳定度。PWAT 表示整层大气的可降水量,代表水汽条件。而 $0\sim 6\text{km}$ 的垂直风切变(SHR06) 则代表动力条件。比较两种标准下 MCS 发生前各项对流参数(表 10),可看出 J-MCS 的 CAPE 和 SHR06 更高,Z-MCS 的 PWAT、水汽通量和 LPL 更高,即水汽条件和不稳定度条件要好于 J-MCS。从环流型看槽前型的水汽通量更大,有利于产生降水,槽后型 CAPE 值和 SHR06 明显大于槽前型,说明槽后型更有利于对流的产生,诱发短时强降水一类的强对流天气。

综上,两种分类标准的大尺度环境场没有太大差别,但在 MCS 发生前的对流参数和造成的降水方面,特别是造成的强降水方面有明显的差异,这可能是因为 Z 标准关注时间与空间尺度较小的中尺度对流系统,而 J 标准则更关注各种尺度相对较大、云顶温度较低的系统,可能会漏掉一些雷达回波

表 10 2016—2017 年夏季(6—8 月)东北地区两种标准下 MCS 槽前型、槽后型 MCS 各项参数对比
Table 10 Comparison of parameters between trough front type and trough rear type of different standards of MCS in Northeast China
in summer from 2016 to 2017

类型		CAPE/ (J·kg ⁻¹)	CIN/(J·kg ⁻¹)	PWAT/mm	LPL/hPa	SHR06/(m·s ⁻¹)	水汽通量/ (g·cm ⁻² ·s ⁻¹)
槽前型	J-MCS	1 164	-9.10	55.56	923.69	13.17	10.93
	Z-MCS	1 125.03	-9.81	60.18	963.19	12.41	11.28
槽后型	J-MCS	1 203.11	-15.11	56.19	943.63	17.13	8.30
	Z-MCS	1 201.82	-7.29	58.47	944.61	16.53	9.25

较强,降水较大,但范围较小,云顶高度较低的中尺度对流系统。统计中还发现(图略)有一些中尺度对流系统云顶高度较高,冷云面积较大,但降水强度较小(低于 10 mm·h⁻¹),这种对流系统的雷达回波强度往往较弱。整体来看,Z 标准在统计强降水方面要优于 J 标准。

5 结论

本文利用 FY-2 号卫星的 TBB 资料、NCEP/NCAR 提供的 FNL 资料对 2013—2017 年夏季(6—8 月)东北冷涡下东北地区的 MCS 的分布和活动特征进行了统计分析,并利用中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量资料和全国雷达拼图对比了 2016—2017 年两种标准下 MCS 的情况得到了以下结论:

(1) 统计得到 2013—2017 年夏季东北冷涡下东北地区的 MCS 共 77 例,包括 9 例 MCC、16 例 PECS、27 例 MβCCS 和 25 例 MβECS。MCS 表现出明显的月际变化特征和日变化特征,6 月 MCS 最活跃。MCS 的主要移向是东、东北和东南,平均移动距离 3.99 个经纬距。

(2) MCS 成熟时刻的面积、偏心率和生命史均小于江淮地区和中国中东部,云顶高度低于江淮地区,在发展过程中表现出发展快消亡慢的特征,与中东部地区一致,而与江淮地区相反。移向基本一致,主要向东移动。移距较江淮地区 MCS 更大。冷涡过程对 MCS 的产生有一定的影响,MCS 生成最多在 6 月,与其他两个地区的活跃月份为 7 月有所区别。

(3) 两种标准下 MCS 的 500 hPa 环境场特征基本一致,主要表现为槽前型和槽后型,具体特征为:对流层高层 MCS 位于双急流之间靠近北支急流的辐散区。双急流高度上南高北低,急流中心分别位于 200 hPa 和 250 hPa;低层,低空急流北易形成低涡,MCS 位于低涡与低空急流之间,有较强的水汽和动量向

MCS 重心处输送。垂直方向,MCS 重心处有明显的低层辐合高层辐散,低层 MCS 南侧 15 个纬距处和 MCS 重心处的锋区分别与高空的两个急流中心以及向下延伸的两个位涡或湿位涡大值区对应,MCS 南侧 15 个纬度范围内存在 θ_{se} 低值区并与环流剖面上 MCS 南侧的垂直反环流对应,中层的垂直反环流向 MCS 输送干暖空气与位涡,促进 MCS 的发展。

槽前型 MCS 位于高空北支急流左前侧的辐散区,高空双急流在强度上南强北弱,槽后型 MCS 位于高空北支急流右后侧的辐散区,双急流在强度上表现为南弱北强,槽后型 MCS 在高空对应的急流更强,产生的锋区更强;低层,槽前型水汽输送的方向是西南—东北向,槽后型由于 MCS 处于北部低涡和南部高压之间则为东西向且水汽辐合更强。环流剖面上,槽前型 MCS 北侧环流以上升为主,槽后型 MCS 由于 500 hPa 位于槽后冷空气较强,气流会先在接近 MCS 北部 5 纬距处下沉然后在 MCS 重心处上升,与南侧反环流上升支共同构成 MCS 重心的上升支,上升运动较强。同时 MCS 南北两侧的环流将南北两侧的大值位涡向 MCS 重心处输送,促进 MCS 的发展。由于槽后型独特的环境场特征,包括 MCS 对应的高空急流的强度,槽后冷空气的输送,不稳定条件,MCS 两侧的垂直环流的配合等均造成了槽后型 MCS 的锋生更强,MCS 强度更强,MCS 成熟时期的面积更大,最低 TBB 更低,生命史更长。

(4) 基于 TBB 的 MCS 识别标准和基于 maxdBZ 的识别标准存在各自的优缺点以及适用方向。Z 标准关注时间与空间尺度较小的中尺度对流系统,统计得到的 MCS 较多,MCS 的雷达回波较强,降水较强,但同时遗漏了云顶高度较高,冷云面积较大,雷达回波强度较弱的 MCS。而 J 标准则更关注各种尺度相对较大、云顶温度较低的系统,雷达回波强度不同,造成的降水强度不同,漏掉了云顶高度较低,冷云面积较小,雷达回波较弱的系统。两种分类标准在造成降

水方面的明显差异说明在统计强降水方面,Z 标准优于 J 标准。

参 考 文 献

- [1] 朱占云, 何金海. 东北冷涡的特征、影响及其可能机制的研究. 气象与减灾研究, 2010, 33(4): 1-8.
ZHU Zhanyun, HE Jinhai. Study on the characteristics, effect and possible mechanism of Northeast Cold Vortex. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 2010, 33(4): 1-8.
- [2] 白人海, 谢安. 东北冷涡过程中的飢线分析. 气象, 1998, 24(4): 37-40.
BAI Renhai, XIE An. Analysis of squall lines occurring in cold vortexes over Northeast China. Meteorological Monthly (in Chinese), 1998, 24(4): 37-40.
- [3] 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学, 1979, 3(3): 227-238.
TAO Shiyang, DING Yihui, ZHOU Xiaoping. The present status of the research on rainstorm and severe convective weathers in China. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1979, 3(3): 227-238.
- [4] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1980, 61(11): 1374-1387.
- [5] Augustine J A, Howard K W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1985. Mon. Wea. Rev., 1988, 116(3): 685-701.
- [6] Cotton W R, LIN Mingsen, McAnelly R L, et al. A composite model of mesoscale convective complexes. Mon. Wea. Rev., 1989, 117(4): 765-783.
- [7] Miller D, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region. Mon. Wea. Rev., 1991, 119(12): 2978-2992.
- [8] Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. Mon. Wea. Rev., 2003, 131(10): 2428-2449.
- [9] 梁巧倩, 项颂翔, 林良根, 等. 华南前汛期 MCS 的活动特征及组织发展形式. 热带气象学报, 2012, 28(4): 541-551.
LIANG Qiaoqian, XIANG Songxiang, LIN Lianggen, et al. MCS characteristics over South China during the annually first rainy season and their organization types. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2012, 28(4): 541-551.
- [10] 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. 大气科学, 2012, 36(6): 1112-1122.
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. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2012, 36(6): 1112-1122.
- [11] 曾波, 谌芸, 肖天贵. 我国中东部地区夏季 MCS 统计分析. 气象, 2013, 39(2): 180-185.
ZENG Bo, CHEN Yun, XIAO Tianguai. Statistical analysis of MCS in summer in central-eastern China. Meteorological Monthly (in Chinese), 2013, 39(2): 180-185.
- [12] 丁治英, 王小龙, 高松, 等. 青藏高原夏季带状 MCSs 的分类以及形成原因. 大气科学学报, 2013, 36(6): 641-652.
DING Zhiying, WANG Xiaolong, GAO Song, et al. Classification and cause analysis of banded MCSs over the Tibet Plateau in summer. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2013, 36(6): 641-652.
- [13] 刘佳颖, 魏建苏, 姚丽娜, 等. 一次 MCS 过程的特征分析. 气象科学, 2013, 33(1): 89-94.
LIU Jiaying, WEI Jiansu, YAO Lina, et al. Characteristic analysis on a MCS process. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2013, 33(1): 89-94.
- [14] Geerts B. Mesoscale convective systems in the Southeast United States during 1994-95: a survey. Wea. Forecasting, 1998, 13(3): 860-869.
- [15] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. Mon. Wea. Rev., 2000, 128(10): 3413-3436.
- [16] ZHENG Linlin, SUN Jianhua, ZHANG Xiaoling, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. Wea. Forecasting, 2013, 28(5): 1081-1098.
- [17] 王磊, 谌芸, 张仙, 等. 冷涡背景下 MCS 的统计分析. 气象, 2013, 39(11): 1385-1392.
WANG Lei, CHEN Yun, ZHANG Xian, et al. Statistical analysis of mesoscale convective system in the context of cold vortex. Meteorological Monthly (in Chinese), 2013, 39(11): 1385-1392.
- [18] 孙力, 郑秀雅, 王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系. 应用气象学报, 1994, 5(3): 297-303.
SUN Li, ZHENG Xiuya, WANG Qi. The climatological characteristics of Northeast cold vortex in China. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 1994, 5(3): 297-303.
- [19] 肖稳安, 胡少校, 姚洪奎. 我国大陆 MCC 特征和结构的分析. 南京气象学院学报, 1990, 13(3): 434-441.
XIAO Wen'an, HU Shaoxiao, YAO Hongkui. An analysis of the characteristics and structure of MCC in China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 1990, 13(3): 434-441.
- [20] 项续康, 江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体. 应用气象学报, 1995, 6(1): 9-17.
XIANG Xukang, JIANG Jixi. Mesoscale convective complexes over the southern China mainland. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 1995, 6(1): 9-17.
- [21] 过仲阳, 林辉, 江吉喜, 等. 青藏高原上中尺度对流系统东移传播成因. 地球信息科学, 2003, 5(1): 5-10.
GUO Zhongyang, LIN Hui, JIANG Jixi, et al. Mining eastward-moving MCSs features over the Tibetan Plateau. Journal of Geo-Information Science (in Chinese), 2003, 5(1): 5-10.
- [22] 刘瑞翔, 丁治英, 孙凌光, 等. 夏季江淮地区中尺度对流系统的统计特征分析. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 215-222.
LIU Ruixiang, DING Zhiying, SUN Lingguang, et al. Statistical analysis of mesoscale convective systems over Yangtze-Huaihe basin in summer. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2015, 34(3): 215-222.
- [23] 白人海, 孙永罡. 东北冷涡中尺度天气的背景分析. 黑龙江气象, 1997, 40(3): 6-7, 12.
BAI Renhai, SUN Yonggang. The background analysis study of meso-scale weather of the cold vortex in Northeast China. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), 1997, 40(3): 6-7, 12.