

李俊, 王东海, 王斌. 2012. 中尺度对流系统中的湿中性层结结构特征 [J]. 气候与环境研究, 17(5): 617–627, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11085.  
Li Jun, Wang Donghai, Wang Bin. 2012. Structure Characteristics of moist neutral stratification in a mesoscale convective system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(5): 617–627.

## 中尺度对流系统中的湿中性层结结构特征

李俊<sup>1,2,3</sup> 王东海<sup>4</sup> 王斌<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 空军气象中心, 北京 100843

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**摘 要** 基于 CloudSat 卫星获得的高分辨率中尺度对流系统垂直剖面结构, 结合大气参量相对湿度和相当位温的诊断分析, 在低纬度、中高纬度地区、陆地或海洋以及不同天气形势下, 发现了多个非常典型的中尺度对流系统 (MCS) 内部具有湿中性层结特征的个例。进一步利用静止卫星普查到的东亚地区 MCS 分布情况, 结合 NCEP 再分析资料诊断 MCS 重心位置处大气状态廓线, 利用大量的例子从统计的角度揭示了湿中性层结结构特征在 MCS 中存在的普遍性, 并且从动力学和热力学的角度探讨了湿中性层结结构在 MCS 发生和发展中所起到的作用。

**关键词** 中尺度对流系统 CloudSat 卫星 湿中性层结

**文章编号** 1006-9585 (2012) 05-0617-11

**中图分类号** P412.27

**文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11085

## Structure Characteristics of Moist Neutral Stratification in a Mesoscale Convective System

LI Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Donghai<sup>4</sup>, and WANG Bin<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Meteorological Center of Air Force, Beijing 100843

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

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

**Abstract** Many vertical sections of Mesoscale Convective System (MCS) detected by CloudSat satellite in regions of high humidity have a structural trait whereby the equivalent potential temperature is close to uniform in the vertical. This is called the moist neutral stratification, commonly found in East Asia in low or medium-high latitudes, over land or sea. Further information regarding the centroid distribution of MCSs was obtained from geostationary satellite cloud infrared image, and the NCEP reanalysis data was used to diagnose some profiles of atmospheric parameters over the centroid of the MCSs. The statistical results show that a moist neutral stratification structure was common in the MCSs. The role that moist neutral stratification plays in the initiation and development of a MCS is discussed from a kinetic and thermodynamic point of view.

**Key words** mesoscale convective system, CloudSat satellite, moist neutral stratification

**收稿日期** 2011-06-11 收到, 2012-07-16 收到修定稿

**资助项目** 国家创新研究群体科学基金项目 40821092, 国家自然科学基金项目 40633016、40875022, 中国气象科学研究院和灾害天气国家重点实验室基本科研业务专项基金

**作者简介** 李俊, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: pladylj@163.com

## 1 引言

大尺度流场主要是建立有利于强暴雨发生的环境条件,而中尺度对流系统 (mesoscale convective system, MCS) 则直接导致强暴雨,并且暴雨的形成和出现常常与  $\beta$ -MCS 的出现相联系。张小玲等 (2002)、孙建华等 (2004)、赵思雄等 (2007) 的研究表明,暴雨降水是东亚地区暖季中尺度对流云团致灾的最主要的方式。Fritsch et al. (1986) 指出,美国落基山脉和密西西比河流域暖季 (3~9 月) 30%~50% 或许更多的降水是由 MCS 所致。Doswell (1987) 以及 Johns and Doswell (1992) 认为,暴雨 MCS 的发生有 3 个必要条件: 1) 不稳定大气层结; 2) 水汽供应; 3) 抬升机制。那么,这些物理条件是如何对 MCS 发生作用的呢? 近年来, Sanders and Paine (1975)、Wetzel et al. (1982)、Maddox (1983)、郑永光等 (2002, 2007)、Dostalek et al. (2004)、柳艳菊等 (2005)、Dotzek and Forster (2008) 对此进行了大量的研究,得出了诸多有益的结果。Bryan and Fritsch (2000) 指出,由于大气存在对流不稳定而产生的上升性入流气流,湿绝对不稳定能量的释放,中尺度边界层出流、重力波,以及低空急流与高空槽配合的天气形势等, MCS 才能够得以维持。大气位势不稳定层结被普遍认为是 MCS 发生的必要的大尺度环境条件之一。但是中国地区的观测事实表明,有不少暴雨 MCS 是在对流层中低层大气层结处于近似中性层结状态下发生和发展起来的,比如,河南“75·8”特大暴雨 (陶诗言, 1980),“96·8”特大暴雨 (冯伍虎等, 2001), 以及 2003 年 7 月 4~5 日淮河流域大暴雨 (周斌和王建捷, 2003) 等。本文在利用 CloudSat 卫星资料分析诊断 MCS 的垂直结构时也发现了中尺度对流云团内部存在湿中性层结结构的特征,由于这种特征在较多中尺度对流云团内部都有发现,从而引起了我们的注意和思考,这种湿中性层结结构在中尺度对流系统中的存在是否具有普遍性呢?

许焕斌和丁正平 (1997) 通过对常规单站探空资料分析,给出了 3 个中国暴雨个例中的湿中性层结结构,并用一个二维的非静力数值模式对“75·8”特大暴雨中的湿中性层结的物理机制进行了数值验证,指出湿中性层结条件下的垂直运动与  $\beta$ -MCS 共存,湿中性层结条件有利于  $\beta$ -MCS 的形成和发

展,提出了  $\beta$ -MCS 内部存在湿中性层结结构的物理框架以及热力、动力学意义。陈忠明等 (2007) 针对湿中性层结特征讨论了降水反馈对 MCS 发展的影响,并且指出湿中性层结条件下非绝热加热垂直分布与垂直涡度分量的耦合强迫可能是暴雨中尺度系统发展的动力机制,并以一次西南低涡系统发生发展过程分析为例,从观测事实方面对理论进行了初步的验证。Correia and Arritt (2008) 利用弓状回波和中尺度对流涡旋试验 (Bow Echo and Mesoscale Convective Vortex Experiment, BAMEX) (Davis et al., 2004) 中的 435 个下投式探空仪对美国圣路易国际机场 18 个 MCS 内部热力学变量的分布进行了统计分析研究,同样发现在 MCS 内部存在两个相当位温不随高度变化 (中性层结) 的区域,但是这一结构特征并没有引起作者的重视,所以也没有对该层结结构进行细致的讨论和分析。国内外的研究均利用常规探空资料从个例上指出了 MCS 内部存在湿中性层结结构特征,从理论和个例分析的角度揭示了大气湿中性层结特征及其变化对暴雨中尺度涡旋系统发生、发展的重要影响,但这些结果都没有更多的观测事实分析来加以验证。湿中性层结结构是否是 MCS 内普遍存在的结构特征呢? 前人的理论工作是否能够得到大量的观测事实分析的验证呢? 针对这两个问题,一方面本文将利用新的资料对 MCS 内部层结结构进行诊断分析,进一步揭示出 MCS 的精细层结结构特征;另一方面,本文将对大量的 MCS 样本进行统计分析,给出具有统计意义的 MCS 的层结结构特征。

## 2 资料简介

为了寻找典型的 MCS 内部湿中性层结特征个例,本文利用 CloudSat 卫星的 2B-GEOPROF 和 ECMWF AUX 资料。2006 年 4 月 27 日, NASA 的 CloudSat 和 CALIPSO 两颗卫星在加利福尼亚州范登堡空军基地发射升空,进入高度为 705 km 的轨道,以大约 7 km/s 的速度绕地球运行,这两颗卫星与美国 Aqua 和 Aura 卫星以及法国 Parasol 卫星一起组成 A-Train 卫星星座,实现准同步 (前后星时间差小于 30 min) 主被动多波段对地球的观测,能够提供云体的垂直廓线及云中粒子的相关特性,它们构成的覆盖全球的探测系统可以提供云层如何

将太阳能向地球大气层传输等前所未有的信息。Stephens et al.(2002)指出 CloudSat 是第一颗搭载毫米波段雷达的卫星，其搭载的云廓线雷达 (Cloud Profiling Radar, CPR) 的独特之处在于它能够探测到星下点视场内绝大部分云冷凝物和降水，并且能够得到它们的垂直廓线，垂直分辨率高达 500 m，水平分辨率在沿着卫星运行轨道方向约为 2.5 km，垂直于轨道方向约为 1.4 km。CloudSat 搭载的云廓线雷达可以对云层进行“切片”，利用其提供的垂直结构可以对天气和气候至关重要的三维结构进行研究，利用它可以对全球云结构、云层成份及其对气候的影响进行变革性的全球探测和研究。本文将利用 CloudSat 观测数据——2B-GEOPROF 资料中的雷达反射率数据，提供平均海平面向上至 30 km 高度处获得的 CPR 实测回波数据，从而可以获得云团内部的精细垂直结构。本文还将利用 CloudSat 数据集中的辅助数据——ECMWF AUX 中的气温、气压、湿度信息，进一步诊断出大气状态参量。ECMWF AUX 资料并非 CloudSat 实测数据，而是利用 ECMWF 发布的大气状态量（包括气压、温度、比湿、地表温度、2 m 温度等）经过插值算法插值到 CloudSat 运行轨迹上，作为一种中间辅助资料与 CloudSat 卫星实测资料一同发布，从而提供了前所未有的 CloudSat 全球运行轨迹上高分辨率的大气基本状态量的垂直廓线，经过进一步诊断可以获得 CloudSat 运行轨迹上相对湿度、相当位温 ( $\theta_e$ ) 等大气参量的状态垂直廓线。

MCS 多发生在春、夏季，为了统计 MCS 发生时的大气层结状况，本文将用 1999~2008 年逐小时地球静止卫星红外亮温 (Temperature of Black Body, TBB) 云图，采用基于数字图像处理技术的客观方法识别出 MCS，并确定 MCS 重心的位置，对 MCS 进行追踪，再利用 NCEP  $1^\circ$  (纬度)  $\times$   $1^\circ$  (经度) 再分析资料对发生 MCS 时 MCS 重心位置处的大气层结状态进行诊断分析。本文中 MCS 云团的识别、追踪判断标准为：云顶亮温低于温度阈值 227 K，且冷云区面积超过 5000 km<sup>2</sup>，持续 3 h 以上的云团。本文所用的静止卫星资料在 2003 年（含）以前为 GMS-5 数字红外云图，GMS-5 网格点数据满足等距投影，网格分辨率为 12 km（格点数为 800 $\times$ 600），时间分辨率为 1 h；2003 年以后为 FY-2C 云图，空间分辨率为  $0.1^\circ$  (纬度)  $\times$   $0.1^\circ$  (经度)，时间分辨率为 1 h。由于 NCEP 资料时间

间隔 6 h，每日仅 4 个时次，分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00（协调世界时，下同），而且 MCS 的发生和分布情况各年各月份有不同，因此本文仅统计有 NCEP 资料时刻且有 MCS 发生时的大气层结状况，具体各年各月进入统计样本的 MCS 个数如表 1 所示。

表 1 1999 年 8 月至 2008 年 9 月进入统计样本的 MCS 的个数

Table 1 The number of mesoscale convective system (MCS) samples from Aug 1999 to Sept 2008

| 发生时间    | 个数  | 发生时间    | 个数    |
|---------|-----|---------|-------|
| 1999-08 | 674 | 2003-08 | 1205  |
| 2000-03 | 266 | 2005-06 | 1106  |
| 2000-04 | 438 | 2005-07 | 1013  |
| 2000-05 | 642 | 2005-08 | 820   |
| 2000-06 | 870 | 2005-09 | 667   |
| 2000-07 | 913 | 2006-03 | 190   |
| 2000-08 | 963 | 2006-04 | 590   |
| 2000-09 | 578 | 2006-05 | 448   |
| 2001-03 | 375 | 2006-06 | 720   |
| 2001-04 | 384 | 2006-07 | 893   |
| 2001-05 | 564 | 2006-08 | 645   |
| 2001-06 | 725 | 2006-09 | 747   |
| 2001-07 | 860 | 2007-03 | 240   |
| 2001-08 | 895 | 2007-04 | 353   |
| 2001-09 | 482 | 2007-05 | 635   |
| 2002-03 | 306 | 2007-06 | 1112  |
| 2002-04 | 410 | 2007-07 | 824   |
| 2002-05 | 161 | 2007-08 | 834   |
| 2002-06 | 652 | 2007-09 | 631   |
| 2002-07 | 671 | 2008-03 | 423   |
| 2002-08 | 848 | 2008-04 | 519   |
| 2002-09 | 517 | 2008-05 | 763   |
| 2003-03 | 291 | 2008-06 | 893   |
| 2003-04 | 366 | 2008-07 | 896   |
| 2003-05 | 232 | 2008-08 | 781   |
| 2003-06 | 943 | 2008-09 | 599   |
| 2003-07 | 723 | 合计      | 34296 |

### 3 MCS 云团内热力垂直结构特征

2007 年 7 月 25 日，受 500 hPa 高空槽影响，低压中心位于陕西关中地区，处于高空槽前的中国西南云贵高原地区出现强对流性天气，06:00 CloudSat 探测到了贵州东北部的一个中尺度对流单体云团（图 1），由此获得了该对流单体的垂直剖面结构（图 2）。从雷达反射率结构来看，该对流云团对

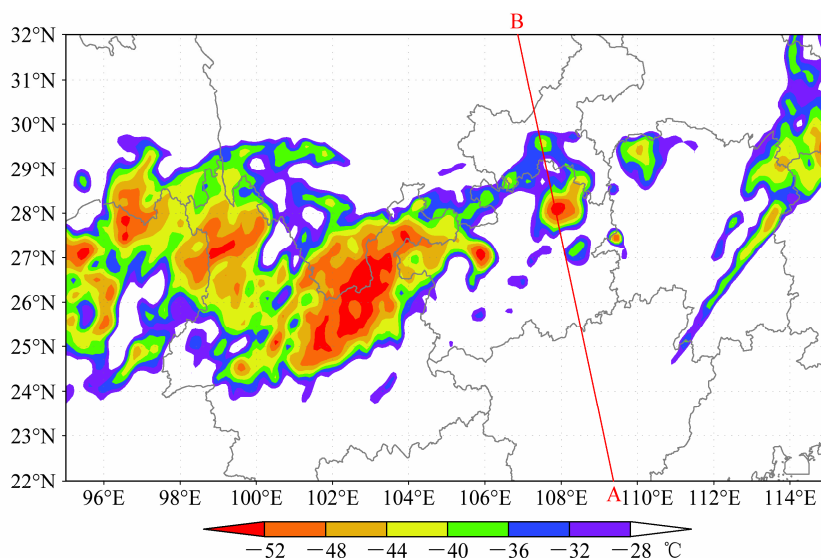


图1 2007年7月25日06:00卫星TBB云图(红色实线为图2中CloudSat运行轨迹)

Fig. 1 Temperature of Black Body (TBB) cloud image at 0600 UTC 25 Jul 2007 (the red solid line indicates the track of CloudSat in Fig.2)

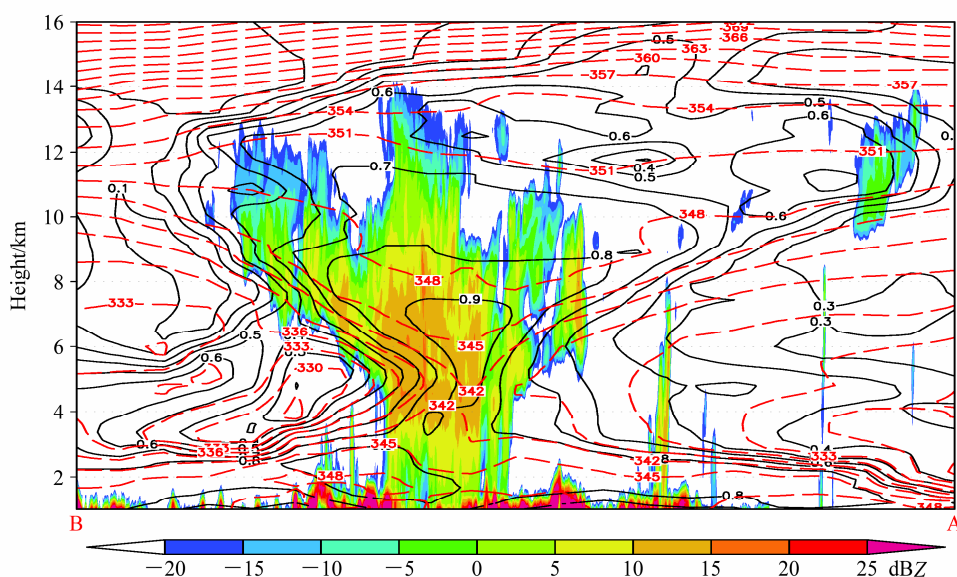


图2 2007年7月25日贵州一个MCS垂直剖面结构(阴影为雷达反射率;黑色实线为相对湿度;红色虚线为相当位温,单位:K)

Fig. 2 The vertical cross section along the Cloudsat track from A to B for a MCS in Guizhou Province on 25 Jul 2007 (shadings indicate radar reflectivity; black solid line indicates relative humidity; red dashed line indicates equivalent potential temperature, units: K)

流旺盛,垂直剖面呈倒堡垒结构,5 km 以下为柱状,5 km 以上对流云团横截面积随高度增加,至8 km 高度增加至原来的约3倍后云团截面积不再随高度增加,对流主体云顶最高伸展到了14 km 高度,附属云顶也在10 km 以上高度,垂直对流活动最强位于4~8 km 高度。结合ECMWF AUX数据诊断分析,得到了CloudSat卫星轨迹上包括相对湿度和相当位温分布在内的垂直结构,该结构揭示了一个非常典型的中尺度对流云团的垂直剖面结构:对流云团的中下部相当位温 $\theta_e$ 分布为鞍形分布,云团内部

4 km 以下 $\theta_e$ 随高度增加而减小,大气层结不稳定,并且 $\theta_e$ 等值线向上凸;5 km 以上 $\theta_e$ 随高度增加而增大,大气层结稳定,并且云团内部 $\theta_e$ 向下凹,对流云团以外对流层中层南北两侧各有一个 $\theta_e$ 低值中心。 $\theta_e$ 等值线在对流云团内部3~6 km 高度几近垂直分布,这样对流云团内部局部形成了鞍型 $\theta_e$ 分布结构,这一区域 $\theta_e$ 几乎不随高度变化,表明大气层结为中性层结,这一区域雷达反射率几乎最强,对流活动也最强。再加上湿度场中上部以对流云团为轮廓,对流中心为90%以上的湿度中心,对流云团

的主体内部相对湿度超过 80%，80%湿度线分布为 $\Omega$ 型分布，低层涵盖对流云团以外的广大高相对湿度区域，于是在对流云团内 3~6 km 高度形成了一个湿中性层结区。

无独有偶，在高、中、低纬度地区，在陆地、海洋上均有类似的垂直剖面结构特征的对流云团被 CloudSat 探测到。例如，台风中 MCS 就是如此。陈联寿和丁一汇（1979）指出，MCS 是台风造成较大暴雨必须具备的条件。Chen and Luo (1995)、孟智勇等（1998）的研究也表明，台风中的 MCS 往

往是造成台风特大暴雨的主要因素。2008 年 5 月 27 日 0805 号热带风暴娜基莉（Nakri）在菲律宾以东洋面生成，后逐渐加强成为台风，于 30 日达到最强，随后又逐渐减弱，最终于 6 月 3 日消失在日本以东洋面。这个台风远离中国大陆，自始至终活动在西太平洋海面上，5 月 31 日 CloudSat 卫星探测到该台风刚刚从最强开始减弱阶段的垂直剖面结构（图 3 和图 4），CloudSat 轨迹几近台风中心，从雷达反射率来看，台风云顶高度超过 12 km，最高可达 16 km 高度，云系中的螺旋云带、对流云墙

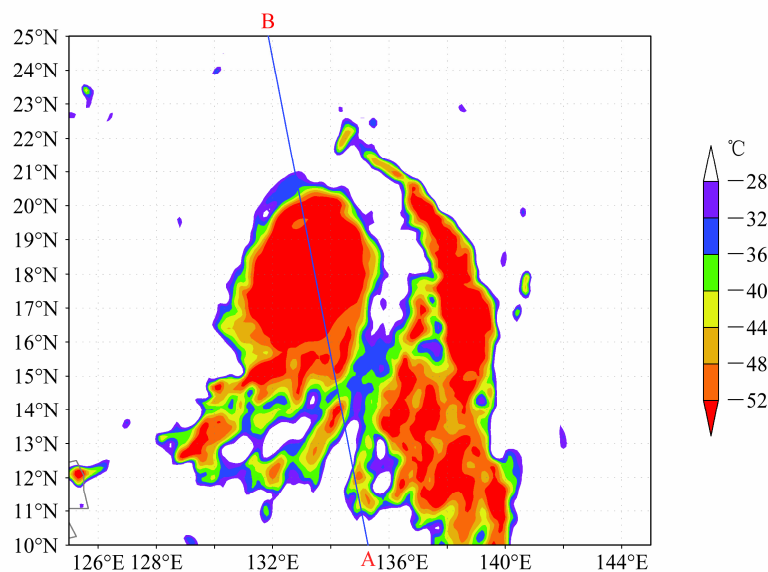


图 3 2008 年 5 月 31 日 05:00 卫星 TBB 云图（蓝色实线为图 4 中 CloudSat 运行轨迹）

Fig. 3 TBB cloud image at 0500 UTC 31 May 2008 (the blue solid line indicates the track of CloudSat in Fig.4)

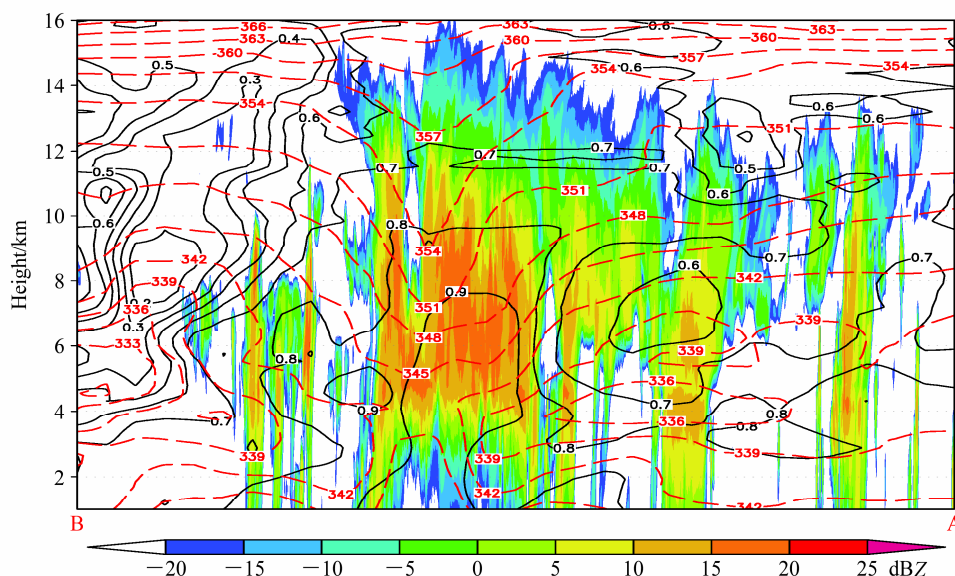


图 4 2008 年 5 月 31 日 04:00 娜基莉台风剖面（阴影为雷达反射率；黑色实线为相对湿度；红色虚线为相当位温，单位：K）

Fig. 4 The vertical cross section along the Cloudsat track from A to B for a tropical storm Nakri at 0400 UTC 31 May 2008 (shadings indicate radar reflectivity; black solid line indicates relative humidity; red dashed line indicates equivalent potential temperature, units: K)

十分清晰。结合 ECMWF AUX 数据诊断分析,台风眼区附近 8 km 以下高度相对湿度超过 85%, 4 km 以下  $\theta_e$  等值线向上凸, 5 km 以上、15 km 以下  $\theta_e$  等值线向下凹, 在 4~5 km 高度处形成一局部中性层结区域, 另外台风云系内部  $\theta_e$  等值线凹凸两侧均形成局部中性层结区域, 造成台风云系内部多处中性层结区域, 那些区域也是对流最强的区域。在低纬度热带海洋上也有同样类似结构的对流云团发现。

在高纬度地区, 东北冷涡是中国东北地区夏季常见的天气系统, 它是造成东北地区低温冷害, 持续性阴雨洪涝、突发性强对流天气的重要天气系统。2007 年 8 月 8 日东北地区内蒙古和辽宁交界处

出现冷涡, 500 hPa 低压中心位于内蒙古通辽, 并且向东北方向移动, 最终于 8 月 10 日消失在黑龙江省北部。该冷涡持续 3 d, 在东北大范围地区特别是吉林省造成了暴雨降水。8 月 8 日 CloudSat 探测到这个冷涡的垂直结构(图 5 和图 6), 对流云顶平均达到了 12 km 高度, 与低纬度以及海洋上 MCS 云团内部不同的是对流云团内部相对湿度稍弱, 表明该东北冷涡水汽条件不如前两个充足, 但是  $\theta_e$  等值线的鞍型分布结构特征却非常显著, 其  $\theta_e$  等值线分布与贵州个例相似, 反映了陆地上 MCS 垂直剖面结构的典型特征。

综观对比 3 个不同条件下的 MCS 个例, 不难

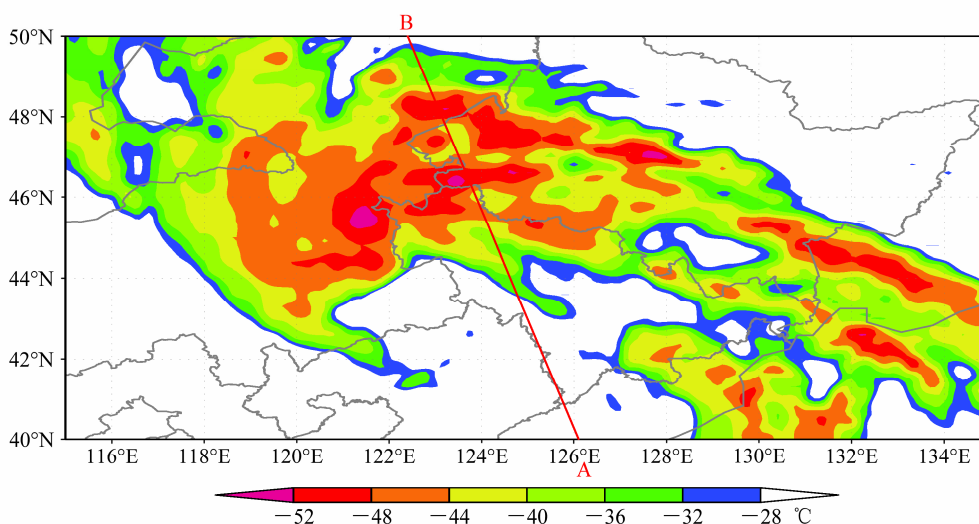


图 5 2007 年 8 月 8 日 05:00 卫星 TBB 云图 (红色实线为图 6 中 CloudSat 运行轨迹)

Fig. 5 TBB cloud image at 0500 UTC 8 Aug 2007 (the red solid line indicates the track of CloudSat in Fig.6)

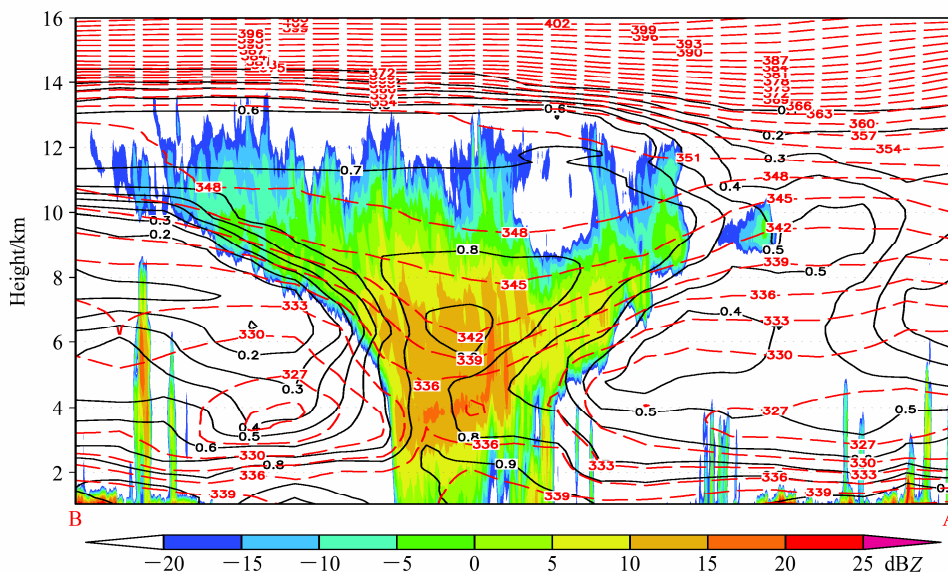


图 6 2007 年 8 月 8 日东北冷涡垂直剖面 (阴影为雷达反射率; 黑色实线为相对湿度; 红色虚线为相当位温, 单位: K)

Fig. 6 The vertical cross section along the Cloudsat track from A to B for a cold vortex on 8 Aug 2007 (shadings indicate radar reflectivity; black solid line indicates relative humidity; red dashed line indicates equivalent potential temperature, units: K)

发现其垂直结构的异同之处。由于海洋上对流运动条件较陆地上充分, 容易形成大面积的对流, 因此海洋上对流云团雷达回波往往呈现柱状, 陆地上则在中低层为柱状回波, 高层在挟卷气流的作用下形成云砧, 使得陆地上对流云团垂直剖面呈现倒堡垒型。然而在对流云团内部对流最强的地方都能够发现大气湿中性层结构特征,  $\theta_e$  等值线在局部区域表现为与水平面近似垂直而造成  $\theta_e$  随高度几乎不变化的中性层结, 但海洋上除此以外还能在局部形成  $\theta_e$  等值线上下层水平平行分布而造成中性层结。

#### 4 MCS 内部大气廓线特征

MCS 的重心位置处的大气状态垂直廓线也是可以直接反映 MCS 发生时的大气状况。本文对东亚地区 54 个月共计 34296 个 MCS 进行了统计, 得到了东亚地区暖季 (3~9 月) 平均相当位温、相当

位温垂直梯度、相对湿度、涡度以及散度垂直廓线分布 (如图 7 所示), 平均相当位温及其垂直梯度廓线表明, MCS 云团内部平均在 650 hPa 以下气层存在一个高温高湿的位势不稳定气层 ( $-\partial\theta_e/\partial p < 0$ ), 不稳定层结顶部 650 hPa 与低层 1000 hPa 相当位温差达 9 K, 这样低层大气具备充足的大气不稳定层结条件有利于 MCS 发展, 而对流层中层 (650~400 hPa) 为湿中性层结大气 ( $-\partial\theta_e/\partial p$  接近于零), 对流层高层 (400 hPa 以上) 大气层结稳定 ( $-\partial\theta_e/\partial p$  明显大于零)。平均相对湿度廓线表明, 大气层中层 (700 hPa 左右) 存在一个相对湿度为 80% 的高值区, 其中 65% 的相对湿度高度可以伸展到 300 hPa。平均涡度廓线表明, 大气中、低层为正涡度, 高层为负涡度, 有利于对流活动的发生、发展, 低层正涡度极值出现在 850 hPa, 400 hPa 左右涡度为 0, 及东亚地区平均 400 hPa 以下是有利于对流发生的, 负涡度极值出现在对流层高层 200 hPa; 平均

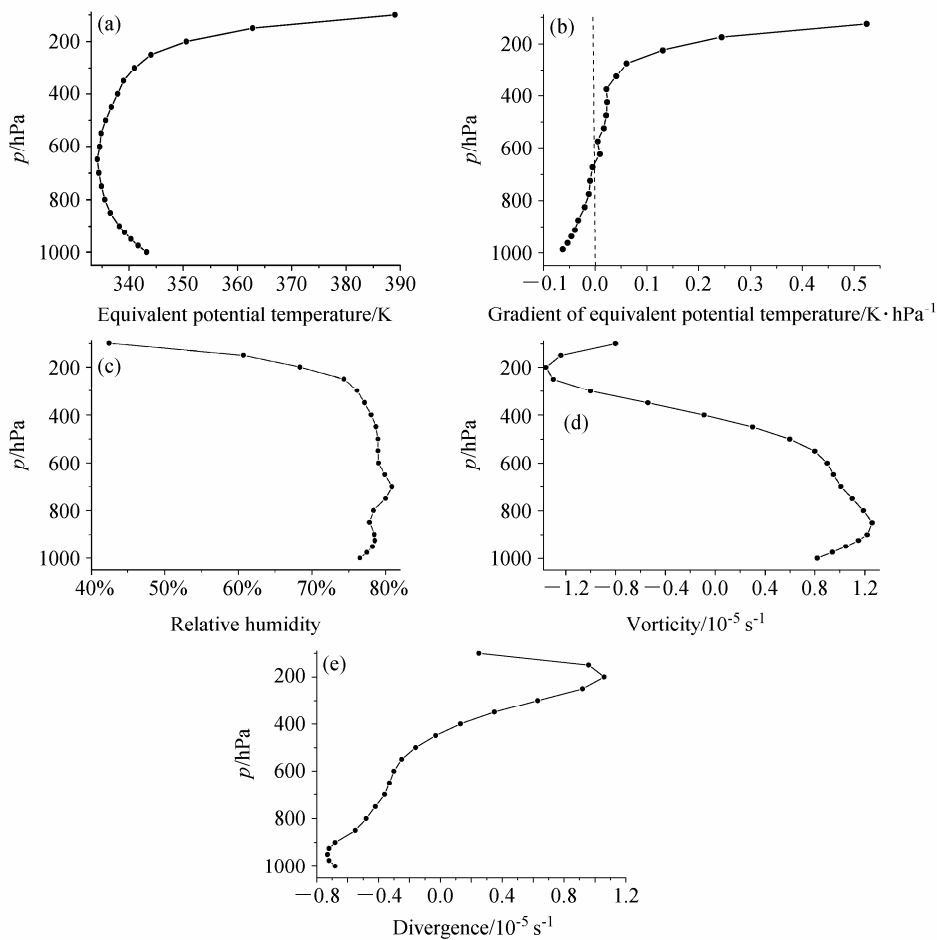


图 7 3~9 月东亚地区 MCS 重心位置处 (a) 相当位温、(b) 相当位温梯度、(c) 相对湿度、(d) 涡度、(e) 散度平均垂直廓线

Fig. 7 The average vertical profiles at gravity center over East Asian MCSs for (a) equivalent potential temperature, (b) gradient of equivalent potential temperature, (c) relative humidity, (d) vorticity, (e) divergence from Mar to Sept

散度廓线表明, 大气低层辐合、高层辐散, 也是有利于对流活动发生的条件, 低层辐合极值出现在 950 hPa, 整层无辐合辐散层位于 450 hPa 左右, 高层辐散极值出现在 200 hPa。

春、夏季 MCS 内部大气廓线(图 8)略有不同, 主要表现在相当位温(不稳定度)及其垂直梯度廓线和相对湿度廓线上, 夏季(6~9 月, 简写 JJAS) MCS 平均相当位温廓线表明, MCS 云团内部平均在 800 hPa 以下气层存在一个高温、高湿的位势不稳定气层 ( $-\partial\theta_e/\partial p < 0$ ), 不稳定层结层顶部 800 hPa 与 1000 hPa 相当位温差达 9.8 K, 而春季(3~5 月, 简写 MAM) MCS 平均廓线在大气低层则不存在明显的位势不稳定层结层。春、夏季 MCS 内部大气对流层中层(800~400 hPa)均为湿中性层结大气 ( $-\partial\theta_e/\partial p$  接近于零), 上下层相当位温差均为 0.6 K 左右, 且对流层高层(400 hPa 以上)大气层结均比较稳定 ( $-\partial\theta_e/\partial p$  明显大于零)。夏季平均相对湿度比春季大, 夏季大气中低层(700 hPa 左右)存在一个相对湿度大于 80% 的高值区, 其中 75% 的相对湿度高度可以伸展到 250 hPa, 表明 MCS 内部平均夏季比春季有更好的水汽条件。涡度廓线和散度廓线则春、夏季差别不大, 大气中、低层为正涡度, 高层为负涡度, 有利于对流活动的发生、发展, 低层正涡度极值出现在 850 hPa, 为  $1.42 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 400 hPa 左右涡度为 0, 及东亚地区平均 400 hPa 以下是有利于对流发生的, 负涡度极值出现在对流层高层 200 hPa, 为  $-1.59 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 平均散度廓线表明, 大气低层辐合、高层辐散, 也是有利于对流活动发生的条件, 低层辐合极值出现在 950 hPa, 为  $-0.74 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 整层无辐合辐散层位于 450 hPa 左右, 高层辐散极值出现在 200 hPa, 为  $1.1 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。另外, 据统计春、夏季 MCS 发生时风切变有显著不同, 春季风切变明显大于夏季, 春季是夏季的 2 倍。

## 5 讨论和结论

CloudSat 卫星探测表明, 无论在低纬度还是中高纬度地区、陆地或海洋以及不同天气形势下, 东亚地区 MCS 内部都存在非常典型的湿中性层结特征的个例。经过本文的统计分析, 东亚地区整个暖季数以万计 MCS 统计平均情况下仍能表现出与单个个例类似的湿中性层结特征, 这足以表明东亚地

区 MCS 发生时大气层的中高层湿中性层结状态绝非偶然现象, 而是普遍存在的现象, 表明 MCS 维持、发展阶段大气层结这一分布具有深刻的动力学和热力学意义。

东亚地区 MCS 发生时大气大尺度环境场的变化在春、夏季体现较为明显(图略), 统计结果表明, 春季对流有效位能 (Convective Available Potential Energy, CAPE) 多数低于 500 J/kg, 而夏季则多数介于 500~1500 J/kg 之间, CAPE 平均值夏季比春季高 74.3%; 对流抑制能量 (Convective Inhibition, CIN) 春、夏季相当, 春季略高于夏季, 表明夏季有利于对流发生的条件更多; 风切变(即风速取 0~6 km 的密度加权平均风与 0~500 m 近地面层密度加权平均风之间的风矢差值)则是春季大于夏季, 春季是夏季的约 2 倍; 大气不稳定度(即 500 hPa 与 850 hPa 高度上的相当位温之差)则是春季低于夏季, 且夏季大气不稳定度是春季的 11.3 倍, 夏季更容易出现对流性不稳定天气。通过春、夏季大气大尺度环境场的比较, 不难发现东亚地区春季出现 MCS 时风切变(动力)的作用占主导地位, 而夏季则是大气不稳定度(热力)作用占据主导地位。这也与东亚大气环流的季节状态密切联系的, 春季东亚大气环流处于斜压状态, 而夏季则处于准正压大气状态, 一般 5 月是这两个状态的转换期。

MCS 发生时, 大气低层大气不稳定度春、夏季却显著不同, 由于春季东亚大气环流处于斜压状态, 夏季大气环流处于准正压状态, 这样春季大气风切变为低层大气垂直运动提供启动条件, 而夏季在低层不稳定层结 ( $-\partial\theta_e/\partial p < 0$ ) 条件下, 在很小的扰动下也很容易产生上升运动, 夏季边界层内的不稳定位势层结为热力对流的启动提供了很好的环境条件。对流层中层为湿中性层结 ( $-\partial\theta_e/\partial p \approx 0$ ), 高层为相对干稳定层结 ( $-\partial\theta_e/\partial p > 0$ ), 低层的辐合与正涡度量值均不大。在这样的层结条件下, 低层一旦有扰动, 上升运动就会得到发展。由于低层的不稳定层结厚度较浅薄, 上升运动到达中层时速度也不会太大, 在中层深厚的湿中性层结大气中, 上升气流基本不会受到阻力而继续惯性上升, 上升运动得以稳定维持, 并进一步得到发展。当上升运动到达上层进入稳定层结区时, 上升气流受到制约, 加之大气相对湿度降低, 上升运动逐渐减弱。此种大气层结分布条件下, 只要在低层有扰动和充足的水汽条件, 是很容易形成  $\beta$ -中尺度对流系统

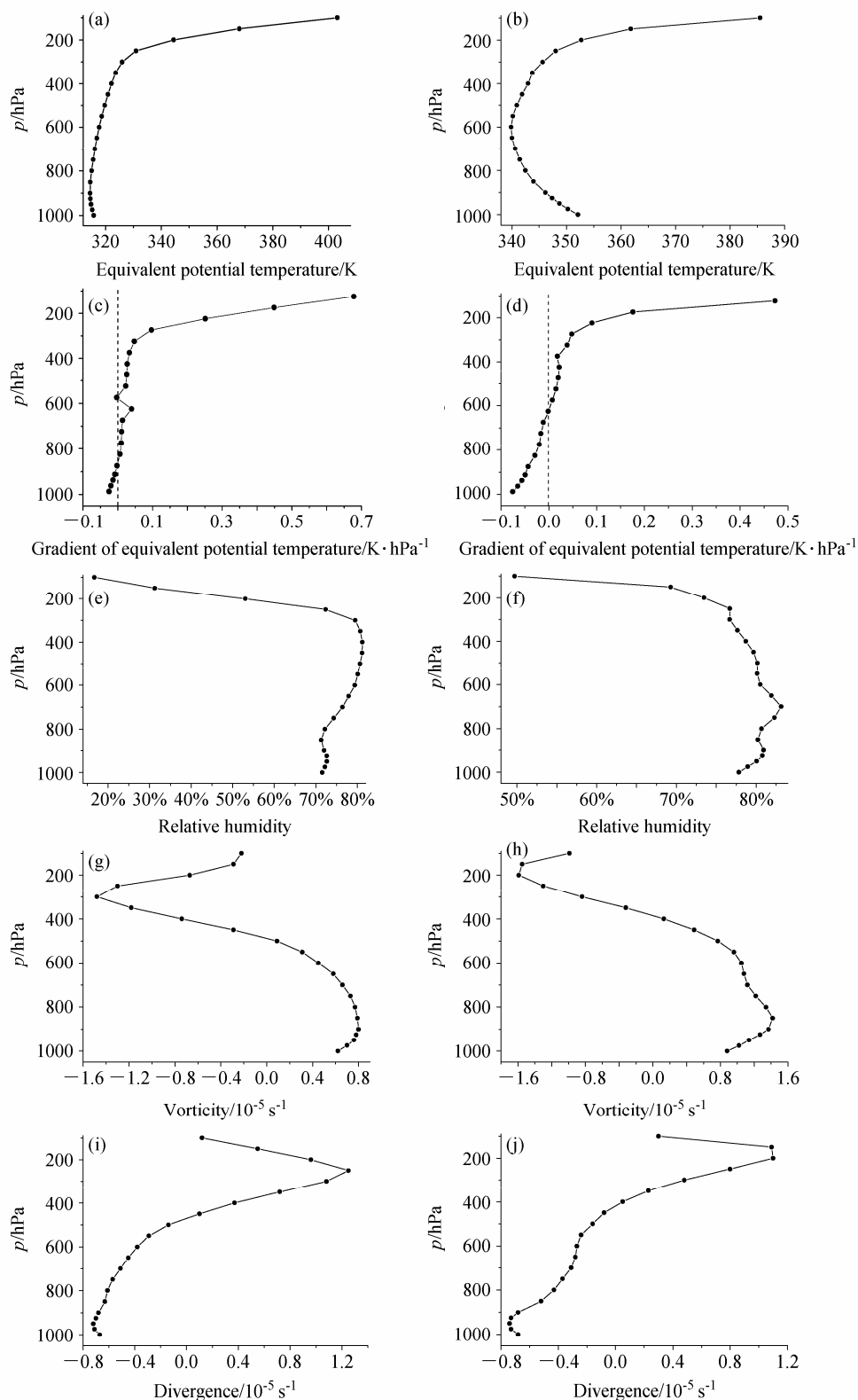


图 8 春季（左列）、夏季（右列）东亚地区 MCS 重心处（a、b）相当位温，（c、d）相当位温梯度，（e、f）相对湿度，（g、h）涡度，（i、j）散度平均垂直廓线

Fig. 8 The average vertical profiles at gravity center over East Asian MCSs for (a, b) equivalent potential temperature, (c, d) gradient of equivalent potential temperature, (e, f) relative humidity, (g, h) vorticity, and (i, j) divergence in spring (left panel) and summer (right panel)

的,这个统计结果与许焕斌和丁正平(1997)观测和数值试验的结果具有一致性。通过比较春、夏季大气层结条件的不同,也不难发现,春季东亚地区 MCS 发生时中、低层均为湿中性层结结构,而夏季湿中性层结仅存在于对流层中层,低层是不稳定层结,并且夏季  $\theta_e$  明显高于春季,春季虽然没有夏季那么有利的低层不稳定层结,但春季在较强的随高度增大的垂直风切变扰动作用下依然能够使得 MCS 维持和发展。

CloudSat 卫星辅助资料 ECMWF 数据诊断发现,多个中尺度对流系统内部热力垂直剖面结构具有湿中性层结特征,进一步结合静止卫星追踪东亚地区长时期 MCS 的分布和 NCEP 再分析资料诊断 MCS 内部大气廓线,从大量的统计结果中同样也发现湿中性层结结构特征,表明了这种结构特征存在的普遍性和广泛性,由此得到本文的结论如下:

(1) 利用高分辨率的 CloudSat 卫星资料探测分析中尺度对流系统垂直剖面结构,进一步诊断分析发现 MCS 内部  $\theta_e$  剖面呈现鞍形分布和相对湿度呈现  $\Omega$  分布,从而在中层形成了湿中性层结结构,并且这种结构在 CloudSat “捕捉”到的 MCS 个例当中比较多见。

(2) 大量的个例分析和统计事实揭示了 MCS 发生时 MCS 内部大气对流层中层的大气湿中性层结结构特征,这种湿中性层结结构绝不仅是对流发展的结局,也不局限于热力作用,具有明确的动力含义,它与相应动力场的配合,成为 MCS 维持或进一步发展的条件。

(3) MCS 发生时的这种湿中性层结结构结合高分辨率数值模式预报结果,对于预报 MCS 以及 MCS 可能引起的暴雨具有启示意义。

**致谢** 本文用到的 GMS-5 云图资料来自北京大学物理学院大气科学系数据库;对李成才副教授和许焕斌研究员一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- Bryan G H, Fritsch M J. 2000. Moist absolute instability: The sixth static stability state [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (6): 1207-1230.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp.
- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Typhoon over West Pacific Ocean [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 491pp.
- Chen L S, Luo Z X. 1995. Effect of the interaction of different-scale vortices on the structure and motion of typhoons [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 12 (2): 207-214.
- 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2007. 暴雨中尺度涡旋系统发生发展的诊断 [J]. *暴雨灾害*, 26 (1): 29-34.
- Chen Zhongming, Min Wenbin, Cui Chunguang. 2007. Diagnostic analysis on the formation and development of meso-scale vortex systems [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 26 (1): 29-34.
- Correia J Jr, Arritt R W. 2008. Thermodynamic properties of mesoscale convective systems observed during BAMEX [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (11): 4242-4271.
- Davis C, Atkins N, Bartels D, et al. 2004. The bow echo and MCV experiment: Observations and opportunities [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (8): 1075-1093.
- Doswell C A III. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example [J]. *Wea. Forecasting*, 2 (1): 3-16.
- Dostalek J F, Weaver J F, Phillips G L. 2004. Aspects of a tornadic left-moving thunderstorm of 25 May 1999 [J]. *Wea. Forecasting*, 19 (3): 614-626.
- Dotzek N, Forster C. 2008. Use of the European Severe Weather Database to verify satellite-based storm detection or nowcasting [C]// *Proceedings of the 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. Darmstadt: Jason Arnold, 8pp.
- 冯伍虎, 程麟生, 程明虎. 2001. “96-8” 特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟 [J]. *气象学报*, 59 (3): 294-307.
- Feng Wuhu, Cheng Linsheng, Cheng Minghu. 2001. Nonhydrostatic numerical simulation for the “96-8” extraordinary heavy rainfall and the developing structure of mesoscale system [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (3): 294-307.
- Fritsch J M, Kane R J, Chelius C R. 1986. The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25 (10): 1333-1345.
- Johns R H, Doswell C A III. 1992. Severe local storms forecasting [J]. *Wea. Forecasting*, 7 (4): 588-612.
- 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件 [J]. *气象学报*, 63 (4): 431-442.
- Liu Yanju, Ding Yihui, Zhao Nan. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the south China Sea in 1998: I Analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 431-442.
- Maddox R A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (7): 1475-1493.
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 1998. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制 [J]. *大气科学*, 22 (2): 156-168.
- Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 1998. Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan Island topography on tropical cyclone unusual motion [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 22 (2): 156-168.
- Sanders F, Paine R J. 1975. The structure and thermodynamics of an intense

- mesoscale convective storm in Oklahoma [J]. *J. Atmos. Sci.*, 32(8): 1563–1579.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1771–1790.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年 6 月 20~24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析 [J]. *气象学报*, 62 (4): 423–438. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. Analysis on MCSs in Meiyu front during 20–24 June 2002 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 423–438.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 12–173. Tao Shiyan. 1980. *Torrential Rain in China [M] (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 12–173.
- Wetzel P J, Cotton W R, McAnelly R L. 1982. The dynamics structure of the mesoscale convective complex—Some case studies [C]// Preprints 12th Conf. Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society, 265–268.
- 许焕斌, 丁正平. 1997. 湿中性垂直运动条件和中- $\beta$  系统的形成 [J]. *气象学报*, 55 (5): 602–610. Xu Huanbin, Ding Zhengping. 1997. The neutral condition of moist vertical motion and the formation of meso- $\beta$  system [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 55 (5): 602–610.
- 张小玲, 陶诗言, 张庆云. 2002. 1998 年 7 月 20~21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- $\beta$  系统的发生发展分析 [J]. *应用气象学报*, 13 (4): 385–397. Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 2002. An analysis on development of meso- $\beta$  convective system along Meiyu front associated with flood in Wuhan in 20–21 July 1998 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (4): 385–397.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007 年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (6): 713–727.
- 郑永光, 陶祖钰, 王洪庆, 等. 2002. 黄海及周边地区  $\alpha$  中尺度对流系统发生的环境条件 [J]. *气象学报*, 60 (5): 613–618. Zheng Yongguang, Tao Zuyu, Wang Hongqing, et al. 2002. Environment of meso  $\alpha$ -scale convective system development in Yellow Sea region [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (5): 613–618.
- 郑永光, 张春喜, 陈炯, 等. 2007. 用 NCEP 资料分析华北暖季对流性天气的气候背景 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 43 (5): 600–608. Zheng Yongguang, Zhang Chunxi, Chen Jiong, et al. 2007. Climatic background of warm-season convective weather in North China based on the NCEP analysis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 43 (5): 600–608.
- 周斌, 王建捷. 2003. “0374” 大暴雨的初步诊断分析 [C]// 中国气象学会水位气象学委员会. 新世纪气象科技创新与大气科学发展. 北京: 气象出版社, 185–188. Zhou Bin, Wang Jianjie. 2003. The preliminary diagnose analysis of heavy rain on July 4 2003 [C]// Hydrologic Meteorology Committee of China Meteorological Association. Innovation of Meteorological Science and Technology and Development of Atmospheric Science in the New Century (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 185–188.