典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用

覃丹宇 方宗义 江吉喜

中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081 国家卫星气象中心,北京 100081

摘 要利用 GOES-9 红外云图和 NCEP/NCAR 1°×1°再分析资料,分析了 2003 年 6 月 29 日~7 月 12 日长江中 下游一次典型梅雨期间暴雨系统的云系成员及其相互作用。结果表明:(1)梅雨暴雨系统的云系成员主要有四 个,它们是梅雨锋云系、西风带短波槽云系、青藏高原东移扰动云系和季风云涌。这些云系成员都可以影响到梅 雨锋云系的形状和强度,对梅雨锋云系的建立或重建都起到重要的作用。(2)梅雨云系成员是相应的天气系统相 互作用的产物,副热带高压决定梅雨锋云系的位置,因此也决定了暴雨发生的区域。适当强度的高空槽可以诱生 梅雨气旋,产生锋面气旋暴雨。高原东移扰动云系如果受高原槽的引导可以移出高原,同时也诱生西南低涡并移 出四川盆地,高空槽和低涡共同作用造成了沿途暴雨。季风云涌在副高东退的情况下,就有可能北上和梅雨锋云 系连在一起。不同的云系成员和梅雨锋云系相互作用的结果形成不同的云系分布。

关键词 梅雨 卫星云图 云系成员

文章编号 1006 - 9895(2005)04 - 0578 - 09 中图分类号 P426 文献标识码 A

The Cloud Systems of Heavy Rainfall in the Typical Meiyu Period and Their Interactions

QIN Dan-Yu, FANG Zong-Yi, and JIANG Ji-Xi

Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The summer monsoon rainfall over East Asia is identified as Meiyu, and it usually lasts for 2 – 3 weeks in the mid – lower reaches of the Yangtze River during June and July. During the typical Meiyu period, it is found that heavy rainfall has close relations with activities of some weather systems, for instance, the four synoptic systems of the western Pacific subtropical anticyclone, the monsoon surges, the northerly cold air and the northeastern plateau trough. Synoptic studies demonstrate when these four main synoptic systems are in the stage of "phase lock" (which means their relative position, coverage and intensity are less change), the Meiyu frontal rain zone often maintains and heavy rainfall occurs. However, what kind of cloud systems are corresponding to the synoptic systems, and how they interact to affect the Meiyu heavy rainfall are still unclear.

The features of Meiyu cloud systems and their activities are studied in this paper. Base on satellite observation, the GOES-9 infrared images, Black Body Temperature (TBB) and the NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data are used to show the heavy rainfall cloud systems' formations, evolutions and interactions in the typical Meiyu period from 29 June to 12 July 2003.

Results show that the main cloud systems of heavy rainfall in the typical Meiyu period are (i) the Meiyu frontal

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040910

收稿日期 2005-03-28, 2005-07-21 收修定稿

作者简介 覃丹宇, 男, 1968年出生, 博士, 副研, 目前从事卫星气象研究。E-mail: dyqin@nsmc. cma. gov. cn

cloud system, (ii) the westerly short wave trough cloud system, (iii) the eastern Tibetan Plateau eastward-traveling disturbance and (iv) the monsoon cloud cluster, and their interactions are propitious to Meiyu frontal rainfall. The interactions among these four cloud systems are important for the Meiyu frontal cloud zone's construction/reconstruction to form a specific cloud pattern with corresponding intensity. Each cloud system relies on synoptic systems and their interactions, i. e., the subtropical high affects the position of the Meiyu cloud system, so the region of heavy rainfall is determined, and the westerly short wave and monsoon cloud cluster act on the Meiyu frontal cloud system resulting in different intense rainfall and orientations.

During the period of two weeks, the mid-level short wave trough cloud system induces a cyclone in the Meiyu front to produce heavy rainfall when it moves eastward, which depicts clearly a meso- α -scale vortical cloud cluster embedding in the belt-like synoptic Meiyu frontal cloud system.

Although many studies stress that the convective cloud systems seldom move eastward from the Tibetan Plateau, when leaded by the traveling short wave trough, the cloud system in the eastern Tibetan Plateau could move away, hence the low level south-west cyclone (SWC) from the Sichuan Basin follows, and SWC is known as heavy rainfall producer on the way in summer monsoon period.

The monsoon cloud clusters do not often go across the east foot of the Tibetan Plateau to the lower reaches of the Yangtze River basin, but they could touch the Meiyu cloud system with heavy rainfall accompanying whenever the subtropical high retreating eastward.

In fact, the typical Meiyu frontal cloud system lasts a few days with pattern's change and cloud growth/decay. The four cloud systems and their interactions are helpful for elongating from west to east narrow Meiyu frontal cloud system which produces heavy rainfall.

Key words Meiyu/Baiu, satellite image, cloud families

1 引言

对梅雨锋的研究可以根据其不同尺度从不同的 角度来进行,大到研究梅雨与东亚季风的关系^[1], 主要揭示季节变化,小到研究梅雨锋γ中尺度对流 系统的气流结构^[2],更多的则是关于梅雨锋天气学 研究,包括天气尺度^[3]、α中尺度和β中尺度系 统^[4~8]以及数值模拟^[9]。最近,Zhou 等^[10]研究了 梅雨锋系的结构,指出了梅雨锋和露点锋相伴的结 构特点。

上述研究描绘了梅雨锋的多尺度云系结构图像, 即梅雨锋长达数千公里的云系包含了α中尺度云系, 而α中尺度云系又是由β中尺度云系组成,在β中尺 度云系中又嵌套着γ中尺度云团。项续康等^[11]分析 了1991年江淮梅雨期第三段梅雨锋云系的特征,包 括梅雨锋云系的建立和重建过程,它的走向、分布特 征、日变化特征,以及它和其他云系之间的关系等, 指出梅雨锋云系的建立是来自高原东北部的华西盾 状云系和西南季风云系相互作用的结果。外围不同 性质云系之间的相互作用是导致梅雨锋云系强烈发 展,继而产生暴雨天气的重要原因之一。

事实上,典型梅雨期间梅雨锋云系维持的时间

较长,期间不断发生增强和减弱等变化,这些变化 大都和梅雨暴雨系统的主要成员有关,但是迄今为 止,我们并没有获得清晰的梅雨暴雨系统成员的图 像,特别是它们之间相互作用如何对梅雨暴雨系统 产生影响。Kozo 和 Yoshiaki^[12]研究了 1991 年的 梅雨锋云系成员结构,指出梅雨锋云带是由一些长 约 2000 km 的云系成员排列而成的,这些云系成员 又是由次天气尺度的云系和位于其尾部的一些 α 中 尺度云系构成, α 中尺度云系可持续 2 天左右, 根 据其对应的对流层中低层涡度强度可以进行分类。 可见,根据梅雨暴雨多有持续性和重复性的特点推 断,其系统成员包括了快变的暴雨云团和相对慢变 的锋面云系以及一些低纬和高纬的云系。在天气学 上,张顺利等^[13]首次正式提出了影响长江流域梅 雨锋降水的四个主要系统(环流因子)为副热带高 压、季风涌、北方冷空气和来自高原东北侧的β中 尺度的高原槽。当它们处于位相锁定的时候,其对 应的云系必然发生相互作用。

本节从卫星观测的事实出发,利用 NOAA 卫 星的红外云图和 NCEP/NCAR 1°×1°再分析资料, 分析了 2003 年 6 月 29 日至 7 月 12 日的梅雨降雨 过程,试图获得梅雨锋暴雨的云系成员及其相互作

(a)

 20°

80°E

(b)

20°N

30°

90°E

100°E

50°N

40°N

30°N

用和影响天气系统的物理图像,以便更好地认识和 理解梅雨锋暴雨系统。

2 过程概况

2003年6月29日~7月4日,淮河流域出现 持续暴雨到大暴雨天气过程,造成王家坝7月3日 凌晨在1991年淮河大水之后12年以来再次开闸泄 洪。7月5~7日,淮河及沿淮地区雨势减弱,雨区 南压。湖北东部、江淮地区、江南北部先后出现了 大到暴雨、局地特大暴雨天气。7月7~11日,湖 南西北部、湖北中东部、安徽江苏两省的中部和沿 淮地区又出现了持续至少两天的暴雨、局地大暴雨 天气^[14]。本文主要研究6月29日~7月12日的梅 雨锋云系及其环境场特征。

沿 117°E 作黑体温度 $T_{\rm BB}$ 的纬度-时间剖面图 (图略),从 6月 29 日到 7月 12 日的这段时间里, 可以看到三个分离的主要云系活动区域:梅雨锋云 带(30°N~35°N)、热带辐合带(The Intertropical Convergence Zone,简称 ITCZ)云带(0°~15°N) 和中高纬度西风带云系(40°N~60°N)。在此期间, 副热带高压稳定少变,梅雨锋云带和 ITCZ 云带之 间为晴空少云区域;梅雨锋云系里对流活跃,中高 纬度有三次影响过程,时间间隔 1~3 天不等。从 这一时段 11 天平均的 $T_{\rm BB}$ 图(图略)上还可以清楚 地看到一条梅雨锋云带,从日本中南部向西沿着长 江流域到青藏高原东部,并且和高原上的云系以及 孟加拉湾的云系连在一起。

图 1 是 6 月 29 日~7 月 12 日 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 的 11 天平均高度场。200 hPa 平均 高度图 (图 1a)上,南亚高压从高原向东延伸至我 国东海,其北侧维持有一条西风急流,梅雨锋云带 位于南亚高压北缘的反气旋环流里、西风急流的南 侧。在 500 hPa 平均高度图 (图 1b)上,副热带高 压稳定控制我国东南部,脊线在 22°N 左右,588 线 西端位于 110°E 附近;在 (55°N,122°E)附近有一 个切断低压,中纬度 30°N~45°N 是较平直的西风 气流,阿尔泰山一带为一个弱的脊区;副高北部边 缘的急流和梅雨锋云系东段的位置基本重合。 850 hPa平均高度图 (图 1c)上,梅雨锋云带南侧维 持有一条西南风急流。

因此, 6月 29日~7月 12日是典型的梅雨天 气形势, 副热带高压位置稳定, 中纬度多短波槽活



动,一条准东西向的切变线稳定维持在江淮地区, 切变线南侧有西南风急流,高空盛行反气旋辐散气 流。到7月12日,副热带高压进一步加强北抬,江 淮切变线减弱消失,梅雨结束。

3 梅雨锋暴雨系统的云系成员

图 2 是 FY-2B 卫星 2003 年 7 月 2 日 0030

140°E

130°E

120°E

110°E

UTC 的红外云图,可以看到梅雨锋云系是一条长 达数千公里,位于 30°N~35°N 之间,由层状云、卷 云和对流云混合组成的云带(图 2 中 A - B - C 云 系)。这条云带虽然相连,但是云的发展并不均匀, 其中包含有次天气尺度逗点状云系 C、 α 中尺度对 流云团 A 和 B,以及 A 和 B 之间的部分 β 中尺度对 流云团。云团 B 的北面与中纬度短波槽云系 T 相 连,表明 B 的发生发展可能与中纬度短波槽云系和 梅雨锋云系相互作用有关。云团 A 在梅雨锋云系 的最西端,和孟加拉湾北上的季风云涌 S 相连,体 现了它们之间存在密切关系。

此外,在7月7~8日期间,有云系从高原东部 移出并影响了整个梅雨锋云系。高原云系的移出虽 然也与西风带东移的槽线有关(图略),但是仍有 必要将其与中纬度短波槽云系区分开来,原因是高 原上的对流云一般不移出高原^[15],一旦移出,对梅 雨锋云系的重建和加强具有重要的作用。另外,常 规观测时间间隔较长,期间不太容易分析高空槽从 高原东移出来,而且它对梅雨锋云系的影响方式与 一般的北方东移短波槽的影响也有所不同,这些都 将在下文进行详细分析。

由此可见,构成梅雨系统的主要云系成员是: 梅雨锋云系、中纬度短波槽云系、季风云涌和青藏 高原东移出来的扰动云系。

3.1 梅雨锋云系随时间的变化

将 T_{BB}进行日平均,以此研究梅雨锋云系随时间的建立和重建过程,其中 T_{BB}≪-32℃的区域表示较长生命史的对流云活动。

从 6 月 29 日到 7 月 4 日这段时间里, 副高强 大而稳定,588 线西端可西伸到 110°E 以西,脊线 在 20°N 附近, 江南地区完全被副高所控制。与此 同时,副高北侧边缘的梅雨锋云系比较完整,成东 西向分布在 30°N~35°N 纬度带,并且不断有中纬 度短波槽云系自西向东在梅雨锋云系北侧移过。两 种云系相互作用的结果是,在梅雨锋云系内发展出 逗点状的次天气尺度锋面气旋云系,对流活动也因 此变得活跃起来(图 3a)。7月5~7日,副高减弱 东退,588 线基本退居海上。在高空槽的影响下, 梅雨锋云系变成倾斜的东北-西南向分布,东段偏 离到 35°N 以北, 西段中国大陆上的云系活动仍然 很清楚,主要是来自孟加拉湾的季风云涌沿着副高 边缘北上,而江淮地区有将近一天时间的云系活动 中断期(图 3b)。7月8~9日,副高又开始加强西 伸,高原槽东移,引导青藏高原东部云系移出高 原。在此过程当中西南低涡形成,并随着高原移出 云系继续向东离开四川盆地,造成沿途云系不断发 展,其中的中尺度对流系统也不断发生发展,最后 新生的云系和中纬度短波槽云系合并,完成了梅雨



图 2 2003 年 7 月 2 日 0030 UTC 典型梅雨期的 FY-2 卫星红外云图 Fig. 2 The infrared image of the typical Meiyu from the FY-2 satellite at 0030 UTC 2 Jul 2003



图 3 2003 年 7 月日平均 T_{BB} (阴影)及同日 500 hPa 高度场 (0000 UTC) 叠加图: (a) 1 日; (b) 6 日; (c) 8 日

Fig. 3 Daily mean black body temperature $T_{\rm BB}$ (shaded) and superposition of the 500 hPa geopotential height at 0000 UTC on (a) 1 Jul, (b) 6 Jul, (c) 8 Jul 2003

锋云系的重建,并导致长江全流域的强降雨(图 3c)。由此可见,副高的位置和强度决定了梅雨锋 云系的位置,梅雨锋云系一般位于副高北侧边 缘。

3.2 中纬度短波槽云系对梅雨锋云系的影响

通过 NCEP/NCAR 再分析资料显示的 500 hPa 高度场和风场可以知道,在6月29日~7月9

日期间,(35°N~50°N,105°E~130°E)之间先后 有三个短波槽东移。选取其中7月1~2日的过程 进行分析,研究中纬度短波槽云系对梅雨锋云系的 影响。

在 500 hPa 高空图上, 7 月 1 日有一个弱脊东 移影响华北地区, 副高 588 等值线位于 30°N (图 4a); 925 hPa 流线和风场显示了从四川盆地经江淮 地区向东到日本南部维持有一条切变线,梅雨锋云 系沿着切变线呈东西向分布, 云系密实, 内有中尺 度对流系统活动(图4b)。2日0000 UTC, 一个短 波槽随着东移的弱脊进入到 111°E 附近区域, 槽前 短波槽云系位于111°E~122°E区域,同时与30°N ~35°N的梅雨锋云系相连并相互作用(图4c),结 果是在它们相交的地方云系得以发展,中尺度对流 系统更加活跃,梅雨锋云系由带状变成了Ω状。从 动力的角度来看,500 hPa 短波槽前的正涡度叠加 在低层切变线上, 诱生了梅雨气旋。在 925 hPa 流 线图上可以清楚看到这种锋面气旋结构,中尺度对 流系统位于气旋环流的东部(图 4d),正涡度中心 和气旋环流中心并不重合,而是偏向其东部(图 略),表明气旋还在继续发展。2日12UTC,短波 槽东移到了123°E附近,北端移动慢南端移动快, 槽线由竖转横,并逐渐减弱;槽后西偏北气流南下 到 34°N, 副高 588 线稍有北抬到 32°N 一带 (图 4e)。随着梅雨气旋的不断发展,梅雨锋云系已转 变成具有锋面气旋特征的逗点云系(图 4e)。其特 征为:(1)一个头部 H,即云团中较宽的部分,通 常在冷侧伴有凸的边界;(2)一个尾部 E,即云中 尖而窄的部分,在其后部具有凹的边界;(3)一个 尖点 T 将冷空气一侧云边界的凹区和凸区分开, 下 一阶段它将发展成钩形^[16]。此时,正涡度中心略 偏东,和气旋环流中心仍不重合,6小时后两个中 心基本重合, 气旋发展到鼎盛然后逐渐减弱消亡。 梅雨气旋在其生命史期间不断有 β 中尺度云团在云 系当中发生发展,这些云团生命史大约4~6小时, 主要发生在梅雨气旋环流的东部或南部具有较强的 正涡度带中(图略)。

3.3 青藏高原东移扰动云系对梅雨锋云系的影响

张顺利等^[13]研究发现,青藏高原对流区中有 东、西两个独立的对流中心,东边的对流中心位于 高原东部(30°N,101°E),西边的中心位于高原中 部(31°N,93°E)。高原中尺度对流云团有明显的



图 4 2003 年 7 月短波槽云系和梅雨锋云系相互作用: (a)、(b) 1 日 0000 UTC; (c)、(d) 2 日 0000 UTC; (e)、(f) 2 日 1200 UTC。(a)、 (c)、(e) 为 GOES-9 红外云图,其上叠加了 500 hPa NCEP 再分析高度(实线,间隔 4 dagpm)、温度(虚线,间隔 4℃)和风场; (b)、(d)、 (f) 为 925 hPa NCEP 再分析高度、温度和风场,字母 G 为高压中心,D 为低压中心,粗实线为主观分析的槽线或切变线 Fig. 4 The interaction of the short-wave trough cloud system and the Meiyu frontal cloud system: (a), (b) 0000 UTC 1 Jul; (c), (d) 0000 UTC 2 Jul; (e), (f) 1200 UTC 2 Jul 2003. (a), (c), (e) are GOES-9 infrared images, and geopotential height (solid line every 4 dagpm), isotherm (dashed line every 4℃) and wind at 500 hPa from NCEP reanalysis are superimposed; (b), (d), (f) are geopotential height (solid line every 4 dagpm), isotherm (dashed line every 4℃), and wind at 925 hPa from NCEP reanalysis. The capital G indicates the center of high, and D for low, while the bold solid lines are short-wave troughs, or wind shear lines from subjective analysis

日变化,午后对流云团开始发展,1200 UTC 左右 发展最旺盛,凌晨对流云团开始减弱,早晨 0000 UTC 左右消失或最弱。高原东移扰动云系可以东 传到长江中下游,高原α中尺度对流云团东传是通 过不断再生、发展向下游传播的。但是青藏高原的 中尺度对流系统却很少移出高原^[15]。

图 5 显示了 7 月 7~8 日一次高原东移扰动云 系和梅雨锋云系相互作用的过程。7 日 0000 UTC,



图 5 2003 年 7 月高原东移扰动云系和梅雨锋云系相互作用: (a)、(b) 7 日 0000 UTC; (c)、(d) 7 日 1800 UTC; (e)、(f) 8 日 0600 UTC。(b)、(d)、(f) 的阴影表示高原, 其他说明同图 4

Fig. 5 The interaction between the eastward-traveling disturbance cloud system in the Tibetan Plateau and the Meiyu frontal cloud system: (a), (b) 0000 UTC 7 Jul; (c), (d) 1800 UTC 7 Jul; (e), (f) 0600 UTC 8 Jul 2003. The shaded area in (b), (d), and (f) denotes the Tibetan Plateau, and the other explanation is the same as in Fig. 4

青藏高原东部有云系发展,对流活跃,但是云系都 没有移出高原,而长江中下游地区梅雨锋云系正在 消散(图 5a)。500 hPa上与对流旺盛的区域相对 应的是一个弱扰动,伴有中心值达 6×10⁵ s⁻¹的正 涡度中心(图略)。此时,在(50°N~55°N,120°E ~130°E)有一高空冷涡发展,与之相连的高空槽 也在加强并向东南方向移动。在 850 hPa上,四川 盆地到淮河流域维持有一条弱的切变线,一个变性 小高压的反气旋环流位于河南境内(图5b)。随着 高空槽不断加强和南下,到1800 UTC 其底部已经 与青藏高原的扰动相连,高原东移扰动云系在槽前 偏南气流的引导下开始东移,四川盆地有中尺度对 流系统强烈发展(图5c),西南涡已生成(图5d)。 随后,高空槽缓慢东移,青藏高原东移扰动云系逐





渐转变成新的锋面云系,它轮廓清晰,冷侧边界平 滑,呈小振幅S状,一系列中尺度对流系统在高空 槽前和850hPa切变线附近生成和发展(图5e)。 西南涡东移到了鄂豫交界附近(图5f)。最后,高 空槽云系北段向东北方向移动,逐渐进入西风带, 而南段留在我国大陆上,完成了梅雨锋云系的重建 过程。高空槽的影响使弱冷空气得以南下,与副高 北部的西南暖湿气流在江淮地区交汇,加强了该地 东西向切变线,梅雨锋云系也因此得到发展。

可见,在高空槽的引导下,青藏高原东移扰动 云系可以移出高原,诱生西南涡并且移出四川盆 地,从而在东移过程中造成沿途暴雨天气。

3.4 季风云涌对梅雨锋云系的影响

活跃的季风云涌表明孟加拉湾和南海是一个充 沛的水汽源地,通过西南风将暖湿气流源源不断向 长江中下游地区输送,而这支西南风的存在是梅雨 锋云系建立和维持的重要组成部分。从图 2 中已经 看到,在梅雨锋云系稳定维持期间同时也是季风云 涌比较活跃的时期,梅雨锋云系西端和季风云涌密 切相连。图 6 显示了 7 月 5~6 日一次季风云涌和 梅雨锋云系相互作用的过程。5 日 1200 UTC 在高 空槽的影响下,梅雨锋云系逐渐转成东北西南向, 云系的西端与季风云涌开始相连(图 6a),6 小时 后,在季风云涌与梅雨锋云系尾部交汇处生成α中 尺度云团。但是由于高空槽较强,南下冷空气使云 带南移。到了 6 日 1200 UTC,副高东退,季风云 涌得以越过云贵高原进入华南西部,并且和高空槽 前的梅雨锋云系连在一起(图 6b)。但是,在高空 槽和随后加强西伸的副高共同作用下,梅雨锋云系 很快被分割成两部分,北部云系随高空槽继续向东 北方向移动并逐渐减弱消散,而季风云涌则退居青 藏高原南麓。

4 小结

通过分析 2003 年 6 月 29 日~7 月 9 日梅雨系 统的云系成员及其相互作用过程,得到以下结论:

(1)梅雨暴雨系统的云系成员主要有四个,它 们是:梅雨锋云系、西风带短波槽云系、青藏高原 东移扰动云系和季风云涌。这些云系成员都可以影 响梅雨锋云系的形状和强度,对梅雨锋云系的建立 或重建起到重要的作用。青藏高原东移扰动云系和 西风带短波槽云系并没有本质的差别,之所以将其 单列出来,是因为有时候在天气图上并没有很清楚 的槽线与它相对应。

(2) 梅雨云系成员是相应的天气系统相互作用 的产物,副热带高压决定梅雨锋云系的位置,因此 也决定了暴雨发生的区域。适当强度的高空槽可以 诱生梅雨气旋,产生锋面气旋暴雨。高原东移扰动 云系如果受高原槽的引导可以移出高原,同时也诱 生西南低涡并移出四川盆地,高空槽和低涡共同作 用造成了沿途暴雨。季风云涌在副高东退的情况 下,就有可能北上和梅雨锋云系连在一起。

(3)不同的云系成员和梅雨锋云系相互作用的 结果形成不同的云系分布,仪清菊等^[17]按云带和 水汽输送带的走向将其分成3种类型,即纬向型、 西南型和混合型。可见本研究的个例特征反映了较 普遍的情况,即西风带短波槽云系和梅雨锋云系的 相互作用属于纬向型,青藏高原东移扰动云系和梅 雨锋云系的相互作用属于西南型,而季风云涌和梅 雨锋云系的相互作用属于西南型,而季风云涌和梅

参考文献 (References)

- [1] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asia summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60~92
- [2] Shibagaki Y, Yamanaka M D, Shimizu S, et al. Meso-beta to -gamma-scale wind circulations associated with precipitating clouds near Baiu front observed by the MU and meteorological radars. J. Meteor. Soc. Japan, 2000, 78, 69~91
- [3] 斯公望. 论东亚梅雨锋的大尺度环流及其次天气尺度扰动.
 气象学报,1989,47 (3):312~323
 Si Gongwang. On the large-scale circulation of Mei-Yu system over East Asia. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1989,47 (3):312~323
- [4] 李玉兰,陶诗言,杜长萱. 梅雨锋上中尺度对流云团的分析. 应用气象学报,1993,4(3):278~285
 Li Yulan, Tao Shiyan, Du Changxuan. An analysis of the meso-convective cloud clusters in Mei-yu front. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1993,4(3): 278~285
- [5] 项续康,马岚,王大昌. 1991 年梅雨锋云系的中尺度分析. 应用气象学报,1993,4(3):286~292
 Xiang Xukang, Ma Lan, Wang Dachang. The mesoscale analysis of the Mei-Yu front cloud system in 1991. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1993,4(3): 286~292
- [6] 马群飞,赵思雄.台湾地区中尺度试验期间梅雨锋及其对流 云图的研究.大气科学,1993,17(2):172~184
 Ma Qunfei, Zhao Sixiong. A study of Meiyu (Baiu) front and convective cloud clusters during TAMEX. *Chinese Journal* of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1993, 17 (2): 172~184
- [7] Ninomiya K. Large- and meso-α-scale characteristics of Meiyu/Baiu front associated with intense rainfalls in 1 - 10 July 1991. J. Meteor. Soc. Japan, 2000, 78: 141~157
- [8] 张小玲,陶诗言,张顺利. 梅雨锋上的三类暴雨. 大气科学, 2004, 28 (2): 187~205
 Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Shunli. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28 (2): 187~205
- [9] 隆霄,程麟生. "99·6"梅雨锋暴雨低涡切变线的数值模拟

和分析. 大气科学, 2004, 28 (3): 342~356

Long Xiao, Cheng Linsheng. Numerical simulation and analysis for "99 \cdot 6" Meiyu front rainstorm and the low vortex with shear line. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 342~356

- Zhou Yushu, Gao Shouting, Shen Samnel S P. A diagnostic study of formation and structures of the Meiyu front system over East Asia. J. Meteor. Soc. Japan, 2004, 82 (6): 1565~1576
- [11] 项续康,马岚,王大昌. 1991 年梅雨锋云系分析. 应用气象 学报,1994,5(3):326~332
 Xiang Xukang, Ma Lan, Wang Dachang. The analysis of Meiyu front cloud system in 1991. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1994, 5(3):326~332
- [12] Ninomiya K, Shibagaki Y. Cloud system families in the Meiyu-Baiu front observed during 1-10 July 1991. J. Meteor. Soc. Japan, 2003, 81: 193~209
- [13] 张顺利,陶诗言,张庆云,等.长江中下游致洪暴雨的多尺度条件.科学通报,2002,47(6):467~473
 Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. Large and meso-α scale characteristics of intense rainfall in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(9):779~786
- [14] 董林. 淮河流域暴雨致洪南方地区高温罕见——2003 年 7
 月. 气象, 2003, 29 (10): 58~61
 Dong Lin. July 2003—Frequent heavy rain and flood in the Huaihe valley. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 29 (10): 58~61
- [15] 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. 应用气象学报,1996,7 (4):473~478 Jiang Jixi, Xiang Xukang, Fan Meizhu. The spatial and temporal distributions of severe convective system on Tibetan Plateau in summer. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1996, 7 (4):473~478
- [16] 巴德 M J, 福布斯 G S, 格兰特 J R, 等. 卫星与雷达图像在 天气预报中的应用. 卢乃锰, 冉茂农, 刘建等译. 北京: 科学 出版社, 1998. 382pp
 Bader M J, Forbes G S, Grant J R, et al. *Images in Weather Forecasting: A Practical Guide for Interpreting Satellite and Radar Imagery* (in Chinese). Lu Naimeng, Ran maonong, Liu Jian, et al. Translated. Beijing: Science Press, 1998. 382pp
- [17] 仪清菊,徐祥德.不同尺度云团系统上下游的传播与 1998年 长江流域大暴雨. 气候与环境研究, 2001, 6 (2): 139~145
 Yi Qingju, Xu Xiangde. The propagation and development of cloud cluster systems and severe precipitation event in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, 6 (2): 139~145