

孙建华. 2008年6月广东沿海一次对流线的演变与结构特征[J].暴雨灾害,2012,31(3):201-209

SUN Jianhua. Evolution and structure of a convection line over coastal region of South China in June 2008 [J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(3): 201-209

2008年6月广东沿海一次对流线的演变与结构特征

孙建华

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要:利用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、FY-2C TBB资料、多普勒雷达资料、自动气象站观测资料以及常规气象观测资料,对2008年6月16—17日广东沿海对流线造成的暴雨过程进行观测资料分析与模拟研究。结果表明,该对流线发生在南海北部,然后向北移动,在到达海岸线附近时开始加强,最强降水区位于地面辐合线南侧;对流线在海岸线附近的加强过程,是由于“海岸锋”的作用使辐合加强所致;海岸锋形成的辐合由其南侧的西南风与北侧的偏东风造成;数值模拟再现了对流线到达沿海增强、北移到大陆上后减弱的过程,辐合线到达海岸线附近时最强,从而增强了对流线上的上升运动和对流,使对流可发展到对流层中上层。

关键词:对流线;暴雨;海岸锋;数值模拟

中图分类号: P458.1*21.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-9045(2012)03-0201-09

Evolution and structure of a convection line over coastal region of South China in June 2008

SUN Jianhua

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, FY-2C TBB data, Doppllar radar data, automatic weather station data and conventional observational data were utilized to study a heavy rain process associated with convection line over Guangdong province on 16-17 June 2008 by using the observation data analyses and simulation. The results indicate that the convection line occurred over northern South China Sea, moved northwards, and it began to intensify while it approached the coastline of Guangdong province. The heavy rainfall occurred to the south of convection line. The intensification of convection line close to coastline was the result of convergence enhanced by the coastal front. The hourly surface wind analysis indicated that convergence line was formed between southwesterlies to the south of the coastal front and easterlies to the north of the coastal front. The numerical simulation reproduced the process showing that convection line was strengthened when it got to in-shore and weakened when it moved northwards to the continent, and convergence line reached the highest intensity when it approached coastline, thus upward motion and convection along the convection line were enhanced making convection extend up to middle-upper troposphere.

Key words: convection line; heavy rainfall; coastal front; numerical simulation

0 引言

华南前汛期降水是我国夏季雨季的开始^[1]。为进一步了解华南前汛期暴雨特征及成因,我国于1977—1979年开展了第一次“华南前汛期暴雨试验”,1998年再次开展华南前汛期暴雨试验(海峡两岸及其邻近地区暴雨试验研究,简称HUAMEX),获取了一批高时空分辨率外场观测试验资料;有专家学者利用这些资料

揭示中尺度系统演变特征,取得较大进展^[2-4]。1987年开展的台湾地区中尺度试验(TAMEX)也取得一些研究成果^[5]。然而,上述结果对更深入了解我国暴雨的 β 中尺度系统的特点仍显不够。自20世纪90年代以来,如1994年、1998年及2005年西江流域均出现强降水并引发大洪水,曾严重威胁到下游地区珠江三角洲人民群众生命财产安全;针对上述强降水过程,国内不少学者开展了一系列研究^[6-13],其主要针对的是锋前暖

收稿日期: 2012-05-02;定稿日期: 2012-07-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41075032);中国气象局公益类行业专项(GYHY200906004)

作者简介: 孙建华,主要从事中尺度气象学研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

区暴雨。如夏茹娣等^[13]对2005年6月广东(粤中)地区特大持续性暴雨的 β 中尺度系统进行了研究,指出广东地面辐合线上的扰动以及地面较强的温湿对比区的热力作用对 β 中尺度系统的触发可能有重要影响。2008年中国气象局组织开展了我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX),针对观测试验个例,已有人做了若干研究工作,如傅慎明等^[14]、曹芳等^[15]对2008年6月中旬一次暴雨过程的中尺度特征进行了研究。国内针对对流线的研究,以往主要集中于飑线过程^[16-18]。早在1982年,丁一汇等^[16]在统计18个飑线个例的基础上指出,冷锋、切变线、低涡、高空急流、露点锋和低空风场不连续线等均可对飑线起触发和组织作用。近年来,由于各种高时空分辨率观测资料的较易获得,对飑线和一般对流线系统发生环境条件与结构特征的研究,也取得了一些成果^[19-21]。

本文研究了2008年我国南方暴雨野外试验的一次对流在海岸线附近增强的过程,对流系统为线状分布。线状对流的加强可能与海岸锋现象有关。在对有关华南沿海发生的对流系统的研究中,李建辉等^[22]发现,静止锋(或冷锋)尚远离海岸时,华南沿海就存在一条回波带,它与海岸线平行,长500~1000 km,一般午夜生成,清晨最强,中午消失,每天维持10 h左右;并认为这是一种“海岸锋”现象。海岸锋的概念最早于1972年由Bosart等^[23]提出,他们认为表面摩擦力、地形、海-陆温度差异、潜热释放以及新英格兰的地理位置都是锋生的重要影响因子。此后,Bosart^[24]研究指出,在这种边界层的锋现象中,内陆偏北气流和海洋

偏东气流之间的不同摩擦力沿海岸线产生的变形和辐合场导致在不均匀热力层结中产生锋生。Ballentine^[25]利用数值模拟研究新英格兰的海岸锋生指出,海岸锋仅能发生在浅薄的高度内,这种海岸锋生的物理过程主要由表面摩擦力、海洋热通量和潜热释放的共同作用造成,而海洋热通量的影响最为显著。然而,我国海岸锋的研究主要集中在冬季系统,对夏季系统研究较少,尤其是针对华南汛期暴雨中的对流线的研究尚少。因此,本文通过对2008年6月16—17日发生在华南沿海的一次对流线过程的诊断分析与模拟研究,期望更好地了解引发强降水的对流线的结构特征,为对流线造成的暴雨天气提供预报依据。本文所用资料包括美国国家气候环境预测中心(NCEP)的再分析资料(分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)、FY-2C黑体亮度温度(Temperature of Brightness Blackbody, TBB)资料(分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$)、广州新一代多普勒雷达资料、广东自动站观测资料(风、温度、湿度)以及常规气象观测资料。

1 环流背景分析

2008年6月16—18日,华南地区发生一次持续性强降水过程(图略)。6月16日华南大部、江南北部出现暴雨,其中华南暴雨中心在广西西部和广东东南沿海。17日长江雨带南下,在华南形成西南—东北向大尺度雨带(图1),其中16日12UTC—18UTC的降水中心在广西北部部和广东中部,而16日18UTC—17日06UTC福建和广东沿海地区出现暴雨中心。18日降水减弱,但仍在广西东部、广东和江南部分地区产生强降水。

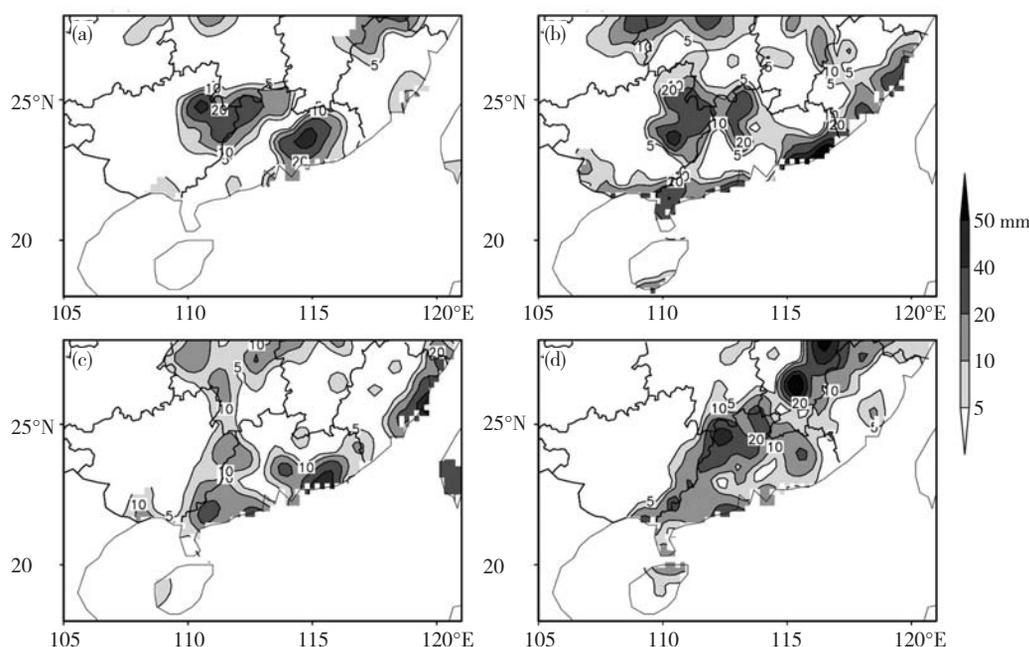


图1 2008年6月16日12—18UTC (a)、16日18UTC—17日00UTC (b)、17日00—06UTC (c)、17日06—12UTC (d)华南地区6 h降水量分布(单位: mm)

本文将集中分析16日夜间到17日早晨广东沿海部分地区发生的大暴雨过程。

华南前汛期暴雨大多为锋前暖区暴雨^[4, 12], 涡旋、切变线等系统不如江淮流域梅雨期暴雨清楚, 但本次过程中华南地区出现涡旋和切变线系统, 该过程之前的6月12—14日广西强降水个例也由低涡切变线造成^[14, 26]。因此, 从大尺度环流特征演变对本次过程简单分析如下: 500 hPa环流形势场上, 中纬度地区有一低槽自西向东移动(图2)。

16日在贝加尔湖和江淮流域有阶梯槽存在(图2a、b), 17日贝加尔湖的槽减弱北移, 而江淮流域低槽略向东南移, 冷空气南下到江南和华南地区(图2c、d)。6月16—17日副热带高压(以下简称副高)表现为逐渐西伸的过程, 其西侧的低空急流明显加强, 但19日前, 副高位于西太平洋上, 有利于冷空气南下到华南地区(图略)。此次过程中200 hPa急流带一直位于30°N以北, 对华南地区降水影响不大。850 hPa低空西南急流较强, 且华南沿海正好位于对流线北侧的辐合区。

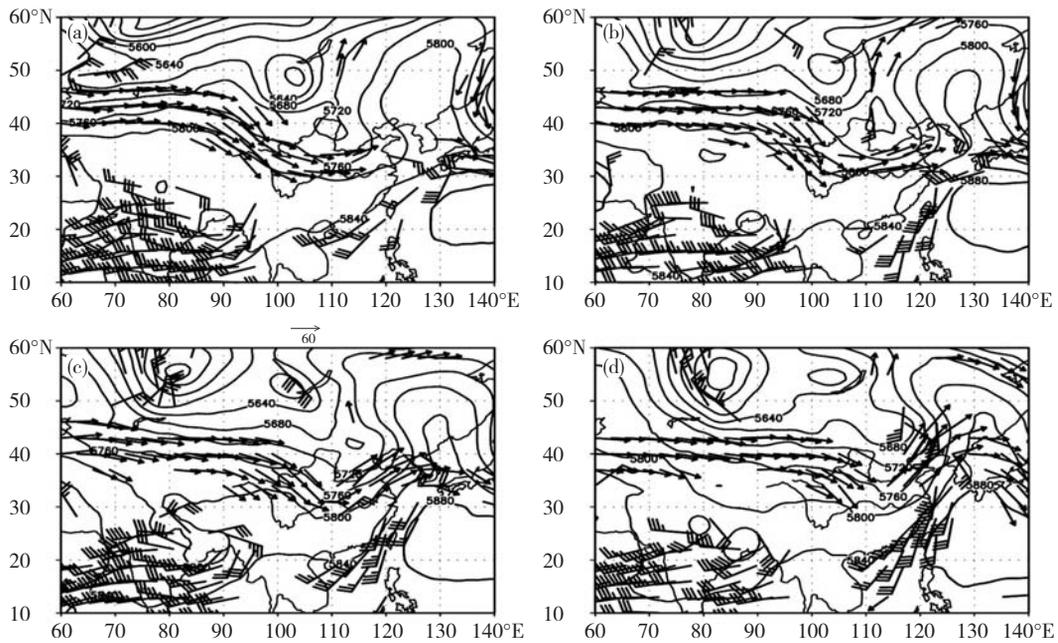


图2 2008年6月16日00UTC (a)、16日12UTC (b)、17日00UTC (c)、17日12UTC (d) 500 hPa高度场(单位: gpm)、200 hPa急流(箭头, 风速 > 30 m·s⁻¹)与850 hPa低空急流(风向杆, 风速 > 12 m·s⁻¹)叠加图

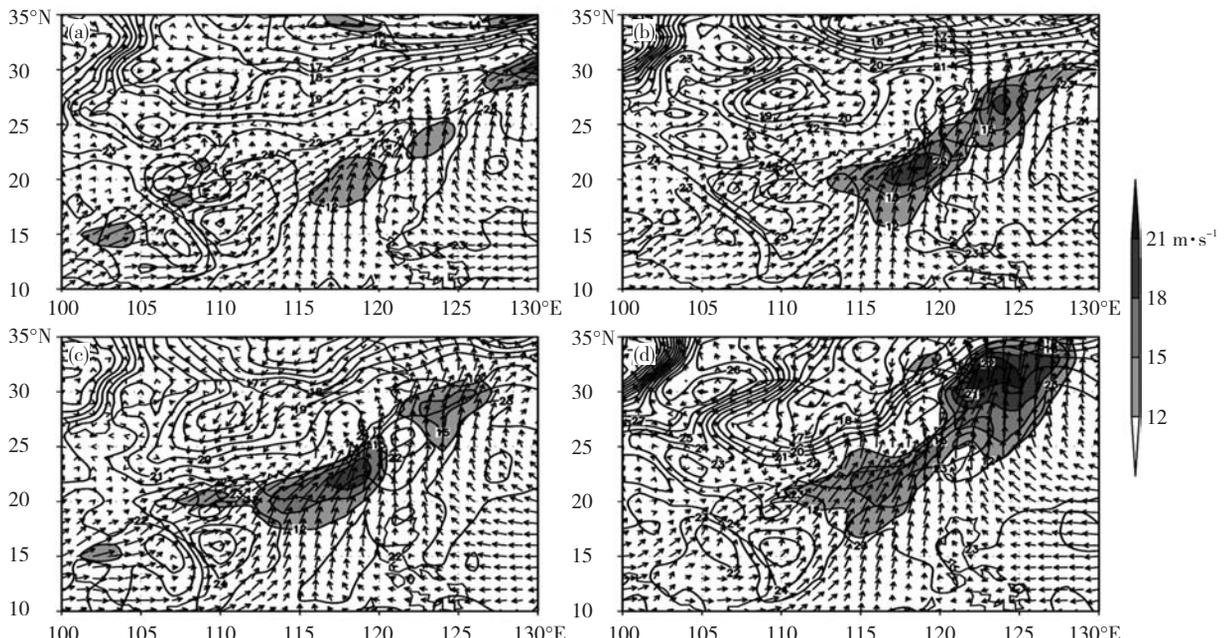


图3 2008年6月16日00UTC (a)、12UTC (b)以及17日00UTC (c)、12UTC (d) 850 hPa温度场(单位: °C)与风场(单位: m·s⁻¹)叠加图(阴影区风速大于12 m·s⁻¹)

850 hPa 图上,低涡在 15 日晚上南移到广西(图略),造成广西地区强降水,当日副高西北侧形成较强低空西南急流,由于副高位置偏东,急流带位于西太平洋上,急流中心强度达 $18 \sim 21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此 15 日降水主要由低涡造成,与低空急流联系不紧密。16 日,低涡位于两广地区,同时位于西太平洋上的低空急流带向北移,广东沿海地区正好处于急流带北侧的辐合区(图 3a,b),可见 16 日暴雨中心(图 1)分别与低涡和急流带有关。16 日 12 时,低空急流带进一步北移到我国东南沿海(图 3b),17 日低涡在急流带北侧迅速发展,同时急流带北侧形成一东北—西南向、尺度 1 000 km 左右的低涡(图 3c、d),华南地区产生大范围暴雨。18 日,随急流和低涡减弱(图 3d),降水减弱。

综上所述可知,6 月 16—18 日降水过程有中低纬

系统配合,中纬度低槽使弱冷空气南下,强降水主要由低涡和切变线造成,华南地区产生持续性降水;但从 6 月 16 日晚上到 17 日白天发生在广东沿海的大暴雨不是由低涡切变直接造成,暴雨是在有利的环流背景条件下由海岸线附近形成的对流系统造成。对其具体的影响系统和形成原因在下文中讨论。

2 广东沿海对流线的发生发展过程

6 月 16 日 01UTC—07UTC 在广西东部有对流云活动,此系统与位于广西的低涡有关,造成广西东部强降水;16 日 07UTC 后,该云团东移影响粤东地区,此云系大约在 16 日 15UTC 减弱(图略)。16 日 12UTC,在南海北部靠近广东沿海地区有一对流线发展(图 4),该系统生成后向北移动,于 16 日 19UTC 移到海岸线附近

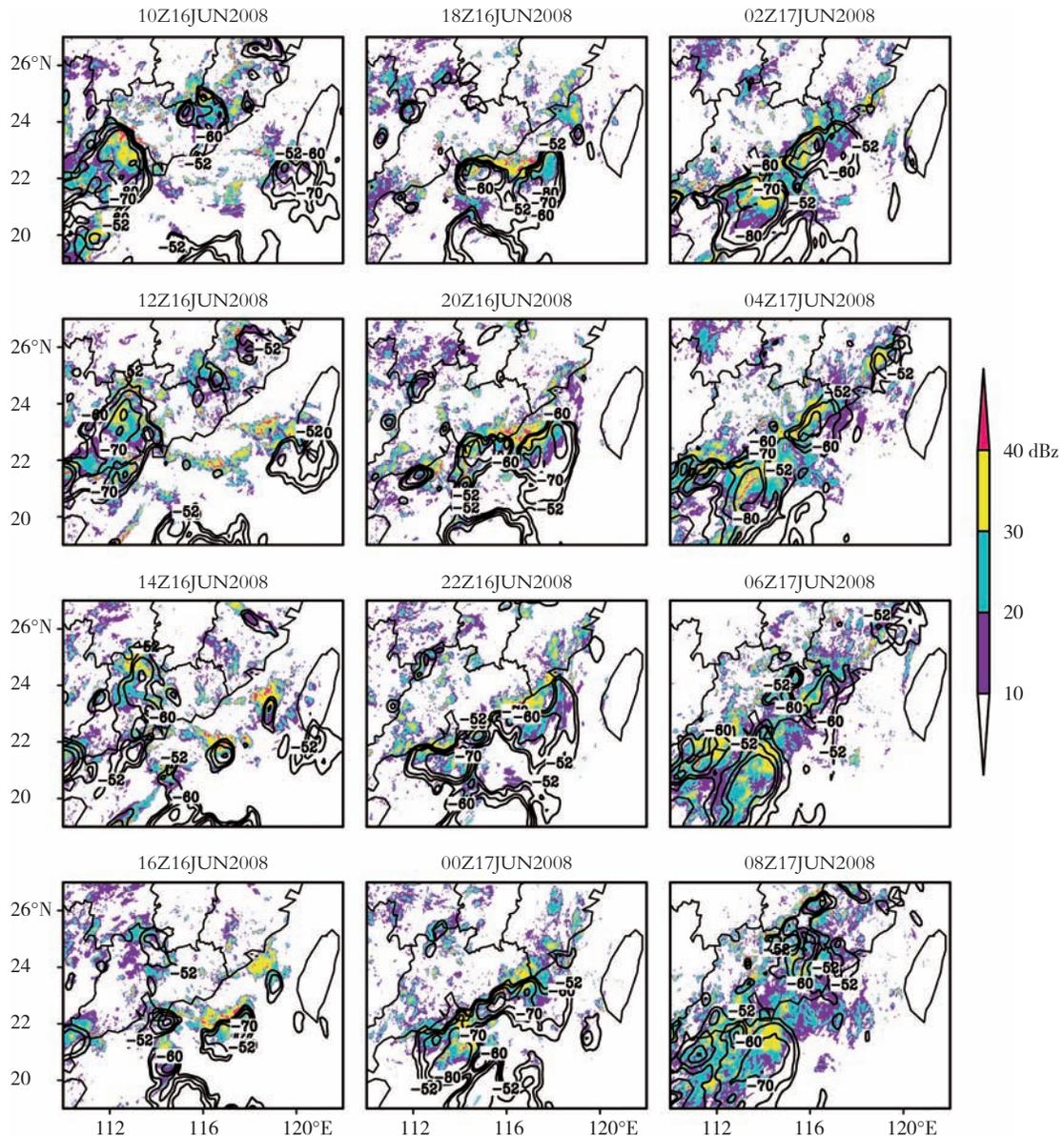


图 4 2008 年 6 月 16 日 10UTC—17 日 08UTC 不同时段雷达组合反射率因子(阴影,单位: dBz)与 FY-2C 卫星 TBB 分布(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

并开始加强。该对流线形成后,一直在海岸线附近活动,持续大约 10 h,到 17 日 07UTC 减弱。对比本文上节环流特征,该对流线云系发生在低空西南急流带北侧,但在到达海岸线附近时有一增强过程。因此,本文对 16 日晚上到 17 日的沿海暴雨过程作重点分析

图 4 给出 16 日 10UTC—17 日 08UTC 每间隔 2 h 的广州多普勒天气雷达组合反射率因子。从中可见,6 月 16 日 10UTC,在距离广东沿海 200 km 的南海北部有散乱的对流系统发展,到 12UTC 形成一长 300 km、宽 50 km 的对流线,此后该对流线向东西方向发展,宽度逐渐加大。18UTC,对流带发展到长 500 km、宽 100 km,其最强回波从对流带的中间移至北部,且对流带的西部已开始影响广东沿海地区。此后,整个对流带向北移动,20UTC 整条对流带开始影响广东沿海,在到达广东沿海时该对流线有一增强发展的过程,向东南和西北方向均有发展,给广东沿海造成较强降水(图 1、图 5)。17 日 06UTC 后,海岸线附近强回波带结构开始松散,强度

开始减弱(图略),但降水一致维持到 17 日 10UTC。

南海北部的对流线在北移到海岸线时有增强发展的过程,对其发展的可能原因,本文使用每小时地面资料加以分析。分析地面图可知(图 5),广东沿海的降水于 16 日 18UTC 从西南部开始,与雷达回波图上对流线开始影响沿海地区的时间一致,此时广东西部海岸线附近的站点为弱的西南风,而距离海岸线几十公里的地方为偏东风,在海岸线附近形成辐合线,强降水在辐合线的西部出现。海岸线附近的辐合线形成后逐渐向东发展,强降水区域也向东扩展,最大范围的强降水出现在 16 日 22UTC,强度达到 $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,有些站点甚至超过 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,此时辐合线南侧的西南风也增强到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此后,该辐合线虽维持,但雨强有所减弱。降水区先出现在地面辐合线的南侧,17 日 00UTC 后逐渐发展到其北侧。此次过程中,辐合线形成后从南向北推进大约 50 km,始终维持在海岸线附近,该辐合线的形成是沿海地区强降水形成的主要原因。

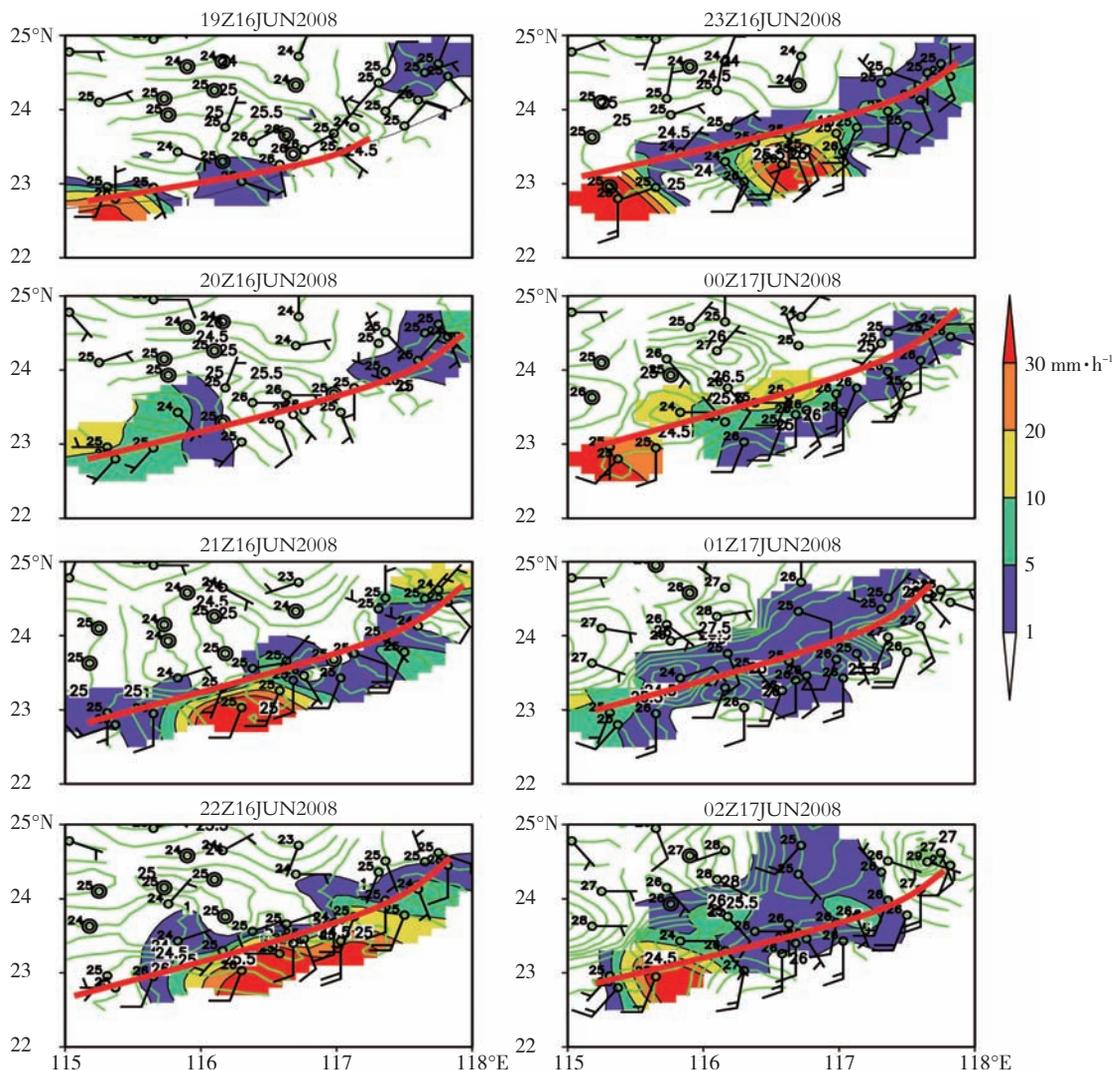


图 5 2008 年 6 月 16 日 19UTC—17 日 02UTC 不同时次地面分析图
 绿色实线为等温线(单位: $^{\circ}\text{C}$);阴影为每小时降雨量(单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);红色粗实线为辐合线

以上分析结果表明,生成于南海的这条对流线的登陆是造成16日18UTC—17日10UTC广东沿海地区强降水的主要中尺度系统,该系统在到达海岸线附近时有一个增强的过程;对流线系统到达海岸线时,沿海岸线有辐合线增强,并造成对流增强;从对流和降水在海岸线附近的分布以及风场辐合的关系看,风场辐合的形成可能与海岸锋现象有关。辐合线增强的机理及增强对流的原因还有待进一步分析。由于观测资料时空分辨率有限,本文对这次过程进行了数值模拟,并采用模拟结果分析对流线的演变和结构特征。

3 数值模拟与对流线结构分析

3.1 数值模拟方案与结果验证

在分析观测资料的基础上,采用WRF (Weather Research and Forecast Model)模式对此次过程进行模拟。模拟采用二重嵌套网格,外层区域网格距为45 km,中心位置为(20.0°N、118.0°E),第二层区域的格距为15 km(因对流系统尺度达数百km,5 km的模拟结果与15 km的基本相似,因此本文采用15 km的模拟资料)。两个区域格点数分别为174×151、214×187。初

始场采用NCEP 1°×1°再分析资料作为背景场,利用WRF的WPS系统分析常规地面和探空资料。微物理过程两层区域均为WSM 6阶霰方案;区域一和区域二采用Kain-Fritsch积云参数化方案和显式方案;边界层采用YSU方案,陆面过程采用Noah陆面模式,辐射采用Dudhia方案。模式积分初始时刻为2008年6月16日12UTC,共积分36 h。

检验模拟的降水量和环流形势,其结果基本与实况相符。图6给出模拟的每6 h降水量,与图1进行对比。16日12—18UTC,模拟的雨带在南海北部,距离海岸线200 km以上,但未模拟出广东的降雨。16日18UTC—17日00UTC,模拟的降水带达到海岸线附近,但观测已出现降水,这种差异是由于模拟对流带形成和到达广东沿海的时间比观测晚3~5 h造成;此外,模拟的对流线维持时间也比观测短。17日00—06UTC,模拟的强降水带正好位于福建、广东沿海,降水的强度与位置与观测基本一致,降水带在登陆后明显变窄,强降水中心也只出现在海岸线附近。在数值模拟较好再现影响广东沿海地区对流线发展过程的基础上,采用模拟的高分辨资料分析对流线演变过程和结构特征。

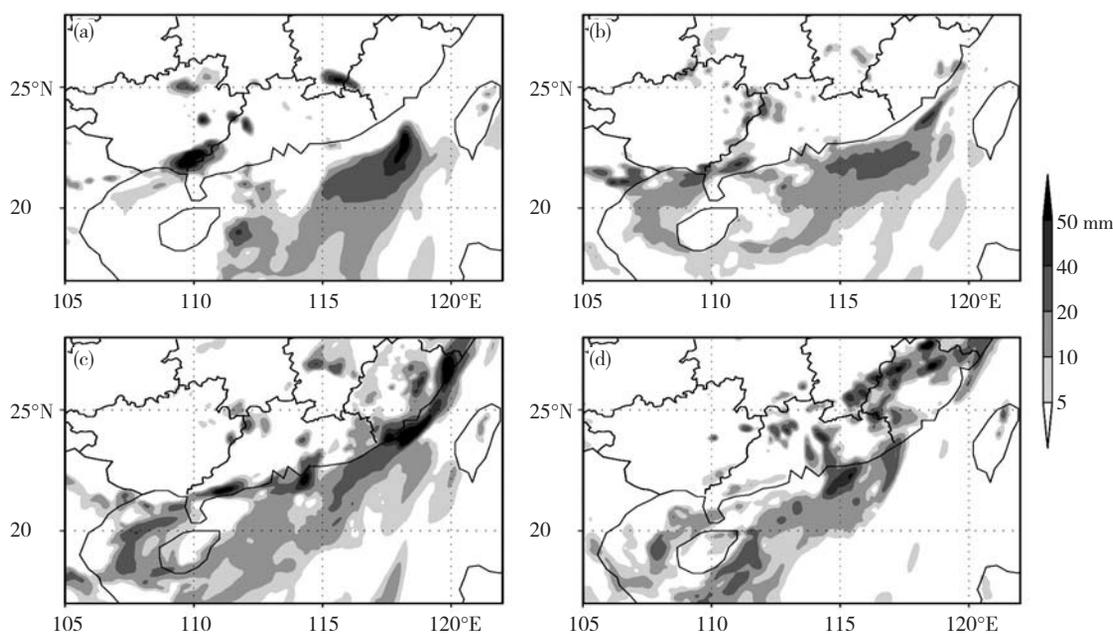


图6 模拟的2008年6月16日12—18UTC (a)、16日18UTC—17日00UTC (b)、17日00—06UTC (c)、17日06—12UTC (d)华南地区6 h降水量分布(单位: mm)

3.2 对流线的演变过程

图7给出对流线在广东沿海附近开始加强到减弱的过程,对流线刚达到沿海时(16日23UTC),对流带南段即海上强的西南风和大陆上的弱西风形成辐合,而北段为南风 and 西南风的辐合,回波带大约在距离海岸50 km处开始加强,形成大约长300 km的强回波(图7a),此时回波带宽仅20~30 km。到17日01UTC

(图7b),对流带已靠近广东沿海,对流带长度未增加,但宽度增至50 km左右,且40 dBz以上强回波范围明显增大。对流带南段和北段的辐合形成仍与16日23UTC的相似。这段时期为对流线发展期。

17日03UTC(图7c),对流带的南段减弱,但北部的对流线发展到大约80~100 km宽,此时对流线已到达沿海,对流线南段的辐合已减弱,中段为对流最强位

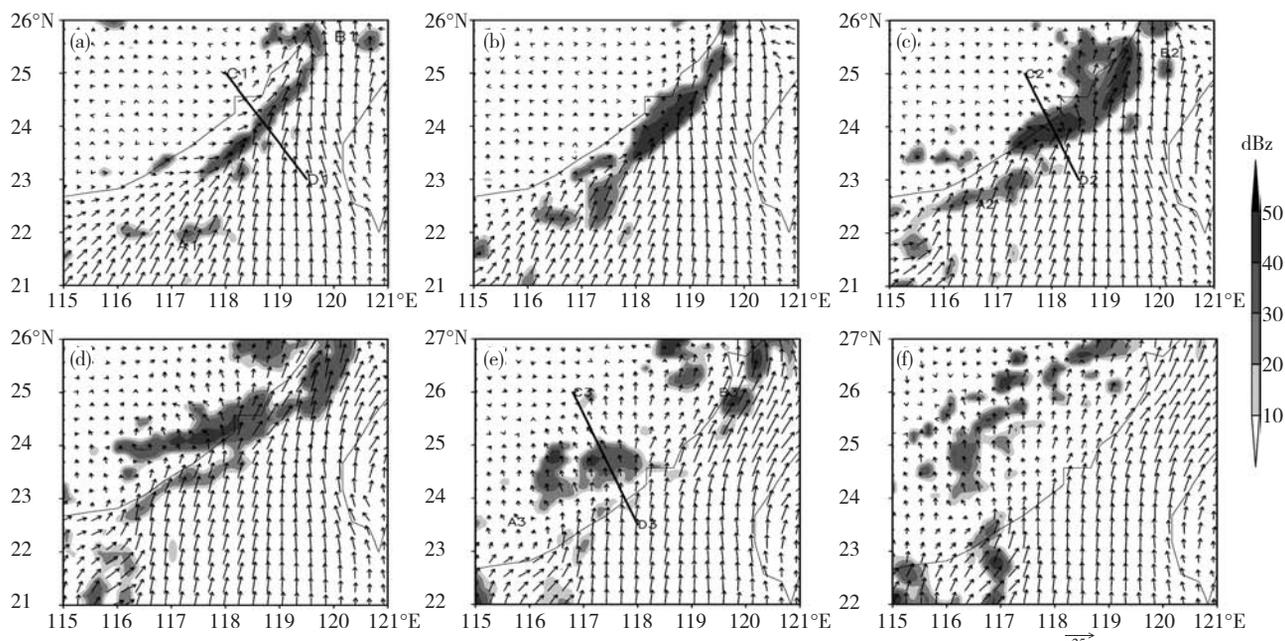


图7 模拟的2008年6月16日23UTC (a)及17日01 UTC (b)、03 UTC (c)、05 UTC (d)、07 UTC (e)、09UTC (f) 地面10 m风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)与雷达反射率因子(阴影, 单位: dBz) 沿对流线垂直的剖面C1D1、C2D2和C3D3分别为图8、图9和图10所画剖面位置

置,即西南风与偏东风的辐合,而北段为南风 and 西南风或西南风的辐合。17日05UTC(图7d),对流带的中段发展到最强,南段和北段均已开始减弱,对流线已深入内陆50~100 km左右,此时辐合已减弱,基本为风速的辐合。02—05UTC是对流线最强阶段,之后对流线很快减弱。17日07UTC(图7e),西南风已深入大陆100 km以上,风速辐合减弱,对流带处于消散阶段。到17日09UTC(图7f),整个对流线只剩下零散的小回波。

3.3 对流线的垂直结构

以上分析表明,对流线大约持续12 h左右,其生成虽在海上,但靠近海岸线时开始加强,在海岸线附近达到最强,当对流线深入内陆50 km以上时开始减弱。分析观测和模拟的地面风场表明,对流线的加强主要归因于在海岸线附近有边界层风场的辐合。Bosart^[24]认为,海岸锋是不同摩擦力沿海岸线产生的变

形和辐合场所致,在不均匀热力层结中产生锋生。可见,此个例的特征类似海岸锋现象。对对流线的垂直结构分析如下:

图8给出模拟的2008年6月16日23UTC沿图7a中C1D1的剖面图,以此分析对流线发展阶段的特点。从中可见,沿剖面的风场(偏南风)在24°N、118.5°E开始上升,500 hPa以下有较强上升运动,最强达 $1 m \cdot s^{-1}$,500 hPa以上上升运动较弱,与低层辐合线(海岸锋)关系不大,在对流线北侧500 hPa以下有一大约50 km宽的垂直环流圈,但此时还未形成对对流线的补偿环流圈。对应垂直环流,此时10 dBz以上雷达反射率因子在500 hPa以下,宽度为20 km,最强中心也未达到40 dBz,且对应对流线的低层强辐合也只出现在850 hPa以下,强度仅 $-30 \times 10^{-5} s^{-1}$,在辐合中心之上500—400 hPa有较强辐散。以上分析显示,在对流线发展期辐合区

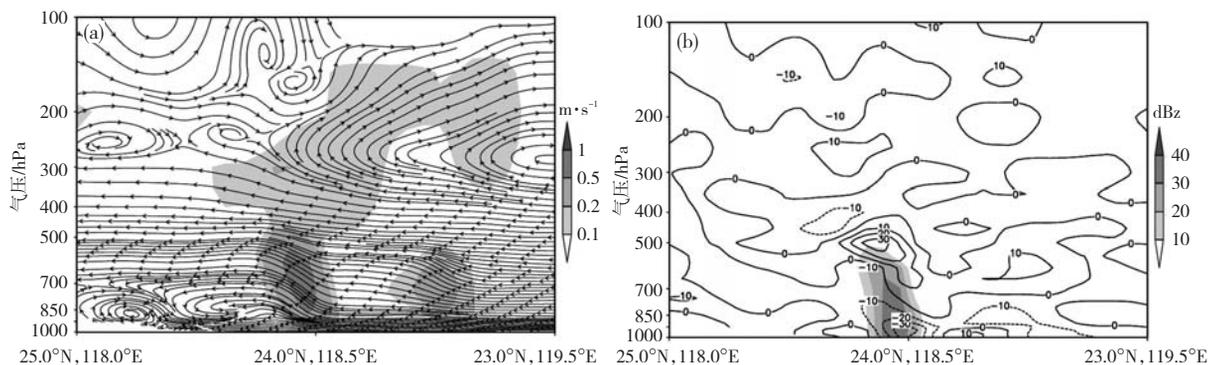


图8 模拟的2008年6月16日23UTC的剖面图(沿图7a中C1D1)

- (a) 沿C1D1的风与垂直运动合成的流场、垂直运动(阴影, 单位: $m \cdot s^{-1}$);
- (b) 反演的雷达反射率因子(阴影, 单位: dBz)与散度(等值线, 单位: $10^{-5} s^{-1}$)

域较窄、高度也不高,对应的对流线宽度也窄,回波高度仅到500 hPa。

图9给出模拟的2008年6月17日03 UTC沿图7c中C2D2的剖面图,以此分析对流线成熟阶段的特点。从中可见,沿剖面的风场(偏南风)在24°N以南大约30 km处开始上升,较强的上升运动一直伸展到200 hPa以上,强度达1 m·s⁻¹以上,200 hPa以上上升运动开始减弱。发展期在对流线的北侧500 hPa以下的垂直环流圈,此时与对流线的垂直环流合并,形成在

对流线南侧上升、北侧下沉的垂直环流。对流线的南侧,中层的入流从高层流出也形成一垂直环流圈。上升运动虽强烈发展,此时10 dBz以上的雷达反射率因子在500 hPa以下,宽度已增至50 km,强度达40 dBz以上。低层的强辐合出现在500 hPa以下,强度增至-40 ×10⁻⁵ s⁻¹,在辐合中心之上500—150 hPa为较强辐散,强度达40 ×10⁻⁵ s⁻¹以上。以上分析显示,在对流线强盛期辐合区域较宽且向中层伸展,对应的对流线的宽度也增大,但强回波的高度仍只到500 hPa。

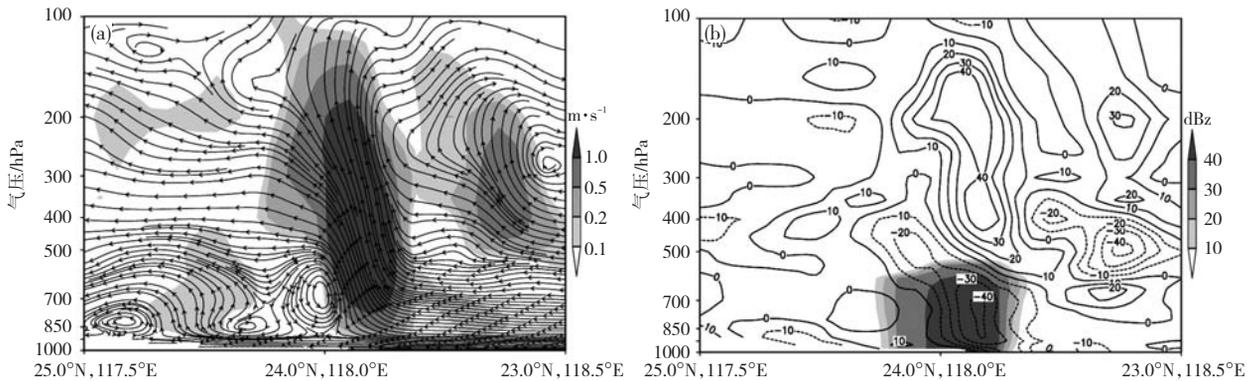


图9 模拟的2008年6月17日03UTC的剖面图(沿图7c中C2D2)

(a) 沿C1D1的风与垂直运动合成的流场、垂直运动(阴影,单位: m·s⁻¹);

(b) 反演的雷达反射率因子(阴影,单位: dBz)与散度(等值线,单位: 10⁻⁵s⁻¹)

图10给出模拟的2008年6月17日07UTC沿图7e中C3D3的剖面图,以此分析对流线减弱阶段的特点。从中可见,沿剖面的风场(偏南风)在25°N以南才有弱的上升运动,对流线南北两侧的闭合环流圈均已

经消失。对流线低层的辐合已转为辐散,仅在对流层中层还有弱的辐合,此时10 dBz以上的雷达反射率因子仍在500 hPa以下,但其宽度和强度均已开始减弱。

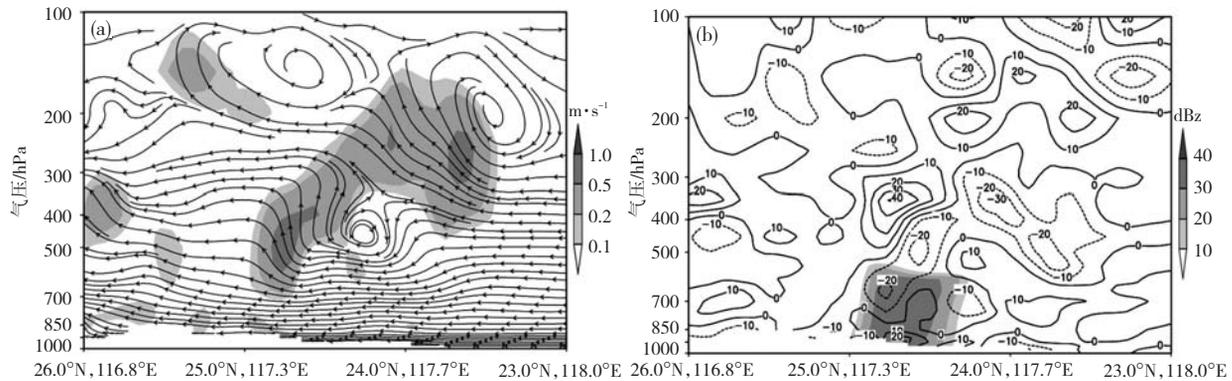


图10 模拟的2008年6月17日07UTC的剖面图(沿图7e中C3D3)

(a) 沿C1D1的风与垂直运动合成的流场、垂直运动(阴影,单位: m·s⁻¹);

(b) 反演的雷达反射率因子(阴影,单位: dBz)与散度(等值线,单位: 10⁻⁵s⁻¹)

4 结论和讨论

2008年前汛期华南地区发生多次暴雨天气过程。本文对当年6月16—17日广东沿海对流线造成的暴雨过程进行观测资料分析和模拟研究,得到如下几点结论:

(1) 此次降水过程是在低涡切变系统影响华南地区的有利天气背景条件下形成的,但其与一条在沿海发展的对流线有关,并非由低涡切变系统直接造成。该对流线发生在南海北部、低空急流北侧的辐合区,然后向北移动,在到达海岸线附近时有一次加强的过程,最强降水区位于地面辐合线的南侧。

(2) 逐小时地面资料分析表明,对流线在海岸线附近的加强过程可归因于“海岸锋”的作用;海岸锋的辐合是由其南侧的西南风和北侧的偏东风形成,使对流线在海岸线附近加强。

(3) 数值模拟再现了对流线到达沿海时增强、北移到大陆上后减弱的过程;低空急流北侧的辐合线到达海岸线附近最强,加强了对流线上的上升运动和对流,使对流发展到对流层中层。

(4) 分析数值模拟结果表明,当对流线达到海岸线附近时,辐合区域还较窄、高度也不高,对应的对流线宽度也窄;当其发展到强盛时,辐合区域较宽且向中层伸展,对应的对流线的宽度也增大,在整个对流线发展的过程中强回波高度仍只到500 hPa。

本例强对流线的产生是由低空急流北侧的辐合带和海岸线附近的辐合共同作用的结果。此次过程与李建辉等^[22]发现的华南海岸锋相似,它与海岸线平行,长500~1 000 km,一般午夜生成,清晨最强,中午消失,维持10 h左右,但与冬季的典型海岸锋过程对流活动只出现在对流层低层不同^[25]。我国海岸锋的研究主要集中在冬季系统,对夏季系统研究较少,而国外一些研究已发现在飓风登陆前,飓风前部由于海岸锋现象会加强陆地上的降水^[27-31]。本文为个例研究,还需收集大量类似个例来研究这类系统生成的具体背景条件和生成机理。

参考文献:

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 225.
- [2] 诸葛秀华, 赵思雄, 刘苏红. 1979年6月9号—11号华南前汛期暴雨的数值试验[G]//华南前汛期暴雨文集. 北京: 气象出版社, 1981: 202-204.
- [3] 李真光, 梁必骥, 包澄澜. 华南前汛期暴雨的成因与预报问题[G]//华南前汛期暴雨文集. 北京: 气象出版社, 1981: 1-8.
- [4] 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 98' 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 218.
- [5] Kuo Y H, Chen G T J. The Taiwan area mesoscale experiment (TAMEX): An overview [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1990, 71(4): 488-503.
- [6] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2000, 24(3): 381-392.
- [7] 孙建华, 赵思雄. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I: 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2002, 26(4): 541-557.
- [8] 孙建华, 赵思雄. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II: 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J]. *大气科学*, 2002, 26(5): 633-646.
- [9] 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟[J]. *科学通报*, 2000, 45(18): 1988-1993.
- [10] 蒙伟光, 李江南, 王安宇, 等. 凝结加热和地表通量对华南中尺度对流系统(MCS)发生发展的影响[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(4): 368-376.
- [11] 刘淑媛, 孙健, 王洪庆, 等. 香港特大暴雨 β 中尺度线状对流三维结构研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(2): 353-363.
- [12] Zhao Sixiong, Bei Naifang, Sun Jianhua. Mesoscale analysis of severe heavy rainfall in Hong Kong during Pre-Rainy Season in South China [J]. *Adv Atmos Sci.*, 2007, 24(4): 555-572.
- [13] 夏茹娣, 赵思雄. 2005年6月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 468-488.
- [14] 傅慎明, 赵思雄, 孙建华, 等. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(2): 235-252.
- [15] 曹芳, 李昉英. 一次特大暴雨过程的中尺度低压特征及发展因子分析[J]. *暴雨灾害*, 2011, 30(1): 28-35.
- [16] 丁一汇, 李鸿洲, 章名立, 等. 我国飊线发生条件的研究[J]. *大气科学*, 1982, 6(1): 18-27.
- [17] 蔡则怡, 李鸿洲, 李焕安. 华北飊线系统的结构和演变特征[J]. *大气科学*, 1988, 12(2): 191-199.
- [18] 翟国庆, 俞樟孝. 强对流天气发生前期地面风场特征[J]. *大气科学*, 1992, 16(5): 522-529.
- [19] 梁建宇, 孙建华. 2009年6月一次飊线过程灾害性大风的形成机制[J]. *大气科学*, 2012, 36(2): 316-336.
- [20] Meng Z, Zhang Y. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. *Mon Wea Rev.* 2012, 140: 445-470.
- [21] 王晓芳, 胡伯威, 李红莉, 等. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 1052-1066.
- [22] 李建辉, 章东华, 杨丁琦. 华南前汛期的海岸锋及其和暴雨的关系[J]. *气象学报*, 1984, 42(3): 370-374.
- [23] Bosart L F, Vaudo C J, Helsdon J H Jr. Coastal frontogenesis [J]. *J Appl Met*, 1972, 11: 1236-1258.
- [24] Bosart L F. New England coastal frontogenesis [J]. *Quart J R Met Soc*, 1975, 101: 957-978.
- [25] Ballentine R J. A numerical investigation of New England coastal frontogenesis [J]. *Mon Wea Rev.* 1980, 108: 1479-1497.
- [26] Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al. An analysis of eddy kinetic energy budget of a southwest vortex during heavy rainfall over South China [J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2009, 2(3): 135-141.
- [27] Bosart L F, Carr F H. A case study of excessive rainfall centered around Wellsville, New York, 20-21 June 1972 [J]. *Mon Wea Rev.* 1978, 106: 348-362.
- [28] Bosart L F, Dean D B. The Agnes rainstorm of June 1972: Surface feature evolution culminating in inland storm redevelopment [J]. *Wea Forecasting*, 1991, 6: 515-537.
- [29] Colle B A. Numerical simulations of the extratropical transition of Floyd (1999): Structural evolution and responsible mechanisms for the heavy rainfall over the northeast United States [J]. *Mon Wea Rev.* 2003, 131: 2905-2926.
- [30] Atallaha H, Bosart L F. The extratropical transition and precipitation distribution of hurricane Floyd (1999) [J]. *Mon Wea Rev.* 2003, 131: 1063-1081.
- [31] Srock A F, Bosart L F. Heavy precipitation associated with southern Appalachian cold-air damming and Carolina coastal frontogenesis in advance of weak landfalling tropical storm Marco (1990) [J]. *Mon Wea Rev.* 2009, 137: 2448-2470.