柯文华，俞小鼎，林伟旺，等. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究[J]. 气象，2012，38(5)：552-560.

一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究*

柯文华[1] 俞小鼎[2] 林伟旺[1] 黄二龙[1] 管习权[1] 黄天宋[3] 杨 新[1]

1 广东省揭阳市气象局，揭阳 522000

2 中国气象局培训中心，北京 100081

3 广东省揭阳市惠来县气象局，惠来 515200

提 要：2010 年 6 月 25 日在粤东南部地区发生了超历史纪录的强降水过程。利用 MICAPS 3.1 软件系统、多普勒雷达及中尺度地面自动加密观测站等资料进行分析表明：深厚的高空冷涡位置偏南，移动缓慢是造成此次极端降水的直接影响系统。有组织排列的多单体风暴活动、地面准静止锋及其前方锋前暖区内出现的中尺度辐合长时间维持，是形成“列车效应(Train Effect)”的主要原因，降水回波沿东北—西南向排列的地面总能量中心移动，特殊的地形作用促使“列车效应”形成。反射率因子图上显示强降水回波具有低质心结构且垂直发展旺盛，具有“牛眼”结构特征的速度图上表明了强盛的低空西南急流存在。由于“大风核”存在，造成中小尺度次级垂直环流，并且这些次级环流有规则的排列，这可能是“列车效应”形成和维持的主要原因。在上述研究基础上提出了此次“列车效应”暴雨模式。

关键词：天气形势，高空冷涡，列车效应，极端降水

The Analysis of the Heavy Rainstorm Caused by “Train Effect”

KE Wenhua[1] YU Xiaoding[2] LIN Weiwang[1] HUANG Erlong[1]
GUAN Xiquan[1] HUANG Tiansong[3] YANG Xin[1]

1 Jieyang Meteorological Office of Guangdong Province, Jieyang 522000

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

3 Huilai Meteorological Station of Guangdong Province, Huilai 515200

Abstract: Using MICAPS 3.1, the mesoscale automatic weather stations (AWS) and Doppler radar, the rainstorm in the southeastern Guangdong with the rainfall exceeding 600 mm within 13 hours on June 25, 2010 is analyzed. It is shown that the direct impact system of this extreme precipitation is the deep high-altitude cold vortex which located south and moved slowly; the strong low level jet (LLJ) and LLJ provided sufficient moisture and dynamic conditions; and that the organized arrangement of the multi-single storm activity, the ground quasi-stationary front and the mesoscale warm shear line which maintained for a long time are the main causes for the formation of “train effect”. The precipitation echoes move along with the total surface center, and the special terrain is also one reason of the “train effect”. The reflectivity images have shown that the banded heavy precipitation echo can be a low-mass center structure and then strong vertical development. The speed image with a “bull eye” structure shows that there was a low level southwest jet. Based on these studies, a “train effect” storm model is proposed.

Key words: weather situation, high-altitude cold vortex, “train effect”, extreme precipitation

* 广东省揭阳市气象局科研课题资助
2011 年 4 月 10 日收稿； 2011 年 11 月 8 日收修定稿
第一作者：柯文华，主要从事暴雨和雷达产品应用分析研究. Email：kewenhua@sina.com

引　言

2010 年 6 月 25 日前后在高空冷涡的偏南方槽线附近，广东省发生一次特大暴雨过程，特别是粤东南部地区降水刷新了历史纪录（本文主要对粤东南部强降水做分析），揭阳市的惠来葵潭、河林，普宁马鞍山一带地区出现历史罕见的特大暴雨（图略）。6 月 24 日 08：00 至 27 日 08：00，揭阳市平均雨量 132 mm，45 个测站有 17 个站超过 100 mm，3 个站超过 600 mm，其中惠来葵潭记录出现全市最大雨量 758 mm，24 小时最大雨量为 697 mm，1 小时最大雨量为 101 mm；6 月 24 日 08：00 至 27 日 08：00，普宁马鞍山过程雨量为 697 mm，为次大值，1 小时最大雨量为 109 mm（25 日 02：00—03：00），刷新了有气象记录以来的最大值。此次强降水过程雨强大，持续时间长，给惠来、大南山华侨管理区和普宁带来了严重的损失。据市三防办统计，揭阳市直接经济损失3.9845 亿元，房屋倒塌 91 间，受灾人口 22.11 万人，死亡 2 人，农作物受灾面积 1.728 万 hm^2。

对流性暴雨导致的暴洪是除了大冰雹、雷暴大风和龙卷之外的第四类对流性灾害天气，Doswell 等[1-6]对对流性暴雨做了许多研究，Doswell 等[1]针对强降水导致的暴洪事件的预报问题提出基于构成要素的预报方法。Maddox 等[7]建立了容易出现列车效应导致极端强降水事件的三种天气系统流型配置，三种天气系统都具有某种准静止特征，使得雷暴反复经过某一区域而导致暴洪。6 月 25 日粤东南部对流性暴雨导致的暴洪主要集中于 25 日01：00—13：00，其直接原因是由于系统移动缓慢及回波有组织地排列形成的“列车效应（Train Effect）”造成的。列车效应是指某区在一段时间内频繁地、接连不断地生成空间尺度不大的对流单体，而每生成一个对流单体即沿着某一方向移动，接着在同一地方生成新的对流单体继续沿着同一方向移动，从而形成由一系列对流单体排列组成类似于“列车”的排列，这一“列车”对其下游某一地区可以造成接连不断的“持续”影响，从而造成强降水。由于对流雨带的移动矢量基本平行于其走向，对流雨带中的强降水单体依次经过同一地点，往往产生最大的累积雨量[8]，黄小玉等[9]指出：具有“列车效应”特征带状回波的谱宽垂直剖面图上，在中低层有较大的谱宽值，极值超过 10 $m \cdot s^{-1}$ 以上，当回波减弱时，低层仍具有较大的谱宽值，高层极值消失，中层谱宽均匀。何群英等[10-13]利用多普勒雷达等资料分析指出：“列车效应”是产生极端雨量从而造成洪涝等灾害的主要回波特征。本文拟对此次产生“列车效应”的原因做分析研究，并给出产生此次“列车效应”的暴雨模式。

1　大尺度环流形势背景

6 月 23 日前后，400～150 hPa 东亚大槽不断东移加深，在东北地区分裂出一闭合冷涡。500 hPa 前期（6 月 22—24 日）中高纬为两槽一脊形势，中亚地区为脊，乌拉尔山以东的西伯利亚西部和亚洲东岸为低槽，亚洲东岸的低槽南伸到 35°N 附近，副高脊稳定维持在 15°～20°N 之间，广东省处于副高边缘 588 dagpm 线附近，东亚槽槽前有冷空气在 30°～40°N、110°～120°E 地区堆积，蒙古一带有较强暖平流，由于暖平流的切断，该地区逐渐形成一闭合冷低中心。此闭合冷低压中心随高度向北倾斜，向上发展到了 150 hPa，在 700 hPa 以下为完整的低压环流，说明这个冷涡是一个深厚的高空冷涡。500 hPa 上此高空冷涡北边为一高脊，东边为一稳定副热带高压，由于两个系统相互连通形成高压坝，高压坝的阻挡作用使冷涡移动极其缓慢甚至停滞。24 日08：00 该冷涡中心南压到 30°N 附近，其南部的槽线南伸到了湖南南部，24 日 20：00 至 25 日 08：00 500 hPa 槽线东南移到广东中部附近近乎停滞（图 1）。

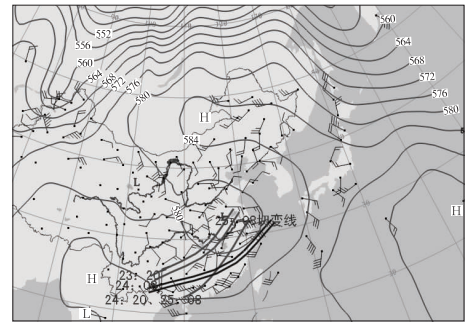


图 1　2010 年 6 月 25 日 08：00 500 hPa 高度场及 850 hPa 风场
（粗实线为 500 hPa 槽线位置）

Fig. 1　The height field on 500 hPa and the wind field on 850 hPa at 08：00 BT 25 June 2010
(the thickel line is trough line on the 500 hPa)

850 hPa 印度低槽加深，西南季风槽向广东地区强烈输送水汽，广东省处于高压后部的西南风场中，巴尔喀什湖附近冷高压不断向东南方向移动，23 日 20:00 在长江流域以南地区形成东北—西南走向低压槽，24 日 20:00 至 25 日 08:00 切变线南压到广东省中部地区，粤东偏南地区西南风速从 8 m·s^{-1}急增到 32 m·s^{-1}（图 1），偏南风场明显大于北边的偏北风场，且粤东偏南地区风速产生了辐合。925 hPa 广东南部有超低空急流形成，西南风速度达到了16 m·s^{-1}。显然低空急流及超低空急流为此次强降水提供了丰沛的水汽和动力抬升条件。

2 产生“列车效应”原因及一类概念模型

2.1 地面静止锋、中尺度特征及锋前地面中尺度辐合系统

6 月 22 日地面为东高西低形势，广东省位于低压槽东南部边缘，低压中心位于云南、贵州地区，四川南部维持一冷高压，四川南部冷平流缓慢向东南移动与北上暖平流形成东西向静止锋，该静止锋处于低压槽区内曲率最大处，24 日 20:00 至 25 日 08:00 地面静止锋受莲花山脉阻挡在广东中部地区少动，24 日 20:00 在该静止锋前方的粤东南部暖区内形成了一条西南风与东南风的中尺度辐合线（或为弱暖锋，图 2a），该暖性中尺度切变线比强降水开始提前 4 小时，持续了 10 小时。强降水发生在暖性切变线南边暖舌区（该区域 $T_d \geqslant 26$ ℃，图略）及暖舌前方。假相当位温（θ_{se}）密集区可以表明锋区所在位置，图 2b 给出了相对湿度、假相当位温（θ_{se}）沿 115°E 垂直分布图，24 日 20:00 地面静止锋停滞于 25°N 广东中部附近，锋面坡度较大，锋面随高度向北倾斜，700 hPa 以下 22°～26°N 强降水区域为高能高湿区，该区域 θ_{se} 随高度减小说明了层结不稳定。

24 日 20:00，位于粤东南汕头站 T-log$p$ 图上，0℃层高度在 5470 m，抬升凝结高度较低，为986 m，说明暖云层较厚；地面至 850 hPa 垂直风切变达到了 8×10^{-3} s^{-1}，中低层具有强的垂直风切变和不稳定层结（图略），湿对流有效位能 $CAPE$ 值达到 1828 J·kg^{-1}。从 24 日 08:00 至 25 日 08:00，地面至 800 hPa温度露点差接近于0℃，800 hPa到对流层

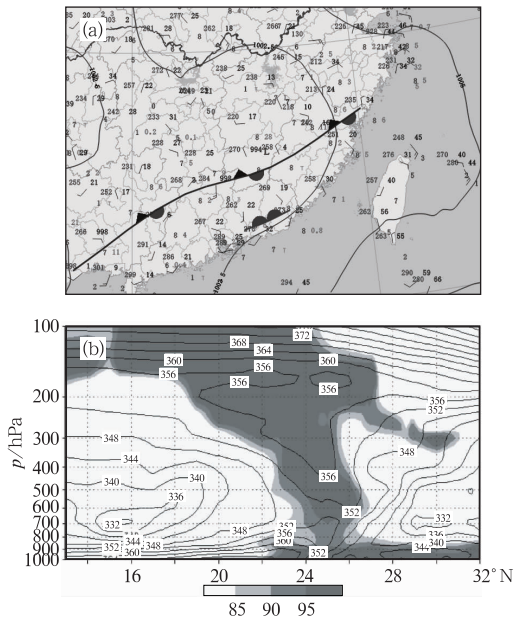


图 2 2010 年 6 月 24 日 20:00 地面形势及沿 115°E θ_{se}（单位：K）剖面及相对湿度（RH）垂直分布图

Fig. 2 The surface weather situation (a) and θ_{se} (unit: K), as well as RH (shaded) vertical distribution along 115°E (b) at 20:00 BT 24 June 2010

上部 $T-T_d \leqslant 5$ ℃，对流层中、上层没有明显的干层，湿层深厚。探空资料所显示的深厚的暖云层、较强的垂直风切变环境、较大的湿对流有效位能以及深厚的湿层，都十分有利于强降水的发生。MICAPS 3.1 给出了冰雹估测直径为 2.6 cm，此次过程主要以强降水为主，并未产生冰雹等天气。由于低层水汽极其充沛，在对流云发展早期，云内就会有大量的水汽凝聚，形成雨滴降落，阻碍上升气流的进一步发展，不易形成冰雹。MICAPS 3.1 给出了冰雹直径的估测或许可以做为强降水的预警。

高密度地面自动观测站资料显示（图 3）：6 月 24 日 20:00 特大暴雨开始之前，在强降水中心附近已出现了一条东—西向长约 170 km 中尺度辐合线，风场上主要表现为偏南风与偏北风的辐合，强降水中心的惠来县葵潭镇自动站处于一气旋式辐合中心附近，个别自动站西南风速达到了 8 m·s^{-1}；到 25 日 02:00 中尺度辐合线仍然存在，该辐合线的东端往南折，地面中尺度辐合线与强降水中心紧密相关，此时沿海西南风速明显加大，25 日 02:15 和 03:50 葵潭镇自动站南边的马甲镇及陆丰市陂洋镇自动站西南风速达到了13.7 m·s^{-1}，葵潭镇自动站

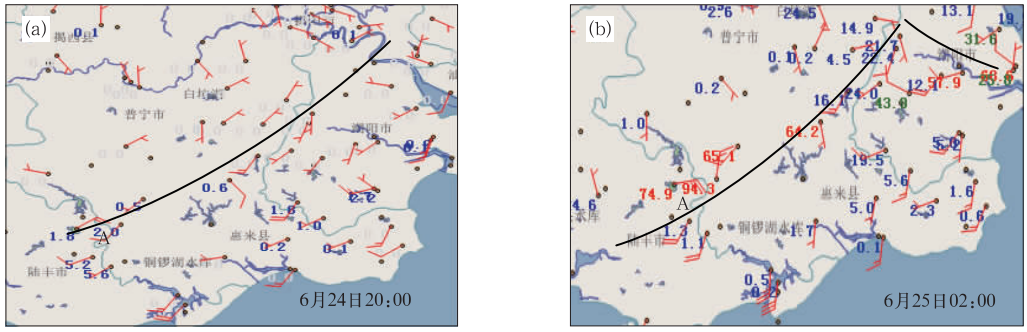


图 3　2010 年 6 月 24 日 20:00(a)及 2010 年 6 月 25 日 02:00(b)中尺度自动加密观测站风场及 1 小时雨量(雨量单位：mm，A 处为葵潭自动站)

Fig. 3　The wind field and one-hour rainfall observed by mesoscale automatic weather stations (rainfall unit: mm, A denotes the Kuitan AWS) at (a) 20:00 BT 24 June and (b) 02:00 BT 25 June, 2010

附近西南风、偏东风和偏北风的气旋式辐合也明显加强，该气旋式辐合一直维持到 25 日 05:00 前后，强降水回波不断在辐合区及西南风速大值区生成及加强。此次过程地面中尺度辐合线维持时间长达 10 小时，位置少动，辐合线的尺度较大，东西向辐合线所在位置即为带状雷达回波的位置，降水回波沿 500 hPa 引导气流向偏东方向移动。辐合线的上风方不断有回波生成，下风方减弱、衰亡，回波有组织地排列，从而形成“列车效应”。中尺度辐合线增加该地区的水汽和能量积聚，对降水产生和加强起到了重要作用，可见，地面自动站提供的较高分辨率资料对这次粤东南部极端暴雨形成具有指示意义，并可以为短时临近预报提供重要参考。

2.2　地面弱冷空气的渗透及地形辐合抬升作用

边界层内浅薄的冷空气沿莲花山脉河谷地段向南侵入粤东南部暖区内，暴雨一直与此浅薄的冷空气前锋相对应。从中尺度自动站气温分布来看(图 4)，位于粤东南部的冷暖边界(以 $T=26$℃ 为界)有一个长时间维持、南压、北抬消失过程。24 日 22:36 小股冷空气从地面入侵到汕尾、潮州附近，在粤东南部冷暖边界基本呈东北—西南走向，暖中心位于沿海一带，随后暖中心有所北抬至揭阳的普宁市；此状态一直维持到 25 日 01:00，地面弱冷空气进一步从揭阳市及揭西县交界处楔入，冷暖边界转为东—西走向并且有所南压，此时强降水开始发生；25 日03:00后冷空气从东路扩散入侵，冷暖边界东部不复存在；直到 24 日 12:00 以后暖湿气流进一步加强使这条冷暖边界线北抬减弱消失，对应降水也逐渐消散。由于浅薄冷空气从边界层内南下时并不改变边界层上部暖湿空气的环境条件，而边界层内的水汽能量辐合又是产生暴雨尤其是特大暴雨的主要水汽来源，因此边界层内浅薄冷空气的侵入不仅

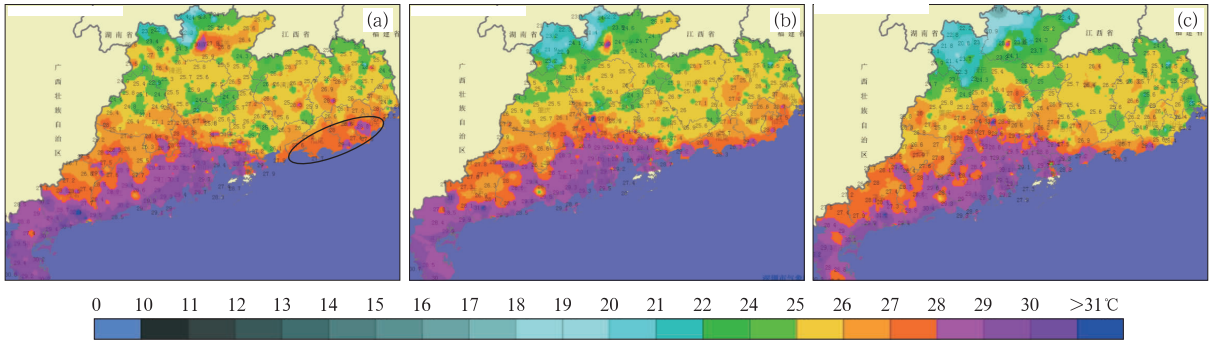


图 4　2010 年 6 月 24—25 日广东省自动站气温变化(单位：℃，椭圆处为粤东南部强降水区)
(a) 24 日 22:36，(b) 25 日 01:00，(c) 25 日 03:00

Fig. 4　Temperature changes observed by Guangdong AWS (unit: ℃, the oval denotes the location of heavy rainstorm in southeastern Guangdong) at (a) 22:36 BT 24 June, (b) 01:00 BT 25 June, and (c) 03:00 BT 25 June, 2010

触发了对流的发展，而且有利于边界层水汽向暴雨区输送增加降水量。

朱乾根等[14]研究发现，当暴雨云团遇到高山时，会发生速度减慢停滞，雨强加大，并平行于山脉移动。广东省的地势大体是北高南低，地形复杂，山脉具有明显的东北—西南走向，粤东南西部的海陆丰一带及惠来葵潭镇附近具有 γ 中尺度、向南开口“人”字形地形结构（图 5），该入口处气流与开口方向正交，潮湿空气向喇叭口灌进，由于地形的收缩，引起辐合上升运动的加强，降水回波不断在辐合中心生成加强。强降水回波在西南气流引导下，沿粤东南地区北边具有 β 中尺度东北—西南走向的莲花山脉平行方向移动，莲花山脉高约 1400 m，低层偏南暖湿气流不断受到莲花山脉迎风坡抬升作用时，极易出现辐合抬升，加剧了大气层结的不稳定性，降水回波在边界层辐合线附近生成并沿莲花山脉平行方向自西向东移动促使“列车效应”形成。边界层低空急流遇到地形的强烈抬升触发使降水回波源源不断地产生，深厚的西南急流为强降水区源源不断地输送暖湿水汽，导致大气不稳定层结产生，有利于持续强回波的发生。

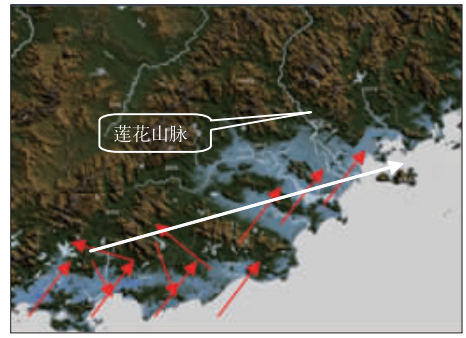


图 5 粤东南地形分布图
（长箭头为回波移动方向，短箭头为风向杆）
Fig. 5 Topographic map of southeastern Guangdong (The long arrow is the direction of echo movement and the short arrow is the wind level)

2.3 粤东南地区地面总能量场分析

对于地形复杂地区，低层大气的热力状况对暴雨的产生有着非常重要的作用。大气的总温度实际上是描述低层大气的热力状况的物理量，总温度反映总能量的大小，并具有准保守性。而总温度表达式：$T_t=(T+lq/c_p)+\gamma_d Z$ 可以看成是相当温度 $T_e=T+lq/c_p$ 干绝热到海平面（$Z=0$）时的温度（c_p 为定压比热，T 为温度（单位：K），q 为空气比湿，l 为凝结潜热，γ_d 为大气温度直减率），中尺度能量系统比中尺度的气压系统更清楚，因此分析地面能量场就更容易抓住直接产生暴雨的中小尺度系统。

利用地面逐时加密观测资料计算粤东南地区各时次总温度分布发现（图 6），降水开始前（20 时），汕尾市的海陆丰一带及汕头市为高能中心，惠来位于

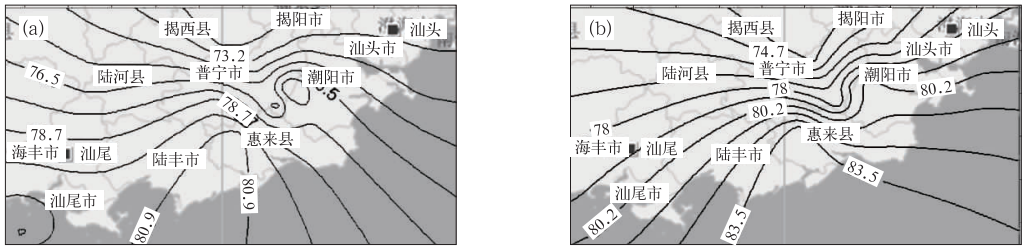


图 6 2010 年 6 月 24 日 20 时（a）、25 日 00 时（b）粤东南地面总温度分布（单位：℃）
Fig. 6 The total temperature distribution at the surface of southeastern Guangdong (unit: ℃) at (a) 20:00 BT 24 June, and (b) 00:00 BT 25 June, 2010

海面向北伸的高能舌区，粤东偏北地区为低能舌区，粤东偏南地区高能区与东北—西南向带状强降水回波带相对应。25 日 00:00 惠来县葵潭镇强降水将要发生前，惠来地区的总温度达到了极值为84.4℃，伴随强降水开始能量的释放，惠来总温度逐渐缓慢减小。总温度大值区自西向东缓慢移动，总温度分布呈北向南增大的分布，过程中降水回波沿东北—西南走向带状的高能中心移动从而形成“列车效应”，由于地面具有很强的能量使强降水得以持续。仔细分析产生暴雨的中尺度能量系统，将有助于提高暴雨的短时、临近预报的准确率。

2.3 本次“列车效应”原因及模型

图 7 给出本次“列车效应”的流场配置（图 7a）

及概念模型(图 7b)：图 7a 为 850 hPa 风场及流场配置，阴影部分为低空急流中心，引导气流取 700 和 500 hPa 的平均风矢量；图 7b 中虚线为露点等值线，阴影部分为暖温度中心及露点大值区即暖湿中心。产生本次“列车效应”的原因：一条东西走向的准静止锋。由于准静止锋移动缓慢或几乎不动，浅薄的冷空气从边界层不断向南入侵，在准静止锋的前方暖区内形成一条与其平行的中尺度辐合线，其北边为较为湿冷的空气，南边为暖湿的空气，准静止锋前的暖湿中心湿层深厚且层结不稳定。在低空西南急流作用下，低层暖湿气块遇到暖锋抬升导致强对流触发。地面中尺度辐合线通过提供带状辐合上升运动起着胚胎和组织积云对流的作用，使得降水回波和对流云团沿中尺度辐合线发展、加强和移动，并且在高空西到西南气流引导下，沿莲花山脉平行方向向东移动形成“列车效应”，由于该中尺度辐合线长时间移动缓慢及“列车效应”的形成，导致该区域的暴雨，强降水与低空急流中心、地面暖湿中心及地面中尺度辐合线相对应。准静止锋的存在、静止锋前的弱冷空气的入侵与低空暖湿气流的对峙是形成此次“列车效应”的直接原因。

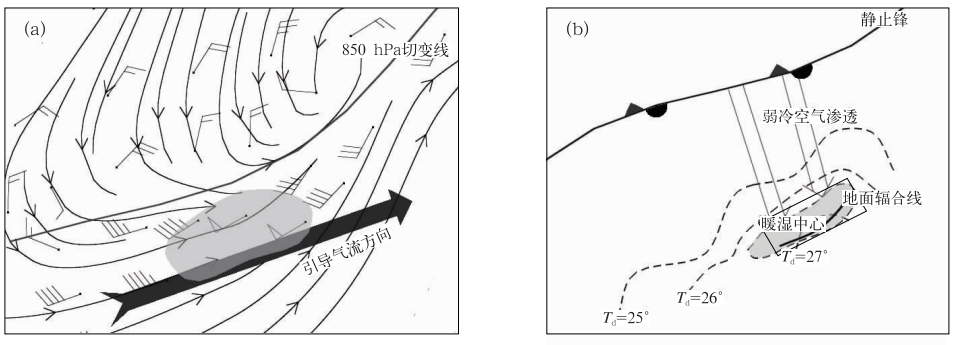


图 7　一类“列车效应”暴雨模式图（方块为强降水区）
(a) 流场配置，(b) 概念模型
Fig. 7　A class of “train effect” diagram
(The box denotes the location of heavy rainstorm)
(a) configuration of flow field, (b) conceptual model

3　多普勒雷达反射率因子及速度特征

3.1　有组织排列的对流多单体风暴形成“列车效应”

利用汕头站多普勒雷达产品和自动站降水逐时分布资料，对造成 6·25 粤东南部强降水过程的回波演变特征进行分析。

自动站降水逐时分布表明(图 8a)：惠来县葵潭镇自动站降水集中在 25 日 01:00—11:00，降水之初就达到了 65 mm·h^{-1}，最大 1 小时雨量达 101 mm，65 mm·h^{-1}以上的强降水持续了 6 小时实属罕见。从每 10 min 降水情况来看(图略)，降雨量≥10 mm 有 36 次，主要集中在 25 日 04:00—09:20；降雨量≥15 mm 有 25 次，主要集中在 25 日 00:50—05:40，04:10—04:20 出现最大 10 min 雨量为 23.9 mm，从降水的时间分布可知，本次降水有着很强的连续性。

0.5°仰角 PPI 图显示(图 8b～d 及图 9)：该过程中降水回波经历了回波初生阶段、单体迅速发展阶段、强回波单体弥合阶段、强回波单体逐渐分离阶段及带状回波消失阶段。在对流系统的初生阶段(24 日 23:42)，回波呈孤立的不规则形状，25 日 00:05 回波从低层开始发展并且发展迅速，海丰、陆丰地区絮状回波很快发展到 50 dBz，并在两个体扫时间伸展到了 5 km 高度，单体(Z≥35 dBz)呈东西向倾斜“一”字排列，单体依次自西向东移向葵潭镇附近，由于如前所述的地形抬升作用以及如图 7 所示的中尺度辐合线东边(葵潭镇附近)T_d 大于西边，使得降水回波移至此时强度明显加强(图 8d)；25 日 01—04 时前后，强回波单体互相靠近弥合连成一

线，呈带状结构，回波单体强度梯度较大，雷达探测范围内弱回波区面积较小，25 日 04 时后强回波带两侧较弱回波面积增大，带状强回波主体有所断裂，但雷达回波的“列车效应”仍存在；该有组织的 β 中尺度多单体风暴带状回波维持到 25 日 09:52 之后，带状回波结构有所破坏，断裂消失，回波范围扩大，逐渐演变成积层混合云降水回波，宽广的层状降水回波由多个中尺度对流单体组成，强度在 50 dBz 左右。期间海丰、陆丰地区不断有成片 35～45 dBz 降水回波生成，东移后与葵潭镇附近原地生成的降水回波合并，降水回波增强到 50 dBz 以上。

风暴路径追踪信息显示：过程有 30 多个回波单体经过该区域附近，且大多单体移动缓慢。其中 25 日 03:37，回波顶(ET)产品显示 18.3 dBz 回波伸展到了 18.3 km 高度，絮状回波也逐渐发展为呈“弓”型东西走向带状回波，回波带由多个大于 50 dBz 单体风暴组成，最大单体回波强度为 59 dBz。整个过程中 45～59 dBz 的强回波不间断地经过葵潭镇附近，从而导致了该地区极端降水的产生。

汕头站探空资料显示 0°层高度为 5.5 km，由风暴信息属性表(图略)可知过程最强回波高度大多在 5 km 左右高度，50 dBz 强回波在 0°层高度以下，因此属于具有低质心的热带对流系统结构。配合自动站逐时强烈的降水情况，说明低质心的热带对流系统结构的雷达回波具有高的降水率[15]。

3.2 形成“列车效应”的速度特征

汕头站多普勒雷达径向速度图表明：强降水发生前后径向速度图上零速度线呈西北－东南向，从地面至上空 8 km 范围内，整层为西南气流控制，副高边缘特征明显。

汕头站雷达速度图(0.5°仰角)上(图 10a 和 b)：24 日 23:48 在 0.2～0.3 km 的边界层已有 12 m·s^{-1}的西南风急流存在，负速度区位于雷达站左侧，右侧为正速度区域，降水回波在陆丰一带强风速中心发展；25 日 01:28 粤东南部沿海形成狭长的西南风急流带，西南风速达到了 20 m·s^{-1}，随后，急流带向东、西方向延伸，说明此时急流向低层和高层伸展，西南风急流深厚，降水回波强度也明显加强；25 日 04:12 开始零速度线由西北—东南直线分布逐渐转为“S”型，表明了低层暖平流的存在，速度图上表现为低层暖平流叠加在辐合风场的特征，有利于强降水的形成与维持，此时正是降水最激烈时刻；到了 05:28 前后，在近地面层出现罕见的超低空西南急流，入流速度约为 20 m·s^{-1}；暖平流叠加在辐合风场的速度特征一直持续了 4 个小时，“S”型零速度线在 25 日08:28 后逐渐又转为西北—东南直线分布，强降水也在将近 1 小时后趋于减弱消失。过程中在较大负速度与较小负速度相嵌套区域容易产生新回波单体，强回波带位于低层径向速度大值区与较小速度交界处，可能是风速的辐合使回波强度得到加强。降水的早期 0.5°仰角有“逆风区”在两个体积扫描时间出现过。

3.4°仰角 PPI 速度图上(图 10c 和 d)25 日 03:25 零速度线南边 5 km 高度处出现折角，零速度线逐渐转为反“S”型，表明了中层有冷平流入侵，低层暖平流与中层冷平流表明层结不稳定。05:52 在 5～6 km 高度处出现“牛眼”结构大风核，经过速度退模糊，中心风速达到了 30 m·s^{-1}，强降水回波带始终与 3.4°仰角速度中心相对应。14:28 PPI 速度图北边 6 km 高度处出现了西北风与西南风辐合风场特征，表明暖湿气流已北抬，预示粤东南部强降水即将结束。

该带状回波受西到西南风引导气流作用，自西向东移动并不断生成发展，根据经验单体的传播方向与低空急流大小相等，方向相反[16]。由于低空为西南急流，单体的传播方向跟引导气流方向相反，且矢量夹角很小为后向传播，后向传播作用造成回波移动极其缓慢且容易在西侧即上风方生成新回波，带状回波整体上的移动方向为自西向东移。

以上径向速度风场分析表明：“6.25”粤东南强降水过程中，从地面到高空整层为西南气流控制，最大西南风速在 5～6 km 高度的区域，风速达到了 30 m·s^{-1}，强降水回波出现在东—西向强劲的西南气流区域，加上带状回波的自西向东移动，这可能是回波在平行方向移动的原因。强劲的西南气流深厚且稳定维持的时间长，导致降水回波在暴雨区上空维持少动。

该过程典型的速度特征为：大于 20 m·s^{-1}“大风核”长时间维持，风廓线产品(VWP)显示大风核为深厚的西南风急流中心，由于大风核的存在，在大风核的一侧形成辐合，而一侧为辐散，因而造成中小尺

度次级垂直环流，并且这些次级环流有规则的排列，这可能是“列车效应”形成和维持的主要原因[17]。

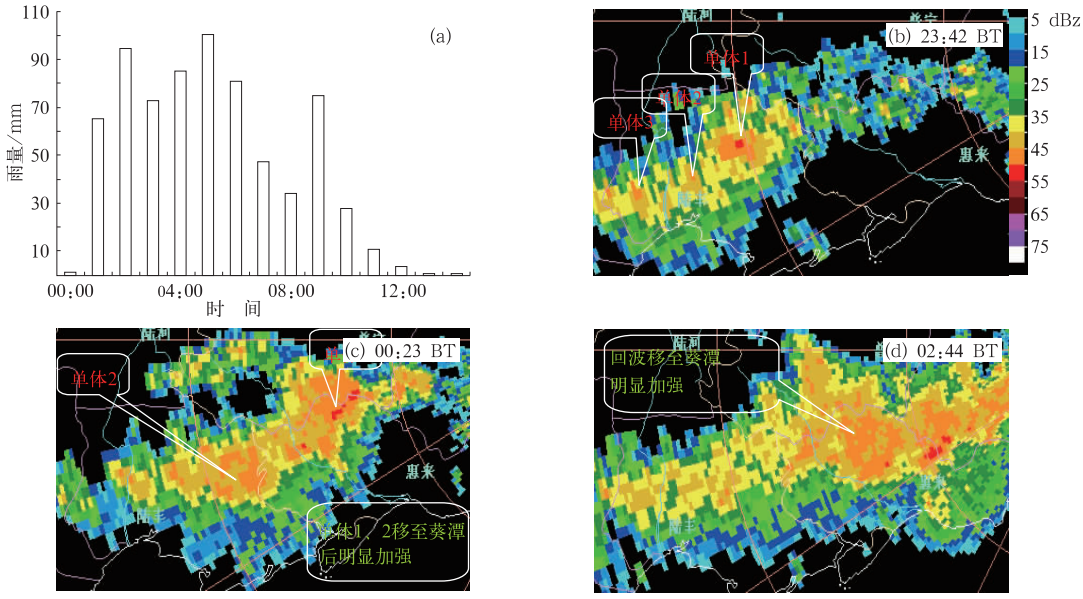


图 8　2010 年 6 月 25 日葵潭自动站逐时降雨量及回波单体演变特征(0.5°仰角)

Fig. 8　The hourly rainfall of Kuitan AWS (a) and the evolution characteristics of cell echoes (b) 23:42 BT 24 June, (c) 00:23 BT 25 June, and (d) 02:44 BT 25 June, 2010 (0.5° elevation)

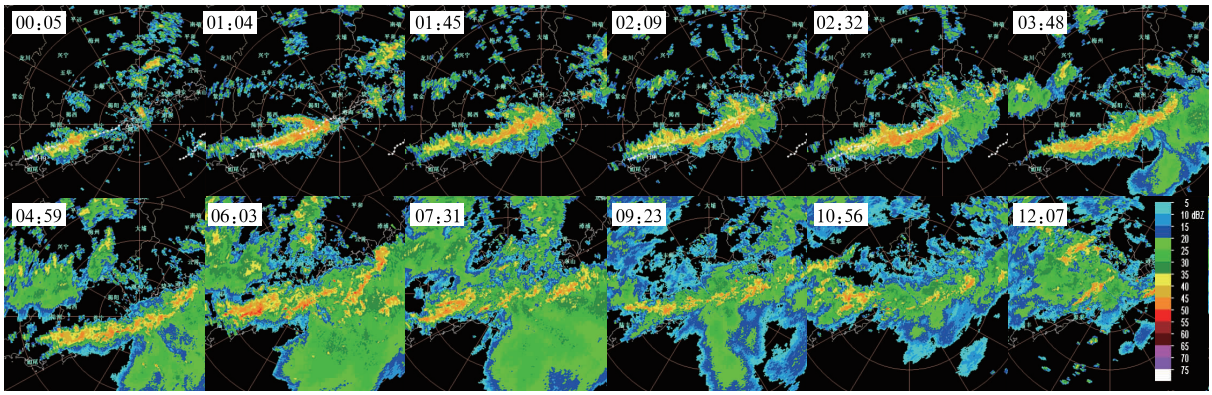


图 9　2010 年 6 月 25 日带状回波形成的“列车效应”(0.5°仰角)

Fig. 9　The “train effect” formed by band echo on June 25, 2010 (0.5° elevation)

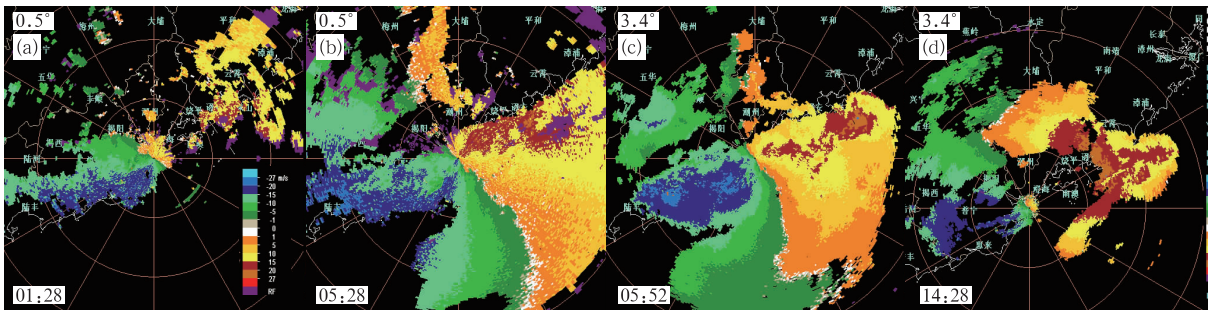


图 10　2010 年 6 月 25 日形成“列车效应”速度特征

Fig. 10　The speed characteristics of “train effect” on June 25, 2010

4 小 结

(1) 本次粤东南部极端降水发生在高空冷涡南部槽线附近。准静止锋的存在、静止锋前的弱冷空气的入侵与低空暖湿气流的对峙是形成此次“列车效应”的直接原因。静止锋前方的粤东南部暖区内中尺度辐合线持续了 10 小时,比强降水开始提前了 4 小时。

(2) 粤东南地区特殊的地形促使了此次“列车效应”的产生,降水回波不断在 γ 中尺度的“人”字形区域生成加强,由西南气流引导下沿莲花山脉自西向东平行移动。地面总能量中心分布与带状强降水回波一致,总温度高值中心比强降水提前出现,对暴雨的短时、临近预报有预示作用。地面中尺度辐合线与强降水密切相关,降水回波在气旋式辐合中心不断生成和发展,气旋式辐合中心长时间维持导致了极端降水,地面高分辨率自动站资料对短时临近预报具有指示意义。

(3) 系统移动缓慢及回波有组织的排列形成的“列车效应”造成了 6 月 25 日粤东南部强降水。雷达回波特征显示当带状回波结构破坏,断裂消失,回波范围扩大时,预示强降水趋于结束;强回波带在 0.5°仰角位于径向速度大值区与较小速度交界处,在 3.4°仰角强降水回波带始终与强速度中心相对应。大于 20 $m \cdot s^{-1}$ 的“大风核”长时间维持造成有组织的次级环流可能是“列车效应”形成和维持的主要原因。

参考文献

[1] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox H E. Flash flood forecasting: An ingredients－based methodology[J]. Wea Forecasting, 1996, 11: 561-581.

[2] 李向红,唐熠,郑传新,等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象,2010,36(8):61-71.

[3] 和卫东. 强对流暴雨预报的初步探讨[J]. 气象,1992,18(12):33-35.

[4] 苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 2009 年山西 5 次横切变暴雨的对比分析[J]. 气象,2011,37(8):956-967.

[5] 廖晓农,俞小鼎,于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象,2008,34(2):10-17.

[6] 曹晓岗,张吉,王慧,等. “080825”上海大暴雨综合分析[J]. 气象,2009,35(4):51-58.

[7] Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. Synoptic and mesoscale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1979, 60: 115-123.

[8] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:173.

[9] 黄小玉,陈江民,叶成志,等. “碧利斯”引发湘东南特大暴雨的多普勒雷达回波特征分析[J]. 大气科学学报,2010,33(1):7-13.

[10] 何群英,解以扬,东高红,等. 海陆风环流在天津 2009 年 9 月 26 日局地暴雨过程中的作用[J]. 气象,2011,37(3):291-297.

[11] 何群英,东高红,贾慧珍,等. 天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析[J]. 气象,2009,35(7):16-22.

[12] 杨春,谌芸,方之芳,等. “07.6”广西柳州极端暴雨过程的多尺度特征分析[J]. 气象,2009,35(6):54-62.

[13] 牟容,余君,刘德. 重庆 2008 年 7 月 21 日强对流天气成因及其特征[J]. 气象,2009,35(5):49-54.

[14] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:8.

[15] 俞小鼎. 强对流天气临近预报[G]. 全国气象部门预报员轮训系列讲义.

[16] Corfidi S F, Merrit J H, Fritsch J M. Predicting the movement of mesoscale convective complexes[J]. Wea Forecasting, 1996, 11: 41-46.

[17] 黄小玉,姚蓉,叶成志,等. 梅雨锋引发的“03.7”特大暴雨雷达回波分析[J]. 气象,2008,34(8):45-50.