浦东国际机场连续强对流过程的对比分析

唐民

（民航华东空管局，200335）

摘　要：利用各种常规观测、多普勒雷达、卫星云图及风廓线仪资料对 2006 年 6 月 22 日发生在上海浦东机场的连续性对流过程进行对比分析，揭示这对流过程中三次强对流天气的发生、发展过程及其触发机制。分析表明：第一次强对流天气为局地热力对流，第二次强对流天气为锋面过境引起飑线过程，第三次强对流天气是伴随中尺度低压环流的对流过程。在飑线发生 3 小时前，浦东机场风廓线仪资料中有明显的风向的垂直切变，具有较好的预警意义。

关键词：飑线　强对流　多普勒雷达　卫星云图　风廓线仪

引　言

夏季是雷暴的高发季节，飑线作为强烈的中小尺度系统在上海地区也时有发生。在一天 12 小时内发生三次强对流天气过程，其中包括一次飑线过程，这给民航气象预报和服务带来有较大的困难。目前，随着探测手段的不断改进发展，特别是浦东机场风廓线仪和虹桥机场多普勒雷达的应用，使得对中小尺度天气系统的细致分析和预警成为可能。

本文利用各种常规观测、多普勒雷达、卫星云图及风廓线资料对 2006 年 6 月 22 日发生的三次对流过程进行对比分析，揭示这三次强对流天气的发生、发展过程，增加对飑线天气系统的了解与认识，从而提高航空气象的服务能力。

1．天气形势分析及气象要素演变

1．1 天气形势分析

受北方气旋后冷空气扩散影响，6 月 22 日起副热带高压呈明显东退减弱趋势。500 hPa 上 5880gpm 等高线北端由 21 日 12 时（UTC，下同）的 33°N 南退至 22 日 00 时的 30°N，22 日 12 时又退至 28°N，西端由 21 日 12 时的 109°E 东退至 22 日 00 时的 112°E，22 日 12 时又快速东退至 117°E（图 1）。副高的减退往往有利于西风带系统的南下与发展[1]。此外，500 hPa 上东亚槽移速很快，槽后弱冷空气扩散南下，影响至 30°N 的沿海地区。00 时上海已处槽底。

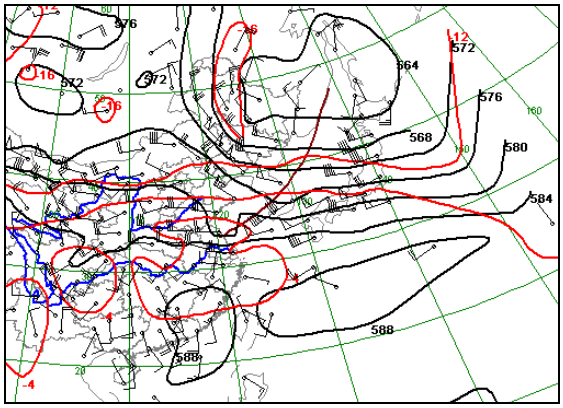


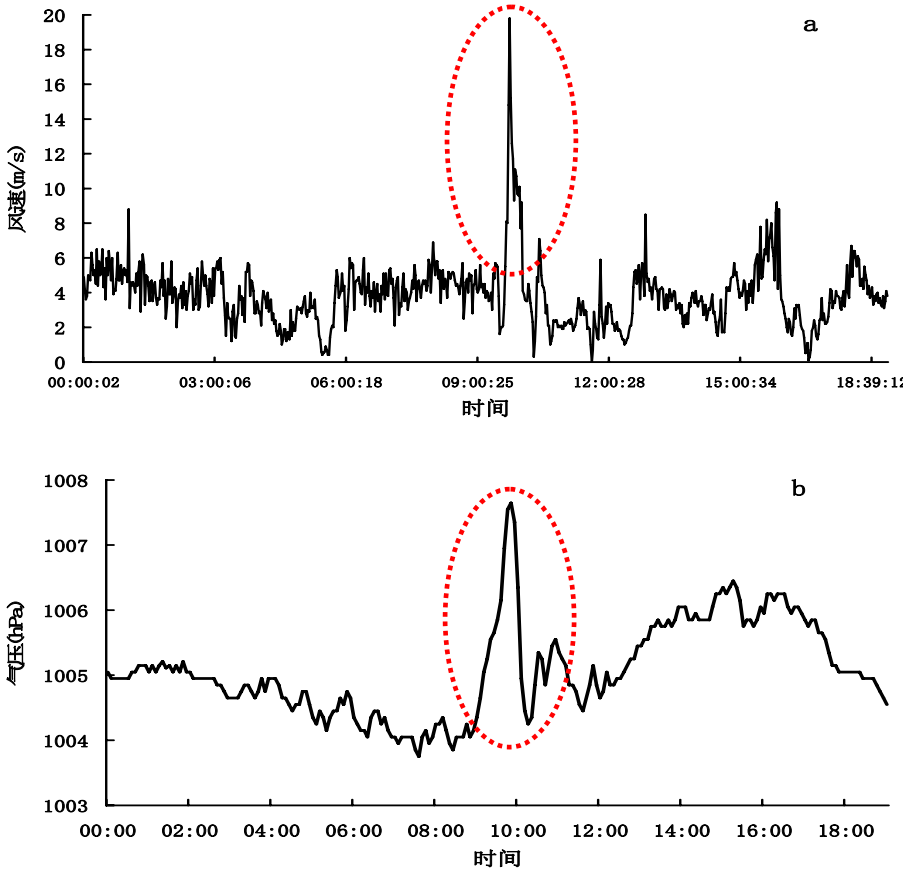
图 1　2006 年 6 月 22 日 00 时(UTC)500hPa 高度场

而 700 hPa 上，从朝鲜半岛沿 35°N 至秦岭山脉为一东西向的切变线，切变线以南西南

气流强盛。在 33° N 附近形成一条从苏北沿海至四川盆地东北部、风速达 16 m•s $^{-1}$ 的低空急流带。急流带也对应了湿度场大值区，表明水汽条件很充沛。随北方冷空气的扩散，切变线南压，相应的低空急流轴南移。受其影响， 22 日 12 时上海的西南风速也达 16 m•s $^{-1}$。辐合线南北形成很强的风速、风向切变。对应的低空 850 hPa 上切变线较 700 hPa 的切变线偏南，00 时位于 33° N。西南气流也偏南偏弱，急流轴风速在 10 m•s $^{-1}$ 左右。到 12 时，切变线南压 1-2 个纬距，而东西向的辐合加强，且切变线上激发出中尺度低压环流。由此可见，上海位于低空切变线的南侧，西南急流轴的附近，受活跃的暖湿气流影响，而 500 hPa 上副高东撤南退速度快，弱冷空气扩散至上海地区，从而形成上干冷下暖湿的不稳定层结，高空冷平流冲击低空暖湿气流区，有利于激发中尺度对流、飑线的形成。

1．2 气象要素分析

2006 年 6 月 22 日上午，浦东机场碧空，风向西南，风速 4-5 m•s $^{-1}$。能见度在 5 公里以上。但从中午 04 时（UTC，下同）开始至凌晨 17 时间，陆续发生了三次强对流天气过程。时间分别是 04-06 时，09-12 时及 15-16 时，其中，中午及半夜主要表现为中等强度的雷阵雨天气。傍晚则为大雷雨天气，且各气象要素发生剧烈变化，为较典型的飑线过程。



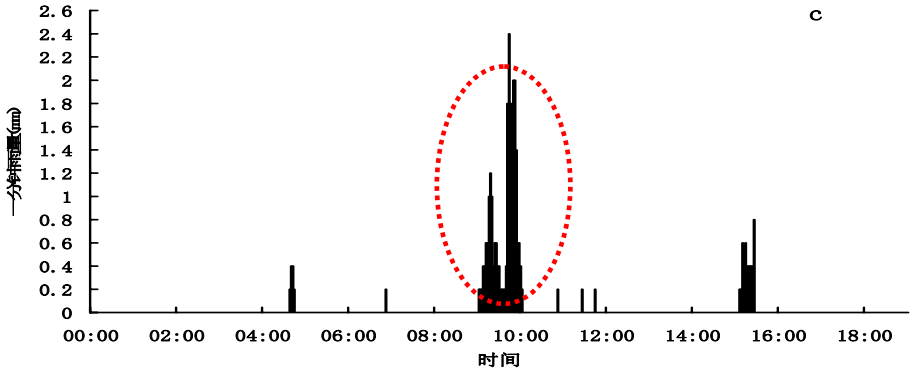


图 2 浦东机场自动气象观测系统风速（a），气压（b）及一分钟雨量（c）演变图

由各气象要素图上，均可明显区分飑线过程。因其引起气象要素的急剧变化,表现为:风向突变、风速突增：七分钟内，由 3.3 m•s $^{-1}$ 的西南风突增至 19.8 m•s $^{-1}$ 的西北风(图 2a)；气压急升：一小时内，气压上升 3.5 hPa(图 2b); 气温剧降—两分钟减低 1℃（图略）；以及强降水：一分钟最大雨量 2.4 mm,一小时最大雨量达 47.2 mm (图 2c)。

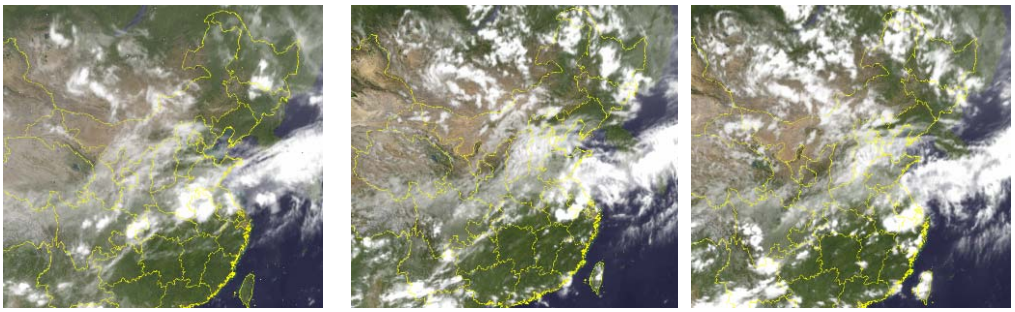
其中风速的加大滞后于风向的突变，并不同时发生。而气压在飑锋过境前后有所区别：飑锋过境前，气压已不断增加，而过境后，气压下降更迅速。其下降坡度比上升坡度更陡。总的来说，各要素峰值所对应的时间差距不大，与飑线过境时间也基本对应。各气象要素的振幅强弱和峰值大小表明了该天气过程的强弱。

1．3 不稳定条件分析

强对流天气的发生、发展是不稳定能量积聚并得以释放的过程。6 月 22 日的天气过程中，沿低空急流，在静止锋北侧，从朝鲜半岛南部经苏北至长江上游有一条东北-西南向的高能舌（K 指数大于 36 度）（图略）。上海位于高能舌南侧的相对低值区（K 指数小于 34 度），虽然不在高能舌范围，但连日的高温也积聚了一定能量，为强对流天气的发生、发展奠定了基础。06 时后，高能舌中心范围缩小并南压，位于上海的正西侧，而上海地区的 K 指数也增加至 34 度，K 指数大于 36 度的高能舌中心的移近与 850 hPa 低空急流出口区的重合有利于发生飑线等强对流天气[2]。12 时，虽然 K 指数大于 36 度的高能中心随飑线能量的释放，在华东沿海已减弱消失，但 K 指数大于 34 度的高能带仍然维持在长江三角洲地区，为后继雷暴提供充足的能量源，所以当满足一定触发机制，雷暴天气就有可能再次发生。

2．红外卫星云图分析各段强对流过程的表现形式

锋面系统作为一种触发机制，有利于对流云团的发展加强。22 日 00 时对应地面静止锋上的多个中尺度对流群在皖、豫、鲁交界区域合并为中尺度对流系统（MCS）（见图 3 的 00 时）。该 MCS 沿西南气流在东移过程中发散并减弱，主要影响长江以北地区，对上海地区的影响并不强。所以中午时段，浦东机场由于地形作用下了中等强度的雷雨，虹桥机场则为少云天气。可见此雷雨过程非系统性影响。



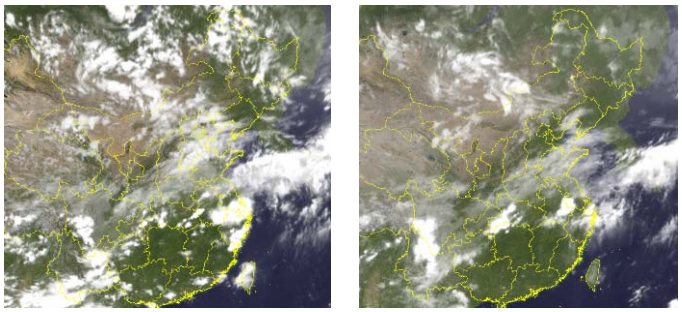


图 3　依次为 2006 年 6 月 22 日 00、06、08、09 及 15 时红外卫星云图

随着北方冷空气的扩散，安徽南部的对流单体不断加强扩大，在 06 时与苏南原 MCS 分裂出的对流云团合并，形成一个新的 MCS，并在东移过程中不断加强。在 08 时的红外云图上可见，长江三角洲地区有光滑整齐的 MCS 外流边界。09 时锋面在上海过境，锋面与 MCS 的外流边界叠加，使得 MCS 内的雷暴群得以发展成飑线。由于副高的东退，处于副高外围的浙江东部及南部沿海在 09 时也发展出较强的 MCS，并向北顶，与长三角洲地区东移中的 MCS 合并。因此使得飑线过后上海地区的雷雨天气仍维持时间较长。随后，MCS 主体东移入海并减弱，但其后部仍有 γ 尺度的雷暴云团发生、发展（见图 3 的 15 时），造成上海地区的再次雷雨过程。但因其较小尺度，强度远弱于飑线系统。

3．多普勒雷达资料分析

上海浦东机场位于东海之滨。夏季白天，陆地表面受日照强烈加热，而海洋升温较慢。由于地表受热不均，造成局地温差，常在近地层形成绝对不稳定层结，造成小型的垂直环流。这种上升运动也可作为一种触发机制，使对流容易发展加强。正是这种热力抬升作用，使得在市区很小很弱的对流云在东移至浦东机场附近时得以加强发展，形成热雷暴。22 日中午，浦东机场发生的雷雨天气即是典型的热力性雷暴过程。（下图）04：08 时虹桥机场多普勒雷达图上显示，虹桥与浦东机场间有一小回波点，至 04：38 时，已发展成高度近万米，强度达 40dBz 的对流云团，04：45 时影响浦东机场，形成雷雨过程。但其减弱也很快，05：22 时主体移到海上，强度也减弱为 30dBz。而在此期间，虹桥机场一直维持少云天气。所以，此次雷雨过程的局地性特征非常强，影响面也较小。

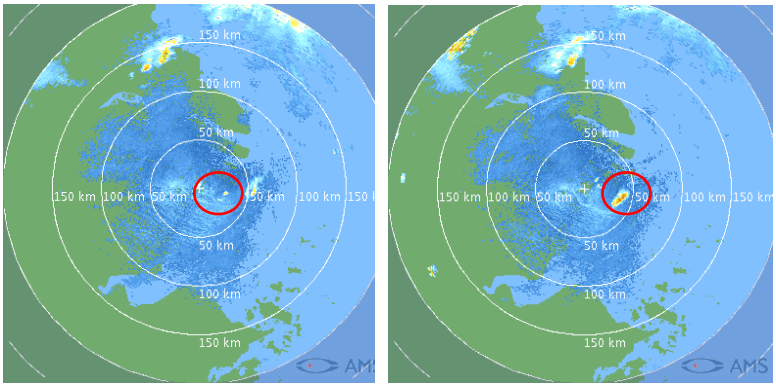


图 4　2006 年 6 月 22 日 04:08(左)，　04：38（右）时上海虹桥机场多普勒雷达回波强度图

下午以后，由于锋面系统的南压，位于苏南地区的对流回波向东南东方向移动，逼近上海地区。从回波的发展演变可见，该飑线的形成类似于断续线型与后续线型的结合[2]，即在低层辐合线上不断有对流单体生成，这些单体逐渐弥合组成一带状回波带。而且存在一个回波发生源，回波不断新生发展，最终形成飑线。07：01 时回波强度图上可见，上海西侧有三条主要的回波带 a,b,c（见图 5 的 07：01 时）。在东移过程中，c 回波带不断新生加强，移

速相对较慢，b 回波带强度变化不大，东移动最快，而 a 回波带在东移过程中后部减弱明显。值得注意的是，在回波带前方（即右侧）虹桥雷达站附近发展出小块对流云团。此新对流单体的生成，很可能是风暴右向传播的结果。08：42 时，b，c 两回波带合并为一条弓状回波。弓状回波常表示中尺度组织增强外流和产生下击暴流[3]。09：01 时，弓状回波前部移到雷达站附近，虹桥机场发生风向、风速的突变，原东北风转为偏西风并出现 17m•s $^{-1}$ 的阵风，并伴随强阵雨。半小时内，气温下降 5℃，露点上升 3℃，气压升高 3 hPa，出现飑线过程。而此时，位于浦东机场的是弓状回波前部的新生回波带，强度还较弱。而到 09：42 时，弓状回波与此新生回波带合并，主体东移到达浦东机场，造成浦东机场飑线过程，阵风达到 20m•s $^{-1}$。由于回波带的合并过程，此阶段是弓状回波的鼎盛阶段，回波强度最强达 50dBz 左右，云顶高度在 15 km 以上。此后弓状回波主体入海并逐渐减弱。

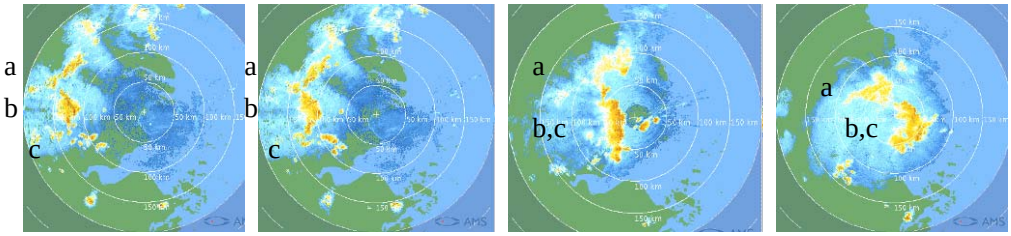


图 5 依次为 2006 年 6 月 22 日 07：01、07：22、08：42 及 09:42 时上海虹桥机场多普勒雷达回波强度

由于静止锋移速慢，锋上不断激发出中尺度低压系统。在低层辐合线上也就不断有对流单体生成。(图 6)13：41 时，虹桥机场附近又有三块小对流单体生成，东移过程中合并发展。杭州湾也有回波带快速向东北方向移动。15：01 时两回波带合并形成一条东北西南向的强回波带，其北段在浦东机场造成又一次雷雨过程。此次雷雨回波带的强度和范围都远小于 09 时的飑线系统。

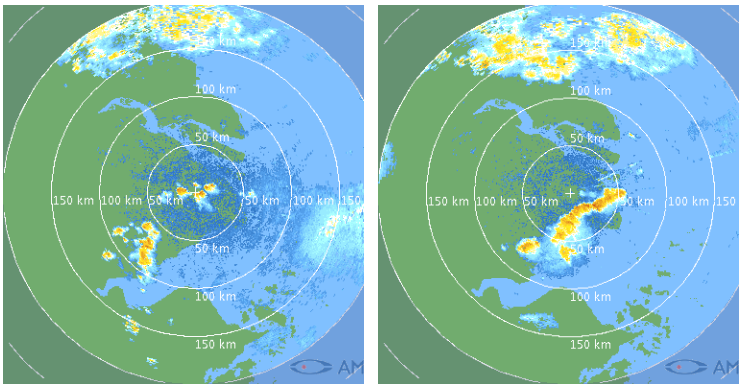


图 6　　2006 年 6 月 22 日 13:14（左） 15:01（右）时上海虹桥机场多普勒雷达回波强度图

4．风廓线资料分析

浦东机场 LAP-3000 风廓线仪可探测近地面至 2-3 km 高度间的水平风和垂直风廓线，其垂直分辨率为 60 m，时间分辨率为 15 min。

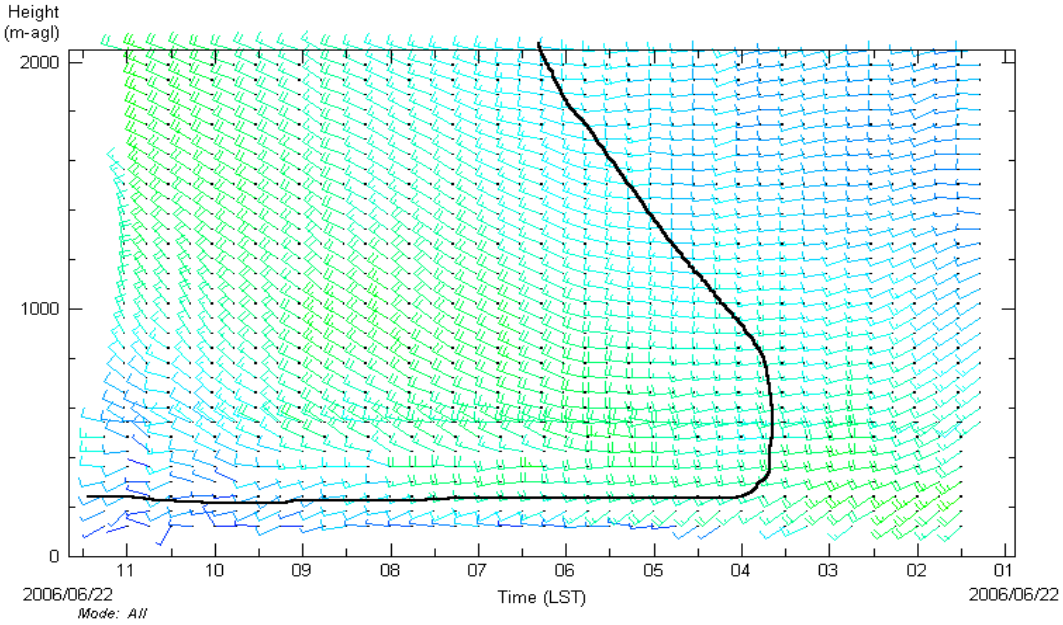


图 7　2006 年 6 月 22 日 01：00-11：00 时（北京时）浦东机场观测到的水平风垂直廓线演变

(风羽颜色表示风速的大小，由蓝到黄逐渐增大，粗黑线表示各高度层风向的切变)

浦东机场风廓线仪资料显示，21 日从地面至上空 2 km 范围内,整层为西南气流控制，副高边缘特征明显。随着时间推移，400 m 以上高度出现先低层后高层的风向顺转，即高层维持西南气流，而低层变成西北风，在各时次上表现为风向随高度的逆转，表明该层有冷平流。至 06 时（北京时，风廓线资料均为北京时）后，400m 以上高度的风向均顺转为西北风，且中上层风速随之增大。而 400m 以下近地层仍为西南西气流，与上层的西北风形成切变（见图 7）。图 7 中横向粗黑线代表了这种垂直方向风切变，造成上冷下暖的不稳定层结。随夏季日照地面的较快升温，更增强了这种层结不稳定，有利于对流的发展。至 11：45 时（见图 8），地面至 500m 间风向由西南西风突变为东北风，且原 2-3m•s $^{-1}$ 的风速突增为 8-12m•s $^{-1}$，底层的东北风与上层的西北风形成了强切变，有助于上游对流系统的加强。浦东机场 12 时出现阵雨，12：45 分出现雷雨天气。因此 11：45 时的风向突变预示了浦东机场天气现象的变化。从预报指示性来说，底层西南气流与其上层西北气流切变为对流的发展创造有利条件，而环境风垂直切变的加强对雷暴产生更起到触发作用。

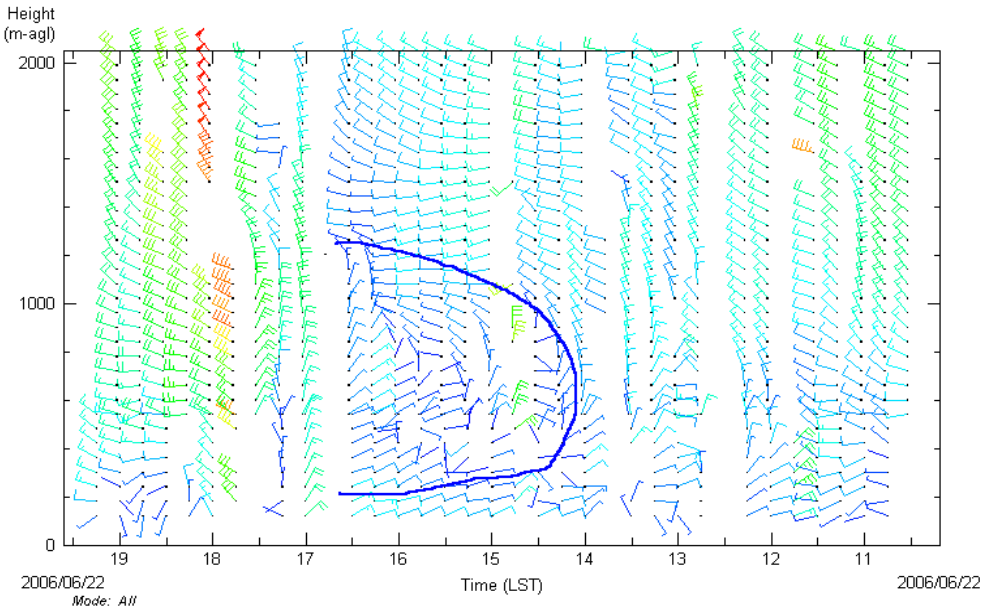


图 8　2006 年 6 月 22 日 11：00-19：00 时（北京时）浦东机场观测到的水平风垂直廓线演变
蓝色粗线显示风向逆转后，高低空的风向切变

14 时后，风廓线资料显示，风向从底层到高层均有逆转。尤其在 1000-1600 m 间，由西北风转为西南西风，风速由 4~5m•s $^{-1}$ 加大至 7~8m•s $^{-1}$。中层西南气流的增强，不仅有利于暖湿气流的输送及不稳定能量的积聚，且与底层东北风间的切变也相应增大（图 8 中蓝色粗线显示风向逆转后，高低空的风向切变）。强垂直风切变的长时间维持是形成强风暴的重要条件，对 17 时飑线过境有很好的指示作用。此外，17 时至 12 时之间均可见：风向随高度有明显的逆转（由东北风逆转为西北风）。根据热成风原理可知，该层有冷平流。持续冷平流的作用有利于不稳定层结的发展。

伴随飑线过程的底层风场变化在风廓线观测资料中也有明显反应。17 时浦东机场为飑线前部东北风入流，此后在 15 分钟内由 10m•s $^{-1}$ 减弱为 1m•s $^{-1}$（接近静风），30 min 后，风向逆转为西北风，为飑线后部的出流，具有明显的飑线风场特征[3]。随着飑峰过境，近地层风速很快减小，半小时内风速已降为 3m•s $^{-1}$。可见飑线过境的过程是：先为静风，然后风向出现突变，阵风增大，随后是强降水过程，飑线过境后风速迅速减小。所以环境风场的强垂直切变和强不稳定层结可作为强烈天气过程的预报着眼点。

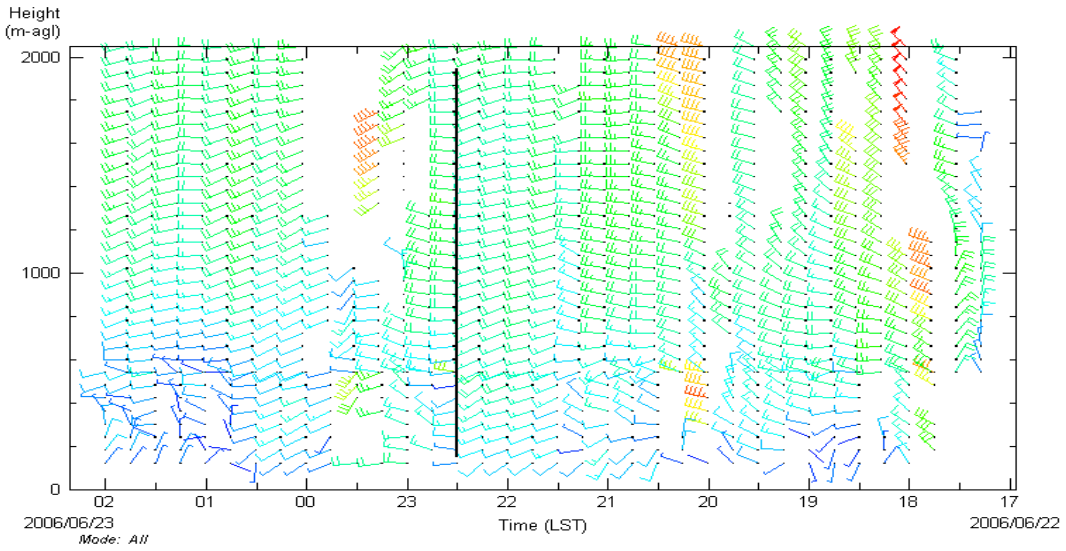


图 9 2006 年 6 月 22 日 17：00-6 月 23 日 02：00 时（北京时）浦东机场观测到的水平风垂直廓线演变

图中粗黑线表示各高度层风向的水平切变

飑线过后，除 300m 以下近地面层为西南风外，上层均为西北风控制，且风速远大于飑线来临前，表明高层冷空气进一步下传。但 21 时后整层风向一致转为较强的西南风，暖湿气流的增强为雷暴的再次发生提供了不稳定能量。22：30 可见各高度层风向又有西南到西北风的顺转（见图中粗黑线），表明自上而下有垂直冷空气的扩散，但维持时间短、强度较弱。23 时，1300m 以下西北风与其上的西南风形成强烈的垂直切变，促使雷雨的再次发生。所以此次过程中西南暖湿气流带来暖湿气流引起不稳定能量的积聚是形成雷暴天气的关键。

对比这三次强对流天气过程，可见它们的形成有共同之处，系统来临前均有西南暖湿气流的输送、高层冷平流的配合，并具有垂直风切变。而环境风切变的强弱、不稳定层结的强度是决定雷暴过程强弱的关键。

6．结论

2006 年 6 月 22 日发生在浦东机场的三次天气过程具有不同的特征。第一次为局地热力对流，第二次为飑线过程，第三次是伴随中尺度低压环流的对流过程。在地面要素、卫星云图、多普勒雷达和风廓线资料也表现为不同的特征。

在地面要素变化中，与其他两次过程相比，飑线过程表现为风速、气压等的突变过程。

在雷达回波图上，第一次的热力对流表现为相对孤立的对流块的快速发展，飑线过程表现为快速移动的对流带，而且移动过程中伴随了对流体的不断新生、合并、加强。

从风廓线仪观测资料上，三次对流过程都有较明显的前兆。在热力对流发生前，中高层的风向自下而上逐渐转为西北风，表明高层的冷空气逐渐入侵，而低层一直维持西南风，在此形势下极易积聚不稳定能量，而在地面的局地加热的触发下容易形成热力对流。

在飑线发生前，风廓线仪资料中有明显的风向的垂直切变，中层有出流特征，低层有入流，在此次过程中，提前 3 小时即表现出了该变化特征，因此具有较好的前兆意义。

第三次雷暴过程表现为整层风场的水平切变，类似于短波槽过境引起的对流过程。

参考文献

1 姚祖庆, 上海“0185”特大暴雨过程天气形势分析. 气象, 2002, 28(1):26-29.

2 张芳华, 2004 年 7 月 12 日上海飑线天气过程分析. 气象, 2004, 31(5):47-51.

3 张杰, 中小尺度气象学. 北京:气象出版社, 2006:222.