

强对流天气的地面中尺度概念模式及其在临近预报中的应用

高庆凯 李洪勤 刘金玉

(空军气象研究所)

提 要

本文利用华东中尺度天气试验资料,分析了系统性雷暴过程中逐时地面物理量场的变化。结果表明, θ_{se} 、 $\text{div}\nabla$ 场与雷暴活动关系密切;在其不同发展阶段,它们具有不同的中尺度扰动特征;这些特征对天气的短时变化有一定指示意义。在此基础上,我们概括出了华东地区强对流天气发展四个阶段的概念模式。所得结果对于认识这类中尺度扰动和临近预报是有益的。

一、引言

强对流常伴有雷雨、冰雹、大风等灾害性天气。对流运动的大部分空气来自对流层低层,因此,低层大气状态与强对流天气发生发展关系密切。随着计算机和通信技术的发展,逐时的地面物理量计算结果已开始在国内临近预报业务中使用^{[1][2][3]}。由于地面散度、涡度、假相当位温、水汽通量散度等物理量场上的某些特征,对未来回波的变化、移动方向有指示作用,所以在1—2小时或2小时以上的预报中,应用上述特征建立定性的判据或定量的统计关系对提高强对流天气和暴雨的预报效果有较好作用。过去多是研究和单一物理量与强对流天气的关系,而很少把几种物理量结合起来进行分析。最近,我们利用华东中尺度试验的地面观测资料和雷达资料,对伴随强对流天气出现的地面中尺度扰动进行了分析。研究结果表明,散度反映天气变化比涡度要好, θ_{se} 比水汽通量效果好,把散度与 θ_{se} 结合起来效果更好。我们分析了散度场和 θ_{se} 场的几种典型配置与回波演变的联系,研究了强对流天气地面中尺度扰动的动力、热力状况及空间分布和时间演变,得出了强对流发展过程中地面中尺度扰动特征。在此基础上,初步概括出了可预

报强对流天气发展变化的概念模式。为强对流天气的临近预报提供了一些依据和方法。1985年5—6月份曾使用南京地区航空报网每小时一次的资料,作了使用试验,效果较好。

二、资料

在研究中,我们使用了华东中尺度天气试验区($29^{\circ}35' - 34^{\circ}27'N$, $114^{\circ}00' - 122^{\circ}00'E$)每小时1次的地面测站观测资料。测站平均间隔为60km,即在200km距离上约有4—5个观测记录。分析了1980—1983年试验期中选出的11次完整天气过程。在分析中,计算了逐时地面物理量场,并由计算机输出了计算结果的水平分布图。在地面散度、假相当位温和流场等要素场图上,配上同时间和下1小时的雷达回波、天气现象,进行对比分析。所用的雷达回波资料是南京、徐州、肥东、常州、苏州、安庆等测站的综合探测(PPI)拼图。天气现象由天气纪要中摘录。为了便于分析,我们将对流回波出现定为发生阶段,发展或维持时期为发展阶段,强天气发生时期为强盛阶段,回波减弱或强天气现象消失为减弱阶段。11次天气过程四个阶段的时次数分别为10、50、36、51。由于每次天气过程各个阶段持续的

时间不同,故四个阶段的时、次数也就不同。有一例天气过程产生于区外,以后移入试验区,所以发生阶段时数少。

三、地面 θ_{se} 和散度的配置与强对流回波演变关系的一些事实

人们通常认为 θ_{se} 的水平分布反映总能量的分布情况,实际上,它还与不稳定能量 E 的水平分布密切相关。

$$E = g[\Delta H_{sp_1}^{P_2}(\theta_{se}) - \Delta H_{p_1}^{P_2}]$$

式中 $\Delta H_{p_1}^{P_2}$ 是两层等压面之间的厚度;

$\Delta H_{sp_1}^{P_2}(\theta_{se})$ 是绝热位势厚度,它只是绝热上升空气的 θ_{se} 的函数^[4]。在不同天气过程中及同一天气过程的不同阶段, $\Delta H_{p_1}^{P_2}$ 变化是很大的,对 E 的分布有重要影响。但是,对于同一天气过程的一定阶段,在中尺度范围内,厚度场变化(特别是纬向方向上)是不大的。因此,地面 θ_{se} 的分布基本上反映了当时不稳定能量的水平分布情况。也就是说, θ_{se} 的水平分布大体上反映了影响强对流天气产生的热力条件的不均匀分布。

地面流场上切变线种类很多。但都对应着流场的辐合区,反映低层存在上升运动。在切变线附近不均匀的上升气流可以触发不稳定能量释放,产生强天气现象。强对流运动发展过程中引起的地面风场扰动,也可以产生或加强地面切变线,以致发展成飑线。飑线前后的上升、下沉气流有组织地释放不稳定能量,是影响飑线维持发展的重要条件。因此,在强对流天气的0—6小时预报中,应该把 θ_{se} 的水平分布和散度场结合起来,进行综合分析。在分析中,我们看到下面的事实:

1. 对流回波常常在流场的辐合区与 θ_{se} 高值区的重迭部分形成。

1982年5月30日12时在盱眙至镇江一线生成多个孤立对流回波,呈带状排列。在12时30分前后,这一回波带上,先后出现了雷暴天气。它们形成在 θ_{se} 脊与辐合区重迭处(图1)。 θ_{se} 和流场的这种配置有利于中小尺度扰动发展,触发不稳定能量释放,产生雷暴天气。通常这种配置的形势要先于雷暴

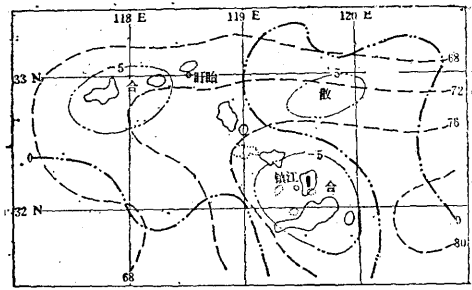


图1 1982年5月30日11时综合图
断线表示 θ_{se} , 点断线表示散度, 点线表示 11 时回波, 实线表示 12 时回波

几小时出现。

2. 伴有辐合线的对流回波在逼近前方中尺度 θ_{se} 脊时, 将迅猛发展, 强天气往往出现在前期的中尺度 θ_{se} 脊中。

1982年5月30日14时左右在杭州湾附近出现了强雷暴、冰雹、大风天气。图2给出了这一天13时的地面 θ_{se} 、散度场和辐合线的位置。从图中可以看出, 此时 θ_{se} 和流场有明显的波动特征。杭州湾处为一中尺度 θ_{se} 脊, 在这个 θ_{se} 脊和后面 θ_{se} 槽线之间, 流场上有一辐合线。这一辐合线组织其前部暖湿空气上升释放不稳定能量, 和后部的来自云中低 θ_{se} 空气的下沉气流, 使扰动发展, 产生了强天气。

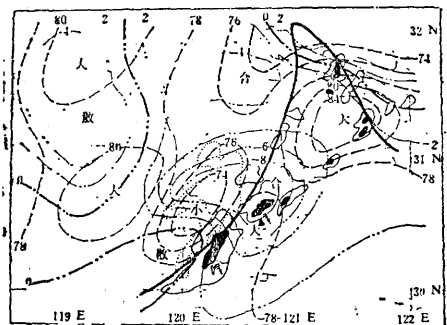


图2 1982年5月30日13时综合图
断线表示 θ_{se} , 点断线表示散度, 点线表示 13 时回波, 实线表示 14 时回波

3. 强对流回波进入 θ_{se} 槽、脱离切变线或与辐散区重迭时, 将迅速减弱。

1982年6月17日23时,在盐城北部有一大片对流回波区,然而,这片回波的东北部已与 θ_{se} 槽区和辐散区重迭,并且原与回波相配的切变线也脱离了回波,处于这样的 θ_{se} 和流场上空的对流运动,已失去了来自低层空气上升释放位能所提供的动能来源,将减弱消失。而这片回波的南部是 θ_{se} 脊和辐合区。结果,到24时这片回波的东北部迅速消散,南部的大丰、兴化等地均有强天气出现(图3)。

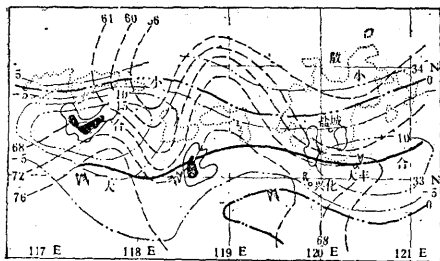


图3 1982年6月17日23时综合图
 断线表示 θ_{se} ,点断线表示散度,粗实线表示切变线,点线表示23时回波,实线表示24时回波

四、强对流天气的地面中尺度扰动特征及概念模式

在强对流发生发展过程中,地面风场伴有扰动,在强对流天气移动方向上,依次有一对辐合、辐散中心与天气区相配。这种扰

动不是规律的正弦波,而是一个波包。我们在辐合辐散中心连线及其延长线上依次取散度为0,负中心、0、正中心、0五个点,统计了各点上 θ_{se} 值和冰雹、飏、雷暴、雷雨等天气现象出现的频率(以下简称天气频率)。由于伴随强对流天气出现的中尺度系统中,散度的数值比天气尺度系统中大得多,用试验区测站网资料(不作尺度分离)直接算得的散度,基本上可以反映2—3个站以上成片的区域性雷暴系统相伴的地面风场的中尺度扰动。我们利用147个时次的资料,研究了它们在不同阶段的变化。

在强对流天气发展过程中, θ_{se} 扰动随着天气的演变而变化。表1给出了各个阶段 θ_{se} 值及相对于发生阶段的变化。在发展和强盛阶段,有强的负变温中心进入辐散区的后部,并开始侵入辐合区。在辐合中心及其前部 θ_{se} 稍有升高。在进入减弱阶段时,负变温已占据了整个辐合区,辐散区后部的 θ_{se} 略有回升。这表明,在系统发展过程中风场与 θ_{se} 场的扰动位相配置是变化的。有一股冷空气由扰动的后部侵入,随着强对流天气由发生到减弱而逐渐向前移动。反映在辐合至辐散中心的 θ_{se} 差值上,在天气发展过程中不断增加,到强盛阶段最大达到 10.5°C ,进入减弱阶段后又急剧减小。

我们还计算了各阶段辐合中心处不稳定

表1 θ_{se} 值及相对发生阶段的变化

位 置	0		正 中 心		0		负 中 心		0	
	$\theta_{..}$	$\Delta\theta_{..}$	$\theta_{..}$	$\Delta\theta_{..}$	$\theta_{..}$	$\Delta\theta_{..}$	$\theta_{..}$	$\Delta\theta_{..}$	$\theta_{..}$	$\Delta\theta_{..}$
发生阶段	63.8	—	64.1	—	67.0	—	70.3	—	71.7	—
发展阶段	59.5	-4.3	61.4	-2.7	65.4	-1.6	71.3	1.0	73.0	1.3
强盛阶段	60.1	-3.7	61.5	-2.6	65.3	-1.7	72.0	1.7	71.8	0.1
减弱阶段	60.7	-3.1	61.0	-3.1	62.1	-4.9	63.3	-7.0	63.7	-8.0

能量值的变化(图4)。不稳定能量自发生阶段后不断增加,至强盛阶段增加量超过 $100\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,而减弱阶段则急剧下降1000多 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从图4中还可以看到各阶段辐合、辐散中心强度以及扰动尺度的变化。在没有强对流发展的情况下,辐合辐散中心强度的绝对值一般都低于 $8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。在对流回波

发生时,辐合辐散中心有规律地成对出现,辐合中心小于 $-10\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。随着强对流天气的发展,辐合中心强度稍有增加,而辐散中心的强度成倍增加,使得两中心绝对值的和加大。到了减弱阶段,辐合、辐散中心的强度都成倍地减少,各中心的绝对值小于 $8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$,且辐合中心值减小得更快。中尺度扰

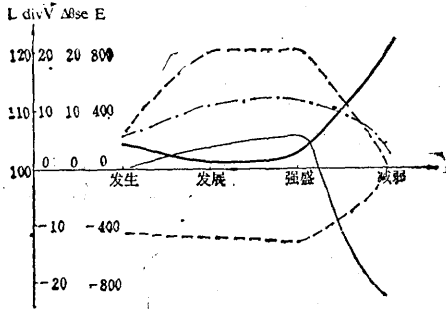


图4 强对流天气发展过程中各阶段的散度(断线),散度正负中心距离L(粗实线), $\Delta\theta_{se}$ (点线), 不稳定能量E(实线)平均值分布

动的尺度与杨国祥等分离出的扰动尺度 220 km^[5]接近。在强对流发展过程中,扰动尺度是变化的。从图4中可以看出辐合辐散中心距离(即半个波长)在发展强盛阶段约为100 km,而进入减弱阶段则明显伸长,达到120 km。这与理论研究中扰动尺度的大小与扰动发展与否的结果是一致的^[6]。而中尺度扰动的结构同采用小扰动方法使方程组线性化后得出的重力内波的结构^[6]有些差别。这可能是强对流扰动强烈,线性分析已不再适用。

综合以上分析,我们按四个阶段初步概括出强对流天气的中尺度概念模式(图5)及其与天气的关系。

1. 发生阶段(图5a)

在此阶段,散度场正负中心相距平均为104km,负中心明显强于正中心,正负中心平均值分别为 $6.01 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $-14.03 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。辐合中心强度的变化与上升气流的变化有关,而辐散中心的变化则与下沉气流的变化相联系。此时近地面水平辐合较强,即水平流入气流强。 θ_{se} 梯度最大区出现在散度的正负中心值之间,两点间差值平均为 $6.2^\circ C$ 。此时对流天气位于正负中心之间的“0”值附近,而后1小时天气出现的频率最大值在辐合中心处,且强度加强。

2. 发展阶段(图5b)

在发展阶段,散度场正负中心之间的距离略有缩短,负值中心变化不大,而正值中

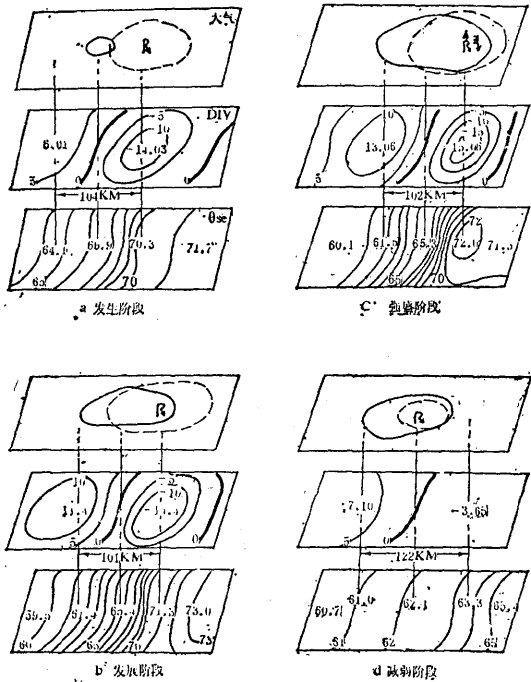


图5 强对流天气的中尺度概念模式图

心明显增强,平均值达 $11.4 \times 10^{-5} s^{-1}$,在辐合中心处 θ_{se} 升高,不稳定能量增大。散度场的正负中心之间 θ_{se} 梯度加大,在散度正中心的后方出现负 $\Delta\theta_{se}$ 中心,斜压性加强。这时天气区进一步扩展,各地点强天气出现频率明显增加,之后1小时的天气出现频率的最大值仍在辐合中心处,强度进一步加强。

3. 强盛阶段(图5c)

强盛阶段的基本特征与前一阶段相近。在这一阶段中散度的正负中心之间的距离变化不大,正负中心值都达到最大,正中心值 $13.06 \times 10^{-5} s^{-1}$ 比发生阶段高一倍多,两中心值的差为 $28.1 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。辐合中心 θ_{se} 持续增加,相应不稳定能量继续加大,两中心间 θ_{se} 梯度达到最大 ($11.3^\circ C/100 km$)。天气发展达最强,之后1小时在辐合中心强天气出现频率达到100%,即辐合中心区是之后1小时强天气的落区。

4. 减弱阶段(图5d)

在减弱阶段,散度正负中心之间的距离

增大到122km。此时环境条件对存在的扰动起抑制作用，辐散中心值比强盛时减少一半，辐合中心值只是强盛时的1/3，且辐散中心强于辐合中心。辐合中心处 θ_{se} 迅速下降，正不稳定能量消失，并转为负不稳定能量。两中心间 θ_{se} 梯度减少为 $1.3^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ 。各地点天气出现频率明显降低，之后1小时天气出现频率最大值位于散度“0”值线附近，地面小图上天气区与辐合线已脱离，强天气现象消失。

五、强对流天气的临近预报

临近预报的重点是预报强对流天气的变化。利用与强对流天气相连的地面中尺度扰动的概念模式，可以判断天气在短时间内的变化。

首先，根据散度场的辐合、辐散中心的距离、强度及其变化， θ_{se} 梯度及其变化，辐合中心处不稳定能量的大小以及天气的分布及其变化确定系统发展所处的阶段；在此基础上判断未来天气的变化。表2给出了各阶段几个特性点上，当时和之后1小时天气出现频率的统计结果，可供预报时参考。当扰动处于初始、发展阶段时，未来天气区将扩大，辐合中心处多为1小时后强对流天气的落区，表现为天气向辐合中心移动。在强盛阶段，强对流天气将出现在辐合中心附近 θ_{se} 高值区。减弱阶段天气区将缩小，强度将减弱，之后1小时的天气多维持在辐合辐散中心之间。

概念模式中重点给出了之后1小时天气

表2 各阶段强对流天气出现频率统计

天气 时段	位置		辐散中心		0		辐合中心		0	
	当时	1小时后	当时	1小时后	当时	1小时后	当时	1小时后	当时	1小时后
初始阶段	0	0	0.3	0.2	0.6	0.6	0.2	0.8	0	0.4
发展阶段	0.26	0.22	0.56	0.50	0.82	0.86	0.52	0.86	0.08	0.42
强盛阶段	0.25	0.17	0.58	0.31	0.83	0.78	0.64	1.0	0.19	0.53
减弱阶段	0.14	0.02	0.51	0.35	0.78	0.63	0.39	0.47	0.08	0.24

发展变化的情况。实际上地面物理量预示天气变化提前的时间不等，短则在当时（少数），长可以提前4个小时就有征兆，而多数在1—2小时。

在上面结果的基础上，我们建立了强对流天气临近预报的逻辑判断方法：

首先，由08点地面图和区域的高空形势分析本地区天气形势对强对流天气的产生是否有利，并计算出11点的地面要素场，配合同时间雷达回波，看有无对流回波发展，作出是否有利出现强对流天气的判断。若有利对流发展，计算每小时物理量场，并与雷达回波或天气区配合，对之后1小时天气变化作出判断。

如果：①散度场中，与对流回波或天气区相连的一对正负中心的距离缩短，差值加大，尤其是负中心值加强；② θ_{se} 场中，辐散、辐合中心之间温度梯度加大；③流场

中，在散度的负区有切变或小涡旋。而且已有对流回波生成，则对流回波将发展，并向散度的负中心移动，在负中心区将会出现强对流天气，即负中心和 θ_{se} 大值中心的重迭区是强对流天气的落区。

如果出现下列情况之一：

①散度场中，对流回波附近负值明显减弱到 $> -5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ；② θ_{se} 扰动及其梯度均减弱， θ_{se} 冷槽与对流回波重迭；③小涡旋消失或切变线远离回波。则强对流天气将很快减弱，甚至消散。

按照上述规则，统计11次天气过程的提前1小时预报的准确率为95%。1985年5—6月在南京军区空军预报业务工作中进行了实际应用试验。试验期间该区出现7天两个站以上雷雨天气，其中6天预报正确，效果好。

六、结语

根据实际观测资料,我们分析研究了伴随强对流天气出现的地面中尺度扰动的空间和时间演变特征,得出了这类中尺度扰动与强对流天气的配置关系,概括出了根据地面扰动判断天气发展变化的概念模式。这不仅补充了外推法的不足,为强对流天气发生发展变化的临近预报(甚短期预报)提供了依据,而且对人们认识这类中尺度扰动的发生、发展及减弱规律也是有益的。

参考文献

〔1〕田畑 明, しーダーエコーの発生・发达との关系

について, 測候时报, 46, 6, 1982.

〔2〕Bothwell, P. D. and Crawford, K. C., 13th Conference on Severe Local Storms, 372-375, 1983.10, 17-20.

〔3〕刘金玉、张义增, 根据地面要素场作强对流天气的短时预报, 气象, 11, 1985.

〔4〕李洪勋, 计算不稳定能量的新方法及其应用, 气象学报, Vol., 43, No. 1, 1985.

〔5〕杨国祥、陈丽珍, 低空急流中的中尺度重力惯性波及其对天气的影响, 强对流天气文集, 1983, 气象出版社.

〔6〕张可苏、周晓平, 非静力平衡模式中重力惯性波的频谱、结构和传播特征, 第二次全国数值天气预报会议论文集, 1980, 科学出版社.

The conceptual models of surface meso-scale turbulence of severe convective weather and their application to nowcasting

Gao Qingkai Li Hongji Liu Jinyu
(Air Force Meteorological Research Institute)

Abstract

The change of hourly surface physical parameter fields during the process of severe thunderstorm is analysed in this paper, using the data obtained from Eastern China Meso-scale Weather Experiment. Results of the study show: there exist an immediate relation between the fields of $\theta_{se}, \text{div}\vec{v}$ and the activities of thunderstorm, the characteristics of meso-scale turbulence are different at various stages of weather development, they have certain indicative meanings for the weather change during short period. In the basis of this analysis, we have proposed a conceptual model for the four stages of development of severe convective weather in Eastern China. Results obtained were of benefit to understanding such meso-scale turbulence and nowcasting of severe convective weather.