

冷锋边界层锋生和锋生 环流的诊断研究*

何齐强 吕 梅 张 铭

(空军气象学院, 南京 211101)

提 要

本文依据华东中尺度天气试验加密的边界层资料, 分析研究了1983年4月28日江淮地区冷锋锋生过程。发现锋生具有短时性、不均匀性及主要表现在边界层中等特点。文中还用 Ekman 动量近似导出的边界层锋生环流方程对边界层中的锋生环流做了诊断分析。

关键词: 诊断分析; 边界层; 锋生。

一、引 言

大气中的锋是重要的天气系统之一, 锋生活动过程中常伴有锋生(消)现象, 带来锋生天气的变化。锋生问题的研究已有较长的历史。1956年 Petterssem 导出的锋生方程已成为锋生分析的重要手段。近年来中尺度锋生研究已引起了人们的重视, 并注意到对流层低层的特征对锋生的影响以及锋生如何引发中尺度对流系统(MCS)的问题^[1-3]。

和锋生联系的另一重要问题是锋区横向环流即锋生环流问题, 它不仅涉及到锋生动力学过程, 也是中尺度对流系统和中小尺度雨带的启动机制之一。自1956年 Sawyer 和 Eliassen(1962)提出锋面次级环流方程以来, 锋生环流的研究获得了较大发展, 丰富了人们对锋生过程的认识^[4-7]。

本文对一次冷锋锋生过程作了研究, 主要依据的观测资料是华东中尺度天气试验加密的地面和边界层资料, 本文研究了该锋生的中尺度特征, 分析了制约锋生的主要因子, 并采用 Ekman 动量近似下的边界层锋生环流方程计算了边界层中的锋生函数和锋生环流。

二、锋生的中尺度特征

1983年4月28日, 我国大部分地区受对流层中层南北排列的低槽控制, 低槽主体在 35°N 以北。槽后冷平流较强且扩展到槽前, 其前方有较强的锋区(两侧温差达

1991年4月19日收到, 1991年10月17日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助的课题。

16°C/400km)。在大陆东部的 25—35°N 和 35—45°N 之间分别存在副热带急流和温带急流，在两广经华东至南朝鲜一线有一支低空急流，江淮地区处于两支高空急流之间和低空急流的左测。在地面图上，和高空锋区对应有一条大尺度冷锋自我国的东北一直延伸到西南地区，锋后伴有大于 8hPa 的 3 小时正变压区和大于 8m/s 的强风区。850hPa 图上的槽线和地面锋线较接近，且其北端超前地面锋线。据统计，这种形势是华东地区 4 月下旬和 5 月上旬大范围强对流天气的重要类型^[8]。

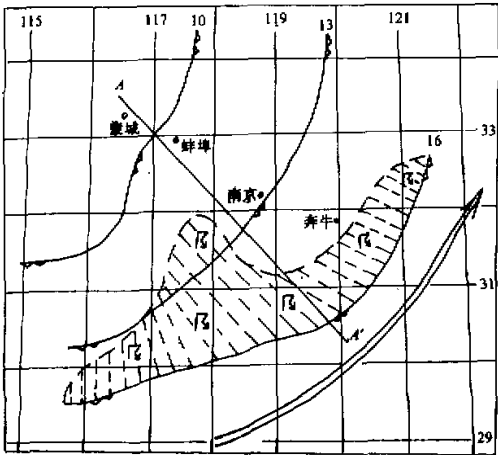


图 1 1983 年 4 月 28 日 10—16 时冷锋动态图
阴影区为 16 时锋后雷阵雨区，双箭头为 08 时 850hPa 急流轴，AA' 为诊断锋生环流剖面

08 时后，冷锋以约 60km/h 的速度进入江淮地区，并向低空急流区接近（见图 1，该图大致也是华东中尺度天气试验区范围），并发生冷锋锋生，锋面天气也随之加强，14 小时后锋后出现大片雷阵雨天气。

本文研究发现，这次锋生有以下三方面特征：

1. 锋生是短时的，具有中尺度的时间特征

表 1 是依据逐时地面加密资料计算的 28 日 10—17 时各时刻锋线两侧各 100km 范围内有关锋段的平均温度 $\overline{T_w}$ （暖区）， $\overline{T_c}$ （冷区）和平均温差 $\Delta\overline{T}$ ，其中全锋段指的是图 1 所示整个锋段上的平均值，从该行可见，从 10 时到 16 时，全锋段上的平均温差 $\Delta\overline{T}$ 除 11—12 时基本稳定外其余均随时间逐渐增大，其值从 10 时的 1.8°C 增大到 16 时的 6.3°C，这表明地面锋生明显。16 时以后锋面移出华东中尺度天气试验区范围，18 时后锋面趋于减弱。锋两侧温差大于 4°C 以上的时间约为 4—6 小时，出现在 12 时以后，锋面天气急剧加强也在这个时段。这说明该锋生具有中尺度的时间特征。

2. 锋生在沿锋线方向空间分布不均匀

表 1 除计算了全锋段两侧的平均温度及其温差外，还根据锋面天气特征，以图 1 中 AA' 剖面为界，将锋线分成两段，以下分别称之为西南段和东北段，并用相同的方法

表 1 28 日 10—17 时各时刻锋线两侧各 100km 范围内有关锋段的平均温度和平均温差

时间 项目 部位	10			11			12			13			14			15			16			17		
	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$	$\overline{T_w}$	$\overline{T_c}$	$\Delta\overline{T}$
全锋段	23.2	21.4	1.8	24.7	21.1	3.6	24.9	21.5	3.4	28.2	23.8	4.4	28.6	22.7	5.7	29.2	23.0	6.2	29.2	22.9	6.3			
西南段	24.6	22.3	2.3	26.6	21.7	4.9	27.4	21.6	5.8	29.2	23.1	6.1	28.6	20.6	8.0	28.9	20.2	8.7	28.6	19.7	8.9			
东北段	21.8	20.4	1.4	22.8	20.5	2.3	22.3	21.4	0.9	27.2	24.4	2.8	28.5	25.1	3.4	29.4	25.7	3.7	29.7	26.1	3.6	27.0	23.8	3.2

分别对这二段作了计算。结果见表 1。由表 1 可见, 尽管这两个锋段在该时段都表现出锋生, 且锋生随时间在加强 (除东北段 12 时以外), 但这两段的锋生强度差别很大, 西南段锋生更强烈, 这体现了沿锋线方向锋生的不均匀性。细致比较各段锋两侧平均温度变化后可见, 东北段的锋生和冷暖区增温强度的不同有关, 而西南段的锋生则主要和暖区增温及冷区的降温相联系。这种锋生在时间和空间上的分布不均匀显示出中尺度锋生过程的复杂性。

3. 锋生主要表现在边界层近地面处

用 1000—100hPa 9 层标准等压面的资料对该冷锋南下的锋生过程作过分析, 并得到了锋区在近地面层为锋生区, 对流层中层为弱锋消区的结论。为避免重复起见, 本文则分析讨论边界层中的情况。用边界层资料可将该冷锋在边界层中的锋生情况揭示得更清楚细致。表 2 给出了边界层各高度上位于该冷锋两侧的测站奔牛站和蒙城站 10 时, 13 时温差。由表可见, 从 28 日 10 时到 13 时, 在 300m 及以下温差随时间明显增大, 在 1.5°C 以上, 这说明锋生主要表现在边界层的下层近地面处。

表 2 边界层各高度上位于冷锋两侧的测站奔牛站和蒙城站 10 时, 13 时温差

时间 (h)	温 度 (°C)	高 度 (m)						
			0	300	600	900	1200	1500
10			4.3	5.0	6.3	7.1	5.4	6.5
13			6.2	6.5	7.0	7.2	6.8	5.2

值得注意的是和锋生伴随, 锋面天气在逐渐加强。28 日 10 时, 锋后为少量稳定性云系, 最大风速 8—10m/s, 13 时随着锋生, 锋附近出现雷雨天气, 锋后最大风速增至 12—14m/s, 16 时锋生加强, 沿锋线出现雷雨带, 锋后最大风速达 16.7m/s, 且在 14—15 时, 在锋后的大别山东侧出现了强飚线过程, 给途经地区带来强对流天气。

三、锋生因子分析

考虑到此次锋生过程的以上特点, 我们依据加密的边界层资料, 采用如下锋生方程来诊断各因子对锋生的贡献^[9]:

$$F = \frac{|\nabla_2 S|}{2} |\text{def } r| \cos 2\beta - \frac{|\nabla_2 S|}{2} \nabla \cdot \vec{V} - \frac{1}{|\nabla_2 S|} (S_x W_x S_E + S_y W_y S_E) + \frac{1}{|\nabla_2 S|} \left[S_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dQ}{dt} \right) + S_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \right], \quad (1)$$

式中 F 为锋生函数, $F > 0$ 为锋生, 反之为锋消, S 为锋面的某种属性, 本文取为假相当位温 θ_{se} , 第一项为变形项, 其中

$$|\text{def } r| = [(u_x - v_y)^2 + (v_x + u_y)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

(2) 式右边的脚标表示对该变量的偏微商, β 为伸长轴与等 θ_{se} 线之间的夹角。第 2、3 项分别为散度项和倾斜项, 第 4 项为非绝热项。由于本文分析的是边界层中的锋生, 这

里非绝热项只考虑空气和下垫面的感热交换,并按文献[9]中的方法取实测资料来计算。计算结果表明,非绝热项对锋生的贡献比其他3项均小一量级,因此本文只讨论该方程前3项的计算结果(计算时水平格距取45km,垂直方向从地面到1500m分6层)。

图2a、b分别是该日10—16时地面锋线东北段、西南段后方 $100\times 100\text{km}^2$ 面积上锋生方程前3项总和对锋生的贡献,它可以表示这两段锋面锋生的平均情况,这是由于该值若除以该区域中的格点数即为该区域上的平均锋生函数。由图可见这两段锋面锋生特征明显不同,西南段从10时到16时边界层中各层持续锋生,且强度较大,东北段虽也持续锋生,但锋生强度较弱,比西南段约要小2—4倍,且从10时到16时锋生的强度还经历了增强到减弱的变化,而它们的共同特征是边界层内锋生强度低层大于高层,最强约在300—600m的层次。这些计算结果在趋势上与以上的讨论及实际的情况是一致的。

为揭示锋生方程各项的相对贡献,我们对锋生强度较大的西南段作了进一步的分析。表3是根据该日16时资料采用上面图2中的计算方法算得的各高度上锋生方程中各项的值及其对锋生的相对贡献。表中虽然各项对锋生都是正贡献,但其重要性仍有所差别。变形项对锋生贡献最大,在300—1200m层次中占总和的一半多,在300—600m

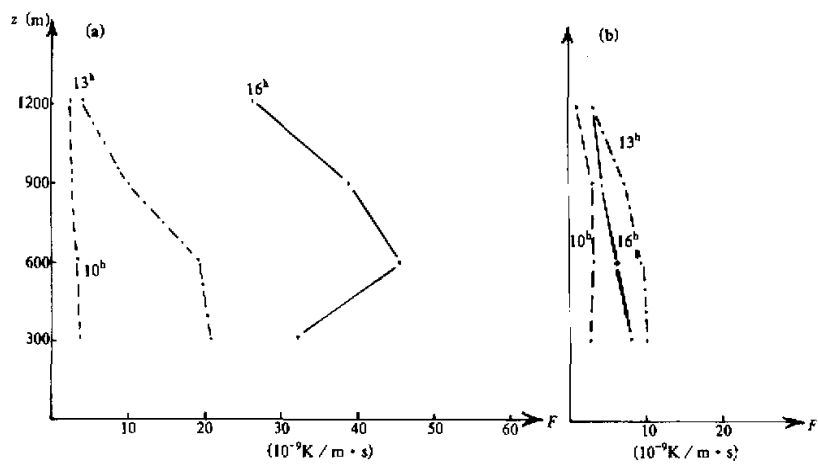


图2 1983年4月28日10—16时锋面东北段、西南段锋生方程前3项总和对锋生的贡献
单位: $10^{-9}\text{K}/\text{m}\cdot\text{s}$, (a)西南段, (b)东北段

表3 锋生方程各项对锋生的贡献 (单位: $10^{-9}\text{K}/\text{m}\cdot\text{s}$)

层次 (m)	300	600	900	1200
三项总和	32.2	45.1	39.3	26.4
变形项	26.1	31.9	18.9	13.4
占总和百分比	81	70	48	51
散度项	4.7	10.1	18.9	8.5
占总和百分比	15	22	48	32
倾斜项	1.4	3.1	1.5	4.5
占总和百分比	4	8	4	17

层次中则占总和的 70% 以上。其次是散度项, 占总和的 15%—48%。变形项和散度项两项的总贡献可达 80% 以上, 它们是锋生的主要控制因子。贡献最小的是倾斜项。该结果文献[1]和[3]中也曾指出过。

四、锋生环流诊断

在 Ekman 动量近似下, 对 Sawyer-Eliassen 锋面次级环流方程进行修正后可得以下 Z 坐标系中边界层中的次级环流方程:

$$\begin{aligned} L(\psi) &= \frac{1}{\gamma^*} \left(f - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \\ &= -2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\kappa}{f} \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial w_E}{\partial y} = A, \end{aligned} \quad (3)$$

这里 $\gamma^* = g / [f(1 + \kappa^2 / f^2)\theta]$, κ 为耗散系数。上述方程右端第一项代表变形场, 它由二项组成, 其分别称为切变变形项和伸长形变项, 第二项为直接由摩擦引起的强迫项 (其与耗散系数 κ 直接有关), 第三项为由摩擦间接造成的 Ekman 抽吸引起的强迫项 (其与 Ekman 抽吸的垂直运动 w_E 直接有关)。在求解该方程过程中, 非齐次的上边界条件的强迫作用也是不可忽略的。方程 (3) 需在以下的边界条件下求解:

$$\psi|_{z=0} = 0, \quad \psi|_{z=H} = \phi, \quad (4)$$

这里 H 为边界层顶的高度, ϕ 为边界层顶处自由大气的流函数, 其可由自由大气的 Sawyer-Eliassen 锋面次级环流方程求得。令 $\psi = \psi_2 + \psi_3 + (z/H)\phi$, 则 ψ_2, ψ_3 可分别由以下定解问题求出:

$$L(\psi_2) = A, \quad \psi_2|_{z=0} = 0, \quad \psi_2|_{z=H} = 0, \quad (5)$$

$$L(\psi_3) = L\left(\frac{z}{H}\phi\right), \quad \psi_3|_{z=0} = 0, \quad \psi_3|_{z=H} = 0. \quad (6)$$

注意到 (5)、(6) 式中方程右端的强迫项均是已知的, 故问题可解。这里 ψ_2 是边界层内的强迫项 A 强迫出来的流函数, $(z/H)\phi$ 则反应了上边界的直接强迫作用, ψ_3 则反应了上边界的间接强迫作用。方程 (3) 的具体推导和流函数的具体计算方法请参考张铭的文章¹⁾, 本文不再赘述。

为进一步揭示和锋生相联系的锋面环流特征, 我们用方程 (3) 在边条件 (4) 下对边界层中的锋面环流做计算。考虑到资料分布, 计算所取的剖面如图 1 所示。在水平方向取 15 个格点, 格距 45km, 垂直方向按高度分成 004, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200, 1350 和 1500m 共 11 层。

图 3 是 28 日 10 时的计算结果, 其中图 3a 是 AA' 剖面上的 θ_{se} 分布, 锋面约在第 5、6 格点即蒙城—蚌埠之间。由表 1 可知, 此时虽有锋生但锋区强度不大, 锋前虽有暖湿中心和位势不稳定层, 但离锋较远, 锋附近呈弱不稳定状态。计算得到的流函数 ψ_2 表明 (参见图 3b), 锋线前呈上升运动, 锋线前、后分别有一逆环流和正环流, 正环流中心

1) Zhang Ming, 1990, The diagnosis equation of frontal secondary circulation in the boundary layer of atmosphere, LASG Annual Report, 270—273.

在 750m 附近, 逆环流有两个中心, 分别在 1050m 和 450m 附近, 但环流强度较弱。图 3c 是总的 ψ 场, 它和 ψ_2 的差别很大, 锋线处于环流的下沉分支中, 这和 10 时的锋面天气实况是一致的, ψ 场与 ψ_2 场的差异说明了边界层以上的系统对边界层环流的影响很大, 考虑锋面天气的发展既要关心边界层的影响, 也需注意自由大气运动的状况。

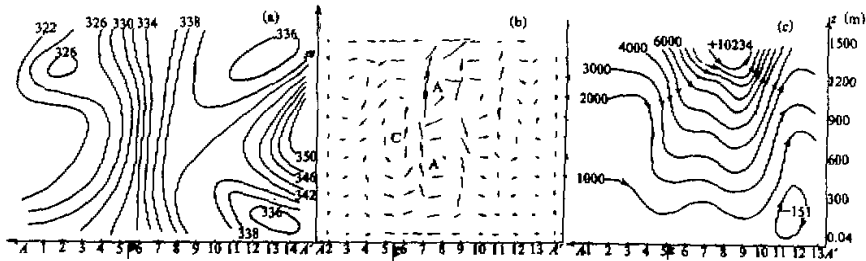


图 3 1983 年 4 月 28 日 10 时沿剖面 AA' 的计算结果

(a) θ_e 分布, 单位: K; (b) 流函数 ψ_2 的环流图, 未制版前原图上水平箭头长 1cm 代表水平风速 1m/s, 垂直箭头长 1cm 代表垂直运动 10^{-3} m/s, 现已缩至原图的 3/10; (c) 总流函数 ψ , 单位: m^2/s

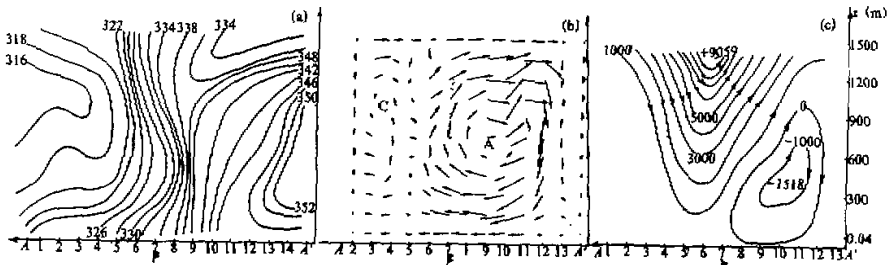


图 4 1983 年 4 月 28 日 13 时沿剖面 AA' 的计算结果

说明同图 3

图 4 是 28 日 13 时的计算结果, 锋线在第 7 个格点即南京附近, 此时锋生加强, 锋区等 θ_e 线变密, 锋前暖湿层次增厚, 位势不稳定也明显增强 (图 4a)。与此同时, 由计算的 ψ_2 知, 锋附近由边界层内各项强迫的上升运动范围加大, 并有加强, 锋前存在水平尺度约 300km 的逆环流圈, 其中心约在第 9 格点的 750m 处 (图 4b)。此时合成的总 ψ 特征 (图 4c) 与 ψ_2 场相似的是, 锋面都位于较强的上升区中, 而上升区又和位势不稳定区匹配, 这就为锋面天气发展的触发、增强提供了有利条件, 13 时后锋面天气出现大范围对流天气及雷暴、大风。值得注意的是在图 4c 上, 上升区的前方存在一个逆环流圈, 其下沉、向北的分支将暖湿不稳定空气向锋区输送, 这有利于锋面天气的维持和加强且与实况相一致。16 时由于锋面已移至计算区域的边界附近故未再做计算。

五、结 语

依据实测加密资料对本例冷锋边界层锋生和锋面环流的分析诊断, 可得如下结论:

(1) 锋生是常见的现象, 但锋生过程是复杂的, 本例揭示出锋生具有短时性、不均匀性及发生在边界层中这三方面的特征。这表明, 尽可能多的占有资料并进行细致分析, 可将锋生特征及与其联系的锋面天气发展揭示得更清楚, 从而有助于提高分析预报水平。

(2) 制约锋生的因子是多方面的, 但其相对的重要性可有很大差别。在本例中, 贡献最大的是变形项, 其次是散度项, 这两项对锋生起到支配作用。贡献小的是倾斜项。和地面感热通量联系的非绝热项比其他 3 项小一个量级, 其作用可不考虑。

(3) 锋生环流和锋生紧密相联系。在边界层中用 Ekman 动量近似下的锋生环流方程对该例做的诊断表明, 和边界层锋生伴随, 在锋前会强迫出上升运动, 且随锋生增强其范围变宽, 强度加大, 并可触发强对流天气的发生。

参 考 文 献

- [1] 赵思雄, 1986, 中尺度锋生和低压的形成, 教学与研究, 空军气象学院, 3。
- [2] Emanuel, K., 1984, Fronts and frontogenesis: other types of fronts, *Dynamic of Mesoscale Weather System*, 85-108.
- [3] 杨明、陈永胜, 1986 梅雨锋暴雨的边界层锋生, 华东中尺度天气试验论文集 (三), 总参气象局。
- [4] Sawyer, J. S., 1956, The vertical circulation at meteorological fronts and its relation to frontogenesis, *Proc. Roy. Soc., A*, 234, No.346.
- [5] Eliassen, 1962, On the vertical circulation in fronts zones, *Geophysical Norvegia*, XXIV, No.4.
- [6] Hoskins, B. J. et al., 1977, The forcing of geostrophic motion according to the Semi-geostrophic equations in an isentropic coordinate model, *J. A. S.*, 34, 1859-1867.
- [7] Shapiro, M. A., 1981, Frontogenesis and geostrophically circulation in the vicinity of Jet streamfrontal zone system, *J.A.S.*, 38, 954-973.
- [8] 杨越奎、张铭, 1992, 次级环流在强对流天气产生和演变中的作用, 应用气象学报, 3, No.4, 487-491。
- [9] 丁一汇, 1989, 天气动力学中的诊断分析方法, 科学出版社, 87-88。

Diagnosis Research of Frontogenesis of a Cold Front and Secondary Circulation in the Boundary Layer

He Qiqiang, Lu Mei and Zhang Ming

(Air Force Institute of Meteorology, Chinese People's Liberation Army, Nanjing 211101)

Abstract

This paper is based on the densified data of the boundary layer of Mesoscale Weather Experiment of East China (MWEEC). A cold front frontogenesis process in the lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe River on April 28, 1983 is studied. Frontogenesis has three mesoscale character, such as nonhomogeneous and short term, which are obvious in the boundary layer. The boundary layer frontal secondary circulation equation, which is based on the approximation of the Ekman momentum, is used to make diagnose the synoptical process.

Key words: diagnosis analysis; boundary layer; frontogenesis.