我国锋生环流特征初探*

张雪雯 钱家声

(空军气象学院)

提 要

本文利用 Sawyer-Shapiro 的模式，通过实例发现我国的锋生环流可分为四种类型，且诸型都对应一定的天气形势。另外，还发现锋生环流的上升支气流的位置、层次和强弱与锋面天气的分布等颇协调；锋生区对锋面的活动具有指示意义。这对更确切地认识具有鲜明特征意义的锋面系统，改善天气学预报手段也许有一定作用。

一、概 述

1. 计算方程式

利用 Sawyer-shapiro 的锋生流函数方程[1]，采用周晓中的计算方案[2]，计算了经向剖面(yp 平面)的流函数与锋生函数等有关的量。

取 y 轴沿经线方向，x 轴沿纬线方向，且假定只有 x 方向满足地转关系，只考虑变形场作用时锋生流函数的关系式为：

$$-\frac{\partial m}{\partial y}\frac{\partial^2\varphi}{\partial p^2}+2\frac{\partial m}{\partial p}\frac{\partial^2\varphi}{\partial y\partial p}-r\frac{\partial\theta}{\partial p}\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}=-2J(U,V)$$

水平位温、垂直位温、水平动量和垂直动量锋生的锋生函数式：

$$\frac{d}{dt}\left(r\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)=J(U,V)+rJ(\theta,\omega)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\theta}{\partial p}\right)=-J(\theta,v_a)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)=J(m,\omega)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)=-J(U,V)-J(m,v_a)$$

这里 φ 为流函数，$v_a=\frac{\partial\varphi}{\partial p}$ 为 y 方向的偏差风，$\omega=\frac{\partial\varphi}{\partial y}$ 是由偏差风引起的垂直速度，$m=U-fy$ 为动量，$J(\alpha,\beta)=\frac{\partial\alpha}{\partial y}\frac{\partial\beta}{\partial p}-\frac{\partial\alpha}{\partial p}\frac{\partial\beta}{\partial y}$ 是 yp 平面上的雅可比算子。强迫

* 本文于 1986 年 2 月 3 日收到，1986 年 8 月 10 日收到修改稿。

项 $J(U,V)=\frac{\partial U}{\partial y}\frac{\partial V}{\partial p}-\frac{\partial V}{\partial y}\frac{\partial U}{\partial p}$，其中第一项 $J_1=\frac{\partial U}{\partial y}\frac{\partial V}{\partial p}$ 为地转纬向风切变部分，称为切变项；第二项 $J_2=-\frac{\partial V}{\partial y}\frac{\partial U}{\partial p}$ 为地转经向风辐合部分，称为辐合项。

2. 选例

在我国锋面活动较为活跃的春秋两季中选例，为使选例具有广泛性，特从东北、西北、华东和华中四地区选出 8 个锋面，做出 11 个垂直剖面，各剖面的时间与地理位置由表 1 列出。

表 1

日　　期	锋面性质	剖 线 位 置	所在地理区域
1983年 4 月28日20时	冷　锋	(117°E, 27.0°N—117°E, 39.2°N) (118.5°E,27.0°N—118.5°E,39.2°N) (120°E, 27.0°N—120°E, 39.2°N)	华　东
1982年 5 月12日20时	冷　锋	(115°E, 27.1°N—115°E, 39.2°N)	华　中
1982年 5 月11日20时	冷　锋	(115°E, 27.1°N—115°E, 39.2°N)	华　中
1981年 6 月 8 日20时	暖　锋	(117°E, 28.4°N—117°E, 36.2°N)	华　东
1983年 4 月13日20时	静止锋	(117°E, 24.4°N—117°E, 36.3°N)	华　东
1981年 3 月 6 日20时	冷　锋	(121°E, 38.9°N—121°E, 51.5°N)	东　北
1981年 3 月 6 日20时	暖　锋	(126°E, 38.3°N—126°E, 50.8°N)	东　北
1979年11月 3 日20时	冷　锋	(102°E, 34.0°N—102°E, 46.7°N)	西　北
1979年11月 3 日20时	冷　锋	(95°E, 34.0°N—95°E, 46.7°N)	西　北

3. 计算结果梗要

1) 强迫项 $J(U,V)$ 的负值区对应正环流区，相反 $J(U,V)$ 的正值区对应递环流区，$J_1<0$(或 $J_2<0$)对正环流做正贡献，反之做负贡献。$J(U,V)$ 的绝对值大值中心与锋生环流中心接近(图略)。

2) 位于我国南方的五例辐合项 J_2 对锋生环流的形成起主导作用，而北方的四例切变项 J_1 为主导项(表略)。

3) 水平动量锋生函数比其他三个锋生函数小 3—5 个量级，可不予考虑，水平位温锋生函数值最大(表略)。后面谈到的锋生均指水平位温锋生。

二、我国锋生环流形态特征分类

取南北剖线长约 1200 km，根据诸例计算的流函数场而得到的锋生环流形态，若忽略其细微特征以剖线上方主要特征作标志，发现可分为四种类型。下面分类说明之。

1. 迭置双环流圈型

1) 特征

1983 年 4 月 28 日 20 时沿 117°E 剖面(图 1)、沿 118.5°E 剖面和沿 120°E 剖面 (图略)、以及 1982 年 5 月 12 日 20 时沿 115°E 剖面 (图 2) 锋区附近均出现了迭置双环流圈型横向环流。

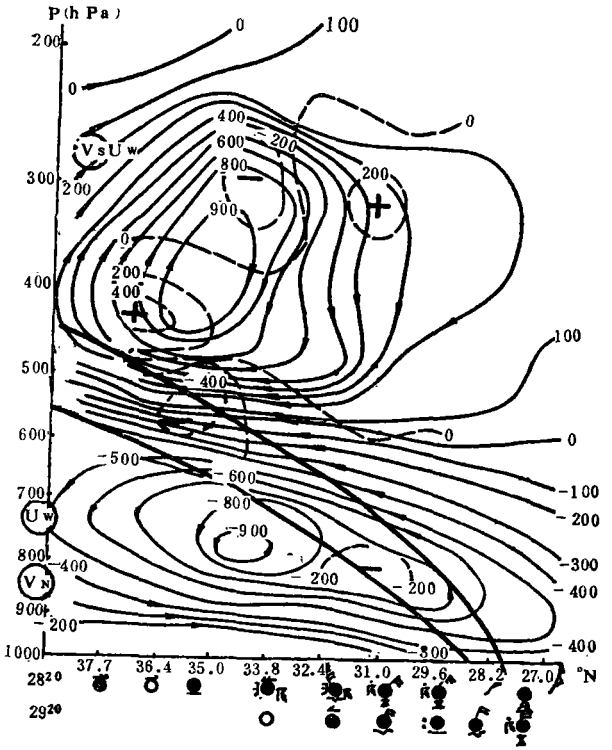


图 1 1983 年 4 月 28 日 20 时华东冷锋
(沿 117°E)垂直剖面图

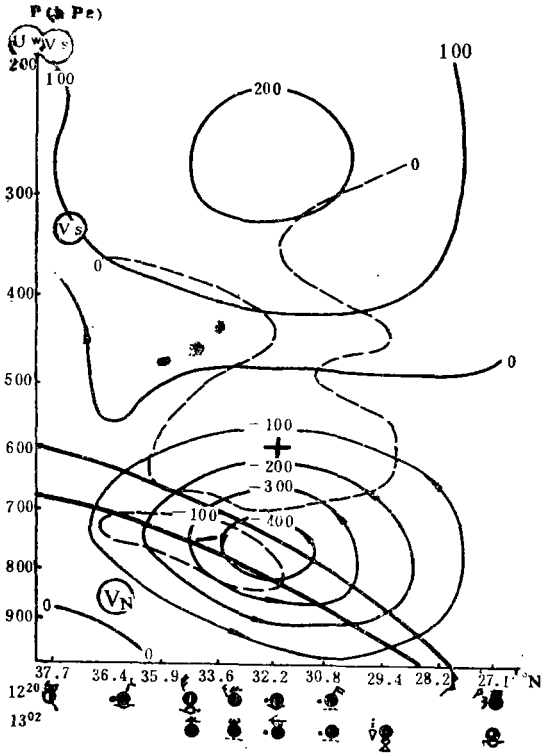
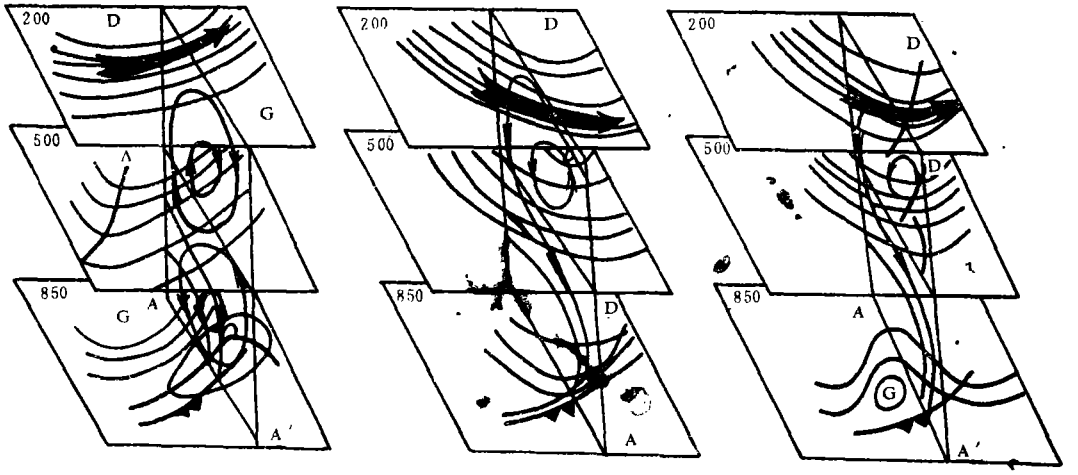


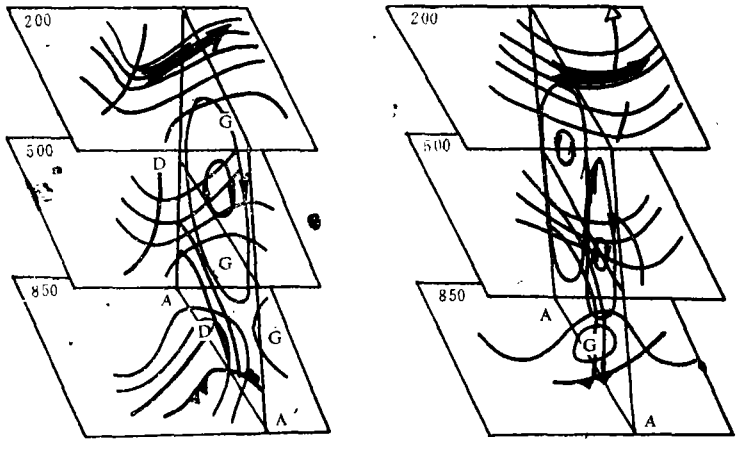
图 2 1982 年 5 月 12 日 20 时华中冷锋
(沿 115°E)垂直剖面图

(图中矢线为等流函数线(流线)、断线为等水平位温锋生线,负值区为锋生区。U_W, V_S, V_N分别为西风、南风和北风的大风速中心。粗实线为锋区。图中锋线为 6 小时后地面锋线。(图 4-图 9 同上))

该型的特点是，对流层内垂直方向迭置两个方向不同的环流圈，低层是一个长轴与锋区基本重合的椭圆形正环流圈，环流中心位于锋区附近，高层存在一个逆环流圈，其中心位于暖区中对流层上层。这两个环流的上升支构成锋上大范围暖空气上滑，尤其是地面锋前几百公里范围内对流层中下层上升运动强烈（等流函数线密集，即非地转的 v_a 和 ω 均强），地面锋线后数百公里高层暖空气上升运动也较强。



（a）迭置双环流圈型　　（b）单正环流圈型之一　　（c）单正环流圈型之二



（d）单逆环流圈型　　（e）并列双环流圈型

图 3　各类环流圈型天气形势模式图

2）天气形势

通过分析实例发现，各类环流圈型的天气形势特点鲜明，为节省文字，本文仅结合根据实例的天气形势归纳出的各类环流圈型的天气形势模式图（图 3），介绍其天气形势的特点。

迭置双环流圈型的天气形势特点是，锋面与向西北倾斜的斜压槽相伴，低槽轴线坡度小于锋面坡度，高空西南风急流轴位于剖面（AA'）的北部。上述天气形势造成对流层中

上层西风急流轴南侧下方，纬向风随高度升高而增大$\left(\frac{\partial U}{\partial p}<0\right)$，经向风沿 y 轴辐散 $\left(\text{即}\frac{\partial V}{\partial y}>0\right)$，由辐合项的作用($J_2>0$)造成逆环流。而对流层中下层，虽然纬向风随高度变化的规律与高层相同，但沿 y 轴方向风由槽前的偏南风转为槽后的偏北风(甚至存在偏北风低空急流)，经向风辐合$\left(\frac{\partial V}{\partial y}<0\right)$，故 $J_2<0$，又由于纬向风有反气旋式切变$\left(\frac{\partial U}{\partial y}>0\right)$，经向风随高度升高而增大$\left(\frac{\partial V}{\partial p}<0\right)$，切变项 $J_1<0$，因而辐合项和切变项的共同作用使对流层中下层产生正环流圈。造成上下层环流方向相反的关键是对流层上下层经向风沿 y 方向散度的符号相反，槽后的偏北风低空急流和高空西南风急流的存在与他们的配置提供了极其有利的条件，急流愈强，相应产生的环流也愈强。

3) 天气

该型冷锋天气较其他型恶劣(见图 1、图 2)。其特点是，与两个环流上升支气流对应有宽广的锋面云系，对应地面锋线前后的强上升区天气最恶劣，有时有对流天气发生，甚至发生强对流天气(1983 年 4 月 28 日例锋面附近出现了冰雹和中尺度雨团) 这是因为低层的正环流有利于有效位能的释放，可以触发对流天气，同时为对流的维持与发展提供能量。

锋生环流对天气的影响，不仅表现在上升与下沉气流的直接影响，而且表现在环流引起的锋生(消)效应，进而对天气变化的影响。图 1、图 2 所示的锋生区主要表现在正环流区域内，最大锋生区位于锋区附近，1982 年 5 月 12 日例锋面天气有所加强 (出现了中等强度的对流性降水)，锋区移动缓慢(6 小时只南压约 100 km)。1983 年 4 月 28 日例 6 小时锋区位移约 150 km。看来，迭置双环流圈型锋面短期内强度维持或加强，移动较慢。

2. 单环流圈型

1) 单正环流圈型

(1) 特征

图 4-6 所示的三例出现了单正环流圈型锋生环流。其特点是，锋区附近整个对流层内存在一个正环流圈，环流主体位于锋上暖空气中，环流北侧气流沿锋面下滑(下滑锋)。

(2) 天气形势

产生该环流圈型的天气形势有两类。第一类(图 3(b))低层锋区与低槽配合较好，锋上空对流层中高层为低槽(涡)后部的偏北气流控制，且偏北风随高度升高而增大$\left(\frac{\partial V}{\partial p}>0\right)$，值得注意的是高空西风急流轴位于地面锋线上空附近，其急流轴北侧下方纬向风有气旋式切变$\left(\frac{\partial U}{\partial y}<0\right)$，于是由切变项为主的作用形成一个垂直伸展整个对流层的正环流圈。正因为高空急流轴位置偏南才使环流主体位于暖区，造成暖空气沿锋面下滑的现象。可以推测，如果高空急流轴位于地面锋线北侧，锋附近将是一个单逆环流圈，锋面将是上滑锋。看来，高空急流轴与锋线的相对位置有时对锋上垂直运动的方向有重要作用。

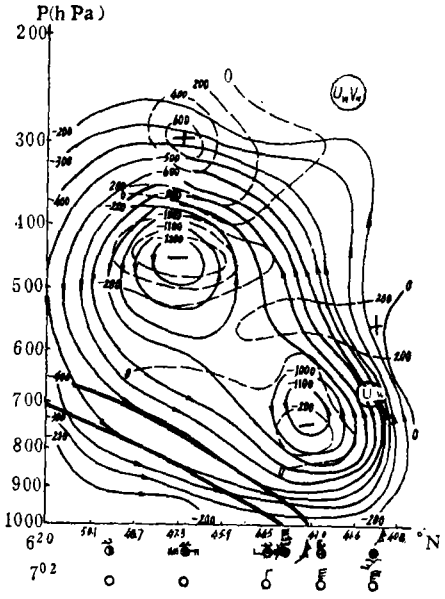


图 4　1981 年 3 月 6 日 20 时东北冷锋(沿 121°E)垂直剖面图

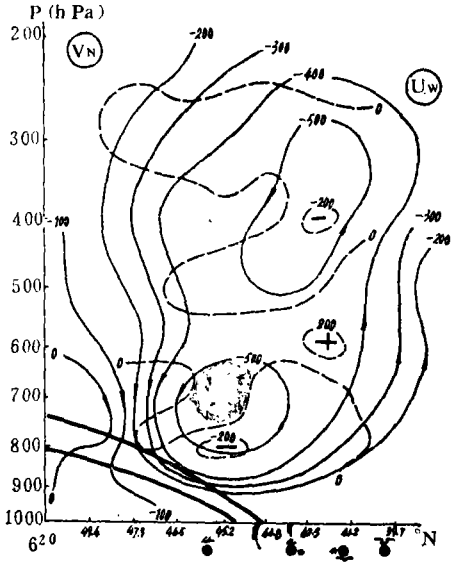


图 5　1981 年 3 月 6 日 20 时东北暖锋(沿 126°E)垂直剖面图

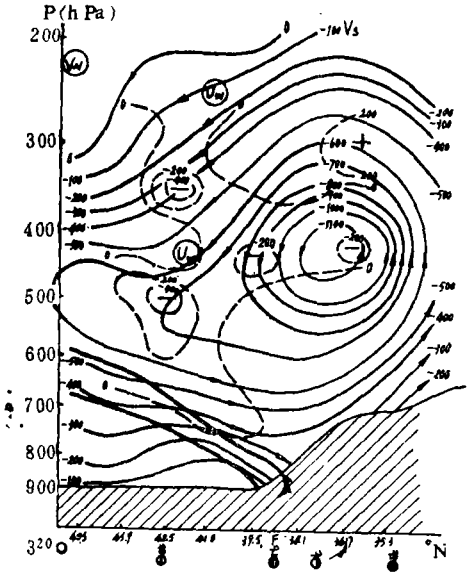


图 6　1979 年 11 月 3 日 20 时西北冷锋(沿 102°E)垂直剖面图

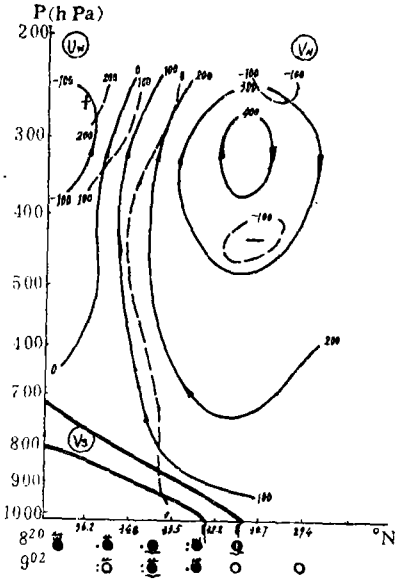


图 7　1981 年 6 月 8 日华东暖锋(沿 117°E)垂直剖面图

第二类天气形势(图 3(c)与第一类只有两点不同，一是高空急流轴位于中层锋区上空;二是锋区上空北部位于槽后偏北气流中，而南部处在南方另一斜压槽的前部。这样，剖面北部形势与第一类相同形成正环流，虽然南部位于高空急流轴南侧纬向风有反气旋式切变$\left(\frac{\partial U}{\partial y}>0\right)$,但经向风随高度增高而增大$\left(\frac{\partial V}{\partial p}<0\right)$，切变项的作用仍是造成正环流,故锋上暖区中也是一个大的正环流圈。

(3) 天气

该型正环流北侧的下沉气流使冷区内天气并不恶劣，而暖区中整层上升运动区内天气才较差。这种天气分布与迭置双环流圈型恶劣天气位于冷区中恰恰相反，该型天气不及迭置双环流型恶劣,上升运动弱是原因之一。

这个型锋生区全部发生在暖区,最大锋生区距锋区相当远(达数百公里),故冷锋移动较快,东北冷锋例 6 小时位移约 300 km。有趣的是东北暖锋由于向最大锋生区方向移动而出现向南倒退现象,锋生效应对东北暖锋的倒退现象给予合理的解释。

2) 单逆环流圈型

该型的特征是,锋面附近整个对流层内存在一个逆环流圈,暖空气沿锋面上滑（上滑锋)。本文的实例（图 7）说明,锋区与正(逆)环流对应时,不一定是上(下)滑锋，锋面上暖空气的上(下)滑运动,不仅取决于锋附近的环流方向,还取决于锋区与环流中心的相对位置。

与上滑气流对应,该型冷区天气恶劣。

图 3 (d)是单逆环流圈型天气模式图。该型天气形势与迭置双环流型天气形势相似,

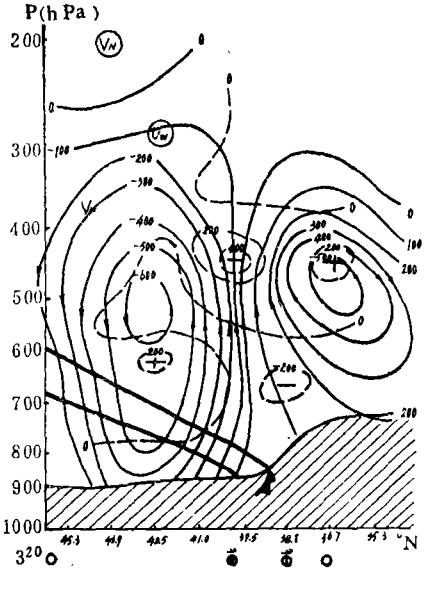


图 8 1979年 11 月 3 日 20 时西北冷锋(沿 95°E)垂直剖面图

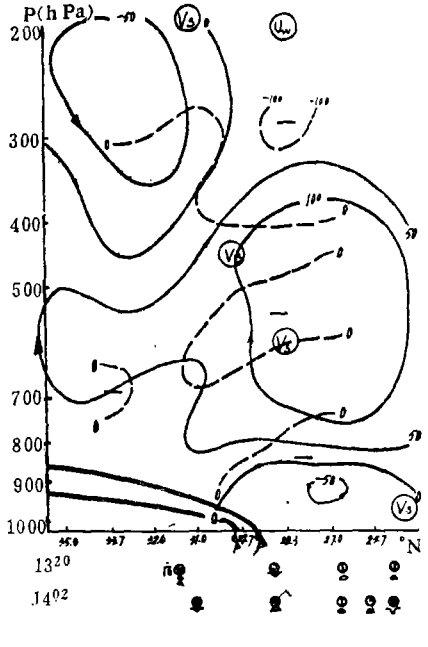


图 9 1983 年 4 月 13 日 20 时静止锋(沿 117°E)垂直剖面图

只是低层不同，该型低层锋区处在倒槽前部且南风风速向北增大，因而高层和低层经向风的散度符号相同$\left(\frac{\partial V}{\partial y}>0\right)$，又$\frac{\partial U}{\partial p}<0$，故在急流南侧形成一个占据整个对流层的逆环流圈。

3．并列双环流圈型

如图 8 所示，该型沿水平方向在锋区附近并列两个方向相反的环流圈，两个环流相邻区的上升支气流构成冷区上空数百公里范围的较强的整层上升区，锋附近最差的天气出现在这里。

该型天气形势模式（如图 3 (e)所示）与单正环流圈型形势之二基本相同，主要的差异是，该型锋区上空全部处在空中槽后，整层北风随高度升高而增大，而在高空急流轴两侧纬向风的切变性质不同，其南侧为反气旋式切变，北侧为气旋式切变，故急流南（北）侧形成逆（正）环流圈。

4．多环流圈型

该型在水平方向或垂直方向存在两个或两个以上的环流圈。1983 年 4 月 13 日例（图 9）在垂直方向出现三个环流圈；1982 年 5 月 11 日江南冷锋锋生垂直剖面图上（图略）垂直方向迭置两个环流圈，而在高空水平方向上又并列三个环流圈。

这种多环流形式与对流层内水平方向或垂直方向存在多个经向（或纬向）风速中心有密切关系，东亚地区常有高、中、低空急流共存的现象，是造成我国锋生环流多中心或多环流形式的原因之一。

三、我国不同地区的锋生环流

我国大陆南北跨温带、亚热带，具有各种类型的流场，又由于复杂地形对各种天气系统外形的影响，使不同地区的变形场有较大差异，因而锋生环流也具有地区性。

1．长江中下游地区的冷锋、暖锋和静止锋

一般而言，能够南下影响长江中下游地区的冷锋都具有一定的强度，多数锋面与斜压槽配合较好，而极锋急流往往位于地面锋线北侧（春秋两季极锋急流平均位于 35—45°N 范围内[3]）这种冷锋天气形势酷似迭置双环流圈型模式，因而长江中下游地区冷锋锋生环流多属于迭置双环流圈型。前节提到的 1983 年 4 月 28 日实例是典型的冷锋例。

1981 年 6 月 8 日例是长江中下游地区常见的暖锋，与该暖锋对应有单逆环流圈型锋生环流（图 7），为上滑锋。最恶劣的天气出现在锋前暖区中，上升气流几乎竖直分布，这种现象难以用锋面本身的原因予以解释，有待于进一步探讨。

1983 年 4 月 13 日例为静止锋例，图 9 为该静止锋的垂直环流。这个锋面坡度较小，只有 1/380，这样小的坡度一般认为锋生环流也必然倾斜得厉害，然而出现了几乎竖直的环流圈，锋前暖区浅层有一个正环流圈，其上迭置一个逆环流圈。锋区上空 500 hPa 到 200 hPa 层内又为一个逆环流。三个环流的上升支构成两个上升区域，锋前暖区小范围浅层的上升区只对应有弱对流云。中层的正环流与高层的逆环流的上升支迭加，气流从 800 hPa 开始一直上升到 200 hPa，这样深厚的上升气流对应有阴雨天气，并且有雷暴天

气。

2．东北地区的冷锋和暖锋

东北冷锋多属于气旋冷锋和寒潮后部副冷锋，蒙古气旋移入东北时往往已得到充分发展，气旋中心轴线近于垂直，冷锋上空为槽后偏北气流控制，寒潮后部的副冷锋上空自然是偏北风。而春秋两季冷空气活动频繁，往往冷空气侵入东北平原时，前次冷锋才到达日本地区，可能出现前后两次锋区迭加而使高空急流位于东北冷锋锋线上空附近，朱瑞兆[4]曾统计过春季和秋季东北平原和日本东南沿海是东亚锋面活动的高频区，高空西风急流居于两锋带之间。可见高空西风急流位于东北平原冷锋锋线附近的现象屡见不鲜，上述东北冷锋上空处在槽后偏北气流之中，以及高空西风急流的位置等天气形势的特点恰好与单正环流圈型天气模式相符。故单正环流圈型是东北冷锋锋生环流的常见形式之一。

图5所示的东北暖锋的锋生环流也是单正环流圈型。它的最大特点是上升气流区与坏天气主要在锋线附近及锋后的暖区中，与长江中下游地区的暖锋以及挪威学派典型的暖锋天气分布截然不同。

3．西北地区的冷锋

图6和图8是同一条西北冷锋沿东西两条经线(102°E和95°E)的剖面图，位于东边的锋生环流是单正环流圈型，而西边的却是并列双环流圈型，这两个相邻剖面环流的差异与西北地区特殊的地形有关。因为与贝加尔湖低槽相伴南下的冷空气移至蒙西山地的背风坡(或青藏高原东北缘)加速东移。102°E以西将处在槽后的西北气流中，地面冷锋受到山地的阻挡移动缓慢，往往造成高空槽超越冷锋的现象。因而两剖面的北部为西北气流控制。又由于青藏高原对低槽的减弱效应使35°N以南的低槽在高原上减弱，移至100°E以东又会得到发展，因为西边剖面的南部将处在这个低槽的槽后，而东边剖面处在槽前西南气流中，这样，由于变形场的差异，东、西剖面上形成了不同类型的环流圈。

四、几 点 看 法

1．锋生环流的特征受大尺度变形场的分布支配。不同季节，不同地区构成变形场的成员、主要角色的外形和强弱不同，构成锋生环流的形式将不同。他们的变化也会引起变形场的变化从而引起锋生环流形态的变化。我国地处东亚，多种类型的大气环流和复杂的地形带来锋生环流的复杂性和形态的多样性。

2：尽管各种类型锋生环流造成的垂直上升区域的位置和层次不同，锋面天气分布不尽相同，但上升气流的位置、层次和强弱与天气的分布甚至强弱程度相当协调。如果能利用高度场的数值预报结果计算出锋生环流，则可间接地预报出锋面天气的分布。

3．从理论上讲，锋生环流的上升造雨作用是有限的，即使达到最强上滑，水汽丰沛，至多只能产生中雨[6]，但我们所选的实例中，有几例的天气十分暴烈，这说明锋生环流上升支所在地区是触发其他造雨系统(如中尺度系统等)的有利场合，所以在中尺度资料不足时，直接利用变形场计算锋生环流，以环流形态间接估计天气分布，仍不失为一种实用的工具。

4．水平位温锋生区的分布对未来锋面的活动具有指示意义，有助于预报锋面活动。

5．我国幅员辽阔，大气环流和地形复杂。本文通过有限的实例得出的认识定会存在片面性，有待今后进一步研究。又由于动力和热力作用可以互相反馈，地形动力作用势必影响锋生环流，文中只作了简单分析，有关地形作用的丰富内涵有待进一步发掘。

参 考 文 献

[1] Shapiro,M.A., Frontogenesis and geostrophically forced secondary circulations in the vicinity of jet stream-frontal zone systems. *J.Atmos. Sci.*, **38**, 954—672, 1981.

[2] 周晓中等，利用 Sawyer-Shapiro 模式对江淮地区上空一次锋生效应的诊断，空军气象学院学报，1985 年第一期。

[3] 中国人民解放军空军司令部，天气学教程，297,1975,8。

[4] 朱瑞兆，东亚气候锋，气象学报，33，4，527—536，1963。

5] J. S. 绍耳，锋的铅直环流及其和锋生的关系，气象译丛，第一卷第三期，237,1964。

A PRELIMINARY STUDY ON THE FRONTAL SECONDARY CIRCULATION IN ATMOSPHERE OVER CHINA

Zhang Xuewen　　Qian Jiasheng

(Institute of Meteorology, P. L. A. Air Force)

Abstract

By using sawyer-shapiro's method, we have calculated the frontal secondary circulation characteristic of some local fronts in China. It is found that there exist four different basic patterns of frontal circulation in the mid-low troposphere over China: single cell pattern (positive or negative circulation), double cell pattern A (juxtaposed), double cell pattern B (superposed) and multiple cell pattern.

We can explain in terms of the characteristics of frontal circulation why the warm front moves backward in North-East China. Over East China in summer, although the front is rather shallow, the top of frontal circulation is very high. Accordingly, heavy rain often appears near the front.