

山地背风坡气旋生成初始阶段的急流 动力学与地转适应过程*

R. 布利克 C. 马托兹

提 要

本文通过数值实验，探讨了高层位势涡度平流与背风坡气旋生成的关系。使用等熵坐标原始方程模式，模拟了曾产生“母体气旋”的冷锋上波扰动的发展。研究了山地阻挡冷锋前进时对扰动发展速度的影响，以及高层急流增强时对扰动发展速度的影响。急流的增强是通过山地强迫抬升气流改变地转位势涡度和求解相应的质量场及速度场来实现的。实验指出，冲击山脉的急流强度和背风坡的气压下降是密切联系的。

一、引 言

在没有摩擦力和非绝热效应的情况下，气流随时间的演变，由位温守恒和位势涡度守恒这两个参量决定。这就很容易证明在准地转情况下，位涡方程可以简化为求质量场倾向的三维椭圆方程。在等熵坐标系中，代表质量场的变量是蒙哥马利位势 $M \equiv gZ + c_p T$ ，而描述 M 场倾向 $M_t \equiv (\partial M / \partial t)_\theta$ 的椭圆方程是：

$$\left[A \nabla^2 + \frac{\partial}{\partial \theta} B \frac{\partial}{\partial \theta} \right] M_t = - \tilde{v} \cdot \nabla Q \quad (1)$$

(1) 式中的系数 A 和 B 是 x, y, θ (表示如椭圆方程左端的不同算符) 的正值函数，其中

$$Q = \left(- \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 M + f \right) + f_0 \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

是准地转位势涡度。
(1) 式的推导在附录中给出。

不言而喻，按 (1) 式沿等熵面求出 $- \tilde{v} \cdot \nabla Q$ 的值即满足位温守恒定律， $d\theta/dt = 0$ ，但是还得明确地引进下边界条件

$$\left(M_t - \theta \frac{\partial}{\partial \theta} M_t \right) = - \left(\theta \frac{\partial^2 M}{\partial \theta^2} \right) (\tilde{v} \cdot \nabla \theta) \text{ 地} \quad (2)$$

按照椭圆边界值问题的标准分类法，这属于

“混合”型边界条件，是以地面蒙哥马利位势的时间倾向表达式 (Bleck, 1974) 为依据的。

方程 (1) 和 (2) 简要地表达了这样的事实，在不考虑摩擦力和非绝热效应的情况下，三维质量场的变化（包括地面气压的变化），大致是由高层位势涡度的平流和（或）位温沿地面的平流引起的。我们想要强调的是，在准地转结构范围内的这些结果，形式上同等压坐标中得出的结果（如 Charney, 1973, 第 7 部分）完全一样；同时，我们的工作也是 Kleinschmidt (1950) “关于大尺度位势涡度侵入或‘植入’(implant) 对周围气压场的影响”这一先导性研究工作的继续。

经典的准地转理论认为，温带气旋生成是对流层高层位势涡度越过低层气团边界的结果。通常，高层位势涡度和地面冷锋相互制约，差不多以相同速率前进。可是，如果低层冷空气被地形障碍物阻滞，就会使具有高位势涡度的高层槽与低层的冷气流间的这种垂直配置暂时打乱。

尽管低层阻塞使得三维质量场产生了畸

* 参考文献略，原文详见《青藏高原及山地气象会议文集》（英文版）。

变，但背风坡气旋的生成几乎都在高层涡度的极大值能够越过障碍物的场合下出现的。这在高层槽发展的最初阶段大概最容易实现，因这时涡度大都以切变涡度形式存在于槽的上风方。在这种场合，涡度是与自身平流能力强、且对周围气压场变化的反应相当迟缓（在有关各项中）的高能流（急流）相结合的。

行进中的急流（例如有限长度的急流），总能引起地转适应过程。因为形成急流的等风速线一般比空气本身移动慢，风速极大值前方的气流是超地转的。因此向右顺转，使急流左前象限的气压下降。低层辐合与上升运动的建立，导致气柱冷却，高层的气压下降，从而反过来减弱这种超地转的程度。在准地转条件下，这个适应过程可用 ω 方程或质量场倾向方程定量地描述。当然，在非理想条件下，也能用准地转诊断法定性地解释辐合和垂直运动的类型。

在没有地形障碍物的情况下，由于水平的冷空气平流，会减少急流左前象限内冷却空气柱所需要的抬升量。这样，如果山脉阻挡冷空气的流入，垂直“抽吸”(pumping)作用将会比平坦的下垫面更强有力。因此，若一地区阻滞的冷空气平流比另一边多(Radinovic, 1965)，即冷空气必须有效的绕过或停滞，直到堆积得足够高而漫过山脊，则可以预期地转适应力量引起的低层辐合与抬升，在同一位置能够持续相当长的时间，比如12小时或更长些。结果是在紧靠障碍物的背风坡强有力的低层涡流旋转向上，并在上升过程中释放出大量潜热，在这一阶段即冷空气尚未绕过或越过障碍物时，使空气变暖。

本文假定，以上概述的准地转适应过程体现了范围狭小的中尺度山脉（象阿尔卑斯山）背风坡气旋生成的最初阶段（通称“触发”阶段）的本质。

二、数值实验

用以下的实验来研究关于背风坡气旋生

成时高层位势涡度平流（如急流强度）的效应。这项实验部分是根据Tibaldi等人的实验得出的。在 β 平面通道上，东西方向为20个格点，南北方向为30个格点，从地面到大约100毫巴取12个等熵层对原始方程积分，格点间距为200公里。初始条件选择在通道的北半部一个正在生成的、纬向波数为1的斜压扰动。对初始场作细致的调整，以保证在没有地形作用或急流强度加强的情况下，沿冷锋就没有扰动形成。

流场积分大约1.5天后，其边界条件作如下修正：

实验1：在行进中的地面冷锋的前方不远的距离内，插入形似2000米高的阿尔卑斯山的钩状障碍物，位势涡度在冷锋后的小区域内增强。位势涡度“植入”的位置，选在导向障碍物的途中，约从300K等熵面伸展到350K等熵面，约在320K等熵面达最强。

实验2：障碍物安排同实验1，但其位势涡度场保持不变。

实验3：位势涡度场的变化同实验1，但不引进山脉的作用。

不论改变热力层结，还是改变速度场，都能改变多层原始方程模式中的位势涡度。任一过程都会造成不能接受的较大的地转不平衡。为了避免发生这种情况，我们选择了不修改实际的位势涡度场，而修改地转位势涡度的办法。地转位势涡度由(A-2)（见附录）通过下式与M的水平和垂直微商联系起来：

$$Q_g = (\nabla^2 M + f) / (\partial p / \partial \theta) \\ = \frac{(\nabla^2 M + f)}{\frac{c_p}{R} (M_0/c_p)^{(1-K)/K} (M_{00}/c_p)} \quad (3)$$

注意这个表达式不仅给出了 Q_g 的定义，而且作为M的三维椭圆方程也给出了 Q_g 的值(Bleck, 1973)。我们的处理方法是，由M场使用(3)式计算出 Q_g ，然后引进植入，再使用(3)式由修正的 Q_g 场计算出M。

原始方程模式后来积分用的风场是地转

风。为尽量减少由于位势涡度场变动和山脉障碍物插入产生的振荡，把由质量场倾向推得的准地转辐散速度的分量加到地转速度场上。

从输出场的三种形式来说明数值积分的结果：海平面气压、对流层高层等熵面上的蒙哥马利位势和对流层低层等熵面上“矢量 \tilde{Q} ”的散度。矢量 $\tilde{Q} = (\nabla \tilde{v}_g) \cdot (\nabla \theta)$ ，最早由 Hoskins 等人（1978）引用，即在准地转 ω 方程中将涡度和热力平流合并为一项，作为单一的强迫项并假定形式为 $(-\nabla \cdot \tilde{Q})$ 。换句话说，矢量 \tilde{Q} 的散度与准地转 ω 场的三维拉普拉斯项成正比。如在引言中所述，我们不打算从这一项求出定量的数据，考虑对于阿尔卑斯山背风坡气旋生成的罗斯贝数一般数量级为 1'，并且实际上不需要求解 ω 方程。同理，我们可以用不同的维量形式再定义矢量 \tilde{Q} ，这种形式在等熵面上计算特别方便。

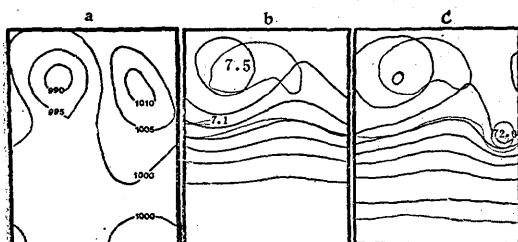
$$\tilde{Q} = (\nabla_\theta \tilde{v}_g) \cdot (\nabla_\theta P^k)$$

这里，下标 θ 表示沿等熵面微分。

由于靠近陡峭山障有重力波的连续激发，我们只选用适合于低层大气条件的时间平均场。因为三种实验的结果是每隔一小时贮存一次，所以到几小时的时间平均实际上仅是几个瞬时场的平均。

三、结 果

图 1a 给出了实验 1—3 的初始地面气压场。图 1b 和 1c 分别给出了 $\theta = 320\text{K}$ 层急流增强前后的蒙哥马利位势场和位势涡度。注意植入的位势涡度改变了槽轴的方向，因为通常天气学家认为气旋发展一般伴随着位势增



海平面气压场(a)，急流增强前(b)后(c)
320K等熵面的蒙哥马利位势(实线)和
位势涡度(虚线)

加。

在有山障的情况下（实验 1），对时间积分 21 小时后，图 1c 的型式已演变为图 2a 的样子。地面位温场积分 21 小时时，没有冷空气能在这段时间内到达山障的背风坡（图 2b）。

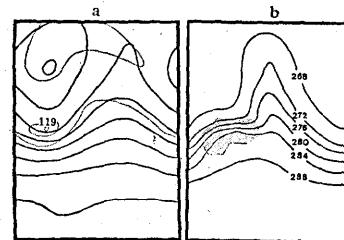


图 2
实验 1 积分 21 小时后 320K 等熵面的蒙哥马利位势(实线)、位势涡度(虚线)(a)和地面位温(b)

由图 3a—c 可见，在实验 1 中，积分的头 30 小时期间，一个强的背风坡气旋形成。背风坡的气压在 $t = 16$ 小时以前实际上没有开始明显下降。 $t = 16$ 是地面冷锋和高层位势涡度极值的前沿达到障碍物的迎风坡的近似时间。此后，直到位势涡度越过障碍之前，背风坡气旋的增强率实际上随时间而增加。图 4a—c 中，292.5K 等熵面上矢量 \tilde{Q} 的散度较好地证实了这个倾向，它给出了最后 6 小时的准地转 ω 场的最大强迫量。然而，我们没有进行过超过 $t = 30$ 小时的积分，积分的最后几个小时，对瞬时矢量 \tilde{Q} 散度场的目视检查告诉我们，26 小时后准地转强迫项开始减小。

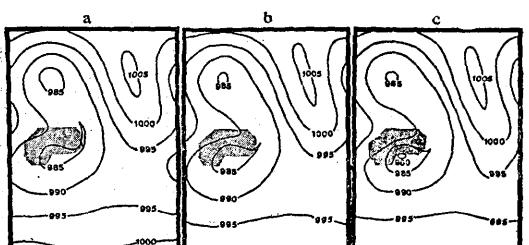


图 3
实验 1 的 6 小时平均海平面气压
a. 12—18 小时， b. 18—24 小时， c. 24—30 小时

图 5 和图 6 是实验 2（无急流增强）的结果，图 7 和图 8 则是实验 3（无障碍物有急流增强作用）的结果。它们分别与实验 1

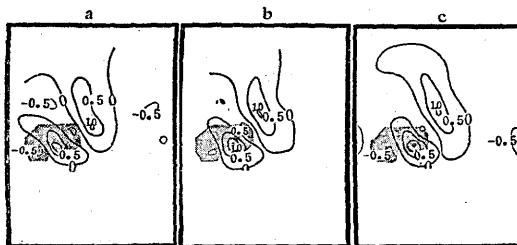


图 4

实验 1 的 292.5K 等熵面上 6 小时平均矢量 Q 散度
a. 12—18 小时, b. 18—24 小时, c. 24—30 小时
(正值表示有上升倾向)

的图 3、4 相对应。

实验 2 (图 5、6) 的结果表明, 在这一特殊情况下, 背风坡气旋生成的强度确实对高层位势涡度平流的强弱非常敏感。注意到这一结果的不足之处, 应在以后加以消除。问题是在解方程 (3) 中使用的 M 的边界条件不容许对系统中总质量作详细说明。特别是增加位势涡度产生的 Q_g 的任何净增量, 都会引起平均地面气压的下降。由于在增强过程中沿南北边界 (Wall) 的质量场变量保持不变, 在通道中部总质量的损失表现为一

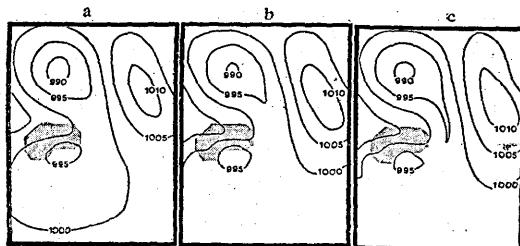


图 5 实验 2 的 6 小时平均海平面气压
a. 12—18 小时, b. 18—24 小时, c. 24—30 小时

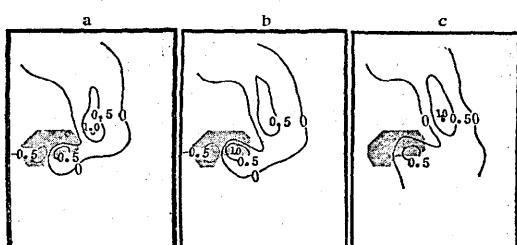


图 6 实验 2 的 292.5K 等熵面上 6 小时平
均矢量 Q 散度

a. 12—18 小时, b. 18—24 小时, c. 24—30 小时

纬向气压槽。因此, 在实验 1 和 3 中北部的东风和南部的西风比实验 2 稍强些。而这不可能对通道上总的斜压性有很大影响, 将来,

我们试着改变位势涡度场, 以便使三个实验初始时在整个网格范围内总质量相同。

图 4 和图 8 充分证明, 在山障附近, 山障的作用集中在与地转适应过程有关的急流上。而实验 3 中, 在平坦的地面上, 急流增强能沿冷锋产生波扰动 (图 7), 此扰动显然不如实验 1 (图 3) 的“中低压”那么强。

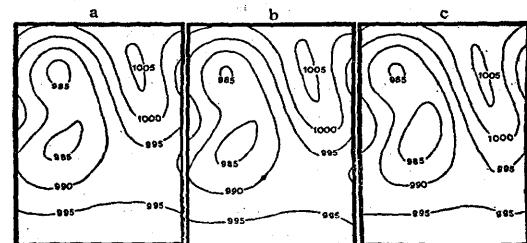


图 7 实验 3 的 6 小时平均海平面气压
a. 12—18 小时, b. 18—24 小时, c. 24—30 小时

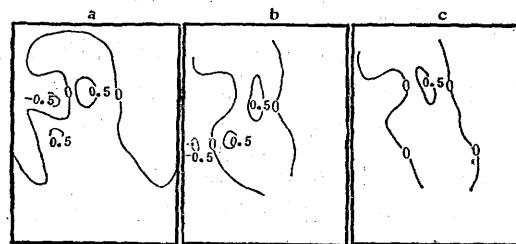


图 8 实验 3 的 292.5K 等熵面上 6 小时平
均矢量 Q 散度

a. 12—18 小时, b. 18—24 小时, c. 24—30 小时

附 录

等熵坐标系中的质量倾向方程

由准地转涡度近似方程和连续方程

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \tilde{V}_g \cdot \nabla \right) \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 M + f \right) + f_0 \nabla \cdot \tilde{V} = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \tilde{V}_g \cdot \nabla \right) \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \nabla \cdot \tilde{V} = 0$$

中消去散度项 $\nabla \cdot \tilde{V}$, 得到等熵坐标系的准地转位势涡度方程:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \tilde{V}_g \cdot \nabla \right) \left[\left(-\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 M + f \right) + f_0 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] = 0 \quad (A-1)$$

其中 f_0 是代表定值的地转参数, $\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta}$ 是某一区域平均 (单位) 等熵层 (气压) 厚度, $\tilde{V}_g = f^{-1} \bar{k} \times \nabla M$ 是地转速度矢量。

(下转第 5 页)

(上接第16页)

由流体静力学方程，有

$$P = \left(\frac{1}{c_p} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)^{1/K} \quad (A-2)$$

其中 $K = R/c_p$, 因此

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot$$

$$\cdot \left[\left(\frac{1}{c_p} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)^{(1-K)/K} \cdot \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right) \right]$$

因而可以将(A-1)式写成 (1) 式的形式

$$\left[A \nabla^2 + \frac{\partial}{\partial \theta} B \frac{\partial}{\partial \theta} \right] M_t = - \tilde{v}_t \cdot \nabla \left(\left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) \right. \\ \left. \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 M + f \right) + f_0 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)$$

其中

$$A = \frac{1}{f_0} \left(- \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right)$$

$$B = \frac{f_0}{R} \left(\frac{1}{c_p} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)^{(1-K)/K}$$

(田宜泉译 赵开化校)