

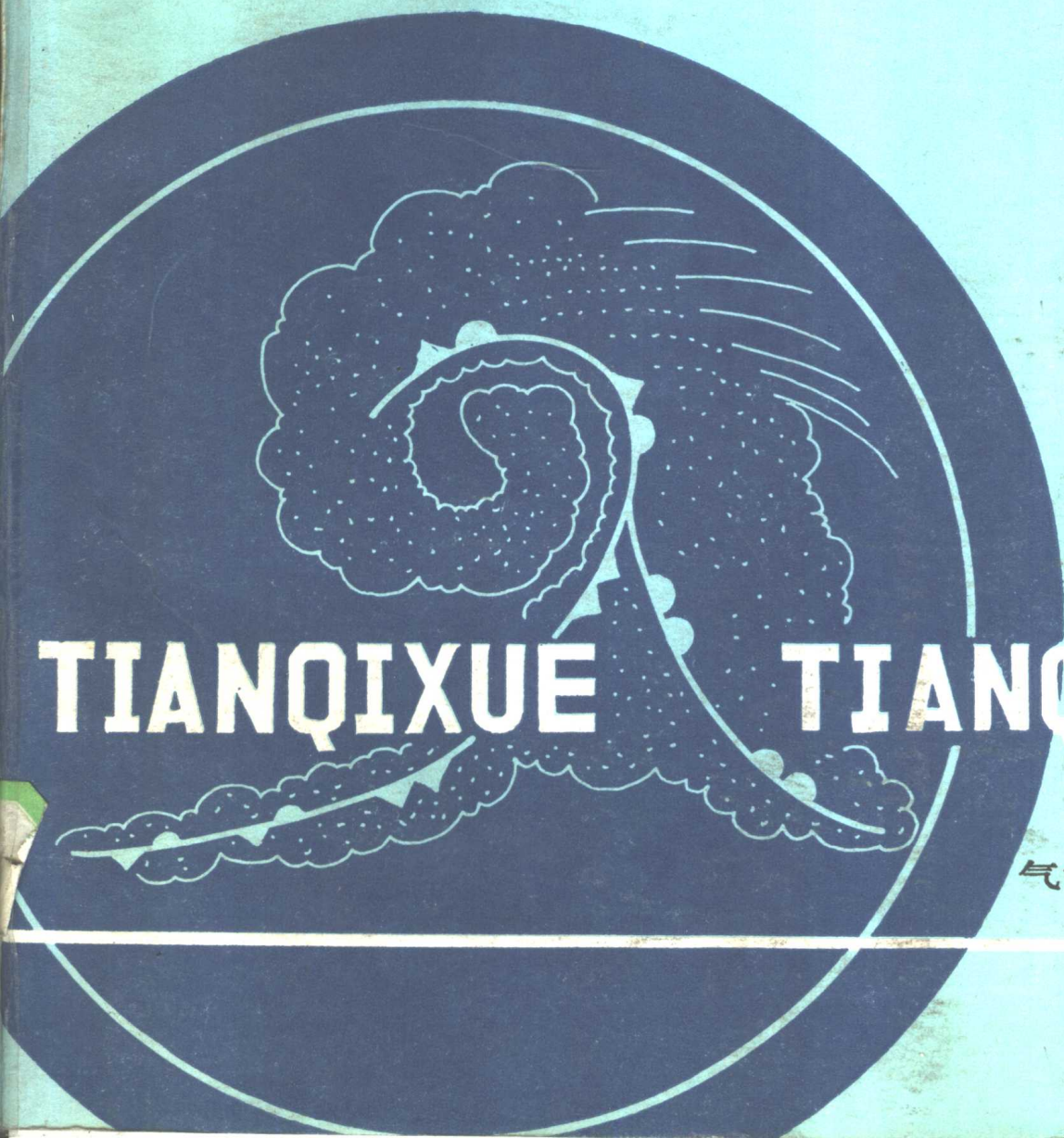
633.7

56.44

天气学

(下册)

刘 振 隆 主 编



TIANQIXUE

TIANQIXUE

气象出版社

天 气 学

(下册)

主编 刘振隆

编者 周鹏飞 胡圣立

气象出版社

第六章 天气形势预报

某地的天气变化，主要取决于天气系统的演变。因此，要想知道某地未来天气状况，首先要预报出该地未来一段时间内受何种天气系统的控制或影响，以及这一系统的发展和移动情况。再根据这一系统的天气状况分布特点结合地方性因子的影响，作出具体要素的预报。前者是对高、低空各种天气系统（包括气压系统和锋面）的生消演变进行预报，称为天气形势预报；后者是对温度、风、降水及其它一些天气现象的预报，称为气象要素预报。实践表明，只有在正确的天气形势预报的基础上，才能作出正确的要素预报。由于天气系统是三维空间的，高空天气系统的移动和发展，直接影响着地面天气系统的移动和发展，而地面系统的发生、发展，又直接决定着天气状况的具体演变，所以，要得出正确的天气形势预报必须建立一个全面的、完整的、合理的空间概念。本章的重点是介绍高空和地面气压系统发生、发展和移动的预报方法。这里所说的高空系统，是指500百帕或700百帕等压面上的气压系统。因为，500百帕或700百帕等压面图上的环流形势和系统的演变与地面系统的演变有着直接的联系。

目前，制作天气形势预报，除使用常规预报法，即外推法、运动学方法（变高、变压法）、物理分析法、引导气流原理及相似形势法、天气学模型法、资料统计法、预报指标法等经验预报方法外，还有数值预报方法。所谓数值预报法，就是根据大气运动实际情况，在一定的初始条件和边界条件下，用数值计算解描述天气演变过程的流体力学、热力学方程组，预报出未来天气形势和气象要素的方法。近年来，不少台站已接收北京气象中心和日本气象厅用数值预报模式制作的数值预报传真图，用于预报业务。在此重点介绍常规预报方法，对数值预报方法本身不予介绍，仅简要介绍各种气象传真图的识别及初步应用情况。

第一节 外推法

一、外推法的含义

天气过程的发展具有连续性，就是说，高空或地面系统的强度变化和移动速度的变化是渐进的而不是突变的，所以，我们可以把天气系统过去的演变趋势外延到以后一段时间，以推测天气形势的未来变化。这种方法称外推法。外推法可用于预报短时间内各种天气系统的移动及强度变化。

二、外推法的种类

1. 等速外推

假定系统的移动速度或强度变化基本上不随时间而改变，这时系统的移动距离或强度变化就与时间成直线关系，外推就按这种直线关系来进行。这种外推法叫做等速外推或直线外推。

2. 变速外推

假定系统的移动速度或强度的变化接近于等变速（等加速或等减速）状态，这时系统的移动距离或系统的强度变化与时间成曲线关系，外推时要考虑到它们的变速情况，这种外推

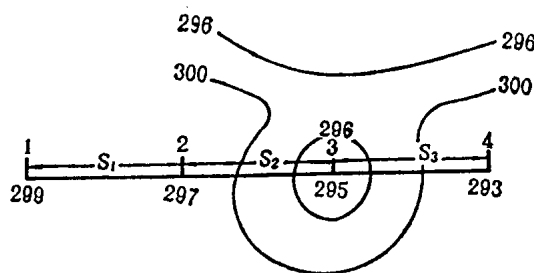


图6.1 等速外推

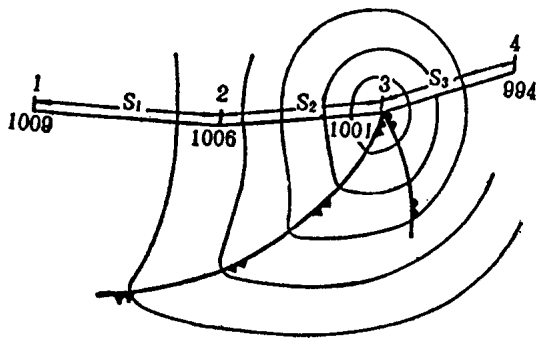


图6.2 变速外推

法叫做变速外推或曲线外推。

三、外推法的应用

1. 闭合系统的外推

(1) 等速外推 如图6.1所示, 24小时前, 低压中心的位置在点“1”, 中心数值为299十位势米; 12小时前, 低中心的位置在点“2”, 中心数值为297十位势米, 移动距离为 S_1 , 系统强度加深了2十位势米; 作预报时低压中心的位置在点“3”, 中心强度为295十位势米, 移动距离为 $S_2 = S_1$, 又加深了2十位势米。由此可见, 低压中心自西向东移动, 方向不变, 移速不变, 中心强度等速加深。在此情况下, 应按直线外推, 那么, 12小时后低压中心将东移到点“4”, 移动距离为 $S_3 = S_2 = S_1$, 中心强度继续降低2十位势米, 达293十位势米。

(2) 变速外推 24小时前地面低中心位于点“1”(图6.2), 中心数值为1009百帕; 12小时前低中心位于点“2”, 中心数值为1006百帕, 移动距离为 S_1 , 加深了3百帕; 作预报时低中心位于点“3”, 中心数值为1001百帕, 移动距离为 S_2 , 加深了5百帕。由图可见, $S_2 < S_1$, 低中心减速移动, 中心数值是加速降低, 移动方向稍向左偏。这种情况应按曲线外推, 那么, 12小时后低压中心移动到点“4”, 移动距离为 $S_3 = S_2 - (S_1 - S_2)$, 中心数值为 $1001 - ((5 + (5 - 3))) = 994$ 百帕。

2. 槽线、脊线的外推

分析实践表明, 高空槽、脊线各段的移动速度往往不同, 因此, 在外推槽、脊线的移动时, 需要在槽、脊线上选取有代表性的点, 分别按其移动趋势外推。

(1) 槽线移动的外推

如图6.3所示, 24小时前槽线位于 A_1A_1' , 12小时前槽线位于 A_2A_2' , 预报时槽线位于 A_3A_3' 。为了外推此槽线的未来位置, 首先根据其移动特点, 在槽线的北段、中段和南段选取有代表性的 a_1 、 b_1 、 c_1 三个点, 并作矢线与 A_2A_2' 垂直相交于 a_2 、 b_2 、 c_2 ; 再以同样的方法作矢线与 A_3A_3' 正交于 a_3 、 b_3 、 c_3 。由槽线过去的移动趋势看出, 其北段和中段是加速移动的, 而南段是等速移动的。如高空形势无重大变化, 则槽线北段和中段可按加速外推, 而南段可按等速外推。12小时后, 其移动距离分别为

$$a_3a_4 = a_2a_3 + (a_2a_3 - a_1a_2)$$

$$b_3b_4 = b_2b_3 + (b_2b_3 - b_1b_2)$$

$$c_3c_4 = c_2c_3 = c_1c_2$$

将 a_4 、 b_4 、 c_4 三点连接起来, 就是未来12小时后的槽线的位置。可见, 由于槽线各段的移速

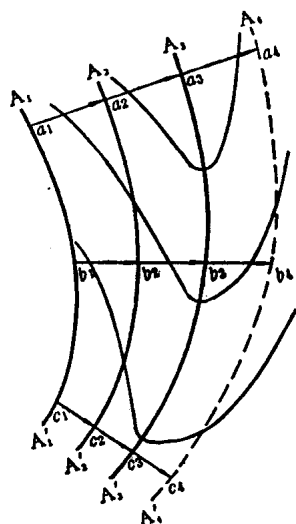


图6.3 高空槽线的外推

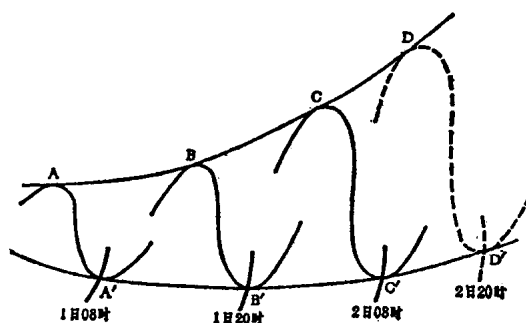


图6.4 高空槽脊强度的外推

不同，故槽线由原来的南北走向变为东北-西南走向。

同理，可外推脊线和地面锋线的移动。

(2) 槽脊强度的外推

用外推法预报高空槽脊的强度变化，通常用槽脊的振幅变化来确定。如果槽脊振幅随时间增大（槽向南伸展，脊向北伸展），且槽脊东西范围变宽，则表示槽脊加强，反之，则表示槽脊减弱。

外推时，首先选取能表示槽脊强度的某条等高线（通常在500百帕层上选540十位势米线），根据其波峰（脊）点、波谷（槽）点位置的变化趋势来外推槽脊强度变化。如图6.4所示，24小时前脊点和槽点的位置分别位于A和A'，12小时前其位置分别位于B和B'，作预报时其位置分别位于C和C'。由图看出，脊点明显北移，槽点稍有南伸，后又北抬，但仍使脊点和槽点间的南北向（正向）距离加大，东西向（侧向）距离也略有加大。这表明槽脊在加强，而移动速度减慢。据此，可外推脊点继续北移，槽点略向北抬，12小时后脊点和槽点分别位于D和D'。如果脊点和槽点间的正向距离继续增大，则可预报在脊区和槽区将有高、低压中心形成。

3. 应用外推法应注意的问题

当大气运动处于相对稳定状态时，天气系统的移动速度和强度变化通常是渐进的，并且具有连续性，所以用外推法作短期天气预报是比较有效的，但外推时间不能过长。当天气系统处于显著的变动状态时，如有天气系统生成或消失，系统移动速度和强度发生突变时，就不适用。因此，在应用外推法时，应结合系统发生发展的物理原因，考虑周围系统的影响，并结合其它预报方法分析判断。

第二节 运动学方法

一、运动坐标系与固定坐标系中局地变化的关系式

根据(4.44)式

$$\frac{\partial \xi_a}{\partial t} = \frac{\delta \xi_a}{\delta t} - C \cdot \nabla_h \xi_a$$

我们可以抽象出一个适用于任一物理量的运动坐标系与固定坐标系中局地变化的关系式

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\delta}{\delta t} - C \cdot \nabla_h \quad (6.1)$$

式中 $\frac{\partial}{\partial t}$ 为固定坐标系中的局地变化, $\frac{\delta}{\delta t}$ 为运动坐标系中的“局地”变化, C 为运动坐标系(即运动的天气系统)相对于固定坐标(我们可取为地表面)的水平移动速度。如果取 x 轴与系统运动方向一致, 那么, C 在 y 轴上的投影为零, 故 $|C| = C = C_x$ 。于是

$$C \cdot \nabla_h = C_x \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \right) = C \frac{\partial}{\partial x}$$

所以, (6.1) 式可写为

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\delta}{\delta t} - C \frac{\partial}{\partial x} \quad (6.2)$$

为加深理解 (6.2) 式的物理意义, 下面举例予以说明。

设700百帕图上有一气旋(图6.5), 其中心在单位时间内, 由固定坐标系的原点 O 移到

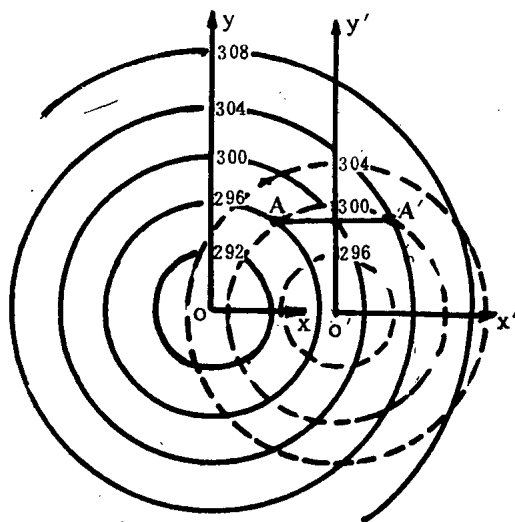


图6.5 固定坐标系与运动坐标系中要素局地变化的关系

O' 点(运动坐标的原点)。此时, 固定于运动坐标上的某点 A , 随运动坐标系移到点 A' 。从运动坐标系 ($x'O'y'$) 来看, 点 A' 的位势高度 H 的局地变化为: 点 A' 的 H 值减去点 A 的 H 值, 即

$$\frac{\delta H}{\delta t} = 300 \text{ 十位势米} - 296 \text{ 十位势米} = 4 \text{ 十位势米}$$

但从固定坐标系 (xOy) 来看, 点 A' 的局地变化为: 点 A' 在运动坐标系中的 H 值减去在固定坐标系中的 H 值, 即

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 300 \text{ 十位势米} - 304 \text{ 十位势米} = -4 \text{ 十位势米}$$

而在固定坐标系的高度场中, 点 A' 和点 A 的高度差, 对单位时间来说(系统的移速就等于移

动距离)，其值为：点 A' 的高度值减去点 A 的高度值即

$$C \frac{\partial H}{\partial x} = 304 \text{ 十位势米} - 296 \text{ 十位势米} = 8 \text{ 十位势米}$$

该值是由于系统的平移所引起的高度变化。将上述数值代入下式

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\delta H}{\delta t} - C \frac{\partial H}{\partial x} \quad (6.3)$$

得

$$-4 \text{ 十位势米} = 4 \text{ 十位势米} - 8 \text{ 十位势米}$$

可见，(6.3)式的两端相等。该式说明：固定坐标系中某点（如点 A' ）的高度局地变化等于运动坐标系中的高度“局地”变化减去由系统平移所引起的高度变化之差。

二、系统移动速度公式

根据(6.2)式，并以 F 表示任一物理量，则有

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\delta F}{\delta t} - C \frac{\partial F}{\partial x}$$

式中 $\frac{\partial F}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial x}$ 均可从天气图上求得，而 $\frac{\delta F}{\delta t}$ 却难以测到。但是，可以在运动系统中，选取一些特性点或特性线，使得在这些点和线上的某一物理量在运动坐标系中的“局地”变化为零，即 $\frac{\delta F}{\delta t} = 0$ 。例如，气旋中心和反气旋中心是特性点，其特征表现是：在中心点处气压

梯度为零，即 $\nabla_{\perp} p = 0$ ，或 $\nabla_{\perp} H = 0$ ，因而有 $\frac{\delta}{\delta t}(\nabla_{\perp} p) = \frac{\delta}{\delta t}(\nabla_{\perp} H) = 0$ ，槽、脊线为特

性线，其特征表现是：对与 x 轴正交的槽脊线而言，有 $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ ，或 $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ ，因而有

$$\frac{\delta}{\delta t} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\delta}{\delta t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = 0。据此，则有$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -C \frac{\partial F}{\partial x}$$

于是，运动系统的移动速度为

$$C = - \frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{\frac{\partial F}{\partial x}} \quad (6.4)$$

此即运动系统的移速公式。

三、系统移动的预报

1. 槽（脊）线的移动预报

取 x 轴与槽（脊）线正交，且指向槽（脊）线移动的方向（图6.6）。此时，取 $F = \frac{\partial p}{\partial x}$ ，

根据(6.4)式，槽（脊）线的移动速度为

$$C = - \frac{\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)}{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)} = - \frac{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} \quad (6.5)$$

式中 $-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)$ 为变压 $-\frac{\partial p}{\partial t}$ 沿 x 方向的分布, 称变压升度; $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ 为气压升度沿 x 方向的分布,

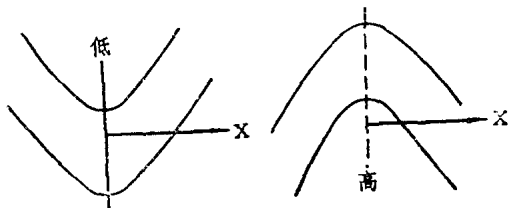


图6.6 槽(脊)线的移动

表示槽(脊)的凹凸程度, 在低压槽内, $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0$, 在高压脊内, $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < 0$ (见4.13式的讨论), 槽(脊)越强, $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ 的绝对值越大。

由(6.5)式可以看出: 对低压槽而言($\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0$), 当 $-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) > 0$ 时, $C < 0$, 即槽前变压(变高)大于槽后变压(变高)时, 则槽后退; 当 $-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) < 0$ 时, $C > 0$, 即槽前变压(变高)小于槽后变压(变高)时, 则槽前进。对于高压脊而言($\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < 0$), 当 $-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) > 0$ 时, $C > 0$, 即脊前变压(变高)大于脊后变压(变高)时, 则脊前进; 当 $-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) < 0$ 时, 则 $C < 0$, 即脊前变压(变高)小于脊后变压(变高)时, 脊后退。

由以上分析, 可得到两条定性预报规则

- (i) 槽线沿变压(变高)梯度方向移动, 脊线沿变压(变高)升度方向移动。
- (ii) 槽(脊)线的移动速度与变压(变高)梯度(升度)成正比, 与槽(脊)的深度成反比, 即在变压(变高)梯度(升度)相同的情况下, 强槽(脊)比弱槽(脊)移动慢。

2. 气旋和反气旋的移动预报

气旋和反气旋有时是近乎圆形的, 但一般是准椭圆的。今在气旋(反气旋)中心建立一个运动坐标系, 并取两条相互垂直的槽(脊)线分别与 x 轴和 y 轴重合, 其移速分别以 C_x 和 C_y 表示。由于气旋(反气旋)中心就是两条槽(脊)线的交点, 所以气旋(反气旋)中心的移动速度 C 在 x 轴和 y 轴的投影就是两条槽(脊)线的移动速度 C_x 和 C_y 。根据槽(脊)线的移动速度公式(6.5)式, 有

$$C_x = -\frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} \quad (6.6)$$

$$C_y = -\frac{\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial t}}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} \quad (6.7)$$

于是, 气旋 (反气旋) 中心的移动速度为

$$C = C_x i + C_y j \quad (6.8)$$

其大小为

$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (6.9)$$

下面将气旋 (反气旋) 分为正圆形和椭圆形两种情况讨论。为便于讨论, 先将为什么在正圆形气旋 (反气旋) 内 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$, 而在椭圆形气旋 (反气旋) 内 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$ 或 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$ 。现用图示法作一直观地说明。

如图6.7所示, 图中ABCD为等高面 (z_0) 上的一个椭圆形气旋, 长轴AB与x轴平行, 短轴CD与y轴平行。等压线可表示为

$$p(x, y, z_0) = \text{常数}$$

曲线 $p = p(x, 0, z_0)$ 表示气旋内长轴AB距离上气压沿x方向的分布, 这条曲线在o点的曲率为

$$k = \frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2}}$$

由于在o点气压有极小值, 故 $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0$, 因而

$$k = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

同理, 曲线 $p = p(0, y, z_0)$ 表示气旋内短轴CD距离上气压沿y方向的分布, 这条曲线在o点的曲率为

$$k = \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$$

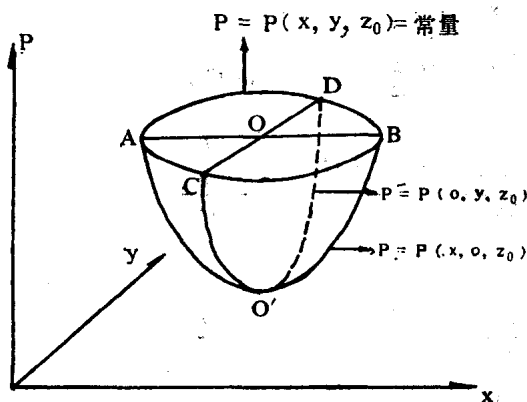


图6.7 椭圆形气旋中水平气压梯度分量
沿长轴和短轴的分布率

从图中可以看出, 在o点 $p = p(0, y, z_0)$ 曲线的曲率比 $p = p(x, 0, z_0)$ 曲线的曲率大, 故有

$$\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

这表示在气旋内，对中心而言，沿 y 方向水平气压梯度的投影的分布率大于沿 x 方向水平气压梯度的投影的分布率。就是说，对于短轴与 y 轴平行，长轴与 x 轴平行的椭圆系统而言，具有 $\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ 的特点。

如果椭圆系统的短轴与 x 轴平行，长轴与 y 轴平行，则相反，即有

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$$

如果椭圆系统的短轴与长轴相等，即正圆形，则有

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$$

这表示气旋（反气旋）内，对中心而言，沿 y 轴和 x 轴的水平气压梯度的投影的分布率是相等的。

(1) 正圆形系统的移动情况

取 I 表示变压梯度，它在 x 轴与 y 轴的投影分别为

$$I_x = -\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}, \quad I_y = -\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial t}$$

于是

$$I = I_x i + I_y j$$

根据以上两式，则(6.8)可写为

$$\begin{aligned} C &= C_{xt} + C_{yt} = -\frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} i - \frac{\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial t}}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} j \\ &= -\frac{I_x}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} i + \frac{I_y}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} j \end{aligned}$$

由于在正圆形系统中， $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$ ，故上式可写为

$$C = \frac{1}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} (I_x i + I_y j) = \frac{I}{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}$$

或

$$C = \frac{1}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} (I_x i + I_y j) = \frac{I}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}}$$

(6.10)

此即正圆形系统的移速公式。

由(6.10)可以看出：对气旋而言， $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > 0$ ，故 C 与 I 同号，这表明气旋中心沿变压（变高）梯度方向移动，移速大小与变压（变高）梯度成正比，与气旋强度成反比，即变压（变高）梯度相同的情况下，气旋越强移动越慢。对反气旋而言，因 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$

$= \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} < 0$ ，故 C 与 I 异号，这表明反气旋中心沿变压（变高）升度方向移动，移速大小与变压（变高）升度成正比，与反气旋强度成反比，即变压（变高）升度相同的情况下，反气旋越强移动越慢。

(2) 椭圆形系统的移动情况

如取 x 轴与椭圆系统的长轴平行， y 轴与椭圆系统的短轴平行，则有 $\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ 。因此，系统的移动方向将偏离变压梯度（升度）的方向。

对气旋来说，设其移速 C 与 x 轴的夹角为 θ ，则 θ 的正切可表示为

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{C_y}{C_x} = \frac{-\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial t} / \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}}{-\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} / \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}} = \frac{I_x / \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}}{I_y / \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}$$

又设变压梯度 I 与 x 轴的夹角为 β （图6.8），则其正切为

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{I_y}{I_x}$$

于是有

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} \times \frac{I_y}{I_x} = \frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} \operatorname{tg} \beta \quad (6.11)$$

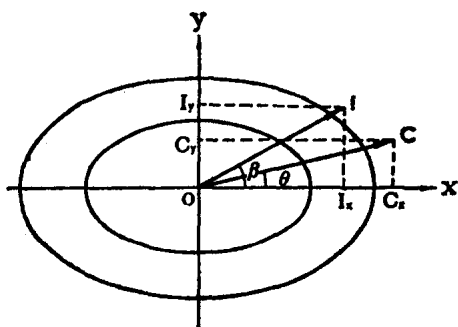


图6.8 椭圆形气旋的移动与变压梯度的关系

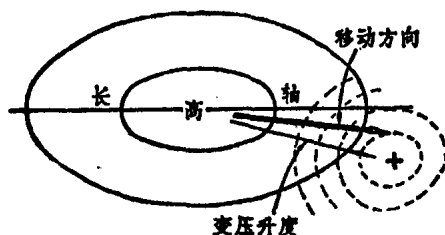


图6.9 椭圆形反气旋的移动与变压升度的关系

由于在椭圆气旋中， $\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0$ ，故（6.11）式可写为

$$\frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}} < 1 \quad (6.12)$$

即

$$\operatorname{tg} \theta < \operatorname{tg} \beta$$

亦即

$$\theta < \beta$$

这表明气旋中心移动方向介于变压梯度与长轴之间。可见，长轴越长， θ 比 β 小得越多，气旋移动方向越接近于其长轴方向。同理，反气旋中心移动方向介于变压升度与长轴之间，其长轴越长，即反气旋越扁，则其移向越接近于其长轴方向（图6.9）。

综合上述分析，可归纳出两条定性规则：

(i) 正圆形低压（高压）沿变压梯度（升度）方向移动，其移速与变压梯度（升度）成正比，而与系统中心强度成反比。(ii) 椭圆形低压（高压）的移动方向介于变压梯度（升度）与其长轴之间，其长轴越长，移向越接近于长轴方向。移动速度与变压梯度（升度）成正比，与系统中心强度成反比。

3. 锋面移动的预报

(1) 锋面移速公式

在锋线上建立一个运动坐标，使 y 轴与锋线平行， x 轴与锋线正交，并由暖区指向冷区。设 p_L 为冷气团一侧的气压， p_N 为暖气团一侧的气压（参阅图3.9）。根据(6.2)式，有

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\delta F}{\delta t} - C \frac{\partial F}{\partial x}$$

根据锋面的动力学条件： $p_L = p_N$ ，即 $p_L - p_N = 0$ ，令 $F = p_L - p_N$ ，在锋线上有

$$\frac{\delta(p_L - p_N)}{\delta t} = 0, \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned} C &= - \frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{\frac{\partial F}{\partial x}} = - \frac{\frac{\partial}{\partial t}(p_L - p_N)}{\frac{\partial}{\partial x}(p_L - p_N)} \\ &= - \frac{\frac{\partial p_L}{\partial t} - \frac{\partial p_N}{\partial t}}{\frac{\partial p_L}{\partial x} - \frac{\partial p_N}{\partial x}} \end{aligned} \quad (6.13)$$

式中 $\frac{\partial p_L}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial p_N}{\partial t}$ 分别为冷气团一侧和暖气团一侧的变压， $\frac{\partial p_L}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial p_N}{\partial x}$ 分别为冷气团一侧和暖气团一侧的气压升度。由于锋线总是位于低压槽内，有 $\frac{\partial p_L}{\partial x} > \frac{\partial p_N}{\partial x}$ 。 $\frac{\partial p_L}{\partial x} - \frac{\partial p_N}{\partial x}$ 表示了锋所在槽的深浅程度，也反映了锋的强弱。

(2) 锋线移动的预报

(i) 锋的移向 由(6.13)式看出：对冷锋而言，系冷空气推动锋面向暖空气移动，由于取 x 轴由暖区指向冷区为正，故冷锋系沿 x 轴的负向移动，因而有 $C < 0$ 。由于 $\frac{\partial p_L}{\partial x} - \frac{\partial p_N}{\partial x} > 0$ ，所以必有 $\frac{\partial p_L}{\partial t} - \frac{\partial p_N}{\partial t} > 0$ ，即冷锋后冷区内的变压大于锋前暖区内的变压。这表明冷锋向变压值小的方向移动。对暖锋而言，系暖空气推动锋面向冷空气移动，即暖锋沿 x 轴正向移动，故 $C > 0$ 。由于 $\frac{\partial p_L}{\partial x} - \frac{\partial p_N}{\partial x} > 0$ ，所以必有 $\frac{\partial p_L}{\partial t} - \frac{\partial p_N}{\partial t} < 0$ ，即锋后暖区的变压大于锋前冷区的变压。这表明暖锋是向变压代数值小的方向移动。

(ii) 锋的移速 由(6.13)还可看出: 锋的移速与冷暖空气内的变压差成正比, 与锋所在槽的强度或锋的强度成反比, 即当锋前后变压差相同的情况下, 锋所在的槽越深、锋面越强时, 则锋面移动缓慢; 当锋所在低槽和锋的强度相同的情况下, 锋前后变压差越大, 则锋移动越快。若锋面两侧变压差很小时, 则锋移动很慢或成为准静止锋。

(3) 预报锋面移动应注意的问题

用变压法作锋面移速预报时, 应注意两点: (i) 预报时间不宜过长。由于(6.13)式中的变压用的是瞬时变压, 而实际工作中是用地面图上的三小时变压差来代替瞬时变压差, 即假定气压的变化在短小时内趋势不变。一般情况下, 在短小时内使用它不会有很大误差, 但如果时效较长就会有问题, 一旦原来的趋势发生变化, 会导致预报失败。(ii) 引起气压局地变化的因子, 除了锋面移动时密度平流因子之外, 还有与气压场紧密联系的质量辐合、辐散、垂直运动等因子, 而且还受气压日变化的影响。因此, 用锋两侧的变压差作锋面移动预报时, 就必须除去气压日变化和其它因子的影响。例如夏半年, 我国西部冷锋南下时, 在08时

(北京时)地面图上, 冷锋后 $+\Delta P_3$ 中心明显, 锋前后变压差也显著, 但到14时地面图上, 冷锋前后均为 $-\Delta P_3$, 锋前 $-\Delta P_3$ 中心明显, 锋后并无 $-\Delta P_3$ 中心, 如果高空图上冷锋区内仍为冷平流, 则可判定地面锋后的 $-\Delta P_3$ 是由气压日变化造成的, 并不是由于暖平流作用的结果, 所以仍可用锋前后成片的变压差来定性考虑锋的移动预报, 而不能拘泥于个别站的变压数值。又如气旋加深, 气旋区内气压普遍下降, 可使冷锋后的升压变得微弱, 甚至可以有降压出现。

四、用运动学方法预报气压系统的发展

根据(6.1)式和(6.2)式

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\delta}{\delta t} - C \cdot \nabla_A, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\delta}{\delta t} - C \frac{\partial}{\partial x}$$

来预报气压系统中心和槽、脊的发展。

对低压(高压)中心而言, $\nabla_A P = 0$, 因此有

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\delta P}{\delta t} \quad (C \cdot \nabla_A P = 0)$$

就是说, 低压(高压)中心气压的局地变化就表示了系统中心气压的变化, 近似地可视为系统中心强度的变化。

对槽线和脊线而言, 取 x 轴与该槽(脊)线正交, 并与槽(脊)移向一致时, 则在槽(脊)

线上 $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$, 因此有

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\delta P}{\delta t} \quad \left(C \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \right)$$

就是说, 槽(脊)线上的气压局地变化, 可表示槽(脊)强度的变化。因此, 从原则上讲, 当气旋中心或槽线上出现负变压(正变压)时, 气旋或槽将加深(填塞); 当反气旋或脊线上出现正变压(负变压)时, 反气旋或脊将加强(减弱)。

综合上述分析, 用运动学方法预报系统的移动和发展时, 有如下定性预报指标:

(i) 低压中心或低槽向负变压(负变高)中心移动; 高压中心或高脊向正变压(正变高)中心移动。

(ii) 槽线前后分别有一负变高中心和正变高中心时, 则槽线移动较快(图6.10a)。

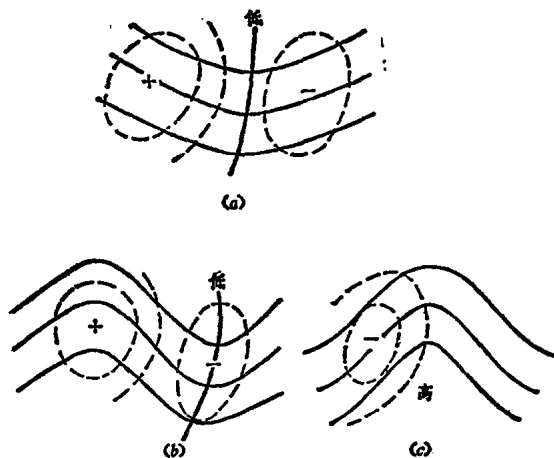


图6.10 变高分布与槽脊移动、发展的关系

(iii) 当槽(脊)线上出现负(正)变高中心时(图6.10 b), 则槽(脊)将加深(加强), 且移动缓慢; 反之, 槽(脊)将减弱, 此后其移速将加快。

(iv) 西风带中, 当脊的西北方出现负变高中心(图6.10 c), 且不断加强时, 此脊将很快减弱。

(v) 当低压槽或均压场中出现较大的负变压中心, 则可能发展成低压; 当高压脊或均压场中出现较大的正变压中心(一般大于2.0百帕), 则可能发展成闭合高压。

(vi) 如果零值变压线接近气旋(反气旋)中心, 则表示气旋(反气旋)未来强度不变; 如果零值变压线处在气旋(反气旋)后部较远的地方, 则气旋(反气旋)要加强; 如果零值变压线处在气旋(反气旋)前部较远的地方, 则气旋(反气旋)将很快减弱; 如果负(正)变压区由气旋(反气旋)中心前移, 则气旋(反气旋)迅速减弱。

(vii) 由于锋面气旋通常沿暖区等压线移动, 故暖区内通常变压不大。如果暖区内出现较大的负(正)变压, 则气旋将发展(填塞)。

第三节 物理分析法

引起气压形势变化的主要因素是动力和热力因子, 物理分析法就是主要考虑了影响气压变化的温度平流和涡度平流作用来进行高空形势预报的方法。

一、涡度平流原理在高空形势预报中的应用

在第四章第二节中, 我们已讨论过无辐散层上涡度平流的影响。但目前多数气象台虽绘制等压面图, 并不绘制涡度图。所以需要介绍直接用等压面图定性估计涡度平流的方法。为此, 将涡度平流用自然坐标表示。

1. 自然坐标系中涡度平流的表达式

在自然坐标系中, 涡度平流表示为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -V \frac{\partial \zeta}{\partial s}$$

将自然坐标系中相对涡度的表达式(4.15)式

$$\xi = k_s V - \frac{\partial V}{\partial n}$$

代入上式则得

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -V \left[\frac{\partial}{\partial s} \left(k_s V - \frac{\partial V}{\partial n} \right) \right] = -V \left[V \frac{\partial k_s}{\partial s} + k_s \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{\partial^2 V}{\partial s \partial n} \right]$$

考虑大尺度的运动是准地转的, 可将实际风视为地转风, 即以 $V_g = -\frac{9.8}{f} \frac{\partial H}{\partial n}$ 代替上式中的 V , 则得

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial s} &= \frac{\partial V_g}{\partial s} = -\frac{9.8}{f} \frac{\partial^2 H}{\partial s \partial n} \\ \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial V}{\partial n} &= \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial V_g}{\partial n} = -\frac{9.8}{f} \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2} \end{aligned}$$

于是有

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} &= -V \left(V \frac{\partial k_s}{\partial s} + k_s \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial V}{\partial n} \right) \\ &= V_g \left(V_g \frac{\partial k_s}{\partial s} + k_s \frac{\partial V_g}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial V_g}{\partial n} \right) \\ &= \frac{9.8}{f} \frac{\partial H}{\partial n} \left(-\frac{9.8}{f} \frac{\partial H}{\partial n} \frac{\partial k_s}{\partial s} - k_s \frac{9.8}{f} \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} \right. \\ &\quad \left. + \frac{9.8}{f} \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2} \right) \\ &= -\left(\frac{9.8}{f} \right)^2 \frac{\partial H}{\partial n} \left(\frac{\partial H}{\partial n} \frac{\partial k_s}{\partial s} + k_s \frac{\partial^2 H}{\partial s \partial n} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2} \right) \quad (6.14) \end{aligned}$$

此即地转风涡度平流的表达式。式中 s 取沿气流方向, n 取垂直于气流并指向气流方向的左方, 系由等高线的高值一侧指向其低值一侧, 所以 $\frac{\partial H}{\partial n}$ 恒为负值。

2. 地转涡度平流的讨论

从 (6.14) 式看出, 涡度平流项的作用, 表现为三个方面, 即曲率项的作用、散合项的作用和疏密项的作用, 依次以 $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_1$ 、 $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_2$ 、 $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_3$ 表示。

(1) 曲率项

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_1 = -\left(\frac{9.8}{f} \right)^2 \left(\frac{\partial H}{\partial n} \right)^2 \frac{\partial k_s}{\partial s}$$

此项表示等高线曲率沿气流方向的变化。当等高线有弯曲时, 便存在曲率项的影响。因式中 $\left(\frac{9.8}{f} \right)^2$ 、 $\left(\frac{\partial H}{\partial n} \right)^2$ 均为正值, 故涡度平流的性质完全由 $\frac{\partial k_s}{\partial s}$ 的正负来确定。由于在槽区 $k_s > 0$, 且在槽线附近 k_s 有最大值; 在脊区 $k_s < 0$, 且在脊线附近 k_s 有最小值, 所以, 曲率项的作用在槽线和脊线中间的地区最为显著。据此, 有两条定性预报规则: (1) 在槽前脊后, 等高线气旋性曲率沿气流方向减小, $\frac{\partial k_s}{\partial s} < 0$, 所以, $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_1 > 0$, 有正涡度平流, 产生减压, 使等

压面降低(图6.11)。(ii)在脊前槽后,等高线气旋性曲率沿气流方向增大, $\frac{\partial k_s}{\partial s} > 0$,

所以, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_1 < 0$, 有负涡度平流, 产生加压, 使等压面升高(图6.11)。

综合上述分析可见, 当等高线呈正弦曲线分布时, 曲率涡度平流引起槽前减压, 脊前加压, 使高空槽、脊向前移动。

(2) 散合项

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right)_2 = -\left(\frac{9.8}{f}\right)^2 \frac{\partial H}{\partial n} \left(k_s - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n}\right)$$

此项表示等高线沿气流方向疏散或汇合对涡度平流的影响。由于 $\frac{\partial H}{\partial n} < 0$, 当 $\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} < 0$ 时,

表示等高线沿气流方向汇合; 当 $\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} > 0$ 时, 表示等高线沿气流方向疏散。由上式看

出, 该涡度平流的性质完全决定于 k_s 和 $\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n}$ 的符号。据此, 可有如下定性预报规则:

(i) 在槽区($k_s > 0$), 等高线沿气流方向汇合时($\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} < 0$), 有负涡度平流($\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right)_2 < 0$)产生加压, 使等压面升高; 反之, 当等高线沿气流方向疏散时($\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} > 0$), 有正

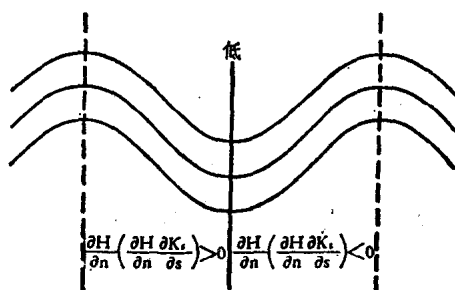


图6.11 曲率项涡度平流

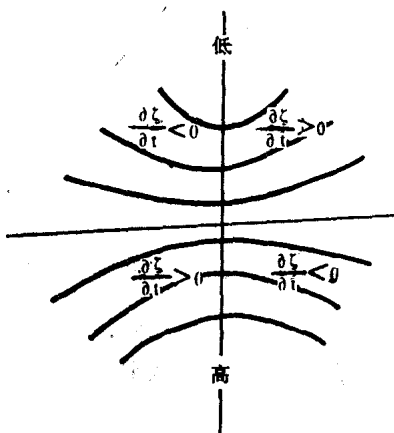


图6.12 散合项涡度平流

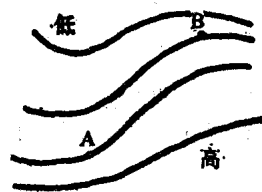


图6.13 疏密项涡度平流

涡度平流 $\left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_2 > 0\right)$, 产生减压, 使等压面降低 (图6.12上部)。

(ii) 在脊区 ($k_s < 0$)、等高线沿气流方向汇合时 $\left(\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} < 0\right)$, 有正涡度平流 $\left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_2 > 0\right)$, 产生减压, 使等压面降低; 反之, 当等高线沿气流方向疏散时 $\left(\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial n} > 0\right)$, 有负涡度平流 $\left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_2 < 0\right)$, 产生加压, 使等压面升高 (图6.12下部)。

(3) 疏密项

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_3 = + \left(\frac{9.8}{f}\right)^2 \frac{\partial H}{\partial n} \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2}$$

此项表示等高线在 n 方向的疏密分布沿气流方向的变化。如图6.13所示, 在 A 点, 等高线向高压一侧密集, $\frac{\partial^2 H}{\partial n^2} > 0$, 有正切变涡度; 在 B 点, 等高线向低压一侧密集, $\frac{\partial^2 H}{\partial n^2} < 0$, 有负切变涡度, 因而, 相对涡度沿气流方向减小, 即 $\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2} < 0$, 则有 $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_3 > 0$, 有正涡度平流, 在 AB 之间的区域, 等压面降低; 反之, 当 $\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial^2 H}{\partial n^2} > 0$, 即正涡度沿气流方向增大时, 则 $\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)_3 < 0$, 有负涡度平流, 等压面升高。实践表明, 除在特殊情况下, 此项不甚重要。

3. 涡度平流定性规则的应用

在等压面图上, 尽管槽脊内的散合形式多种多样, 但均可应用上述定性判断规则, 按照具体的散合形式分析涡度平流及其变化。下面我们结合日常预报工作中常见的几种散合形式予以说明。

(1) 对称槽脊中的涡度平流

(i) 槽脊线处等高线汇合

如图6.14a、b所示, 在槽前等高线疏散, 减压; 槽后等高线汇合, 加压。脊前等高线疏散, 加压; 脊后等高线汇合, 减压。

此时由于等高线弯曲, 同时存在曲率涡度平流, 槽前脊后为正涡度平流, 减压。脊前槽后为负涡度平流, 加压。

可见, 对于槽脊线处等高线汇合的槽脊来说, 槽脊前后散合项和曲率项的作用是一致的, 故涡度平流强, 加压减压也强, 能使槽脊快速东移。

(ii) 槽脊线处等高线疏散

如图6.14c、d所示, 槽前等高线汇合, 加压; 槽后等高线疏散, 减压。脊前等高线汇合, 减压; 脊后等高线疏散, 加压。而曲率项的作用, 仍然是槽前脊后, 减压; 脊前槽后, 加压。

可见, 对于槽脊线处等高线疏散的槽脊来说, 槽脊前后散合项和曲率项的作用正相反。此时, 涡度平流的综合结果难以确定。但通常情况下, 曲率项作用大于散合项。因此, 槽前脊后有弱的正涡度平流, 减压也弱; 脊前槽后有弱的负涡度平流, 加压也弱。这种涡度平流