

大气中的

风

张克家
吴富山
王庆斋
编著

气象出版社

大气中的风

张克家 吴富山 王庆斋 编著

气象出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大气中的风/张克家等编著. —北京: 气象出版社,
1999. 12
ISBN 7-5029-2854-5

I. 大… II. 张… III. 风-天气学-分析 N.P442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 72225 号

内 容 简 介

气压场和风场的分析是气象业务中最基本的技术之一, 掌握好气压场和风场的分析往往是预报成败的关键。本书针对天气分析的实际, 深入浅出地介绍了天气分析中常用的基本气压场型式和地转风、梯度风、热成风、偏差风及摩擦层中风的概念及其数学表达式。同时, 附绘了大量的图表, 详细地阐述了这些概念在天气图上的定性分析方法。本书内容广泛, 数学推导严谨, 可供气象专业的大中专学生、从事水文气象预报、教学、科研的人员以及气象爱好者参考。

气象出版社出版

(北京白石桥路 46 号 邮编: 100081)

责任编辑: 李如彬 成秀虎 终审: 周诗健

封面设计: 李洪杰 责任技编: 陈红 责任校对: 宋春香

*

北京市白河印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 5 字数: 130 千字

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—500 定价: 10.00 元

前 言

气压场和风场在天气分析和预报中有十分重要的作用。它是造成大气中的风、云、雨、露等天气现象的基本要素之一。无论天气系统分析，还是气象要素预报，均离不开对气压场和风场的类型、结构、性质和演变正确认识。作者在多年的预报、教学实践中，深感正确分析是预报的灵魂。分析气压场和风场变化，往往是预报成败的关键。然而，这种分析比较抽象，理论和实际不容易结合，是天气预报业务中比较复杂的问题，同时，也是气象预报人员必须具备的基本功之一。所以，搞清气压场和风场的基本概念及其判别方法是正确分析天气系统的发生发展的前提条件。为了清楚地说明问题，适应广大读者的需要，本书从基础理论入手，并密切结合气象业务预报实践，尽力以图文相结合的形式来阐述天气分析中常用的气压场的型式、运动方程和几种风的基本概念，以及他们的数学表达式。同时，着重描述了在天气实践中的应用方法。

由于编写时间仓促，加之作者学识水平有限，难免有不足和错误之处，敬请读者提出批评指正。

编者

1999年10月8日

目 录

第 1 章 气压场	(1)
1.1 气压场的表示方法	(1)
1.2 重力与位势	(11)
1.3 气压随高度的变化	(21)
第 2 章 空气的运动方程	(33)
2.1 基本运动方程	(33)
2.2 运动方程的简化	(39)
2.3 x, y, p, t 坐标系中的运动方程	(45)
2.4 自然坐标系中的水平运动方程	(54)
第 3 章 连续方程	(56)
3.1 连续方程	(56)
3.2 x, y, p, t 坐标系中的连续方程	(58)
第 4 章 风 场	(60)
4.1 流线与轨迹	(60)
4.2 风场的型式	(74)
4.3 流函数和势函数	(88)
第 5 章 地转风、热成风和梯度风	(93)
5.1 地转风	(93)

5.2	热成风.....	(99)
5.3	地转风随高度变化的基本类型	(104)
5.4	高度和低压中地转风随高度的变化	(106)
5.5	梯度风	(108)
第 6 章	偏差风.....	(118)
6.1	偏差风在大气运动中的作用	(118)
6.2	偏差风公式	(121)
6.3	怎样在天气图上判断偏差风	(123)
第 7 章	风场与气压场的适应过程.....	(133)
7.1	适应过程的发生	(133)
7.2	风场与气压场的适应关系	(135)
7.3	适应过程的快慢	(137)
第 8 章	摩擦层中的风.....	(139)
8.1	摩擦力	(139)
8.2	摩擦力对空气水平运动的影响	(145)
8.3	摩擦层中的风随高度的变化	(146)

第 1 章 气压场

产生某种物理现象的空间叫场。做为气压这一物理现象在空间的分布称为气压场。气压场中空气的水平流动就形成了风。风有多种形式。如冬季，我国北方的寒潮暴发时，常伴随大风；夏季，东南沿海等地台风活动时，常伴有狂风暴雨。风现象也是天气系统的重要内容。如对暴雨有重要作用的低空急流，本身就是风速的不连续现象。因此，有必要详细地分析、研究风的有关概念和规律。大气的运动是在气压场中进行的。所以，气压场分析是预报天气变化的一个重要依据。因此在研究空气运动时，首先了解气压场及空气在气压场中的运动规律是很有必要的。

1.1 气压场的表示方法

显示气压场可用图示法与函数表示法。图示法是实际分析预报中经常运用的基本工具，函数法属于一般数学表达式，在理论推导中有时予以引用。

1.1.1 图示法

用图像表示空间气压场分布有两种方法：一是等高面图，二是等压面图，前者只用地面图上，而描述自由大气的气压分布则采用后者。

1. 等高面图

等高面：高度处处相等的面叫等高面，是一个平面。

等高面图：在特定的等高面上分析等压线的图叫等高面图。它表示了标准高度上气压的分布，用不同标准高度上这套图，就可表示出空间气压场分布。像地面天气图就是高度为零的等高面图，即海平面图。海平面图反映了海平面的气压分布——即反映了海

平面的气压场。实际工作中，通过分析地面图上的等压线以后，就能够清楚地表示出气压在海平面高度上的分布。如图 1.1 所示。

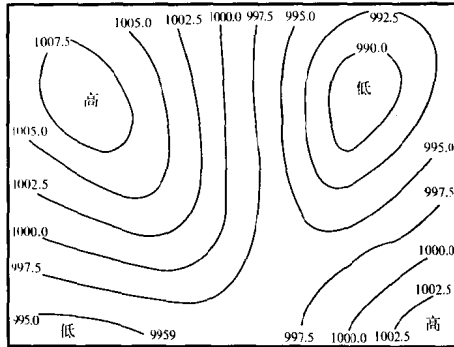


图 1.1 等高面示意图

2. 等压面图

等压面：空间气压相等的各点所组成的面，称等压面，是类似地形起伏不平的曲面。即气压高处的等压面向上凸起，气压低处的等压面向下凹陷。

如图 1.2 所示，在等压面上取 A 、 B 、 C 三点，显然，这三点气压相等，但高度却不同， $H_A > H_B > H_C$ ；如在同一水平面上取与 A 、 B 、 C 三点所对应的三点 A' 、 B' 、 C' 这三点高度相等，而气压却不同， $p_A' > p_B' > p_C'$ 。将这两种情况联系起来就可以看出，在等压面上高度高的地方，正是它附近水平面上气压高的地方；高度低的地方，正是它附近水平面上气压低的地方。所以说，用等压面上高度场的分布就可以表示出附近水平面上的气压场的分布。从而，当我们知道了间隔一定气压值的几个等压面在空间的分布情况，也就可以了解到空间气压场的情况了。

因此，气象上描绘等压面起伏形势，先求出某一等压面在各

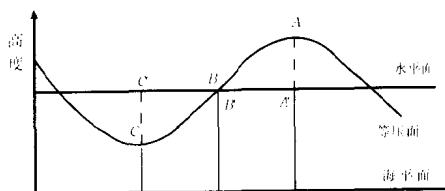


图 1.2 等压面上高度场的分布

地上空相对于海平面的高度，然后连接高度相等的点，绘制等高线，根据等高线的分布，就可以看出等压面的空间起伏形势，就可以了解空中气压场的分布。

等压面图：又称为等压面形势图，通常分为绝对形势图与相对形势图两种。

等压面相对于海平面的起伏形势图称为绝对形势图，以 AT 表示。如 850hPa 等压面图 $AT850$ 图，其海拔高度约为 1500m ， $AT100$ 图，其海拔高度约为 16000m 等。

表示两等压面间起伏（两等压面间的高度差或厚度）的形势图，称为相对形势图（或厚度图），用 OT 表示，如： OT_{1000}^{500} 图表示 500hPa 等压面相对于 1000hPa 等压面的相对形势图。

OT 图与 AT 图虽然都叫等压面图，但两者性质不同。 OT 图的等厚度线分布，实质上反映了两等压面之间气层的平均温度的分布。在气温高（低）的地方，空气密度小（大），单位气压高度差大（小），因而两等压面之间厚度也大（小）。

等压面图上气压系统的特性：由于等压面图上的位势高度场的型式，能够表示附近水平气压场的情况，因此，等压面图上的等高线分布型式也有气压系统：低压、高压、低压槽、高压脊、鞍形场。

下面我们应用曲线的切线斜率的数学知识，描述五种气压系统的特性。

(1) 低压

图 1.3 是通过低压中心的垂直剖面图。低压中心是曲线的切线斜率正负的变换点，是等压面的最低点。因此，低压中心的等压面坡度或曲线的切线斜率等于零，即 $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial H}{\partial y} = 0$ 。在低压中心的左侧，曲线的切线斜率为负， $\text{tg}\beta_1 < 0$ ，也即是 $\frac{\partial H}{\partial x} < 0$ ；在低压中心右侧，曲线的切线斜率为正， $\text{tg}\beta_2 > 0$ ，也即是 $\frac{\partial H}{\partial x} > 0$ 。所以，通过低压中心点时， $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} > 0$ 。同理， $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} > 0$ 。

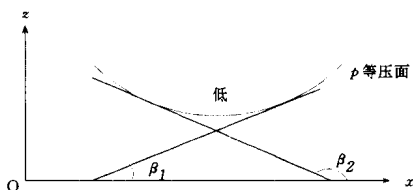


图 1.3 通过低压中心的垂直剖面

(2) 高压

高压中心点也是曲线的切线斜率正负的变换点，所以， $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial H}{\partial y} = 0$ 。通过高压中心时，曲线切线斜率是由正变负（见图 1.4），因此， $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} < 0$, $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} < 0$ 。

(3) 低压槽

图 1.5 给出 x 轴垂直槽线的示意图，在槽线上，曲线切线平行 x 轴，即 $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ ，在通过槽线时，低压槽的曲线形状与低压相同，因此， $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} > 0$ 。

(4) 高压脊

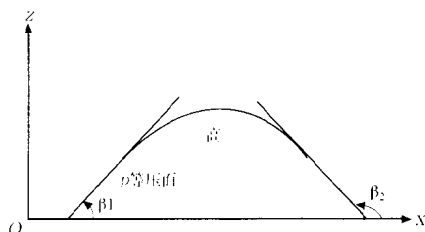


图 1.4 通过高压中心的垂直剖面

图 1.6 给出 x 轴垂直脊线的示意图，在脊线上，曲线切线平行 x 轴，即 $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ ，在通过脊线时，高压脊的曲线升降变化与高压相同，因此， $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} < 0$ 。

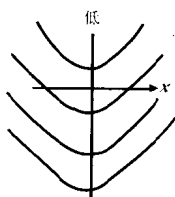


图 1.5 槽线示意图

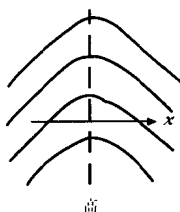


图 1.6 高压脊示意图

(5) 鞍形场中性点

如图 1.7 所示，在中性点 O 处恰是脊线垂直 x 轴，槽线垂直 y 轴的高点，所以 $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ ， $\frac{\partial H}{\partial y} = 0$ 。

沿 x 轴方向的中性点等压面与高压中心等压面几何形状相同，所以 $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} < 0$ ，沿 y 轴方向的中性点，等压面与低

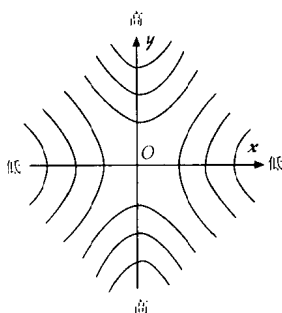


图 1.7 鞍形场示意图

压中心等压面几何形状相同，所以 $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} > 0$ 。

3. 等高面图与等压面图的异同点

(1) 相同点：

①都是等值面。

②都能反映气压场的特点。等高面图上高（低）压区表示等压面是向上凸（下凹）的。

③都是在平面图上用一组等值线反映水平气压场分布特点。

(2) 不同点：

①等值面性质不同：一是等高面，另一个是等压面。

②等值线的名称、意义、间隔不同：

名 称	意 义	间 隔
等 压 线	海平面与空间一组等压面交割而得的一组线，称海平面等压线	以 1000hPa 为准，每隔 2.5hPa 划一根
等 高 线	一特定等压面与空间一组等高面交割而得的一组线，叫等压面图上的等高线。	700hPa 以 3000gpm 为基本线，每隔 40gpm 划一条。

(3) 所起的作用不同

等高面图是直接反映水平气压场分布；

等压面图是间接反映水平气压场分布；

海平面图是直接反映了零高度水平气压场的分布形势。各等压面起伏形势（用等高线表示），反映了所对应高度附近的水平气压场形势。如 700hPa 等压面反映约 3000m 附近高度的水平气压场形势。

1.1.2 定量表示法

图示法可以看出空间气压分布情况，但不能定量显示气压差异程度，为了定量地研究气压场，有必要引出定量表示气压场的

一些基本概念。

1. 气压场的函数式

气压场是个标量场，各量的函数表达式为：

水平气压场的函数表达式： $p = p(x, y, t)$

等压线的函数表达式： $p_a = p(x, y, t) = \text{常数}$

2. 气压梯度

(1) 定义：表示气压分布不均匀的程度的物理量叫气压梯度。

方向：垂直于等压面从高压指向气压降低最快的方向。

大小：等于沿该方向上单位距离内气压改变量。数值越大(小)表明垂直于等压面指向低压方向上的气压分布不均匀程度越大(小)。设 M 为气压梯度，则

$$M = -\nabla p = -\frac{dp}{dN} N \quad (1.1)$$

N ：垂直于等压面指向低压的单位矢量。

$\frac{dp}{dN}$ ：两等压面垂直距离内的气压改变量。

负号是使气压梯度保持为正值而加的。

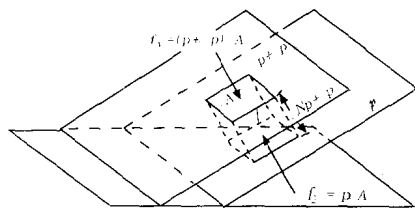


图 1.8 气压梯度示意图

(2) 单位：hPa/赤道度（水平气压梯度）

(3) 推导

沿等压面法线方向 N 取微小体积的空气微团， M 为其中心点。

设两等压面 p 、 $p + \Delta p$ 平行，在它们之间任取一小块立方体空

气柱 (图 1.8), 其底在等压面 p 上, 顶在 $(p+\Delta p)$ 等压面上, 顶面、底面面积均为 ΔA , 两等压面垂直距离 ΔN , 此时, 立方体四个侧面压力两两相等抵消, 而作用于立方体底面上的压力应为 $p \times \Delta A$, 顶面上受的壓力为 $(p+\Delta p) \Delta A$, 两面上压力差即整个立方体所受的总压力为:

$$p\Delta A - (p+\Delta p) \cdot \Delta A = -\Delta p \cdot \Delta A$$

以立方体体积 $\Delta A \cdot \Delta N$ 除上式得: $-\frac{\Delta p}{\Delta N}$

据定义, 这就是气压梯度。但这是两等压面间的平均气压梯度。

但当 $\Delta N \rightarrow 0$, 小立方体压缩成一点 M , 则平均气压梯度就变成空间点 M 的气压梯度即:

$$-\Delta p = -\frac{dp}{dN} N$$

由于 $\frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i}$, $\frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j}$, $\frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}$ 分别为 $\frac{dp}{dN} N$ 沿 x 、 y 、 z 轴上的三个分量。因此, 空间气压梯度表达式也可写为:

$$-\nabla p = -\left(\frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}\right) \quad (1.2)$$

空间气压梯度大小为:

$$|-\nabla p| = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2} \quad (1.3)$$

空间气压梯度 $-\nabla p$ 可分解成

$$-\nabla p = -\nabla_2 p - \nabla_z p = \mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_z$$

$$\mathbf{M}_2 = -\nabla_2 p = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j}\right): \text{水平气压梯度, 约为 } 1 \sim$$

3hPa/赤道度

$$\mathbf{M}_z = -\nabla_z p = -\frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}: \text{垂直气压梯度, 约为 } 1\text{hPa}/10\text{m}$$

$-\nabla_z p$ 比 $-\nabla_2 p$ 大一万倍, 所以气压梯度 $-\nabla p$ 方向与垂直气压梯度近似一致, 因而等压面近似呈水平状态。

(4) 性质：气压梯度是一个空间向量，是一个体积力。

3. 气压梯度力 G

空气的运动是大气压力分布不均匀而引起的，即有了气压梯度的原因，因此可将其做为力来研究。

(1) 定义：由于气压分布不均匀而造成作用在单位质量空气上的力，称为气压梯度力。

方向：同气压梯度，垂直于等压面，由高压指向低压。

表达式：将 ∇p 除以密度 ρ ，就得到作用于单位质量空气上的力即

$$\mathbf{G} = -\frac{1}{\rho} \nabla p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k} \right) \quad (1.4)$$

$$\mathbf{G} \text{ 的水平分量: } G_2 = -\frac{1}{\rho} \nabla_2 p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} \right) \quad (1.5)$$

$$\mathbf{G} \text{ 的垂直分量: } G_z = -\frac{1}{\rho} \nabla_z p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k} \quad (1.6)$$

性质：矢量、质量力。

(2) 作用：

①同一水平面上， G_2 主要由 $-\nabla_2 p$ 决定。

②上下高度相差大时， G_2 要考虑 ρ 的影响；当上下的 $-\nabla_2 p$ 相同时，则 $G_{2\uparrow} > G_{2\downarrow}$ 。

③由于在垂直方向上的重力 g 与 G_z 相平衡，所以尽管 G_z 比 G_2 大很多，实际大气仍以水平运动为主，垂直运动是较小的。

(3) 水平气压梯度 (M_2) 与其气压梯度力 (G_2) 的异同点。

相异点：

①意义不同： M_2 是体积力， G_2 是质量力。

② G_2 与 ρ 成反比， M_2 与 ρ 无关。

相同点：

①都反映了气压分布的不均匀性。

②方向：垂直等压面由高压指向低压。

③大小：等压线愈密（疏），气压差越大（小），则两个量值也越大（小）。

④均以等压面有坡度为其存在条件。

4. 等压面坡度

反映等压面在空中的倾斜程度，以 $\tan\beta$ 表示（见图 1.9）。

判断等压面坡度的办法有：

第一、根据等压面图上的等高线疏密程度来判断等压面的坡度（图 1.10）。

等高线密集则等压面坡度大（图中 AB 处），等高线稀疏则等压面坡度小（图中 CD 处）。

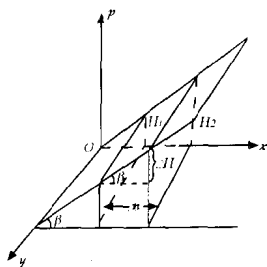


图 1.9 等压面坡度示意图

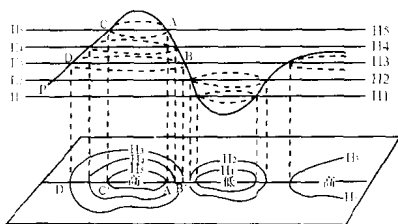


图 1.10 等压面图上等高线疏密与等压面坡度

第二、根据位势梯度的数值大小来判断等压面的坡度。

如图 1.9 所示，等压面坡度 $\tan\beta = -\frac{\Delta H}{\Delta n}$ ，而位势梯度 $-\frac{\Delta H}{\Delta n}$ 可以定量算出，因而等压面坡度可用位势梯度表示。

$-\frac{\Delta H}{\Delta n}$ 是表示垂直等高线由高位势指向低位势方向上单位距离内的高度差。 $-\frac{\Delta H}{\Delta n}$ 愈大（小），则等压面坡度愈大（小）。由于 ΔH 固定取 40gpm，因而， $\tan\beta$ 与 Δn 大小直接有关，即可由等高

线疏密直接判断等压面的坡度。

通常情况下，等压面坡度是随高度增加而增加的，如10km高度的等压面坡度要比近地面的大2~3倍。

5. 等压面图上水平气压梯度力 G_2 与水平位势梯度的关系

已知差分形式 $G_2 = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} = -\frac{1}{\rho} \frac{p_A - p_B}{\Delta n} = -\frac{1}{\rho} \frac{p_C - p_B}{\Delta n}$ (见图 1.11)。

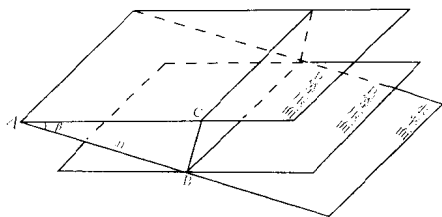


图 1.11 等压面上水平气压梯度力与水平位势梯度的关系

由静力学方程： $dp = -\rho g dz$ 可知：

$$\begin{aligned} p_C - p_B &= -9.8\rho (H_C - H_B) \\ &= 9.8\rho (H_B - H_C) \\ &= 9.8\rho (H_A - H_C) \end{aligned}$$

$$\text{所以, } G_2 = -\frac{1}{\rho} \frac{p_C - p_B}{\Delta n} = -9.8 \frac{H_A - H_C}{\Delta n} = -9.8 \frac{\Delta H}{\Delta n} \quad (1.7)$$

由该式可直接用水平位势梯度 $-\frac{\Delta H}{\Delta n}$ 大小来比较不同等压面上 G_2 的大小。只要量出两等高线间距离 Δn ，就可以知道 G_2 的大小。这比在等高面图上求 G_2 方便，因为等高面图上的 G_2 与 ρ 有关，而 ρ 是一个不能直接测量的量。

1.2 重力与位势

大气在重力场中运动，因而气压场的变化与重力是有密切关系的。本节介绍重力的产生及其变化规律，以及空气块在重力场