

# 天气分析与预报

上 册

S. 佩特森

科学出版社

# 天气分析与预报

(上册)

运动与运动系统

S. 佩特森 著

程 纯 枢 译

陶 诗 言 校

科学出版社

1958

S. PETERSSSEN  
WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING  
VOLUME 1  
MOTION AND MOTION SYSTEMS  
McGRAW-HILL  
NEW YORK TORONTO LONDON  
1956

內 容 簡 介

本書是一本有关天气分析预报方面的参考書，它包括了許多天气学近年来新的研究成果。全書共分为上下二册，上册主要是敘述天气学的主要部分，大气的运动与运动系統，其中詳細地敘述了从大气基本运动方程开始到系統形成的种种理論分析，又例舉了許多实例加以具体說明。

本書可供大学气象专业教师、学生及研究工作者和业务工作者参考，而尤其对于预报员的帮助特別大。

天气分析与预报（上册）

运动与运动系統

S. 佩特森著

程純枢譯

陶詩曾校

科学出版社出版（北京朝阳門大街117号）  
北京市各刊出版业营业許可証出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华書店总經售

|                |                    |
|----------------|--------------------|
| 1958年10月第一版    | 書号：1390 字数：330,000 |
| 1959年10月第二次印刷  | 开本：850×1168 1/32   |
| (京)1,581—2,980 | 印张：12 1/4          |

定价：(10) 2.00元

## 中 譯 本 序

在最近的十余年来，天气学的面貌已經发生很大的变化。所以，过去出版的一些旧天气学教科书，在目前已经不能完全适用。佩特森(S. Petterssen)新写的“天气分析与预报”一书的第二版，对从事实际预报工作的人们来说，是很受欢迎的。

从天气学过去的发展历史看，大致经历了三个阶段。在初期，人们只能从地面的气象资料进行分析与研究，预报员们只能采用非常简单的外推法去预报气旋及反气旋的移动。在第一次世界大战以后，极锋和气团学说出现了，个别的气象台站开始有了高空观测。这时候天气学进入了第二个阶段。在这个时期内，锋和气团成为天气学中的基本观念。所以，在天气预报方面，也以锋和气团的移动及变性作为主要的根据。第二次世界大战以后，在世界上高空观测台站网大大增加，同时动力气象学也有了非常迅速的发展。这时候在天气学里新的事实与问题也大大地增多了，而且天气学也从过去的间接高空天气学时代进入到直接的三度空间的天气学时代。而动力气象学中的许多新成就也已被吸收到天气学中去，因此，就使得天气学与动力气象学间的距离愈来愈缩短。在目前的预报工作中，我们一方面固然还沿用过去的一些老方法，但更重要的是要广泛采用从动力气象学新近发展所得出来的许多运动学或动力学的方法及法则。例如，预报员在做形势预报或者做气压系统的发生及发展预报时，常常得考虑辐合、辐散及涡度等概念。另外，在最近的几年来，客观的数值预报方法也已开始在预报业务中应用。因此在天气学的这个新阶段里，具有经验的预报员们应该要赶上新的形势，应该掌握天气学中的一些新的观念和方法以及数值预报的物理基础。

苏联在1955年出版了“短期天气预报指导”，这本书基本上是

按照天气学在新阶段中的要求编写而成的，所以可以說是最早的一本用新的观念和方法写成的天气学书籍。而佩特森的“天气分析与预报”約迟一年以后才出版。

在原书的序言中，作者列举了許多資本主义国家的学者，认为最近十几年来天气学的发展，主要归功于他們，而根本沒有提到苏联学者的工作。实际上，苏联学者的貢獻是很大的；特別在数值长期预报方面，苏联更是走在資本主义国家的前面。所以我們在讀这本“天气分析与预报”时，應該注意到这一点。

陶詩言

## 原 序

在本書第一版发行十五年之后,才編印第二版,这不应当看成是这么多年以来天气学缺乏进展,正相反,气象学的研究进展得非常迅速,以致不能在早些时候編出一本适当的新版本来。

目前天气学在下列几方面已获得了显著的进展。

第一,由于在世界范围内高空观测网建立的结果,已經到得大量的新的事实,而且都已經过整理研究。因此間接分析法已为直接分析法所代替。运动的垂直结构及天气系统的垂直结构已經相当細致地进行了一些研究,其中特别是 J. 皮叶克尼斯 (Bjerknes)、帕尔門 (Palmen)、銳尔 (Riehl)、罗斯貝 (Rossby) 和威立特 (Willett) 等人的工作;并且已經确立一个事实,即低层的天气过程是与不断在变化着的高层大气的结构有着密切的关联。

第二,因为有自由大气新知識的鼓励,赫姆霍茨 (Helmholtz) 和 V. 皮叶克尼斯的經典定理重新得到重視。特别是罗斯貝和設特克列夫 (Sutcliffe) 他們将这些定理应用到預报中来,因而为預报研究工作指出了已经获得进展的方向。

第三,高速計算机的創制,这便能够将运动方程进行数值积分,并作出及时的預报,这主要是由于卡尼 (Charney)、菲耶托夫特 (Fjörtoft)、菲利浦斯 (Phillips) 和罗斯貝等人的工作。理論与应用之間真正的桥梁已經架起来了,虽然这条桥梁还須进一步巩固和加寬,但毫无疑问这条桥現在已經有用处了。

在預报上統計学的方法,其中包括应用类比法和分类法等,可以作为經驗的补充 并且始終証明是有用的。但是根据自动相关、交叉相关和連續場的时系分析这些方法来創造更加严格的預报方法,只在最近才有显著的成就。在这方面,高速計算机的創制也大大地提高了用客观方法做出及时預报的可能性。

虽然在定量的预报方法的发明和創造上有了成就，但是一般预报工作人員还是起很重要的作用的。他的地方性和地区性的經驗，地形和地势对天气影响的經驗以及水汽和渾浊現象源由等等方面的經驗，对于由机器而作出的预报起着很有价值的补充作用。当机器提供了日常可以算出来的答案之后，预报員便有机会去专心于那些只能用科学理解和經驗才能解答的种种問題。此外，由于机制预报是由理想化模式得出的（至少一部分是如此的），总遺留一些未得到解释的剩余問題，吸引人們去研究。所以，预报員需要通晓机制预报所根据的理論、假設和模式。特別是有必要能够分辨那些是屬於理想模式（無論是动力学的或統計学的模式）不适用时的“反常形势”。

由此看来，在現在预报員訓練方向要加以修改。修改的要旨应当是尽量縮小（如有可能，消灭它）通常所称的天气学与动力气象学之間的差別。本書第二版的目的是提供一本为这样訓練用的教科書。

可以这样概括地說：运动系統是天气系統的制造者；也是传送者。所以作者認為，先处理运动系統，然后在下册中討論天气系統的分佈预报，这样可以便利一些。

提供一本关于一般预报的教科書是作者的目的。因此关于在赤道帶中的种种問題便不加討論。經驗指出，赤道区的气象工作者在进行预报时，主要須根据专为具体地区創制的經驗性方法，同时还要注意赤道帶与中緯度大尺度运动系統間的相互作用。另外，关于由地方性經驗所得到的許多預報規則，这里也省略了。虽然这些規則在当地很有用处，如果加以普遍化，其預報价值便很成問題，这些規則放在地区性預報手册里是比較恰当一些。

我非常感謝厄里阿生（Eliassen）博士对第一至九章的指教和对我很有帮助的評論；希帕特（Sheppard）教授对第五章提出可貴的意見；帕尔門教授对第十二章提出的意見；設特克列夫博士对作者进行了通訊，因此对第十六章的內容方面有很多影响。此外，还承蒙許多同事們允許我引用他們的許多图表，我也非常感謝，这些图表的出处都已在正文里的有关部分加以注明。

我特別感謝，勃拉特布雷 (Bradbury) 幫助我準備許多天氣圖資料；夫里德蘭得 (Friedlander) 繪制了大部分圖表；蘭姆森 (Lamson) 和伍夫森 (Wolfson) 幫助準備原稿；厄斯多克 (Estoque)、休斯 (Hughes) 和牛頓 (Newton) 三博士和我系其他同事給我許多可貴的幫助。

我熱忱地致謝厄里阿生博士為本書寫作第十五和十八兩章，他的親切支援大大地促進了我的工作

S. 佩特森

# 符 号 表

(括弧里的数字表示这符号定义所在的章节)

## I 标量类

- $A$  系统的加速度(3.2, 3.5);面(2.6, 7.3)
- $A_0, A_T$  涡度、厚度平流(16.2)
- $A_r, A_s, A_t$  相对流綫、流綫、路径的振幅(8.1, 8.3)
  - $a$  风速仪高度上实况风距地轉风的偏离角(5.4)
- $B$  輔助量(5.4);气流的半寬(6.11, 9.2)
- $b$  气压傾向(3.1)
- $C$  一个系统的速度(2.5, 3.2, 3.4);速度的环流(7.1);相速(8.1, 9.2)
- $\bar{c}$  环流加速度(7.2)
- $C_G$  羣速(10.8)
- $C_{lim}$  倒退波的速度极限(9.3)
- $c_v, c_p$  定容、定压比热(1.8)
- curl 旋度(附录 I)
- $D$  在某一面上的輻散(2.6, 11.6)
- $d/dt$  随运动微分(1.2, 附录 I)
- $\partial/\partial t, \partial/\partial x$  等 偏微分(1.6, 附录 I)
- div 輻散(散度, 1.6, 附录 I)
- $E$  熾(1.8);地球半径(6.1);內能(15.2)
- $e$  水汽压力部分(6.1)
- $F$  变形系数(2.6, 11.6);流(7.1)
- $F_x, F_y$  摩擦力分量(1.7, 5.4)
- $\mathcal{F}$  鋒生强度(11.6)
- $f$  柯氏参变数(1.11, 7.4)
- $G$  梯度风(4.5)
- $g$  重力加速度(1.5, 6.1)
- grad 梯度(附录 I)

- $H$  水平距离, 差分格里的距离(3.7); 由非绝热过程所引起的厚度变化的度量(16.2)
- $I$  变压梯度(3.4)
- $g$  气压系统的强度(3.6)
- $J$  Jacobian 行列; 函数行列式(18.3)
- $I_x, I_y$  变压风分量(4.6)
- $K$  曲率(2.1), 每单位质量的动能(4.1); 运动学的涡动粘度(5.3)
- $K_n$  正交曲率(4.6, 4.7)
- $K_i, K_t, K_r$  等压线、流线、路径的曲率(2.5)
- $k$  无因次的比例因数(5.3)
- $L$  蒸发潜热(1.8); 波长(8.1)
- $L_s, L_t$  静止波长(8.4, 9.3); 路径波长(8.3, 8.5)
- $M$  Montgomery 位势(1.10)
- $M_x, M_y$  摩擦层里的质量传输(5.5)
- $m$  质量(1.2); 图的缩尺(18.6)
- $N$  每单位面积的力管数(6.7); 波数(8.4)
- $n$  沿法线的长度(2.8)
- $P$  位能(15.2)
- $p$  大气压力(1.2)
- $Q$  绝对涡度正交于某面的分量(7.4)
- $q$  相对涡度正交于某面的分量(2.6, 7.4)
- $Q_g, q_g, q_T$  地转风( $g$ )和热成风( $T$ )的涡度(7.11, 16.2, 18.3)
- $R$  干空气气体常数(1.8); 曲半径(2.1)
- $R_w$  水汽的气体常数(6.1)
- $R^*$  湿空气的气体常数(6.1)
- $r$  湿度混合比(1.8); 旋转变形系数(2.6); 半径(7.3)
- $S$  力管数目(7.5); 辅助量(3.7, 6.4); 绝热过程所引起的厚度变化的度量(16.2)
- $s$  沿流线的切线的长度(2.8)
- $T$  温度(1.8)
- $T^*$  虚温(6.1)
- $t$  时间(1.2)

- $U$  緯帶风速(8.1), 热槽或脊的最大风速(9.2)  
 $u, v, w$  风速的分量(1.5)  
 $u_g, v_g$  地轉风分量(4.2)  
 $u', v'$  地轉风偏差分量(4.3)  
 $u_T, v_T$  热成风分量(6.3)  
 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$  加速度分量(1.5)  
 $u^*$  摩擦速度(5.3)  
 $V$  体积(1.2); 风速(2.1)  
 $\dot{V}$  沿流綫的加速度(4.4)  
 $V_g$  地轉风速(4.2)  
 $V_T$  热成风速(6.3)  
 $W$  热(1.8)  
 $x, y, z$  空間坐标(1.5)  
 $Y$  特用坐标(8.1, 10.4)  
 $Z$  等压面距海平面高度(1.9)  
 $Z_g$  梯度风层(5.4)  
 $Z_T$  气层的厚度(6.3)  
 $Z_\theta$  等熵面距海平面的高度(1.10)  
 $z_0$  粗糙度参变数(5.3)  
 $\alpha$  比容(1.2)  
 $\beta$  风向(2.1); 罗斯貝参变数(7.6, 7.8)  
 $\Gamma$  递减率(6.4, 16.2)  
 $\gamma$  递减率(1.8); 槽脊的傾斜(9.2)  
 $\Delta$  差分(有限差, 3.7)  
 $\delta$  增減量(1.2)  
 $\delta/\delta t$  一个动的系統里的局地微分(3.3)  
 $\theta$  位温(1.8)  
 $\kappa$   $(C_p - C_v)/C_p$  (1.8)  
 $\mu$  粘度系数(5.1, 5.2)  
 $\rho$  密度(1.2)  
 $\sigma$  静力稳定度的一个度量(18.3)  
 $\tau$  切应力(5.1, 5.2); 倍时(15.4)  
 $\Phi$  重力位势, 位势(1.2, 6.1)

- $\phi$  緯度角(1.3)
- $\chi$  角(2.6, 2.7, 4.4, 7.5)
- $\Omega$  地轉角速度(1.3)
- $\omega$  以气压为垂直坐标的垂直速度(7.8, 14.1)

## II 矢量类

- A, B, C 通用矢量(附录 I)
- C 一系统的行速(2.5)
- F 摩擦力(1.2)
- I 变压梯度(3.4, 4.6)
- i, j, k 沿三坐标軸的单位矢量(附录 I)
- J 变压梯度所引起的地轉风偏差(4.6)
- N 力管矢量(6.6)
- n 沿外法綫的单位矢量(7.5)
- Q 绝对渦度(7.4)
- q 渦度(附录 I)
- V 风速(1.2)
- V' 地轉风偏差, 即非地轉风部分(4.3)
- V<sub>0</sub> 绝对速度(1.2)
- V<sub>g</sub> 地轉风(4.2)
- V<sub>T</sub> 热成风(6.3, 6.9)
- $\dot{V}$  加速度(1.3, 1.5)
- $\Omega$  地球自轉的角速(1.3)
- $\nabla$  哈氏(Hamilton)算子(附录 I)
- $\nabla^2$  拉氏(Laplacian)算子(3.6, 附录 I)

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 中譯本序 .....             | i   |
| 原 序 .....              | iii |
| 符号表 .....              | vii |
| 第 一 章 基本方程 .....       | 1   |
| 第 二 章 准水平运动的运动学 .....  | 22  |
| 第 三 章 气压场的运动学 .....    | 42  |
| 第 四 章 风与气压的关系 .....    | 55  |
| 第 五 章 摩擦的影响 .....      | 71  |
| 第 六 章 风系的垂直结构 .....    | 86  |
| 第 七 章 环流与渦度 .....      | 117 |
| 第 八 章 长波理論 .....       | 132 |
| 第 九 章 續高空波动的理論 .....   | 143 |
| 第 十 章 气压系统行动的計算 .....  | 150 |
| 第十一章 鋒与鋒生 .....        | 175 |
| 第十二章 温带气旋和反气旋的结构 ..... | 196 |
| 第十三章 气旋和反气旋的活动 .....   | 232 |
| 第十四章 垂直速度与輻散 .....     | 262 |
| 第十五章 气旋形成的不稳定性理論 ..... | 274 |
| 第十六章 气旋和反气旋的发展 .....   | 288 |
| 第十七章 气旋发展之例 .....      | 307 |
| 第十八章 数值预报 .....        | 333 |
| 第十九章 图解积分法 .....       | 350 |
| 附录 I 矢量的記号和运算解释 .....  | 365 |
| II 风的計算 .....          | 373 |
| III 定渦度路径計算用表 .....    | 374 |
| IV 波速計算 .....          | 378 |
| V 绝对渦度計算法 .....        | 379 |

# 第一章

## 基本方程

**1.1 通論** 几乎一切的天气现象都是与大大小小空气块的运动有着直接或间接的联系；而这些运动又可以看成是附加在一种近乎永久性的、基本上是沿着緯圈方向环绕北极的环流上。在许多问题中，这些叠置在基本气流上的运动系统，可以看成是天气现象的制造者又是运送者。

对于这些运动作数学处理时，会遭遇到几种困难。第一，表示流体运动的方程式很复杂，只有根据一些简化的假定才可以推论出一些有用的结果。在简化时，按照问题的性质将方程式里一些不重要的项省略掉。第二，运动系统的几何结构也往往很复杂，所以在处理问题时，必须有若干结构上的简化。

关于数学上的简化手段，在各类运动系统里相差很大；天气学研究工作的技巧高低，大半看研究者构造问题的能力如何——问题必须构造得能够求得有用的解答。例如，在处理某些小尺度（规模）现象（例如地方性对流）时，可以不計地球自转的影响只須考虑加速度一般便可以了。另一方面，在中緯度大尺度流型问题上，都可以容許将加速度项省略，而地球自转的作用则很是重要的。同样，在自由大气里的运动，可以假设是絕热的，沒有摩擦的；而对于近地面的问题里，这些假设便证明是与所研究的过程的本质相违背的。

常常也須要将系统的结构简化，并将环流系统看成是一些明确的类型来考虑，譬如象一个正弦波、圓、或橢圓的型式等等——虽然实在的结构可以并不具有这些对称性。这样一来，有关大气运动系统的种种理論多数指的是理想化的模式。这些模式只代表了这些系统的主要性质，而不是詳尽到细节上的结构。在日常的天气图分析

里，就要将实际的大气状态跟这些系统的主要性质和已知的模型对証并比較。

从地球上任何大范围的天气图上，特别是在中高緯度的天气图，可以发现清晰的动力系统，在这些系统中空气的运动主要是近于水平的，并且其运动主要决定于温度和气压的水平梯度。这些运动指出，在水平气压力与地球自轉力之間存在有近乎相互平衡的状态，由于有这种平衡状态，結果便得出一个将气压和风相联系起来的有用的近似公式。根据这种平衡性质所計算出来的风速称为地轉风。观测結果証明实际风与地轉风相差很小，所以在日常天气图分析里可以忽略。然而在許多問題里（例如，关于气压变化、环流系统的形成及加强等問題），实际风和地轉风之間小的偏差以及这些偏差空間的分布，却构成了变化机构的主要部分。

因此天气工作者經常会面对如何将种种过程加以分別，如何将一些为实践所証明可用的模式和簡化手段加以应用等問題，以作出运动系统的行动和发展的預报問題。

在原理上，流体的运动方程式可写成

$$\text{密度} \times \text{加速度} = \text{力总和}.$$

在气压力跟由于地球自轉所引起的力之間，有准平衡存在，这意味着加速度項在数量上比上述兩項力小得多。这一情况虽然便利了日常的天气分析工作，但若要想直接从运动方程寻求称心可用的預报方程，那末这准平衡的情况却对問題构成了非常大的困难。因为，我們发现加速度項（是時間导数項）是两个或两个以上比較大項之間的小差，而且这两个大項都是难以足够精确地加以观测的。如果我們不考慮运动的本身，而考慮运动的渦度本身，上述困难可以在若干程度上得到克服。如考虑了运动的渦度，則在所得到的方程式里，含有渦度对時間导数的一項，是一个主要項，这样便可使預报方程式的建立成为可能。而且，我們虽然对各种力并不具备比較完全的知識，但仍可能进行数值积分。

在本書以后的章节里，我們將要多方面討論到大尺度运动系统的渦度。

**1.2 绝对运动的方程式** 在推导流体运动方程式的各项时,对于固定于空间的坐标系上的运动,跟固定于地球上并与地球一同旋转的坐标系上的运动,须加以区别。为了简便起见,前一种运动称为绝对运动,后一种称为相对运动。必要时分别以注字  $a$  和  $r$  以资识别。

分别考虑了作用在一非常小的流体质粒上的各种力之后,便可以推导出绝对运动方程式。设  $\rho$  为密度,  $\delta V$  为体积元,质粒的质量是

$$\delta m = \rho \delta V. \quad (1.2.1)$$

起作用的力有下列几项: (1) 地球引力, (2) 气压力, (3) 由液体内部摩擦(包括分子的粘性和涡动的粘性)所引起的力。

在设立方程式时,我们所用的主要原理是质量守恒原理和牛顿第二定律——即物体的运动量的变化率,不论在数量上和方向上,等于各力的矢量和。

流体质粒的运动量是  $\rho \delta V \mathbf{V}_a$ ; 其中  $\mathbf{V}_a$  是绝对速度。运动量的变化率是

$$\frac{d}{dt} (\rho \delta V \mathbf{V}_a)_a.$$

但是,由于质量保持不变,亦即  $\rho \delta V$  是个常数,于是运动量的变化率是

$$\rho \delta V \left( \frac{d\mathbf{V}_a}{dt} \right)_a,$$

这里  $(d/dt)_a$  表示是随着绝对运动所取的微商。

如以  $\Phi_a$  表示引力位势,则作用于质粒的引力是

$$-\rho \delta V \nabla \Phi_a,$$

其中  $\nabla \Phi_a$  是  $\Phi_a$  的梯度\*。负号表示力是从高位势指向低位势的,也就是向下指向重力的中心。

以  $p$  表示大气压力,则气压力是

$$-\nabla p \delta V,$$

\* 关于这个矢量的符号及其运算方法,见附录 I。

其中  $\nabla p$  是  $p$  的梯度, 即每单位体积的气压力.

又以  $\mathbf{F}$  表示每单位体积的摩擦力, 则摩擦力是

$$\mathbf{F} \delta V.$$

以上各力的总和是

$$(-\nabla p - \rho \nabla \Phi_a + \mathbf{F}) \delta V.$$

与运动量变化率列成等式为

$$\rho \delta V \left( \frac{d\mathbf{V}_a}{dt} \right)_a = (-\nabla p - \rho \nabla \Phi_a + \mathbf{F}) \delta V,$$

除以  $\delta V$ , 得

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{V}_a}{dt} \right)_a = -\nabla p - \rho \nabla \Phi_a + \mathbf{F}, \quad (1.2.2)$$

这就是以矢量形式表示的绝对运动的方程式.

上面这个方程式所指的力, 都是单位体积的力. 一般用单位质量的力来表示较为方便. 设  $1/\rho = \alpha =$  比容, 也就是单位质量所占的体积, 则得

$$\left( \frac{d\mathbf{V}_a}{dt} \right)_a = -\alpha \nabla p - \nabla \Phi_a + \alpha \mathbf{F}, \quad (1.2.3)$$

$\Phi_a$  可以称为绝对引力位势.

**1.3 相对运动的加速度** 为了了解相对运动的加速度跟绝对运动的加速度之间的关系, 试看图 1, 其中  $P$  是一任意点, 它的位置对于旋转着的地球而言是保持不变的. 以矢量  $\boldsymbol{\Omega}$  表示地球自转的角速,  $\mathbf{R}$  表示自地球中心指到  $P$  点的一个矢量, 于是  $P$  点的绝对速度  $\mathbf{V}_p$  是等于  $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}$ , 这  $\times$  表示矢量乘法. 这个速度的数量是  $\Omega R \sin(\pi/2 - \varphi) = \Omega R \cos \varphi$ , 方向是自西指东, 切于通过  $P$  的纬圈.

如有一个气粒以速度  $\mathbf{V}_r$  (相对于转动着的地球) 经过  $P$  点, 它的绝对速度是

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_r + \mathbf{V}_p = \mathbf{V}_r + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}. \quad (1.3.1)$$

因为  $\mathbf{R}$  是空气粒的位置矢量, 所以

$$\mathbf{V}_a = \left( \frac{d\mathbf{R}}{dt} \right)_a, \quad \mathbf{V}_r = \left( \frac{d\mathbf{R}}{dt} \right)_r,$$