

天气

董晓敏 田盛培

诊断分析

方法简介

气象出版社

天气诊断分析方法简介

董晓敏、田盛培

气象出版社

内 容 简 介

本书讨论了天气诊断分析方法在天气预报中的重要作用,详细地介绍了各种气象诊断场及其计算方案,介绍了诊断分析方法在天气实践中的一些具体应用,并附有气象电码半自动客观化分析程序和诊断分析程序,对有关的数值计算方法也作了简要介绍。

本书着重于实际操作;可作为广大气象台预报员的自学教材,也可作为有关院校的教学参考书。

天气诊断分析方法简介

董晓敏 田盛培 编著

责任编辑: 康文骥

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张5.5 字数: 143千字

1986年5月第1版 1986年6月第1次印刷

印数: 1—2,500

统一书号: 13194·0323 定 价: 1.55 元

前 言

根据党在新的历史时期的总任务,气象部门为了适应国家经济建设迅速发展的需要,必须建立现代化的业务技术体系。为此,一方面要积极地引进和发展遥测、遥感、电子计算机等新装备、新技术;另一方面更重要的是迅速和有效地提高实际业务工作人员的技术水平。

我省扬州市气象局领导为了满足所属台、站广大预报员学习和掌握新技术方法的迫切要求,于1982年5月举办了预报员技术学习班。目的是促进和推动预报员将他们多年的实践经验和数值预报产品的使用结合起来,以期达到预报质量的切实提高;同时也为天气预报的客观化和定量化做些技术准备。本书曾作为这次学习班的讲稿。

本书是在江苏省气象科学研究所《暴雨课题组》1979年以来开展诊断分析工作的基础上整理出来的。为了便于广大台、站预报员了解大气温、湿、压及诸多物理量诊断场的计算方法,更重要的是有助于他们对重大灾害性天气切实去作诊断分析,因此对具体操作介绍得比较详细,并附有使用方便的气象电码的客观化分析程序和诊断场计算程序;另外,在文字叙述方面力求通俗明瞭,希望能成为老预报员在知识更新过程中的自学参考材料。

由于编者长期从事实际预报工作,对理论问题学习和钻研不深,对教学工作更没有经验,因此在编写过程中遇到不少困难。空军气象学院章震越教授和沈春康、魏绍远两位同志给我们很大帮助,除提出许多宝贵意见外,还帮助作了仔细审查和修改;另外,早在1979年诊断场计算程序调试过程中,北京大学地球物理系谢安同志曾给予协助。对他们的辛勤劳动,我们表示深切感谢。

由于编者水平限制,错误和不妥之处仍然难免,恳请阅者及时指正,以便今后改进。

编者 1983年春

符 号 表

A 功热当量 $\left(A = \frac{\bar{\sigma}(K) \times M(J, I)}{0.225 \times 10^5} \right)$, 或无量纲系数

A_0 水汽通量散度

A_T 总温度的散度量

A 矩阵标记

a 常数, 或地球半径

B 变量标记 $\left(B = \frac{R}{P} \left(\frac{P}{P_0} \right) AR / c_p \right)$

B_e 变量标记 $\left(B_e = \frac{RT}{P\theta_{ec}} \right)$

b 矩阵标记

$b, c_0, c_1, \dots, c_n$ 常数

C 常数标记

$^{\circ}\text{C}$ 摄氏度单位

c_p 定压比热

D 散度, 或记数的标记

d 步长间距, 或网格格矩

E, E_s 水汽压, 饱和水汽压

E_{s0} 常数 ($E_{s0} = 6.1078$), 温度 0°C 时饱和水汽压值

E_t 总能量

e 误差标记

F 凝结函数, 或摩擦力, 或标量

$F_1, F_2, \dots, F_{12}$ 强迫函数

F_p 等压面上的凝结函数

F_{zn} 垂直于 z 轴的摩擦力在法线 n 方向的分量

F_{zx} 和 F_{zy} 垂直于 z 轴的摩擦力在 x 和 y 方向的分量

- f 地转涡度,或函数和多项式的标记
- G 区域范围标记
- g 垂直加速度(重力加速度)
- H 常数($H = 10^{-4}$),或加热函数
- H_L 潜热加热函数
- H_S 显热加热函数
- h 地形高度
- I 或 i 网格的列标号
- I 或 I_A 整层气柱的水汽辐合总量(两者反号)
- i x 方向的单位矢量
- J 或 j 网格的行标号
- j y 方向的单位矢量
- K 圆锥常数($K = 0.71556$),或不稳定度指数,或湍流粘性系数,或等压面标号,或热力学温度单位(开)
- k 等压面标号
- $\mathbf{k}$ 垂直方向的单位矢量
- L 凝结热,或环流闭合线
- L_S 地球上纬度为 φ 的纬圈大圆的周长
- l 长度,或圆锥母线
- l_0 标准纬度处的圆锥母线
- l_S 地球面上的经线长度
- M 地图投影放大系数,或网格总行数
- M_a 干空气的质量
- M_w 水汽的质量
- m 米,或迭代次数
- N 网格总列数,或需要计算的总(垂直)层数
- n 法线方向的标记
- P 气压,或地球北极极点的标记
- P_0 和 P_B 地面气压和摩擦层顶气压
- Q 水汽通量的量值,或热流入量

- Q_x 和 Q_y x 方向和 y 方向的水汽通量
- Q_z 水汽在垂直方向的输送量
- q 比湿, 或整数标记
- q_s 饱和比湿
- q_B 和 q_{sB} 摩擦层顶的比湿和饱和比湿
- R 降水估计值, 或气体常数, 或半径
- $R^{(m)}$ 迭代过程中的余差
- R_θ 和 $R_{\theta_{re}}$ 位温平流和相当位温平流
- R_ζ 和 $R_{(\zeta+f)}$ 涡度平流和绝对涡度平流
- r 环流闭合线的切向量
- r 和 r_p P 坐标系中温度垂直递减率和干绝热递减率
- T 和 T_d 温度和露点温度
- T_k 凝结高度上的温度
- T_t 和 T_u 总温度和饱和总温度
- t 时间标记
- u' 沿网格 x 方向的水平风分量, 或西风的脉动值, 或西风的非地转偏差
- V 体积标记
- $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{V}_g$ 风矢量和地转风矢量
- v' 沿网格 y 方向的水平风分量, 或北风的脉动值, 或北风的非地转偏差
- $\mathbf{V}_x$ 和 $\mathbf{V}_\psi$ 辐散风和旋转风
- W 权重系数, 或 z 坐标系中的垂直速度
- α 方位角, 或经度差, 或单位弧度值, 或系数标记
- α' 变量标记 ($\alpha' = K\alpha$)
- β 系数标记, 或变量标记 ($\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$)
- Γ 环流量, 或边界线标记
- δ 个别导数标记
- ε 热流入量的微差(全微分), 或误差标记

ζ 和 ζ_a 相对涡度和绝对涡度 [$\zeta_a = (\zeta + f)$]

ζ_x , ζ_g 和 ζ_B 分别是涡度在 x 方向的分量、地转风涡度和摩擦层顶涡度

θ 位温,或余纬

θ_{re} 相当位温

λ 系数标记

μ 超松弛迭代中的松弛因子

γ 地面风和等压线的交角

π 圆周率

ρ 空气密度

σ 和 σ_e 稳定度参数和总稳定度参数

τ 函数标记

ϕ 位势高度

φ 和 φ_0 风向角(或纬度)和标准纬度

χ 速度势

ψ 流函数

Ω 地球自转角速度

ω P 坐标系中的垂直速度

$\omega_0, \omega_h, \omega_f$ 地面垂直速度,地形垂直速度,外摩擦效应所产生的垂直速度

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 强迫函数 F_1, F_2, F_3, F_4 产生的垂直速度

ω_l 为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 之和 ($\omega_l = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$)

ω' 垂直速度的脉动值,或修正的垂直速度

$\omega^{(m)}$ 迭代过程中的垂直速度(指求解“OMEGA”方程)

($\overline{\quad}$) 空间平均

目 录

前言.....	i
符号表.....	ii
第一章 诊断分析的基本概念.....	1
§ 1 什么叫诊断分析	1
§ 2 为什么要进行诊断分析	2
§ 3 怎样进行诊断分析	2
第二章 诊断分析中各物理量的数学解析式.....	4
§ 1 基本量	4
§ 2 水汽及降水量方面的物理量	5
§ 3 温湿特征和稳定度方面的物理量	12
§ 4 动力条件方面的物理量	18
§ 5 求解 ω (OMEGA) 方程, 计算垂直速度	25
第三章 各物理量的计算数学表达式.....	44
§ 1 网格设计	44
§ 2 放大系数	46
§ 3 插值计算	51
§ 4 差分法	61
§ 5 椭圆型方程的差分解法	70
§ 6 各物理量的计算数学表达式	79
§ 7 修改的准地转 ω 方程的计算数学表达式	87
第四章 诊断方法在天气分析中的应用.....	97
§ 1 降水过程中垂直气流的诊断	97
§ 2 副热带高压和西风槽强度的诊断	106
§ 3 产生特大暴雨的梅雨锋结构的诊断	111
§ 4 中间尺度低涡发生、发展的诊断	115

附录 I “准地转模式”诊断分析程序(FORTRAN 语言) …	120
一 程序说明·····	120
二 源程序(包括子程序)语句·····	130
附录 II “平衡模式”诊断分析程序 (FORTRAN 语言) …	142
一 程序说明·····	142
二 源程序语句·····	150
参考文献·····	164

第一章 诊断分析的基本概念

§1 什么叫诊断分析

在天气分析和预报中有一些物理量是十分重要的,如涡度、散度、垂直速度、水汽通量和水汽通量散度,以及各种能量场等等。但这些物理量与一般的气象要素(温、压、湿、风)不同,它们通常是无法由观测直接得到的,而必须通过其它要素由计算间接获得。这些物理量在某时刻的空间分布被称为诊断场。诊断场和预报场是不同的,预报场是对未来时刻某物理量场的预报结果,显然在预报方程中含有该物理量对时间的微商项;而诊断场是物理量在某时刻的分布实况,一般在计算该物理量的方程中不含有它对时间的微商项。反映各气象要素场之间关系的,不含有对时间微商项的方程称为诊断方程。研究这些物理量的计算方法、分析其空间分布特征以及它们和天气系统发生、发展的关系等等称为诊断场的分析,简称为诊断分析。

诊断分析实际上是一种狭义的动力分析,它仅限于分析观测的事实,确定主要和次要的物理因素,给出天气现象发生的空间结构,而不涉及这些因素随时间的演变过程。

诊断分析一般是先用较完整的垂直运动(ω)方程计算出垂直速度场,再结合实测的水平风绘制出大气的三维运动图案。这是因为垂直运动不仅与大气的能量转换和平衡有关,而且也影响了大气中的水汽、热量、动量等的铅直交换和分布,因而它也是决定降水和天气系统发生、发展的一个重要因子。当然,垂直运动的计算只是诊断分析的一个内容。诊断分析的基本内容除此之外,还应包括对观测到的气象要素场和其它物理量场的分析。

诊断分析的方法,原则上适用于大气科学的所有领域(如对各

种灾害性天气的分析)。当然,被诊断的对象不同,计算和诊断的重点也不一定相同。

§2 为什么要进行诊断分析

准确的天气预报和有效的人工影响天气都是建立在对天气过程有深刻认识的基础上的。诊断分析是达到这种认识的一种重要途径。对实际业务部门来说,为了提高预报服务水平,必须在常规的天气形势分析的基础上,进一步了解天气系统发生、发展的各阶段气象要素(物理量)场的三度空间结构,给出其物理图象;进而对这些物理量场的三度空间结构作出预报,也就是对天气现象产生的物理条件作出预报。只有这样,才能对天气现象作出较为准确的预报。

现在,已愈来愈清楚地表明,单纯的天气图分析不能很好地解决天气预报实践中提出的大量问题。天气预报作为一个应用物理问题,应该将天气分析、动力分析和数理统计方法结合起来,才是提高预报水平的有效途径。只有在对已往大量天气过程进行深刻的天气学和动力学分析的基础上,才能建立有效的统计预报模式。因此,动员广大台、站有丰富经验的预报员来开展对灾害性天气过程的诊断分析是十分重要的。

§3 怎样进行诊断分析

进行诊断分析,首先是针对诊断对象(某类灾害性天气)选取合理的诊断方程,使之能体现出大气物理过程的基本特点。诊断方程的形式应便于计算,使计算在允许的精度范围内愈简单愈好。

在具体计算时,如果诊断方程是微分式,则需用差分近似地代替微分,将其转化成计算数学表达式。若要用电子计算机计算,还要进一步将计算式编制为计算程序,然后计算得出物理量的三度空间数值分布。

诊断方程的数值解与实际大气中客观存在的场量值之间是有

差异的。差异的原因是：①直接参加计算的温、湿、压、风等气象要素值有观测误差，且这种误差在计算过程中会累积放大；②用差分代替微分所产生的截断误差。因此，在诊断方程求解过程中，采用好的计算方案，使计算误差尽可能小些，数值解和实际场量值的近似程度也就好些。

最后，精密地分析所求得各物理量的空间分布特征，分析它们和天气系统发生、发展的关系，以及和诊断对象的联系等等，得出灾害性天气发生和发展的三度空间物理图象。从而取得对它们的深刻认识，为预报它们提供着眼点或预报因子。

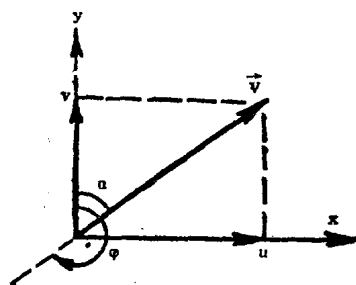
第二章 诊断分析中各物理量的数学解析式

在诊断分析中对于所要求取的每一个物理量都必须准确地掌握其数学表达式、它的物理意义和量纲。

§1 基 本 量

所谓基本量是指可由观测直接得到的各个物理量,如位势高度 ϕ (或气压 P), 温度 T , 露点温度 T_d (或温度露点差 $T - T_d$), 水平风 $\mathbf{V}$ 等, 其它物理量是由这些量通过计算间接得到的。对这些基本量无须多加说明, 下面仅就 $\mathbf{V}$ 的分解简述之。

$\mathbf{V}$ 是矢量, 可按解析法分解。通常将 x 方向取作和纬圈相切, 指向东; y 方向取作和经圈相切, 指向北。 $\mathbf{V}$ 在 x 方向和 y 方向的分量分别记作 u 和 v , 由图 2.1 可见



$$\begin{cases} u = |\mathbf{V}| \sin \alpha \\ v = |\mathbf{V}| \cos \alpha \end{cases}$$

但方位角 α 和风向角 φ 之间相差 180° ,

即
$$\varphi = \alpha + \pi$$

因此有
$$\begin{cases} u = |\mathbf{V}| \sin(\varphi - \pi) \\ v = |\mathbf{V}| \cos(\varphi - \pi) \end{cases}$$

图 2.1 水平风 $\mathbf{V}$ 按 x, y 方向分解图

u 和 v 的正、负取值完全由 φ 决定。

当 $\mathbf{V}$ 为东风时, $\varphi = 90^\circ$; $\mathbf{V}$ 为西风时, $\varphi = 270^\circ$; $\mathbf{V}$ 为南风时, $\varphi = 180^\circ$; $\mathbf{V}$ 为北风时, $\varphi = 360^\circ$ 或 0° 。

若是由计算机进行分解计算, 尤其是当计算网格的范围较大时, 风矢量的两个分量应取作和网格线平行。如图 2.2, 计算是在

等角圆锥投影底图上进行的,其中 OB 线是计算网格的基准经线,
 α 为地球上过 P 点的经线和
 OB 线之间的夹角, α' 为投
 影底图上过 P 点的经线和
 OB 线之间的夹角,

则有 $\alpha' = K\alpha$

式中 K 为圆锥投影常数,是
 圆锥面的展开角与相应的地
 球面展开的经度数之比值,
 对于勃兰特圆锥投影来说,
 $K = 0.71556$ 。

设 P 点的风矢量沿纬圈
 和经圈的分量分别是 u 和 v ,
 而沿网格线方向的分量分别
 是 u' 和 v' ,由坐标转换关系
 和三角公式得

$$\begin{cases} u' = u \cos \alpha' + v \cos(90^\circ - \alpha') \\ v' = -u \cos(90^\circ - \alpha') + v \cos \alpha' \end{cases}$$

由于 $\cos(90^\circ - \alpha') = -\sin \alpha'$,

故有

$$\begin{cases} u' = u \cos \alpha' - v \sin \alpha' \\ v' = u \sin \alpha' + v \cos \alpha' \end{cases}$$

也可以直接由 $\mathbf{V}$ 求得 u' 和 v' ,计算公式为

$$\begin{cases} u' = |\mathbf{V}| \sin(\varphi - \alpha' - \pi) \\ v' = |\mathbf{V}| \cos(\varphi - \alpha' - \pi) \end{cases}$$

以上 u 和 v 及 u' 和 v' 的单位均取米/秒。

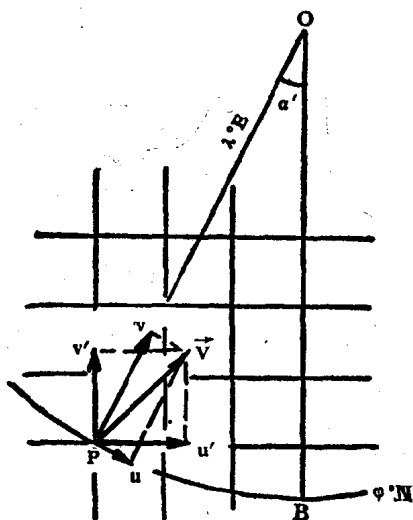


图 2.2 水平风 $\mathbf{V}$ 按网格线方向的分解图

§2 水汽及降水量方面的物理量

2.1 整层温度露点差 $\text{SUM}(T - T_d)$

$\text{SUM}(T - T_d)$ 是整层水汽饱和程度的度量,是一个标量。通

常 400 毫巴¹⁾以上的水汽含量已经很少了,因此整层气柱中水汽的饱和程度只需考虑 400 毫巴以下的层次便可。根据这样定义,

$$\text{有} \quad \text{SUM}(T - T_d) = \sum_{k=1}^7 (T - T_d)$$

式中下标 $k = 1, 2, \dots, 7$, 分别是 1000 毫巴, 900 毫巴, $\dots$, 400 毫巴等压面的标号。

SUM($T - T_d$) 的单位取 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 水汽压 E 和饱和水汽压 E_s

水汽压 E 是空气中的汽态水本身的压强, 当空气饱和时便是饱和水汽压 E_s , E 和 E_s 都是标量。

E_s 被定义为在一定的温度下一定体积空气中, 水汽达到最大限度含量时的分压强。因此, E_s 仅仅是温度 T 的函数。

E 和 E_s 不同, E 不仅仅是温度 T 的函数, 而且还是水汽含量多少的函数。

E 和 E_s 的计算公式是

$$\begin{cases} E = E_{s0} \exp\left(\frac{aT_d}{273.16 + T_d - b}\right) \\ E_s = E_{s0} \exp\left(\frac{aT}{273.16 + T - b}\right) \end{cases}$$

式中 a, b, E_{s0} 均是常系数。 $E_{s0} = 6.1078$, 是 $T = 0^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水汽压。由于水面和冰面的饱和水汽压不同, 因此, 系数 a 和 b 的取值也不相同: 对于水面, 取 $a = 17.26$, $b = 35.86$; 对于冰面, 取 $a = 21.8746$, $b = 7.66$ 。

当 T 或 $T_d \geq -15^{\circ}\text{C}$ 时, 按水面处理

$$E_w = 6.1078 \exp\left(\frac{17.26T_d}{273.16 + T_d - 35.86}\right)$$

1) 1 毫巴(mb) = 1 百帕(hPa), 下同。

$$E_{s*} = 6.1078 \exp \left(\frac{17.26T}{273.16 + T - 35.86} \right)$$

当 T 或 $T_d \leq -40^\circ\text{C}$ 时, 按冰面处理

$$\begin{cases} E_* = 6.1078 \exp \left(\frac{21.8746T_d}{273.16 + T_d - 7.66} \right) \\ E_{s*} = 6.1078 \exp \left(\frac{21.8746T}{273.16 + T - 7.66} \right) \end{cases}$$

当 $-15^\circ\text{C} > T$ 或 $T_d > -40^\circ\text{C}$ 时, 按冰水混合处理

$$\begin{cases} E = 0.022[(80 + 2T_d)E_* - (30 + 2T_d)E_{s*}] \\ E_s = 0.022[(80 + 2T)E_{s*} - (30 + 2T)E_*] \end{cases}$$

以上各式中 T 和 T_d 的单位均取 $^\circ\text{C}$, E 和 E_s 的量纲为毫巴。

2.3 比湿 q 和饱和比湿 q_s

比湿 q 定义为一定体积内水汽质量与空气总质量的比。设某体积内干空气的质量为 M_d , 水汽质量为 M_w ,

则有
$$q = \frac{M_w}{M_w + M_d}$$

当空气饱和时便是饱和比湿 q_s , q 和 q_s 均是标量。

比湿 q 与气压 P 和水汽压 E 之间有一定关系,

即
$$q = \frac{622E}{P - E}$$

由于 $P \gg E$,

因此有
$$q \cong \frac{622E}{P}$$

空气饱和时,

有
$$q_s \cong \frac{622E_s}{P}$$

以上各式中 P , E , E_s 的单位取毫巴, q 和 q_s 的量纲是克/千克。