

吴 宝 俊
汪 文 修 编 著



海 洋 出 版 社

海洋、气象基层台站用 物理量计算方法

海洋、气象基层台站用 物理量计算方法

吴宝俊 汪文修 编著

海洋出版社

1987年·北京

内 容 提 要

本书介绍了大气温湿特征量、散度、涡度、铅直速度、水汽通量、水汽通量散度,以及稳定度等物理量的简单易作的计算方法。阐述了应用这些物理量的计算结果配合天气图,进一步揭示暴雨、冰雹等的物理成因,以及提高暴雨、冰雹等灾害性天气的短期、短时预报准确率。本书不仅从理论上进行了阐述,而且配以实例。从编著者的实践总结得出,本书介绍的方法,对短期、短时的灾害性天气预报的准确率,高于单用天气图预报灾害性天气的准确率。

本书所介绍的预报方法适合省、市、地、县级气象台站及海洋台站使用。也可供气象、海洋科研人员及大专院校有关师生研究天气预报方法时参考。

责任编辑:温宗文

责任校对:刘兴昌

海洋、气象基层台站用 物理量计算方法

吴宝俊 汪文修 编著

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 国防科工委印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 4³/₄ 字数: 100千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷

印数: 3000

统一书号: 13193·0858

定价: 1.25元

前 言

预报员在制作天气分析、预报时，常会遇到天气形势相似或影响系统一样，而天气分布却差异较大的情况。这表明仅靠现行的天气图进行定性分析是难以反映这些相似过程的本质差异。近年来的很多实践表明，如果把计算出的温、湿特征量、散度、涡度(相对涡度铅直分量)、铅直速度、水汽通量、水汽通量散度以及稳定度等物理量与天气形势或影响系统相结合进行综合考虑，可以弥补现行天气图的某些不足，对揭示暴雨、冰雹等的物理成因，以及提高它们的短期、短时预报准确率有一定的作用。

为了帮助海洋、气象基层台站在日常业务中计算并应用这些物理量，我们曾受《气象》杂志编辑部之约，于1980年以讲座形式，用《物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用》为题连载。连载以后，受到在基层气象、海洋台站工作的同志们的欢迎。现应读者要求，对讲座原内容作适当修改和增补后，编写成这本小册子，请海洋出版社予以出版。

现行天气图上的压、温、湿、风等物理量，无需计算即可得到。本书介绍的物理量则不同，是需要经过计算方能得到的。

基层气象、海洋台站所用物理量的计算，很多人以为非常繁琐。其实，这是误解。本书介绍的几种物理量计算，简单易作，花费时间也不多，既可在省（自治区、直辖市）级

气象、海洋台使用，也可在地、县级台站使用。

因水平所限，这本小册子的缺点、错误在所难免，请读者批评指正。

编著者

1984.1

目 录

一、湿静力能量与湿静力温度·····	(1)
二、厚度平流涵差·····	(19)
三、静力稳定度指数·····	(30)
四、水平散度·····	(49)
五、大尺度铅直速度·····	(72)
六、涡度·····	(85)
七、水汽通量与水汽通量散度·····	(97)
八、边界层中散度、涡度和铅直速度·····	(109)
九、物理量计算中差分近似误差对量值的影响·····	(117)
十、暴雨分析预报中的应用示例·····	(129)

一、湿静力能量与湿静力温度

在制作强对流天气的分析预报时^[1]，在讨论低纬地区的能量演变时^[2]，在采用积云对流参数化的方法时^[3]，在分析中小尺度天气过程时^[4]，在研究季风问题时^[5]，都可以运用湿静力能量 E_σ 或湿静力温度 T_σ 。

(一) 总能量与总温度

研究表明，可以直接决定大气运动状态的主要能量是：显热能、潜热能、位能、动能^[6]。所谓总能量，是指上述四种能量之和。对于单位质量（下同）的空气块：

总能量 = 显热能 + 位能 + 潜热能 + 动能

∴ ∴ ∴ ∴ ∴

$$E_t = c_p T + gZ + Lq + \frac{1}{2}V^2 \quad (1-1)$$

其中 $c_p (=1.004675 \cdot 10^3 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1} \cdot \text{度}^{-1})$ —— 干空气的定压比热；

T —— 空气温度 (K 或开)；

$L (\approx 2.501 \times 10^6 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1})$ —— 水汽凝结潜热；

q —— 空气比湿；

$g (=9.80665 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2})$ —— 重力加速度；

Z ——拔海高度；

V ——风速。

(1-1)式右端各项虽是和差关系，但用观测资料计算仍有困难，为此，我国气象工作者引入了与总能量相应的温度——总温度^[1]：

$$T_t = \frac{E_t}{c_p} = T + \frac{g}{c_p} Z + \frac{L}{c_p} q + \frac{1}{2c_p} V^2 \quad (1-2)$$

$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
显	位	潜	动
热	能	热	能
项	项	项	项

不言而喻，当已知用绝对温标表示的总温度时，只要再乘以 c_p ，就可得到总能量 E_t 。

(二) 湿静力温度 T_σ

所谓湿静力温度 T_σ ，是指(1-2)式右端前三项之和：

$$T_\sigma = T + \frac{g}{c_p} Z + \frac{L}{c_p} q \quad (1-3)$$

计算表明(表1-1)，当风速小于 30 米·秒⁻¹时，动能项的数值小于 0.5 度，故通常有：

$$T_t \simeq T_\sigma \quad (1-4)$$

(1-3)式中 T_σ 、 T 的单位可同时采用绝对温标(K)，也可同时采用摄氏温标(°C)。另外，当已知用绝对温标表示的 T_σ 时，只要再乘以 c_p ，就可得到湿静力能量 E_σ 。

由(1-2)、(1-3)式看出，当改用 T_t 与 T_σ 时，显热项可

表 1-1 动能项 $\frac{1}{2c_p} V^2$ 查算表 (其中 V 的单位为米·秒⁻¹, $\frac{1}{2c_p} V^2$ 的单位为度)

$\frac{1}{2c_p} V^2$	V	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04
10	10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18
20	20	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.31	0.34	0.36	0.39	0.42
30	30	0.45	0.48	0.51	0.54	0.58	0.61	0.65	0.68	0.72	0.76
40	40	0.80	0.84	0.88	0.92	0.97	1.01	1.06	1.10	1.15	1.20
50	50	1.25	1.30	1.35	1.40	1.46	1.51	1.56	1.62	1.68	1.74
60	60	1.80	1.86	1.92	1.98	2.05	2.11	2.18	2.24	2.31	2.38
70	70	2.45	2.52	2.59	2.66	2.74	2.81	2.88	2.96	3.04	3.12
80	80	3.20	3.28	3.36	3.44	3.53	3.61	3.70	3.78	3.87	3.96
90	90	4.05	4.14	4.23	4.32	4.42	4.51	4.61	4.70	4.80	4.90
100	100	5.00	5.10	5.20	5.30	5.41	5.51	5.61	5.72	5.83	5.94
110	110	6.05	6.16	6.27	6.38	6.50	6.61	6.73	6.84	6.96	7.08
120	120	7.21	7.32	7.44	7.56	7.69	7.81	7.94	8.06	8.19	8.32
130	130	8.45	8.58	8.71	8.84	8.98	9.12	9.25	9.38	9.52	9.66
140	140	9.80	9.94	10.08	10.22	10.37	10.51	10.66	10.80	10.95	11.10

由观测到的温度值计算，位能项可由高度计算，动能项由查表得到，潜热项也可用预先制作的表格查出(见表1-4)，这样计算起来就非常方便。这就是引入 T_1 、 T_0 代换 E_1 、 E_0 的主要原因。

在日常业务中，为了化简(1-3)式，常取：

$$c_p \approx 1000 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1} \cdot \text{度}^{-1},$$

$$L \approx 2\,500\,000 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1},$$

$$g \approx 9.8 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2}.$$

这时(1-3)式可改写为：

$$T_0 \approx T + 9.8Z + 2.5q \quad (1-5a)$$

其中 Z 单位取千米， q 取克·千克⁻¹。

(三) 湿静力温度 T_0 查算方法

能量守恒定律是自然界的基本规律之一，因此，很多人早就认识到可从大气能量学观点研究天气分析、预报。但是，为什么在大尺度天气分析、预报中，过去却很少使用大气能量学观点呢？其中一个原因可能是人们以为计算十分复杂。从这个意义上说， T_0 计算方法的解决，对于推动湿静力能量分析、预报方法的开展起了一定的作用。

1. 高空天气图上 T_0 的查算

高空（等压面）天气图上的高度是位势高度。因此，应首先找出(1-3)式中位能项与位势高度的关系。考虑到位势高度 $H \approx gZ/9.8$ ，则(1-3)式可改写为：

$$T_0 \approx T + \frac{9.8}{c_p} H + \frac{L}{c_p} q \quad (1-5b)$$

其中位势项 $\frac{9.8}{c_p} H \approx \frac{g}{c_p} Z_0$ 。

考虑到 $H = H_0 + (H - H_0)$ ，则有：

$$T_\sigma \approx T + \underbrace{\frac{9.8}{c_p} H_0 + \frac{L}{c_p} q}_{T_{\sigma H_0}} + \frac{9.8}{c_p} (H - H_0) + \delta T_\sigma \quad (1-6)$$

其中右端前三项之和 $T_{\sigma H_0}$ 一般用已制作好的表（如表1-2）进行查算，第四项 δT_σ 可近似地用每 100 位势米折合 1°C 算出。例如，当 850 毫巴¹⁾ $T = 15.0^\circ\text{C}$ 、 $T_d = 14.0^\circ\text{C}$ 、 $H = 1440$ 位势米时，则

$$T_\sigma \approx 57.9 + 0.4 = 58.3 (^\circ\text{C})$$

表 1-2 850 毫巴（设 $H_0 = 1400$ 位势米）湿静力
温度 $T_{\sigma H_0}$ 查算表^[7]

$T - T_d$ $T_{\sigma H_0}$						
T		0	1.....20.....24			25
25		971	936	543	504	496
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15		599	579	379	357	352
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10		461	447	289	274	270
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注：单位： $^\circ\text{C}$ ，最后一位是小数。

另外，(1-6)式还可改写为：

注：1) 1毫巴=100帕。

$$T_{\sigma} = T_0 + \underbrace{\frac{9.8}{c_p} H_0 + \frac{L}{c_p} q}_{T_{\sigma H_0}} + \frac{9.8}{c_p} (H - H_0) + (T - T_0) \quad (1-7)$$

当遇到 T 或 $T - T_d$ 的值超出表 1-2 中取值范围时, 即可利用 (1-7) 式变换成能用表 1-2 查算的条件。例如, 当 850 毫巴 $T = 25.0^{\circ}\text{C}$ 、 $T - T_d = 40^{\circ}\text{C}$ 、 $H = 1360$ 位势米, 欲用表 1-2 求 T_{σ} 时, 可取 $T_0 = 10.0^{\circ}\text{C}$ 、 $T - T_d = 25.0^{\circ}\text{C}$ 求出

$$T_{\sigma} \approx 27.0 - 0.4 + 15.0 = 41.6 (^{\circ}\text{C})$$

又如, 当 850 毫巴 $T = 30.0^{\circ}\text{C}$ 、 $T - T_d = 25.0^{\circ}\text{C}$ 、 $H = 1440$ 位势米时, 可取 $T_0 = 25.0^{\circ}\text{C}$ 、 $T - T_d = 20.0^{\circ}\text{C}$, 求出

$$T_{\sigma} \approx 54.3 + 0.4 + 5.0 = 59.7 (^{\circ}\text{C})$$

2. 地面上湿静力温度 T_{σ} 查算方法

考虑到 $q \approx 0.622 e_s / p_s$, 可将 (1-3) 式变换为:

$$T_{\sigma s} = T_s + \frac{g}{c_p} Z_s + 0.622 \frac{L}{c_p} e_s / p_s \quad (1-8a)$$

式中 T_s ——地面天气图上所填各站温度, Z_s ——各站海拔高度, e_s ——地面水汽压, p_s ——场面气压。

对于位能项, 我们利用套印在底图上的拔海高度解决。对于潜热项, 我们采用分档查表的办法近似解决。下面用实例说明。

当已知地面温度 T_s 为 12.0°C 入地面露点 T_{ds} 为 10.0°C 、测站海拔高度 Z_s 为 1100 米时, 可先用表 1-3 查出与测站高度最接近的气压, 再用表 1-4 查出潜热项, 然后代入 (1-3) 式即得

$$T_{\sigma s} \approx 12.0 + 11.0 + 21.0 = 44.0 (^{\circ}\text{C})$$

其中11.0℃是用每100米近似折合1℃算出的。这种查算方法，显然有一定的误差，但就目前天气分析和预报所要求的精度，在业务工作中还是可用的。

表1-3 夏半年台站拔海高度与场面气压^[7]近似对应关系（查潜热项用）

测站高度 (米)	0—250—750—1200—1700—2200—2700—3300—3800							
气压(毫巴)	1000	950	900	850	800	750	700	650

表1-4 潜热项 Lq/c_p 所相当的温度(℃)^[7]

$\frac{L}{c_p} q$ T_d	1000	950	900	850	800	...
30	66.0	69.6	73.7	78.2	83.4	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	18.9	19.9	21.0	22.3	23.7	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-34	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	...

3. 利用地面记录月报表查算 T_o 的方法

因为地面气象记录月报表中一般只有水汽压 e ，故应先找出(1-3)式中潜热项与 e 的关系。把 L 、 c_p 值代入，再考虑到 $q \approx 0.622 \frac{e}{p}$ 后有：

$$\frac{L}{c_p} q \approx 1555 \frac{e}{p} \quad (1-8b)$$

根据上式，编制出由 e 、 p 查算潜热项的表(表1-5)后，利用地面月报表查算 T_o 的问题便得到解决。例如，当已知

$p=970$ 毫巴、 $T=20.0^{\circ}\text{C}$ 、 $e=12.0$ 毫巴、 $Z=250$ 米时，可求出

$$T_{\sigma} \approx 20.0 + 2.5 + 19.2 = 41.7 (^{\circ}\text{C})$$

其中 19.2 即利用表 1-5 查出。

表 1-5 潜热项近似值 $\frac{L}{c_p} q \approx 1555 \frac{e}{p}$ 查算表 ($^{\circ}\text{C}$)^[7]

$\begin{matrix} 1555 \frac{e}{p} \\ e \end{matrix} \backslash \begin{matrix} p \\ \end{matrix}$	970	975	980	985	990	...
10	16.0	16.0	15.9	15.8	15.7	...
12	19.2	19.1	18.9	18.8	18.8	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	

(四) 饱和湿静力温度

饱和湿静力温度 T_{σ}^* ，我国最初是为了分析雹暴而引入的。后来证明，这是一个非常重要的物理量，在制作对流天气分析、预报时非常有用。

在气压、温度不变的条件下，假定空气达到饱和时的湿静力温度，称为饱和湿静力温度，其表达式为：

$$T_{\sigma}^* = T + \frac{g}{c_p} Z + \frac{L}{c_p} q_s \quad (1-9)$$

或

$$T_{\sigma}^* = T + \frac{9.8}{c_p} H + \frac{L}{c_p} q_s \quad (1-10)$$

式中 q_s 表示与温度 (T) 相应的饱和比湿。需要强调的是, T^* 纯属假想出的一个温湿特征量, 不能用任何简单的物理过程达到。

由 T^* 定义及其表达式可知, 查算 T^* 与 T_0 的方法非常相似, 因两者仅潜热项有差异。例如, 当 850 毫巴 $T=15.0^\circ\text{C}$ 、 $H=1400$ 位势米时, 令 $T-T_d=0$, 利用表 1-2 可查出 $T^*=59.9^\circ\text{C}$ 。

又如, 当 800 毫巴 $T=10.0^\circ\text{C}$ 、 $Z=2000$ 米时, 则

$$T_0 \approx 10.0 + 20.4 + 23.7 = 54.1 (^\circ\text{C})$$

其中潜热项数值 (23.7°C) 是由表 1-4 查出的。

下面我们借助图 1-1 讨论 T^* 代表的物理意义。设 T_0 表示原在 H_0 处空气的湿静力温度, T'_{0H} 表示 H_0 处的空气上升到 H 时的湿静力温度, T^*_{0H} 表示 H 处空气的饱和湿静力温度, 且 H 大于凝结高度 H_c , 则有:

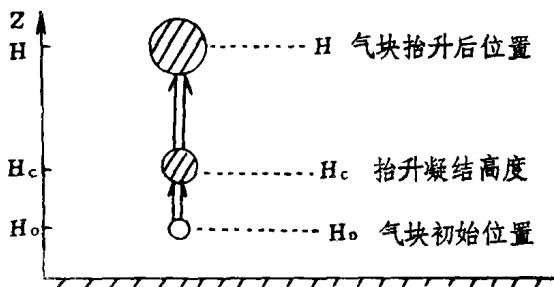


图1-1 推导(1-13)式所用示意图

$$T_{00} = T'_{0H} = T'_H + \frac{9.8}{c_p} H + \frac{L}{c_p} q_s(T'_H) \quad (1-11)$$

$$T^*_{0H} = T_H + \frac{9.8}{c_p} H + \frac{L}{c_p} q_s(T_H) \quad (1-12)$$

式中 T_H 表示高度 H 处原有的空气温度, T'_H 表示自 H_0 上升到 H 处气块的温度, $q_s(T'_H)$ 与 $q_s(T_H)$ 分别表示与 T'_H 、 T_H 对应的饱和比湿。

考虑到 $q_s(T_H) - q_s(T'_H) = \frac{\partial q_s}{\partial T} (T_H - T'_H)$, (1-12) 与 (1-11) 相减得:

$$T_{\sigma H}^* - T_{\sigma 0} = \left(1 + \frac{L}{c_p} \frac{\partial q_s}{\partial T}\right) (T_H - T'_H) \quad (1-13)$$

因为 $\left(1 + \frac{L}{c_p} \frac{\partial q_s}{\partial T}\right)$ 恒为正, 故 $T_{\sigma H}^* - T_{\sigma 0}$ 与 $T_H - T'_H$ 成正比。这样, 当 $T_{\sigma 0} \leq T_{\sigma H}^*$ 时, H_0 处的空气便不能自由地穿过 H 层上升, 其能量将贮存在 H 层之下; 当 $T_{\sigma 0} > T_{\sigma H}^*$ 时, H_0 处的空气及其具有的能量将自由地穿越 H 层而往上传递。因此, $T_{\sigma H}^*$ 表示 H 层以下气块湿静力能量贮存的限度, 可简称为贮能限。饱和湿静力温度的这一性质, 在对流天气分析、预报中非常有用。

(五) 湿静力温度在天气分析 预报中的应用

像通常制作天气分析预报一样, 把湿静力温度 T_σ 用于日常业务, 也是通过一套图表实现的。 T_σ 图表主要有: T_σ 形势图、 T_σ 铅直剖面图、 T_σ 铅直廓线图。下面结合实例说明其用途。

1. T_e 形势图与几种能量系统

把 T_e 值填在天气图底图上,按分析等值线的方法绘制出等能线。闭合等能线围成的大(小)值区域,称为高(低)能区,不闭合等能线构成的大(小)值狭长带,称为高(低)能舌。

T_e 形势图在业务工作中应用的时间虽然很短,但借助它已经揭示出一些很有意义的能量系统,如锢囚高能舌和能量锋等。

(1) 锢囚高能舌

这个能量系统,是在研究北京地区暴雨的分析预报时提出的。因其中等能线的形状很似 Ω , 故后来也有人称作 Ω 能量系统。

普查 1975 与 1976 年 7、8 月 850 毫巴湿静力温度 T_e 形势图后发现,在北京地区一部分暴雨产生前 12—36 小时,常有一个自河套地区伸向北京西面的准饱和 ($T - T_d \leq 4^\circ\text{C}$) 高能舌(如图 1-2),在 高能舌的两侧(上、下游),各有一个低能区,或称为低能舌。在 高能舌和低能舌之间常为等能线的密集带,这个密集带称为能量锋区。从气流角度看,饱和和高能舌中,供应了形成暴雨的水汽和提供了形成上升运动的南来暖湿气流。低能舌为干冷气流,它包围了中间的南来气流,这种分布形式称为锢囚高能舌,或称为 Ω 能量系统 (Ω 型)。这种系统在温压场上往往反映并不明显,而在能量场上表现得比较清楚。就尺度而言,它是属于次天气尺度或中间尺度的。我国一些气象工作者,曾相继对这种能量系统进行过一些研究^[8-11]。

过去,人们常苦于在暴雨和飑线等强对流天气发生之前在天气图上分析不出明显的气压系统,一旦气旋波或低压形