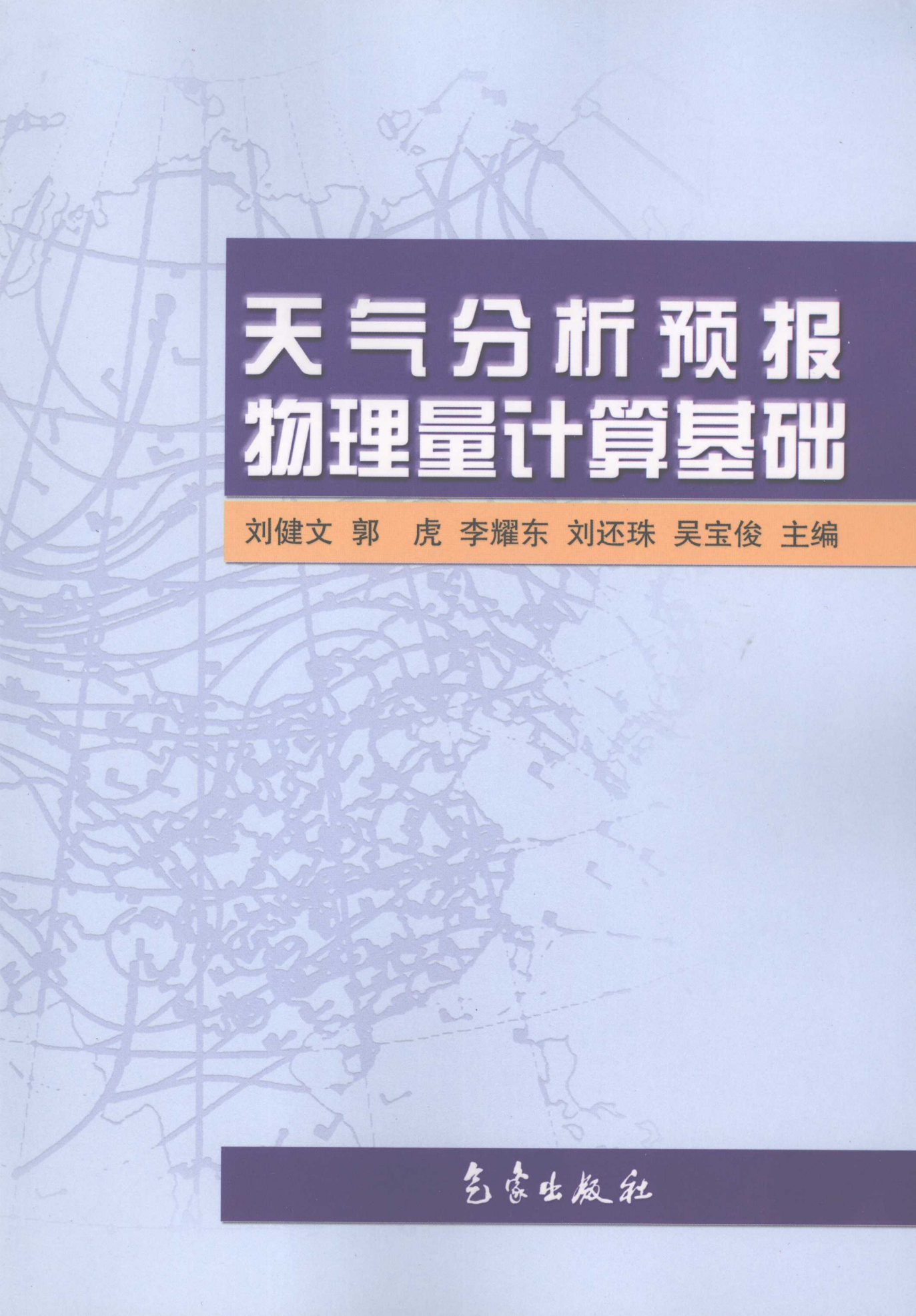


The background of the cover is a light blue map of China, overlaid with a complex network of thin, dark blue lines representing weather patterns or isobars. These lines are more densely packed in the southern and eastern regions of the map.

天气分析预报 物理量计算基础

刘健文 郭 虎 李耀东 刘还珠 吴宝俊 主编

气象出版社

国家自然科学基金项目(40375016)和国家科技攻关课题(2002BA904B05)资助

天气分析预报物理量 计算基础

刘健文 郭 虎 李耀东 刘还珠 吴宝俊 主编

气象出版社

内容提要

本书收集天气分析预报物理量 90 余个,全书共分为 10 篇 36 章。第一篇介绍了天气分析基础与常用物理量,第二至第十篇依次介绍了稳定度与稳定度指数、有效位能、与垂直风切变有关的量、不稳定能量储存机制、触发机制、热力学与动力学量组合参数、强对流天气指数、锋与锋生、压能、旋转风与辐散风。书中较为全面地介绍了各个物理量的概念、物理意义及计算方法,并给出部分物理量的使用范例和说明。书中收集的天气分析物理量较为系统和全面,特别是收集了多个近年发展的用于强对流天气分析和预报的参数和指数。本书可供气象预报员及科研人员参阅,也可作为大学生、研究生学习和研究的参考和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

天气分析预报物理量计算基础/刘健文等主编. —北京:
气象出版社,2005.6(2007.12 重印)
ISBN 978-7-5029-3961-8

I. 天… II. 刘… III. 天气预报-物理量 IV. P45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 052415 号

出版者: 气象出版社	地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号
网 址: http://cmp.cma.gov.cn	邮 编: 100081
E-mail: qxcbs@263.net	电 话: 总编室: 010-68407112 发行部: 010-68409198
责任编辑: 俞卫平 吴庭芳	终 审: 黄润恒
封面设计: 王 伟	版式设计: 吴庭芳
印刷者: 北京中新伟业印刷有限公司	
发行者: 气象出版社	
开 本: 787×1092 1/16	印 张: 16.5 字 数: 380 千字
版 次: 2005 年 6 月第一版	2007 年 12 月第二次印刷
印 数: 1501~3500	
定 价: 50.00 元	

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

天气分析和预报中经常使用各种物理量,了解这些物理量的来源、物理意义、性质特点和使用方法无疑对业务工作有很大帮助。目前,国内在此方面缺少一本类似于手册或工具书一类的书籍供气象预报和研究人员方便地参考。针对这一情况,本书收集和整理了天气分析预报物理量 90 余个,涵盖了从最基本的用于大尺度天气分析的基础物理量,到用于中尺度和风暴分析与预报的强对流参数。书中按其物理性质进行了分类,介绍了这些物理量的来源、物理意义、计算方法及使用时应该注意的一些问题,书中特别介绍了不少近年来发展的用于强对流天气分析的对流参数。本书作者在多年的科研工作中曾使用过其中的许多物理量,期望通过本书,把对这些物理量的理解和认识提供给读者参考,同时,希望读者通过参阅本书,对所使用物理量有更全面的理解,在此基础上,促进对天气过程及相关分析方法的理解和认识。

考虑到与气象卫星、气象雷达等探测资料有关的物理量已经另有专著介绍,故本书只着重介绍与常规气象观测资料有关的物理量。

周小刚、姚秀萍、梁丰、林建、刘玉玲、伏建国、刘珂等同志参加了本书部分内容的编写,参加过本书初稿讨论及相关课题研究工作的还有姚学祥、毕宝贵、钱传海、陈鲜艳、付宗钰、熊敏詮、张涛、张金艳、吴庆梅、李浚河、白洁、纪飞、张方友等同志。

中国气象局许小峰副局长对本书的编写和出版给予了关心和支持,在此谨表谢意。

本书部分内容为国家自然科学基金“华北深对流天气观测分析和预报技术研究”、科技部“奥运气象保障技术研究”和中国气象局“大气对流参数软件包及在短时预报中的应用”项目研究成果。

本书的取材、编排方式和内容有诸多可商榷之处,疏漏在所难免,恳请读者批评指正!

主 编

2005 年 5 月

目 录

第一编 基础物理量

第 1 章 表示空气湿度的物理量	(3)
1.1 饱和水汽压	(3)
1.2 水汽状态方程与水汽密度	(6)
1.3 比湿与混合比	(7)
1.4 相对湿度与温度-露点差	(10)
1.5 虚温与密度温度	(11)
第 2 章 热力学图解上的几个特征高度	(15)
2.1 抬升凝结高度	(15)
2.2 对流凝结高度与对流温度	(20)
2.3 起始抬升高度与起始下沉高度	(21)
2.4 自由对流高度、平衡高度与等面积高度	(24)
2.5 0°C 层高度与 -30°C 层高度	(25)
第 3 章 与大气中水分有关的物理量	(27)
3.1 大气可降水量	(27)
3.2 凝结函数	(28)
3.3 降水效率	(30)
第 4 章 温湿特征量	(32)
4.1 位温与虚位温	(32)
4.2 假相当位温与饱和假相当位温	(33)
4.3 湿球温度与湿球位温	(38)
4.4 湿静力温度	(39)
第 5 章 云中含水量的计算	(43)
5.1 绝热比含水量	(43)
5.2 利用强风暴数值模式求云中液水含量	(44)
5.3 利用中尺度数值模式求云中液水含量	(46)
第 6 章 平均风矢与相对风矢	(51)
6.1 风向、风速、风矢与 u, v 分量的关系	(51)
6.2 气柱平均风矢	(52)
6.3 雷暴的移速	(53)
6.4 风暴相对风矢	(54)

第 7 章 涡度、散度与垂直速度·····	(56)
7.1 涡度的计算·····	(56)
7.2 散度的计算·····	(58)
7.3 垂直速度的诊断·····	(59)
7.4 地转偏差与散度、垂直速度的关系 ·····	(61)
第 8 章 水汽通量与水汽通量散度 ·····	(64)
8.1 水汽通量·····	(64)
8.2 水汽通量散度·····	(65)
8.3 水汽通量散度应用示例·····	(67)
第 9 章 平流与差动平流 ·····	(70)
9.1 温度平流·····	(70)
9.2 涡度平流·····	(71)
9.3 θ_{se} 平流·····	(72)
9.4 θ_{se} 差动平流·····	(73)

第二编 稳定度与稳定度指数

第 10 章 条件性稳定度指数·····	(77)
10.1 气块法 ·····	(77)
10.2 条件性稳定度指数 ·····	(78)
10.3 肖沃特指数 ·····	(81)
10.4 抬升指数 ·····	(82)
10.5 最大抬升指数 ·····	(82)
10.6 抬升垂直运动指数 ·····	(83)
第 11 章 对流性稳定度指数·····	(84)
11.1 对流性稳定度 ·····	(84)
11.2 对流性稳定度指数 ·····	(85)
11.3 条件-对流稳定度指数·····	(86)
11.4 最大对流稳定度指数 ·····	(86)

第三编 有效能量

第 12 章 对流有效位能·····	(91)
12.1 对流有效位能的概念 ·····	(91)
12.2 与 CAPE 计算有关的问题 ·····	(93)
12.3 计算注意事项 ·····	(95)
12.4 与 CAPE 应用有关的一些问题 ·····	(95)

12.5 小结	(96)
第 13 章 下沉对流有效位能	(98)
13.1 斜交 T - $\log p$ 图	(98)
13.2 下沉对流有效位能(DCAPE)	(98)
13.3 下沉对流有效位能的计算方法	(100)
13.4 讨论	(101)
第 14 章 湿有效能量	(102)
14.1 湿总能量	(102)
14.2 有效能量、无效能量以及参考状态	(104)
14.3 全球湿有效能量与湿-比有效能量的近似表达式	(106)
14.4 参考状态的确定	(108)
14.5 A_{mk} 与 MAE_1 的计算及其单位	(112)
14.6 A_{mk} 对非局地暴雨信号的放大作用	(112)
14.7 小结	(113)

第四编 与垂直风切变有关的量

第 15 章 环境风的垂直切变和理查森数	(117)
15.1 环境风的垂直切变	(117)
15.2 理查森数	(119)
第 16 章 局地螺旋度与 z -螺旋度	(123)
16.1 螺旋度	(123)
16.2 局地螺旋度与 z -螺旋度表达式	(123)
16.3 局地螺旋度密度的几个特性	(124)
第 17 章 风暴相对螺旋度	(127)
17.1 风暴相对螺旋度	(127)
17.2 风暴相对螺旋度的计算	(127)
17.3 讨论	(128)

第五编 不稳定能量的储存机制

第 18 章 储能机制指数	(137)
18.1 干暖盖强度指数	(137)
18.2 储能指数	(138)
18.3 干暖盖特征的另一种表示方法	(138)
18.4 其他分析结果	(139)
18.5 小结	(140)

第 19 章 对流抑制能量	(141)
19.1 热力学图解上的负面积	(141)
19.2 对流抑制能量定义	(141)
19.3 CIN 的预报应用	(142)
19.4 与 CIN 计算有关的几个问题	(142)

第六编 触发(抬升)机制

第 20 章 边界层中的散度和垂直速度	(147)
20.1 地面附近散度的计算	(147)
20.2 边界层中垂直速度的计算	(148)
第 21 章 准地转 Q 矢量	(150)
21.1 准地转 Q 矢量表达式 I	(150)
21.2 准地转 Q 矢量表达式 II	(151)
21.3 Q 矢量散度为强迫项的准地转 ω 方程	(151)
21.4 $\omega \propto \nabla \cdot Q$ 的导出	(153)
21.5 补充知识:矢量的“梯度”	(153)
第 22 章 热成风适应机制与垂直运动	(156)
22.1 陈秋士数	(156)
22.2 非地转风情况下大尺度动力学方程的简化	(156)
22.3 热成风适应简化方程	(157)
22.4 热成风适应机制与垂直运动发生的原理	(159)
22.5 适应与水平尺度的关系	(160)

第七编 热力学与运动学量的组合参数

第 23 章 相当位涡	(163)
23.1 引言	(163)
23.2 等压面上的 EPV	(163)
23.3 EPV 计算示例	(166)
第 24 章 湿位势涡度	(168)
24.1 位势涡度和湿位势涡度定义	(168)
24.2 位涡守恒性	(168)
24.3 湿位涡守恒性	(170)
24.4 等压面上的湿位涡及倾斜涡度发展理论	(171)
24.5 位涡和湿位涡单位	(172)
24.6 倾斜涡度发展理论的应用	(173)

第 25 章 风暴强度指数	(174)
25.1 引言	(174)
25.2 资料来源及处理方法	(174)
25.3 点聚图	(175)
25.4 风暴强度指数	(176)
25.5 应用举例	(177)
第 26 章 能量螺旋度指数、涡生参数与粗理查森数	(179)
26.1 能量螺旋度指数	(179)
26.2 涡生参数	(179)
26.3 粗理查森数	(181)

第八编 强对流天气指数

第 27 章 雷暴指数	(185)
27.1 杰弗逊指数与莱克力指数	(185)
27.2 T^* 指数	(186)
27.3 瑞士新雷暴预报指数	(187)
第 28 章 雷暴大风与下击暴流指数	(190)
28.1 雷暴大风(日)与下击暴流	(190)
28.2 大风指数	(192)
28.3 微下击暴流潜势日指数	(193)
28.4 微下击暴流的预报	(193)
第 29 章 冰雹指数	(196)
29.1 上升气流	(196)
29.2 降雹条件	(198)
29.3 最大上升速度与 0°C 层高度的关系	(202)
29.4 降雹的预报	(203)
第 30 章 雷电(闪电)指数	(205)
30.1 闪电	(205)
30.2 地闪气候规律	(206)
30.3 闪电频数的简单参数化方案	(208)
30.4 云地闪频率	(211)
第 31 章 强天气分析预报的其他指数	(215)
31.1 全总指数及修正的全总指数	(215)
31.2 强天气威胁指数	(215)
31.3 K 指数及修正的 K 指数	(216)
31.4 山崎指数	(217)

第九编 锋与锋生

第 32 章 能量锋与 Ω 系统	(221)
32.1 能量锋	(221)
32.2 Ω 能量系统(锢囚高能舌)	(222)
32.3 Ω 系统湿斜压调整过程	(224)
第 33 章 标量锋生公式	(226)
33.1 概述	(226)
33.2 锋生、锋消公式	(226)
33.3 影响锋生、锋消的因子	(228)
33.4 伸展形变与切变形变	(229)
33.5 其他形式的锋生公式	(232)
33.6 $\frac{d}{dt} \nabla_h \theta $ 表达式的物理意义	(234)
33.7 应用中的注意事项	(235)
第 34 章 矢量锋生函数	(236)
34.1 概述	(236)
34.2 矢量锋生公式	(236)
34.3 其他形式的矢量锋生公式	(239)
34.4 F_n 与 F_s 的意义	(241)

第十编 压能、旋转风与辐散风

第 35 章 压能	(245)
35.1 概述	(245)
35.2 压能性质 1	(245)
35.3 压能性质 2	(247)
35.4 压能性质 3	(248)
第 36 章 旋转风与辐散风的 Endlich 计算方法	(249)
36.1 基本原理	(249)
36.2 计算步骤	(249)
36.3 应用示例	(251)
36.4 小结	(253)

第一编

基础物理量

构成天气的基本要素是温、压、湿、风、云,正是这些基本要素的变化形成了变幻莫测的天气现象。天气预报常用的基础物理量基于这些要素,并从动力、热力等不同角度进一步表述了大气状态,且和基本天气过程有着紧密的联系。本篇介绍大气最常用和基本的温、湿及动力特性参数的概念和物理意义,并介绍部分常用基础物理量的计算和诊断方法。

第 1 章 表示空气湿度的物理量

1.1 饱和水汽压

饱和水汽压常用 $E, e,$ 或 e^* 表示。

1.1.1 定义

1. 饱和空气与饱和水汽压

大气中由水汽所产生的分压强称为水汽压。它的大小视大气中水汽含量的多少而定,单位用百帕(hPa)表示。

在温度一定的条件下,一定体积的空气中能容纳的水汽分子数量是有一定限度的。如果空气中的水汽含量正好达到某一温度下空气所能容纳水汽的限度,则水汽达到饱和,这时的空气称为饱和空气。饱和空气中的水汽压,称为饱和水汽压。对于纯净的平水面而言,其上面空气的饱和水汽压称为水面上的饱和水汽压;对于平冰面而言,其上面空气的饱和水汽压称为冰面上的饱和水汽压。

2. 水面和水汽的动态平衡

假定有一封闭的绝热容器,内装有一部分水,如图 1.1.1(Rogers,1979)。水体表面层内的分子处于动乱状态:其中有的离开水面成为水汽分子,有的水汽分子撞击水面,并被水面吸附。这样,凝结和蒸发便同时发生。在给定的某一温度条件下,当凝结和蒸发达到同一速率时,将处于动态平衡状态。此时空气和水汽的温度等于液水的温度,而且没有水分子从一个相态转移到另一相态去的净变化。这时液面上方就称为处于水汽饱和状态,这种情况下的水汽分压强就是上面说的饱和水汽压。

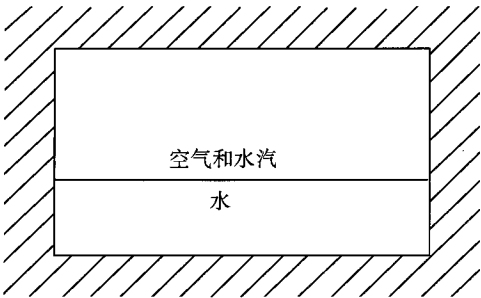


图 1.1.1 水汽与水面处于动态平衡状态示意图(Rogers,1979)

1.1.2 克劳修斯-克拉贝龙方程

1. 克劳修斯-克拉贝龙方程

饱和水汽压可用克劳修斯-克拉贝龙方程来描述。

根据热力学理论,当水汽和液态水两相达到平衡状态时,必须满足以下三个平衡条件:热平衡条件、力学平衡条件和相变平衡条件。即:

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T \\ p_1 = p_2 = p \\ \mu_1(T, p) = \mu_2(T, p) \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)不但给出了水汽和液态水两相平衡共存时压强和温度的关系,而且也给出了描述相图中相平衡曲线的方程式。其中 μ 表示 1 mol(或 1 g)物质的吉布斯函数(通常称为化学势),余为惯用符号。有关吉布斯函数的定义,请参看其他参考书。

利用相平衡曲线上两相化学势相等的性质可推导出:

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L_v e_s}{R_v T^2} \quad (1.1.2)$$

式中 L_v 是水的汽化热, e_s 为饱和水汽压, R_v 是水汽的比气体常数,余为惯用符号。

式(1.1.2)是由克拉贝龙(Clapeyron)首先得到,并由克劳修斯(Clausius)用热力学理论导出,所以称为克劳修斯-克拉贝龙方程。但此方程仅仅适用于平液面,在讨论云、雨滴等的相变过程时必须考虑曲液面的影响。

2. 由克劳修斯-克拉贝龙方程得出的推论

推论 1 饱和水汽压仅与温度有关

考虑到 $d\left(\frac{1}{T}\right) = -\frac{dT}{T^2}$, 并将 L_v 简写为 L , 则式(1.1.2)可改写为:

$$\frac{de_s}{e_s} = -\frac{L}{R_v} d\left(\frac{1}{T}\right), \quad d \ln e_s = -\frac{L}{R_v} d\left(\frac{1}{T}\right) \quad (1.1.3)$$

式(1.1.3)表明:(i)饱和水汽压 e_s 仅与温度 T 有关,是温度的一元函数;(ii) e_s 是 T 的递增函数,即 e_s 随着 T 的增大而增大。

推论 2 饱和水汽压(E, e_s 或 e^*)的表达式

如果把潜热 L 看成是常数,对式(1.1.3)从 (e_{s0}, T_0) 积分到 (e_s, T) , 得到:

$$\ln \frac{e_s}{e_{s0}} = \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (1.1.4)$$

式(1.1.4)中, e_{s0} 是 T_0 时的饱和水汽压,可由实验或由另外的假设来确定。事实上, L 随温度有少量的变化,所以式(1.1.4)并不是 e_s 与 T 关系的精确描述。但在对流层温度范围内, L 的变化仅为 $L_0 = 2.501 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 值的百分之几,将 L_0 值代入式(1.1.4),可以得到实际饱和水汽压的近似值。在 $T_0 = 273 \text{ K}$ 时,积分常数 e_{s0} 等于 6.11 百帕(hPa)。

当温度低于 0°C 时,可将式(1.1.4)中 L 以凝华潜热 L_s 代入,即可获得相对于冰面的饱和水汽压。

推论3 实际水汽压 e 的表达式

实际水汽压是指空气未饱和时的水汽压。

当温度 T 与露点温度 T_d 相等时,空气即达到饱和,故在饱和水汽压 e_s 的表达式中,若用 T_d 取代 T ,则可用实际水汽压 e 取代饱和水汽压 e_s ,从而得到实际水汽压 e 的表达式。

1.1.3 饱和水汽压经验公式

饱和水汽压 E (或 e_s 或 e^*) 随温度的变化规律,常用经验公式表示。

1. Emanuel 推荐的公式

关于饱和水汽压 E 的计算, Emanuel 1994 年在《Atmospheric Convection》一书中推荐了如下经验公式:

$$\ln E = 53.67957 - \frac{6743.769}{T} - 4.8451 \ln T \quad (1.1.5)$$

其中 E 的单位是 hPa, T 的单位是绝对温标 K, 与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系是:

$$T = 273.15 + t \quad (1.1.6)$$

式(1.1.5)与史密松(Smithsonian)气象表(List, 1951)给出的值是匹配的: 在 $0^{\circ}\text{C} \leq t \leq +40^{\circ}\text{C}$ 范围内,它们之间的误差小于 0.006%。尽管 t 低于 0°C 时过冷却水和水汽平衡的观测值不十分精确,但当温度低至 -30°C 时,与史密松(Smithsonian)表中值的误差仍小于 0.3%。温度低至 -40°C 时,误差也不超过 0.7%。

式(1.1.5)将气象中可能遇到的情况统一到了一个公式中,而不再分水面和冰面,其精度也符合气象业务的需要。

2. 饱和水汽压的其他计算(经验)公式**(1) Tetens 公式(Tetens, 1930)**

$$\text{水面} \quad e_{\text{水}}^* = 6.11 \times 10^{7.5t/(237.3+t)} \quad (1.1.7)$$

冰面与水面相比,水分子不易脱离,故冰面饱和水汽压比水面低些,满足下列经验公式:

$$e_{\text{冰}}^* = 6.11 \times 10^{9.5t/(265.5+t)} \quad (1.1.8)$$

上述公式也被称为 Magnus 公式。

(2) 修正的 Tetens 公式

如果将式(1.1.7)精确度稍微降低,则 Bolton(1980)给出了对 Tetens 公式的修正:

$$E = 6.112 \exp\left(\frac{17.67t}{t + 243.5}\right) \quad (1.1.9)$$

这里 t 是摄氏度,在 $-35^{\circ}\text{C} \leq t \leq +30^{\circ}\text{C}$ 范围内,该公式与 Tetens 公式的误差小于 0.3%。

温度愈高,则湿度愈大。根据定义, T_d 即是 $e=E$ 时所对应的温度。

3. 应用

上述饱和水汽压经验公式的结果差异对气象预报影响不大。因此,实际应用时可视情选择。

1.2 水汽状态方程与水汽密度

1.2.1 水汽状态方程

与其他大气成分不一样,水在大气中可以出现三种状态,即固态、液态和气态。水汽在大气中所表现的特征可以非常近似地看作是一理想气体,它的状态方程是:

$$e = \rho_v R_v T \quad (1.2.1)$$

式中 e 是水汽压, ρ_v 是水汽密度, R_v 是水汽的比气体常数,一般取 $461.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

式(1.2.1)有时写成:

$$e = \rho_v \frac{R_d}{\epsilon} T \quad (1.2.2)$$

式中 R_d 是干空气的比气体常数,一般取 $287.05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ϵ 是一个经常用到的常数,其表达式为:

$$\epsilon = R_d/R_v = 0.622 \quad (1.2.3)$$

1.2.2 水汽密度

1. 定义

单位容积空气中所含的水汽质量,就是空气中水汽的密度(ρ_v),单位用 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 表示。虽然 ρ_v 能够直接表示空气中水汽的绝对含量,但却不能被直接测量得到,通常它是由水汽压计算得到的。

2. 计算公式

考虑到空气中水汽密度的定义,根据水汽的状态方程(1.2.1)可得:

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} \quad (1.2.4)$$

下面将式(1.2.4)变化为可用观测量直接计算的形式。考虑到:(i)水汽压(e)的单位 $\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 以及 $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (N 表示牛顿), (ii) $R_v = 461.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 以及 $\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 则由式(1.2.4)不难导出:

$$\rho_v = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^{-2}}{461.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{K}} \right] \frac{e}{T} = \left[\frac{(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{m}^2}{461.5 (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}) \text{kg}^{-1}} \right] \frac{e}{T} \quad (1.2.5)$$

$$\text{或} \quad \rho_v = \frac{e}{461.5 \times T} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1.2.6)$$

$$\text{亦即:} \quad \rho_v = 2.167 \times 10^{-3} \frac{e}{T} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1.2.7)$$

1.3 比湿与混合比

1.3.1 比湿

1. 定义

比湿(q)是指某容积中水汽质量(m_v)与同一容积中空气(包括水汽)的总质量($m_v + m_d$)的比值。

饱和空气的比湿称为饱和比湿(q_s)。

2. 表达式

比湿表达式为:

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_d} \quad (1.3.1)$$

对单位容积,上式可写为密度之比:

$$q = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_d} \quad (1.3.2)$$

将状态方程($e = \rho_v R_v T$ 与 $p_d = (p - e) = \rho_d R_d T$)代入式(1.3.2)得:

$$q = \frac{e/(R_v \cdot T)}{(p - e)/(R_d \cdot T) + e/(R_v \cdot T)} \quad (1.3.3)$$

取干空气和水汽的比气体常数分别为 $R_d = 287.05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $R_v = 461.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 可得:

$$R_d = 0.622 R_v \quad (1.3.4)$$

将 $R_d = 0.622 R_v$ 代入式(1.3.3)得:

$$q = \frac{e/R_v T}{(p - e)/0.622 R_v T + e/R_v T} \quad (1.3.5)$$

将分母中第1项展开得:

$$q = \frac{e/R_v T}{p/0.622 R_v T - e/0.622 R_v T + e/R_v T} \quad (1.3.6)$$

消去分子、分母中的 $R_v T$, 得:

$$q = 0.622 \times \frac{e}{p - e + 0.622e} = 0.622 \times \frac{e}{p - 0.378e} \quad (1.3.7)$$

考虑到 $p \gg e$, 所以可略去 $0.378e$, 则得:

$$q = 0.622 \frac{e}{p} (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1.3.8)$$

或:

$$q = 622 \frac{e}{p} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1.3.9)$$

3. 比湿垂直分布特征

(1) 平均情况