

全国高等林业院校教材

气 象 学

(修 订 版)

贺庆棠 主编

中国林业出版社

全国高等林业院校教材

气 象 学

(修订版)

贺庆棠 主编

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

气象学/贺庆棠主编. —2版(修订本). —北京:中国林业出版社,1988.11(2006重印)

全国高等林业院校教材

ISBN 7-5038-0237-5

I. 气... II. 贺... III. 气象学—高等学校—教材 IV. P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 133277 号

出 版 中国林业出版社(100009 北京西城区德内大街刘海胡同7号)

网 址: <http://www.cfph.com.cn>

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话:(010)66184477

发 行 新华书店北京发行所

印 刷 三河市艺苑印刷厂

版 次 1988年11月第2版

印 次 2006年11月第14次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16

字 数 338千字

定 价 14.50元

凡本书出现缺页、倒页、脱页等质量问题,请向出版社图书营销中心调换。

版权所有 侵权必究

前 言

全国高等林业院校试用教材《气象学》已试用八年了。为了使教材更好地反映国内外科学技术的新发展，适应我国四化建设的需要，使我们培养的人才能满足面向世界、面向未来和面向现代化的要求，有必要对原教材进行修订，使之日臻完善。

这次修订，是以1984年5月在湖南省株洲市召开的全国高等林业院校气象学教材修订会议确定的大纲为基础编写的。全书以能量平衡和水分平衡为主线，阐述了气象学和微气象学的基本理论，天气、气候和小气候的基本知识，以及气象观测和计量的基本方法，并附有实习指导。在编写过程中，我们力求运用辩证唯物主义观点阐明气象科学规律，贯彻理论联系实际的原则；在取材上本着少而精的原则，尽量反映国内外科技先进成果及动向；在内容安排上，则由浅入深，便于学生自学。因此，与原书相比，从体系和内容上都有较大变化。但是，由于我们的水平有限，书中缺点和错误在所难免，我们诚恳希望使用此教材的同志批评指正，以便将来进一步修改。

本书由贺庆棠主编，有关章节的编写人是：绪论、第一章、第三章、第五章、第六章及附录一由贺庆棠编写；第二章、第九章及实习一、五、六由姚丽华编写；第四章、第七章由邵海荣编写；第十章由袁嘉祖编写；第八章及实习二、三、四由陆鼎煌编写。南京气象学院翁笃鸣副教授和北京林业大学陈健副教授对本书作了细致的审稿和删改，在此表示衷心感谢。

编 者

1986.9.

主 编 人：贺庆棠

参加编写人：贺庆棠、姚丽华、陆鼎煌、袁嘉祖、邵海荣

主 审 人：翁笃鸣（南京气象学院）

审 阅 人：翁笃鸣、陈 健

责任编辑：许鸿祥、杨延雨

目 录

绪 论	1
第一节 气象学的概念	1
第二节 气象学在林业上的意义	2
第一章 大 气	4
第一节 大气的组成	4
第二节 大气的分层	5
第三节 大气的基本物理性质	8
第二章 辐射能	12
第一节 辐射的基本知识	12
第二节 太阳辐射	13
第三节 长波辐射	24
第四节 净辐射	26
第三章 感热与温度	29
第一节 土壤和空气的热量交换方式和热特性	29
第二节 土壤热通量和土温	32
第三节 森林植物体贮热量和树温	37
第四节 感热通量和气温	40
第五节 空气的绝热变化和大气稳定度	43
第六节 生物学温度、界限温度和积温	46
第四章 大气的运动	49
第一节 气压	49
第二节 空气的水平运动——风	54
第三节 大气环流模式概述	60
第四节 地方性风	62
第五节 湍流	65
第五章 植物新陈代谢能	77
第一节 植物的新陈代谢作用	77
第二节 大气中的二氧化碳	79
第三节 植物新陈代谢能通量的确定方法	83
第六章 能量平衡	87
第一节 下垫面的能量平衡	87
第二节 地球的能量平衡	88
第三节 森林的能量平衡	89

第七章 大气中的水分与水量平衡	93
第一节 蒸发	93
第二节 空气湿度	96
第三节 凝结与凝华	97
第四节 降水	101
第五节 水分循环和水量平衡方程	104
第八章 天气与气象灾害	111
第一节 天气学基础	111
第二节 主要灾害性天气过程	116
第三节 气象灾害	124
第四节 气象与森林火灾	129
第五节 气象与森林病虫害	133
第九章 气候和中国气候资源	136
第一节 影响气候的因子	136
第二节 季节	141
第三节 气候带和气候型	143
第四节 中国气候区划	144
第五节 中国季风气候	147
第六节 中国气候资源	151
第十章 小气候	163
第一节 小气候的概念	163
第二节 地形小气候	163
第三节 防护林小气候	171
第四节 森林小气候	179
第五节 采伐迹地和林中空地的小气候	182
第六节 城市气候	184
第七节 人工改造小气候的途径	191
附录一 小气候观测方法	194
附录二 气象学实习指导	201
实习一 太阳辐射和日照时数的观测	201
实习二 空气温度和土壤温度的观测	208
实习三 空气湿度的观测	219
实习四 气压、风、降水和蒸发的观测	227
实习五 气象观测资料的整理——气象年、月报表编制方法	241
实习六 气候资料统计	243
参考书目	249

绪 论

第一节 气象学的概念

由于地球引力的作用，地球周围聚集着一层深厚的空气层，称为地球大气或简称大气。大气围绕着地球，构成大气圈。大气圈的底部是地球表面，它是大气圈的“下垫面”，因此，气象学上称的下垫面，就是指地球表面，而在小气候学上又把下垫面称为活动面或作用面。

在大气中，不断地进行着各种物理过程，例如大气的增热和冷却过程、蒸发和凝结过程等等。在各种大气物理过程中，经常发生着风、云、雨、雪、寒、暖、干、湿、光、声、电等各种物理现象。大气中所发生的一切物理现象和物理过程，它们的发生、发展和变化，首先决定于其能量来源——太阳辐射，同时也与大气本身物理特性和下垫面状况有关。研究大气中所发生的各种物理现象和物理过程的学科就称为气象学。

气象学的任务，不仅要研究和掌握大气的变化规律，而且更重要的是根据所掌握的大气变化规律，预测大气的变化和发展过程，使人们在生产实践中能充分利用气象和气候资源，克服不利的气象和气候条件，进而达到控制局部天气和改造气候的目的。

气象学的范围很广，涉及的问题很多，在解决问题的方法上差异也很大，随着科学技术的发展，气象学逐渐分出了许多分支学科。

一个地方某一瞬间大气状态和大气现象的综合称为天气。研究天气及其演变规律，并预测预报未来天气变化的学科称为天气学。

气候则是一个地方多年间发生的天气状态，它既包括平均状态，也包括极端状态。研究气候的形成、分布和变化规律的学科称为气候学。

由于人类活动和各种生物的生命活动，绝大部分在紧靠下垫面附近的空气层中进行，而这个气层的气候主要决定于下垫面（也称为作用面）状况和特性。因此，把在局部地区范围因作用面条件影响而形成的与大气候（即气候）不同的近地气层气候称为小气候，并把研究小气候的学科从气候学中分出，称为小气候学。而把研究近地气层的大气物理现象和过程的学科称为微气象学。

气象学与人类各种活动有着密切的关系，因而逐步形成和发展了许多应用气象学分支。如农业气象学、工业气象学、建筑气象学、医疗气象学、生物气象学、森林气象学、军事气象学、航空气象学和海洋气象学等等。森林气象学是研究森林与气象条件相互影响和作用的科学。

第二节 气象学在林业上的意义

林业工作者主要的任务是培育和管理森林,使林木速生、优质、丰产和永续利用,为社会主义建设提供越来越多和越来越好的林、副产品,以发挥森林的巨大经济效益;同时充分发挥森林在维持和改善生态平衡、保持水土、涵养水源、调节地方气候、净化大气、美化环境、抵御水、旱、风、沙等各种自然灾害,保证农业稳产高产等多方面的巨大生态效益;以及有利于人类健康、休憩、娱乐、旅游等社会福利效益。为了科学地培育和管理好森林,必须掌握森林与外界环境条件相互作用的规律。其中,气象和气候条件如光照、热量、水分和空气是森林生长发育的最基本条件。因此,学习气象学、掌握自然界光、热、水、气等气象因子的变化规律及控制调节方法,气象灾害的产生和预防方法,都是十分重要的。对于林业科技工作者来说,学好气象学的基本理论、基本知识和基本技能,不仅是学好林学理论和技术的基础,而且是为林业生产和科研工作服务的必要工具。

具体到各项林业生产活动与气象学的关系也是很密切的。

在采种工作中,要根据气象及天气条件,预测种实成熟期、采集期,以便及时组织采种。要依据气象及气候条件,作好种实处理和贮藏工作。

在育苗工作中,要根据当地气象及气候条件,灾害性天气预报,采取恰当的耕作、栽培、管理及灾害预防措施,才能培育出高产壮苗。

在造林工作中,首先要根据气候条件作好造林区划和规划。要调查当地气候和小气候特点和变化规律,在划分立地条件类型的基础上作好造林设计,确定好造林树种、造林季节、整地方式、混交类型和方式以及恰当的造林技术,以便做到适地适树,保证造林成活率和保存率,并为以后形成稳定高产和具有良好生态效益的森林打下基础。

在营造防护林时,要根据当地气候资料,确定主要害风方向,设计好林带走向、配置、宽度和树种。

在森林经营工作中,要掌握森林与气候相互作用规律、森林气候的特点,才能确定较好的抚育采伐方式和强度、森林更新方式和主伐方式。

在林木良种选育工作中,要根据地方气候和小气候的特点选择良种优树、种子园地址和母树林位置以及确定经营管理措施,以保证种实优质高产。在林木引种工作中,要根据气候条件相似性和小气候特点进行工作,确定能否引种,以便扩大优良品种栽培范围或成功地引种外来树种。

在森林病虫害防治工作中,要掌握气象及气候条件与病虫害发生的关系,作好预测预报,并利用适当天气条件进行防治,才能收到较好效果。

在护林防火工作中,要依据当地气象资料,确定火险等级,作好森林火险预报,以减少国家和人民财产的损失。

在森林采伐运输工作中,要根据天气条件决定采伐季节、木材运输或流送和做好防洪

等工作。

在城市及工矿区园林绿化工作中，要掌握城市气候特点，气象条件与大气污染的关系，以及园林绿化对净化空气、改善小气候的作用，以便合理进行绿化设计、配置好绿地和栽植行道树与环境保护林。

总之，林业生产活动与气象和气候条件关系很密切。气象学在林业上有着重要的意义。

第一章 大 气

第一节 大气的组成

大气是由多种气体混合组成，此外还包含水汽，一些悬浮在其中的固体杂质及液体微粒。

一、干 洁 空 气

大气中，除了水汽、液体和固体杂质的整个混合气体，称为干洁空气。它的主要成分是氮（ N_2 ）和氧（ O_2 ），约占干洁空气体积的99%（其中 O_2 占20.95%， N_2 占78.08%），加上氩（ Ar ）和二氧化碳（ CO_2 ）（ Ar 占0.93%， CO_2 占0.03%），合计约占干洁空气的99.99%。其他稀有气体如氖（ Ne ）、氦（ He ）、氪（ Kr ）、氙（ Xe ）、氢（ H_2 ）、臭氧（ O_3 ）等的总和仅占0.01%。干洁空气从地面到100km高度，它的成分和各种气体比例是很少变化的。

干洁空气中以氮、氧、二氧化碳和臭氧最重要，与地球生物圈关系最密切。

氮是大气中最多的气体，它能起冲淡氧，使氧化作用不致过于激烈的作用。有的植物通过菌根的作用，可直接将大气中的氮改造为植物体内不可缺少的养料。

氧是大气中次多的气体，是地球上一切生命所必需的。氧还决定着有机物的燃烧、腐烂和分解过程，以及影响到在大气中进行的各种化学反应过程。

臭氧是氧分子在太阳紫外线作用下分解为氧原子，然后又与氧分子化合而成。它在大气中含量极少，分布也不均匀。在近地层中臭氧很少且不稳定。从10km高度开始逐渐增多，在20—30km高度处达最大值，再往上，臭氧含量又逐渐减少，到55—60km高度上就极少了。臭氧能大量吸收太阳紫外线，使臭氧层增暖，影响到大气中温度的铅直分布。同时，也使地球上的生物免受过多太阳紫外线的伤害。

二氧化碳主要来源于燃料的燃烧、有机物的腐烂分解和生物的呼吸作用。这些作用集中在大气底层，因此二氧化碳分布在大气底层20km的气层内。它的现有浓度约为0.033%（330ppm）。在20km高度以上，二氧化碳含量就显著减少了。大气中二氧化碳含量随时间和地点是不同的，大致在一年中是冬季多夏季少，夜间多白天少，城市及工业区多农村少。在大工业城市，空气中二氧化碳含量可达0.05%，甚至0.07%。随着近代工业的发展，大气中二氧化碳含量逐渐增加。由于二氧化碳能强烈吸收地面辐射和放射长波辐射，它的增多将对地面和空气温度产生一定影响。大气中，二氧化碳是植物进行光合作用制造有机物质不可缺少的原料，它的增多也会对提高植物光合效率产生一定的影

响。

二、水 汽

大气中的水汽，来源于江、河、湖、海等水面蒸发，潮湿陆地和物体表面蒸发及植物的蒸腾。因此，随高度的增加而空气中水汽含量则减少。大气中的水汽主要集中在 2—3 km 以下的低层空气里。至 5 km 高度，水汽含量只有地面附近的 1/10，再向上水汽含量就更少了。大气中水汽含量按容积仅有 0.1—4%，虽然数量不多，且随时间和空间变化很大，但它是天气变化的重要角色。如果大气中没有水汽，也就不会产生云、雾、雨、雪、霜、露等一系列天气现象。此外，由于水汽能强烈吸收或放出长波辐射，在蒸发或凝结时要吸收或放出潜热，这些都能对地面和空气温度产生一定的影响。在自然条件下，空气总是含有水汽的。水汽密度小于干空气密度，在温度和气压相同时含水汽的湿空气密度小于干空气密度，因此湿空气比干空气轻。

三、固体杂质和液体微粒

固体杂质是悬浮在大气中的烟粒、盐粒、花粉、微生物、细菌、病毒、孢子和尘粒等等。液体微粒是悬浮于大气中的水滴、过冷却水滴、冰晶等水汽凝结物。它们多集中在大气低层，其含量随时间、地点和高度而异。通常是城市多于农村，陆地多于海洋，冬季多于夏季，随高度的增加而迅速减少。大气中固体杂质和液体微粒使大气能见度变坏，但它们能充当水汽凝结的核心，对云、雨的形成却起着重要作用。同时它们能吸收一部分太阳辐射和阻挡地面放热，对地面和空气温度也有一定影响。

大气中除上述正常所含的成分外，由于现代工业和交通运输业的发展，向大气中排出的废气和粉尘等有害物质，使空气中增加了新的成分，不断污染着大气。在大气中，已产生危害并引起注意的污染物成分约有 100 种。其中影响范围广，对人类和生物界环境威胁较大的主要是各种粉尘、二氧化硫、一氧化碳、二氧化氮、硫化氢、碳化氢和氨等，其中氮氧化物经太阳紫外线照射，发生复杂的化学反应，形成毒性很大的光化学烟雾；硫化物与大气中水汽发生化学反应，产生酸雨降到地面，给森林和农作物生长带来危害。大气污染在许多国家已成为“公害”，威胁着广大人民的生活和健康，对环境、农林植物、动物等也已造成不同程度的危害。

目前，解决大气污染问题的措施，主要有工程措施和生物措施。前者如通过集尘器和清洗器在排气前清除污染物等；在生物措施中，造林绿化是保护环境、净化空气，防止大气污染的重要措施。

第二节 大气的分层

由于地球引力作用，大气质量的 2/3 都集中在大气低层。随着高度增加，空气密度迅

速减小，到大气上层空气异常稀薄。当大气密度等于星际气体密度（气体质点密度为 1 个/cm^3 ，电子浓度为 $10^2 - 10^3 \text{ 个/cm}^3$ ），即是大气上界了。据气象卫星探测资料推算，大气上界大约在 $800 - 1000 \text{ km}$ 高度上。

世界气象组织根据大气温度的铅直分布、扰动程度、电离现象等不同性质，统一规定将大气在铅直方向分为五层：即对流层、平流层、中间层、热成层和外层。

一、对 流 层

是大气圈最低的一层。对流层的厚度比其他各层都薄，在低纬度地区平均为 $7 - 18 \text{ km}$ ，中纬度地区为 $10 - 12 \text{ km}$ ，高纬度地区为 $8 - 9 \text{ km}$ 。

对流层大约集中了整个大气质量的 $3/4$ 和几乎全部水汽，主要的大气物理现象都发生在这一层中，是天气变化最复杂的层次，也是对人类活动影响最大的一层。

对流层有三个主要特征。

（一）气温随高度增加而降低 在不同地区，不同季节，不同高度，气温降低值是不同的。平均每上升 100 m 气温降低约 0.65°C 。

（二）空气具有强烈的对流运动 由于空气的对流运动，高层和低层的空气得以进行交换和混合，使近地面层的热量、水汽和杂质等向上输送，这对成云致雨有重要作用。

（三）温度和湿度的水平分布不均 在寒带内陆上空的空气，因受热较少和缺乏水源，就显得寒冷而干燥。在热带海洋上空的空气，因受热较多，水汽充沛，就比较温暖潮湿。由于对流层中温度和湿度水平分布不均，从而经常发生大规模空气的水平运动。

根据对流层内气流和天气现象分布特点，从下向上又可分为下层、中层、上层和对流顶四层。

下层又称摩擦层或行星边界层。它的范围是自地面到 1.5 km 左右高度。因受地面摩擦和热力的影响，这层空气的对流和不规则的湍流运动都很强。随高度增加，风速增大，气温日变化也很大。由于下层水汽、尘埃含量较多，低云和雾多发生在这里。在下层内还可分出一个贴近地面的副层，称为近地面层。近地面层的高度约由地面至 $50 - 100 \text{ m}$ ，其中 $0 - 2 \text{ m}$ 间的气层又称为贴地层。近地面层是受地面强烈影响的气层，也是人类生活和生物生存的重要环境，对它的研究有着很大的实际价值。

中层是指高度 $1.5 - 6 \text{ km}$ 的一层大气。它受地面影响比下层小得多。气流状况基本上可表征整个对流层空气运动的趋势。大气中的云和降水大都发生在这一层内。这一层顶部气压通常只及地面的 $1/2$ 。大气从对流层的中层开始受地面摩擦影响可忽略不计，因此常把 1.5 km 以上的大气称为自由大气。

上层的范围是从 6 km 高度伸展到对流层顶部。这一层的气温常年都在 0°C 以下。水汽含量较少，各种云都由冰晶或过冷却水滴组成。在中纬度和热带地区，这一层中常出现风速等于或大于每秒 30 m 的强风带，即所谓急流。

对流顶层是对流层与平流层间的过渡层。厚度为数百米至 $1 - 2 \text{ km}$ 。这一层的主要

特征是气温铅直分布成等温或变化很小。对流层顶的气温，在低纬度地区约为 -83°C ，高纬度地区约为 -53°C 。对流顶层对铅直运动的气流有很大阻挡作用，上升的水汽、尘粒多聚集其下，使那里的能见度变坏。

二、平流层

自对流层顶到55km左右高度为平流层。在平流层下层，气温随高度不变或微有上升，到25—30km以上，气温升高较快，到了平流层顶，气温约升至 -3°C — -17°C 。平流层的这种气温分布特征，是与它受地面温度影响很小，并且存在着大量臭氧能强烈吸收太阳紫外线有关。

在平流层中，空气的铅直运动远比对流层弱，以水平运动为主，气流平稳，天气晴好，适于飞机飞行，目前超音速飞机飞行高度已进入平流层。平流层中水汽、尘埃含量已极少，基本无云，但在中高纬度地区的晨昏，在20—30km高度，有时可见到色彩奇异的贝母云。

三、中间层

从平流层顶至85km左右高度。这层特点是气温随高度又迅速降低，顶部气温可低至 -83°C — -113°C 。由于下暖上冷，再次出现空气的铅直运动。在顶部近热成层处的逆温有利于水汽聚集，在夏夜高纬地区有时会出现银白色光芒的夜光云。

四、热成层

又称热层或暖层。范围从中间层顶至500km高度。热成层内空气稀薄，空气分子在太阳紫外线辐射的作用下变为离子和自由电子，空气处于高度电离状态，故热成层又可称为电离层。短波无线电通讯得以进行，电离层对无线电波的反射是一个重要条件。在热成层内，随高度的增加气温迅速升高。据人造卫星的观测，在300km高度上，气温可达 1000°C 以上，500km高度处可达 1200°C ，但自500km以上高度温度变化不大。这是因为所有波长小于 $0.175\mu\text{m}$ 的太阳紫外辐射都为该层中的气体所吸收的缘故。

在热成层内有时可出现极光现象。它是由太阳喷焰中发射的高能微粒子与高层大气中空气分子相撞，使之电离，并在地球磁场作用下偏于两极上空而形成的，其景象异常壮观。

五、外层

或称为散逸层。一般指500km以上的大气层。它是大气的外层，是大气圈与星际空间的过渡地带。由于这里温度高，空气粒子运动速度很快，又因距地较远，地球引力作用很小，因而大气质点不断向星际空间散逸。

第三节 大气的基本物理性质

一、主要的气象要素

气象要素是定性或定量描述大气物理现象和大气状态特征的物理量。它们包括太阳辐射、温度、湿度、气压、风、云、降水、蒸发、能见度和各种天气现象等。下面简要介绍气压、温度、湿度和风这四个主要气象要素。

(一) 气压 地球表面单位面积上所受到的大气压强称为气压，其大小等于单位面积上大气柱的重量。气压单位常用的是百帕 $\cdot$ (hpa)，或以水银柱高度的毫米 (mm) 数表示。气压是随高度增加而降低的。

(二) 温度 表示物体冷热程度的物理量。表示空气冷热程度的物理量称为气温，类似的表示还有地温、树温、水温等。气象上常用的温度单位有：

$$\text{摄氏温标 } (^{\circ}\text{C}) \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (F - 32) \quad (1-1)$$

$$\text{华氏温标 } (^{\circ}\text{F}) \quad t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} C + 32 \quad (1-2)$$

$$\text{绝对温标 } (\text{K}) \quad T\text{K} = 273 + C \quad (1-3)$$

(三) 湿度 是表示物体中水分含量的物理量。表示大气中水汽含量多少的物理量称为空气湿度，类似的表示还有土壤湿度等。气象上常用的表示空气湿度的方法有：

1. 水汽压 (e_w) 大气中所含水汽的分压力称为水汽压。水汽压的单位与气压完全相同，即百帕 (hpa)。在一定温度下，空气中水汽达到最大含量时的水汽压力称为饱和水汽压 (e_w)。实验和理论都指出，在气压一定 ($P=1000\text{hpa}$) 的条件下，饱和水汽压是随温度升高而很快增大的。如表 1—1 所示。

对于纯水面上饱和水汽压与温度的关系可用马格奴斯 (Magnus) 公式表示，即

$$e_w = e_{w0} \cdot 10^{\frac{at}{b+t}} \quad (1-4)$$

式中 e_w 为温度 t 时纯水面上的饱和水汽压； e_{w0} 为 0°C 时纯水面上的饱和水汽压； a 、 b 为经验常数，对于水面 $a=7.45$ ， $b=235$ ；对于冰面 $a=9.5$ ， $b=265$ 。

表 1—1 不同温度下水面上的饱和水汽压

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-30	-20	-10	0	10	20	30
饱和水汽压 (hpa)	0.5	1.2	2.8	6.1	12.2	22.9	42.4
饱和水汽压 (mm)	0.4	0.9	2.1	4.6	9.2	17.5	31.8

饱和水汽压除与温度有关外，还与蒸发面的物态、形状以及蒸发面的溶液浓度等因子

• 以前文献中常用毫巴 (mb)， $1\text{mb}=1\text{hpa}$

有关。同一温度下冰面饱和水汽压比水面小；凹面的饱和水汽压比平面小，平面又比凸面小，随着凸面曲率的增加，饱和水汽压增大；纯水面的饱和水汽压比溶液的大，随着溶液浓度增大，饱和水汽压则减小。

2. 饱和差 (d) 在某一温度下空气的饱和水汽压与空气中实际水汽压之差称为饱和差，它表示空气距离饱和的绝对程度。即

$$d = e_w - e \quad (1-5)$$

3. 绝对湿度 (a) 单位容积湿空气中含有的水汽质量，也就是空气中的水汽密度。

如果 a 的单位取 g/m^3 ， e 的单位为 hpa ，则

$$a = \frac{217e}{T} \quad (1-6)$$

如果 e 的单位为 mm ， a 的单位为 g/m^3 ，则

$$a = \frac{289e}{T} \quad (1-7)$$

上式中 T 为绝对温度，当 $T=289\text{K}$ (或 $t=16^\circ\text{C}$) 时， a 在数值上与 e 是相等的。故在常温下，当要求不很精确时，可以 mm 为单位的 e 值代替 a ，但需注意两者表示的单位是不同的。

4. 相对湿度 (U) 空气中实际水汽压与同温下饱和水汽压的百分比，称为相对湿度。即

$$U = \frac{e}{e_w} \times 100\% \quad (1-8)$$

相对湿度表示空气中水汽含量距离饱和的相对程度。当空气饱和时 $e_w = e$ $U=100\%$ ；未饱和时 $e_w > e$ $U < 100\%$ ；过饱和时 $e_w < e$ $U > 100\%$ 。

5. 比湿 (q) 在一团湿空气中，水汽质量与该团湿空气的总质量之比称为比湿。即

$$q = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (1-9)$$

式中 m_w 为水汽质量， m_d 为干空气质量。比湿 q 与水汽压 e 之间常用关系式为

$$q = 0.622 \frac{e}{P} \quad (1-10)$$

式中 P 为气压， q 单位为千克/千克 (kg/kg)。由公式 (1-9) 可见，对某一团空气而言，不论其体积如何变化 (膨胀或压缩)，只要不发生凝结，其比湿都保持不变。因此在讨论空气铅直运动时，常用比湿来表示空气湿度。

6. 露点 (t_d) 当空气中水汽含量不变，且气压一定时，使气温降低到达水汽饱和

时的温度称为露点温度，简称露点，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

实际气温(t)与露点(t_d)之差表示空气距离饱和的程度。当 $t > t_d$ 时，表示空气未饱和；当 $t = t_d$ 时，已饱和；当 $t < t_d$ 时为过饱和。

(四) 风 空气的水平运动称为风。风是一个表示气流运动的物理量。风是矢量，包括风向和风速。风向是指风的来向，常用8个或16个方位来表示。风速是指单位时间内空气水平移动的距离，通常用每秒米(m/s)或风力等级来表示。

二、状态方程

(一) 干空气的状态方程 气体状态常用体积(V)、质量(m)、压强(P)和温度(T)来表示。对于理想气体的状态变化，是当气体质量为 m ，摩尔质量为 μ 时，压强和体积的乘积，除以它的绝对温度所得的商是不变的。即

$$PV = \frac{m}{\mu} R^* T \quad (1-11)$$

式中 R^* 称为通用气体常数，它等于 $8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。(1-11)式是理想气体的状态方程。凡是严格符合这个方程的气体，叫做理想气体。实际上理想气体并不存在。不过在通常大气温度和压强条件下，干空气和未饱和的湿空气都十分接近理想气体。故上式对于实际大气是适用的。

在气象上常用单位体积的空气块作为研究对象，故

$$P = \frac{m}{V} \cdot \frac{R^*}{\mu} T \quad (1-12)$$

式中 $\frac{m}{V}$ 就是密度 ρ ，用 R 表示 $\frac{R^*}{\mu}$ ，则

$$P = \rho R T \quad (1-13)$$

R 称为比气体常数，是对一克气体而言的，它的取值与气体性质有关。对于空气密度为 ρ_d ，比气体常数 R_d 为

$$R_d = \frac{8.31}{28.966} = 0.287\text{J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

于是干空气状态方程可写为

$$P = \rho_d R_d T \quad (1-14)$$

(二) 湿空气的状态方程 大气总是含有水汽的，含有水汽的空气称为湿空气。假设湿空气的温度为 T ，总压力为 P 时含有的水汽分压力为 e ，此时干空气压力为 $P - e$ ，干空气密度 ρ_d ，水汽密度为 ρ_w （即绝对湿度）。则湿空气密度为 $\rho_d + \rho_w$

$$\rho_d = \frac{P - e}{R_d T} \quad (1-15)$$