

氣象學

陈佑淑 蒋瑞宾



高等教育出版社

p4
C25

气 象 学

陈佑淑 蒋瑞宾 编

气象出版社

内 容 简 介

本文系统地讲述了气象学的基础知识。全书内容共分九章，除绪论外还有大气概述，大气静力学，空气的水平运动，太阳、地面和大气的辐射，大气热力学基础，大气静力稳定度，地面和大气的热状况，云雾和降水，大气中的光电声现象等。每章后面都附有复习题和练习题。本书侧重于基本原理的讲解，适合于大专院校气象专业函授生和自学考试生的自学进修。并可供大专院校农林、水文、地理、环保等专业的师生参考。

气 象 学

陈佑淑 蒋瑞宾 编
责任编辑 刘生长

● ● ●
气象出版社出版

(北京西郊白石桥路66号)

北京市昌平环球科技印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经

● ● ●
开本：850×1168 1/32 印张：12.5 字数：310千字
1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷
印数：1—2500 定价：2.65元
ISBN 7-5029-0262-7/P·0158(课)

前 言

本教材的读者对象主要是大专院校气象专业的函授生。近年来气象专业的函授生有两部分人组成：一部分曾在中等专业学校进修过气象专业或在基层台站干过气象业务工作，他们有一定的专业基础知识；另一部分人则从未接触过气象，对于气象学原理需要从头学起。为了适应这两部分人的需要，本教材必须既重视基本知识和基本理论的系统讲解，让初学者获得系统的知识；同时又能反映近代科学的新动向，在理论上有一定的深度，使具有一定专业基础的学生学了以后有所收获。另外，还要注意物理概念叙述的条理性，公式推导的简洁性，以适合于函授生自学。这是我们编写这本教材的主导思想。

本教材在内容上重点突出大气静力学，空气的水平运动，太阳、地面和大气的辐射，大气热力学基础，大气静力稳定度及云雾和降水等章节基本原理的讲解。

本教材是在总结多年教学经验的基础上，参照了北京气象学院《气象学》讲义并参考了国内外一些有关气象学方面的教材或参考材料编写的。初稿于1985年由蒋瑞宾、陈佑淑、王强等三同志完成，已在北京气象学院大专函授班和干部进修班各试用了三届。在1987年组织的评审会上，北京大学副教授尹宏同志，南京气象学院副教授曹文俊同志，北京气象学院副教授章澄昌同志和中国人民解放军空军气象学院副教授沈春康同志提出了很多极其宝贵的意见。最后由陈佑淑、蒋瑞宾两同志修改后定稿。在此我们向上面提到的四位副教授的热情帮助表示诚挚的感谢。

编者 1988. 11

目 录

绪论	(1)
第一章 大气概述	(7)
§1 大气的组成	(7)
§2 大气的结构	(14)
§3 气象要素	(26)
§4 空气的状态方程	(37)
复习题和练习题	(42)
第二章 大气静力学	(44)
§1 大气静力学基本方程	(44)
§2 压高公式	(52)
§3 气压的时空分布	(62)
复习题和练习题	(76)
第三章 空气的水平运动	(78)
§1 大气运动方程	(78)
§2 自由大气中的风	(91)
§3 行星边界层中的风	(106)
§4 大气环流模式及地方性风	(110)
复习题和练习题	(115)
第四章 太阳、地面和大气的辐射	(118)
§1 太阳和地球	(118)
§2 辐射能的概念和度量	(128)
§3 热辐射的基本定律	(136)
§4 太阳辐射	(141)
§5 地面和大气的辐射	(160)
§6 辐射差额	(164)

复习题和练习题	(170)
第五章 大气热力学基础	(172)
§1 热力学第一定律在气象上的应用	(172)
§2 干绝热过程	(176)
§3 饱和湿空气的绝热过程	(185)
§4 温度-对数压力图解及其应用	(189)
复习题和练习题	(204)
第六章 大气静力稳定度	(206)
§1 大气静力稳定度的判定法 (气块法)	(207)
§2 大气中的不稳定能量	(216)
§3 卷挟过程对稳定度的影响	(224)
§4 影响大气层结稳定度的其它过程	(227)
复习题和练习题	(235)
第七章 大气的热状况	(237)
§1 地球表面和地气系统的热量平衡	(237)
§2 地面温度变化	(247)
§3 大气边界层温度	(253)
§4 自由大气中的温度	(258)
§5 大气中的逆温	(260)
复习题和练习题	(265)
第八章 云雾和降水	(266)
§1 水相变化	(266)
§2 饱和水汽压	(270)
§3 云滴的形成与凝结增长	(281)
§4 云雾形成的基本过程	(288)
§5 云	(292)
§6 雾	(302)
§7 云雾的微物理结构	(306)
§8 降水	(312)
§9 人工影响云雾降水	(325)
复习题和练习题	(330)

第九章 大气中的光、电、声现象	(332)
§1 大气中的光现象	(332)
§2 大气中的电现象	(358)
§3 大气中的声现象	(371)
复习题和练习题	(376)
参考文献	(381)

绪 论

一、气象学的定义

包围地球的空气圈称为地球大气。研究大气结构、组成、物理现象、化学反应、运动规律及其它问题的科学称为大气科学。气象学是大气科学的主要部分，也是地球物理学中的重要分支。气象学是研究大气现象（风、云、雨、雪、干、湿、雷、电等）及其状态（温度、压强、湿度、密度等）变化规律（包括动力的、物理的、化学的及生物学的），以便掌握规律合理地利用自然和改造自然的科学。

近三、四十年来，气象科学迅速发展，使得它的内容不断扩展和丰富，研究对象已超出了可见的大气现象，研究的问题已包含了大气物理以外的大气化学问题，研究的领域已扩展到地球以外的行星和卫星大气，所以“气象学”这门学科的名称已逐渐有改称“大气科学”的趋势。

二、气象学的主要分支

大气科学按传统可分为两门学科——气象学与气候学。

气象学是大气科学的主要基础之一，是涉及到许多学科（如农、林、牧、航空、航海、工业、建筑、医疗等）的应用基础科学，按传统又可分为三个分支：

1. 物理气象学 研究大气的组成和结构，大气中的辐射过程，地球的热量收支，大气光学、电学、声学、云物理学，降水物理学，人工影响天气学以及高层大气物理学等等问题。

2. 天气学 综合广阔地理空间上同时刻大气运动状况进行分析并作出天气预报的学科，预报部分称天气预报学，分析部分为天气分析学。有了大型快速电子计算机以后，可利用它通过求解

描写大气运动规律的流体力学、热力学方程进行天气和天气形势的预报，现已成为一门独立的学科——数值预报学。

3. 动力气象学 是把热力学原理应用于大气热状态及其热力过程的大气热力学与以动力学理论、观点、方法研究大气现象的大气动力学相结合发展成的一个分支。

气候学是研究气候的形成、分布、变化规律及其与人类活动相互关系的学科。一个地区的气候条件通常用该地区的气温、降水量、日照等气象要素的多年平均值与极端值来表示。按传统气候学也可分为三个分支：

1. 物理气候学 是研究气候的基本成因的。目前由于动力气象学的基本原理在气候学研究中得到了广泛的应用，已发展成一门新的分支——动力气候学。

2. 描述气候学 系统地阐述全球性、地区性、局部及微尺度的气候统计特征的分支。

3. 应用气候学 利用气候统计方法结合物理性气候模拟以解决实际问题的学科，如建筑气候等。

大气科学的内容很广泛，大气中各种变化过程性质不同，研究的方法差别也很大，因此，一般还根据研究内容和研究方法的差别来分类。例如从研究方法分，可将气象学分为理论气象学——它包括动力气象学和大气物理学（又可分为近地层大气物理学、自由大气物理学和高层大气物理学等）和实验气象学——它包括大气探测、高空气象学和无线电气象学（应用无线电与雷达测天）等。如从应用观点出发，则有农业气象学、水文气象学、污染气象学、航空气象学、航海气象学及军事气象学、医疗气象学等等。从地理分布出发可分为热带气象学、极地气象学、南半球气象学等。近年来由于研究其它行星外层大气及太阳能的变化造成天气变化又派生出一门新的分支——宇宙气象学。

三、现代气象科学与技术的发展趋势

在过去很长的一个历史时期中，气象科学主要停留在描述性

和经验性的阶段。17世纪以前,人们依靠肉眼观察对天气和气候现象积累了丰富的经验。例如,我国劳动人民远在公元前1217年,于殷墟的甲骨文字中就记述着3月20日至29日十天之内的天气。周代的诗经中就有关于季节和天气变化的谚语:“上天同云、雨雪雰雰”(冬季如有满天一色的阴云,预兆下雪)。先秦时期的科学文献《夏小正》上,已有气象和物候的专述。在我国古代气象知识在农业、交通、军事、建筑等许多方面都得到了很好的应用,特别是对农业的发展起到了积极的推动作用。但到17世纪前,人们对天气和天气变化的认识还处于经验和知识的积累阶段。

自从温度表、气压表、风向风速仪及毛发湿度表等测量仪器出现之后,气象的观测和研究开始进入了定量描述的阶段,这一阶段大致从17世纪到19世纪初叶。由于当时地面及高空气象仪器的陆续发明,使人们对地方气候和世界气候有较深入的了解。天气变化在气压上的反映,使人们认识到气压变化在天气变化中的重要作用,为天气学的发展提供了线索。而定量气象规律的发现也为促进流体力学和动力气象学的发展创造了条件。

19世纪初到20世纪中叶为对大气现象进行系统研究的阶段。各种大气现象不再被认为是孤立现象,而是三维的、内外上下有机关联的综合体系中的表现,既有其历史演变,也有其发展规律。19世纪初叶德国H.W.布兰德斯第一张天气图的创制、19世纪中叶法国J.J.勒威耶天气图的业务使用、20世纪20年代挪威学派气团及锋面理论在天气分析预报上的应用,是这个阶段的主要标志。在天气学发展的推动下,天气气候学、动力气象学研究的进展十分显著,数值天气预报研究也有一定的发展。

20世纪中叶以后至今,随着科学技术的发展,尤其是在以原子能、空间技术和电子计算机为标志的工业技术革命的影响下,气象科学与技术的许多方面无论是在深度与广度上都加快了前进的脚步。目前的发展趋势是:

1. 气象业务技术的自动化 例如,大气探测技术越来越从

人工直接探测发展到自动化、遥感化；其它如资料收集、传输、加工及分析预报等均在向自动化发展，目前自动化正在渗透到气象业务的各主要方面，而且，把自动化观测技术、数据处理技术、通信传输技术以及客观分析和自动化预报的制作与发布结合成一个整体，构成一个完整的系统，利用这种系统，可以使气象科技人员从繁重的日常工作中解脱出来，从而进一步提高气象业务工作的效率。

2. 气象科学的数学化 例如，天气分析和预报从手工分析和主观定性预报发展为客观、定量和自动化的分析与预报。气象科学的其它领域，如气象观测、气候学、云雾物理学以及农业气象等学科的研究也正在广泛地应用数学工具，向客观化和定量化进展。

3. 气象科研规模日益扩大 这是由大气科学本身的特点所决定的。某一局部地区的天气和气候与大气环流甚至全球环流有关，所以，要研究大气状态的变化规律，需要大范围甚至全球的观测资料，这就势必使气象科学的科研组织规模日益扩大，走向国际合作。例如，目前全球大气研究集中于一个大规模的国际研究计划——全球大气计划（通过国际科学家联合会理事会和世界气象组织由大气科学家和各国气象局共同组织的），其目的是研究关于全球的环流和运动特性的一些基本问题。

四、气象事业引起人们兴趣的重要因素

1. 人类活动对气候和大气环境的影响已成为非常突出的中心问题。例如，人类活动对大气环境的影响。随着现代化战争和现代化工业和航空事业的迅速发展以及城市人口的大量密集，各种污染物大量地进入大气，使大气环境遭受到严重的污染，所以，迫切需要研究污染物对人类短期和长期的影响，控制污染，保护环境成为当务之急。又如，人类活动对气候的影响。由于大气中二氧化碳和其它微量气体如甲烷、氧化氮的大量增加，全球平均气温正在升高，据科学家们估计，到2030年左右大气温度可能上

升 1.5° 到 4.5°C ，其后果将导致海平面上升20—140厘米，沿海城市将发生海水倒灌，沿海一带土壤盐渍化加重，将对我国上海等滨海城市和太湖流域的低洼地区产生巨大的灾害性影响。

由于气候变暖，世界降雨量的分配将变得更不均匀，中纬度大陆，干旱频率增大，沙漠化进程加速。专家们认为，目前世界上半干旱、干旱、沙漠化的地区约占全球陆地总面积的三分之一，并且有继续发展的趋势。我国目前干旱、半干旱及沙漠化地区约占全国面积的50%，并且还在发展，对今后四化建设很不利。国际上对此问题十分重视，我国科学家（叶笃正等同志）建议政府组织科技力量，认真研究全球气温上升对我国境内的影响程度，以便及早采取对策，对改善我国气候、治理干旱和沙漠化的措施也提出了建议，如：开源节流，修建水库，提高自然水的利用率，营建防沙林，封沙育草、保护植被等。

2. 面对世界人口的迅速增长，世界粮食资源问题使我们更加意识到气候变动的严重影响，特别是对发展中国家的影响。例如，1985年非洲大陆发生了本世纪以来罕见的旱灾和饥荒。所以，气候的变动及其预测成为迫切需要研究的问题。

3. 人造卫星和电子计算机的发展给大气研究提供了更有力的工具，使人们有可能把大气作为一个整体来研究，使现代大气科学显示了强大的生命力，并提供了解决复杂问题的攻坚基础。

气象卫星的有利空间位置，提供了观测和监视全球范围内大气的条件。实践说明，气象卫星资料对改进天气预报提高预报准确率，特别是加强对灾害性、关键性天气的监视、预报具有显著的作用。

现代科学与技术的主要发展趋势是气象科学的数学化和气象技术的自动化，这两方面的发展均和计算机的发展紧密地联系在一起。高速电子计算机可用来对复杂的物理问题进行数值模拟。

大气探测技术随着现代科学的迅速发展已有了重大改进。十多年来，声雷达、红外辐射计、微波辐射计、多卜勒雷达、激光

雷达等相继出现，许多主动和被动的遥感设备有了很大的发展，搜集了过去难以得到的资料，创造了研究方法，更深刻地了解到大气现象的物理本质，拓宽了大气物理学的研究领域。

五、当前气象业务和科学技术工作面临的新课题

尽管气象科学有这样大的进步，但当前气象界的活动和预报质量还没有提到社会所要求的程度。例如，随着工业的迅猛发展，特别是新能源的开发利用，向大气释放的各种污染物日益增多，对我国大气环境质量的监测和大气化学的研究已成为日益迫切的重大课题。又如民航运输的发展，高速喷气客机的增多，使得大气低层风切变的监测和研究成为极待解决的又一个重要课题。

另外，如加强对流灾害性天气的监测预报；台风的发生发展及其移动规律和预报方法的研究；南方冻害和连阴雨天气的研究；大气环流异常以及长期天气过程和气候变化的物理成因的研究；适用于我国的长期数值天气预报和气候模拟动力学模式的研究；人类活动对气候变化的影响等等研究课题，都等待我们去完成，这些科研课题的完成，将大大推进气象科研事业的发展，加快气象现代化建设的步伐。

总之，气象科学是一门难度很大的科学，它所处理的现象不但范围很广，而且是在各种不同的尺度上发生作用，并且以非线性的方式相互作用着。因此，在不同的发展阶段我们只能期望在有限的几个领域内取得某些进展。随着现代科学技术的发展，气象科学的装备和研究手段不断的得到更新与完善，气象科学也必然和其它科学一样，会在不久的将来取得更大、更加全面的发展。

第一章 大气概述

地球是由水圈、岩石圈、大气圈及生物圈所组成。包围地球的气体外壳称为地球大气，简称大气。大气的总质量约为 5.136×10^{18} 千克，仅相当于地球质量的百万分之一，为地球水圈质量的三分之一。由于地球引力的作用，大气质量的 $1/2$ 集中在 6 千米高度以下， $3/4$ 的质量集中在 10 千米高度以下，99% 的质量集中在 35 千米高度以下。

大气是一种无色无味由各种气体及悬浮在空中的液态和固态微粒所组成的混合物。地球上一切有生命的东西都离不开大气，大气对地球上的生物有着重要的作用。同时在大气中进行着各种不同的物理过程，产生着各种不同的物理现象。大气中有时风起云涌，雨雪纷飞，有时云消风静，晴空蔚兰。这些过程和现象的发生发展，直接或间接地与大气的成份、结构、状态有关，同时直接影响着人类的活动，所以对大气的研究是非常重要的。本章将着重对大气的成份及大气的基本物理性质作以概述。

§1 大气的组成

自地球形成以来，在它 46 亿年的生命演化过程中，大气的成份和结构有了很大的变化。一般认为，大气历史的演化，经历了最初可能以氢为主也可能是以氢、碳、氮、氧的化合物甲烷 (CH_4)、氨 (NH_3) 和水汽为主的原生大气。这与土星、木星上目前的大气成份类似。第二阶段主要是以二氧化碳、一氧化碳、水汽、甲烷为主的次生大气，这与金星、火星上的大气类似。地质学家探明，在 3 ~ 2 亿年以前，植物生命的原始形态已发展到开始通过光合反应释放极少量的氧。并认为这类早期的生命形式

是在液水环境中发展的。

当大气中氧逐渐增加时，就导致了高层大气中臭氧层的形成，从而过滤掉太阳辐射中的紫外部分。随着臭氧层的发展，透过大气到达地面的紫外线愈来愈少，逐渐的使植物移向液面，最后出现在陆地上。植物的光合作用使二氧化碳逐渐减少，氧气逐渐增多。

从火山喷发出来的氮，有1/5进入到地壳的硝酸盐中，由于氮的化学惰性，它在水中的不易溶解，所以大部分仍保留在大气中，因此氮的含量在大气中就占了很大的比重。大气中的其它微量成分，有的是火山喷发进入大气，有的是地球固体部分放射性物质衰变的副产品，更多的则是随着人类空间活动的增加及工业、交通运输的发展使大量的污染物进入大气。这就是目前以氮和氧为主要成份的现代大气。

由于大气中存在着空气的对流运动、湍流运动和分子扩散，因此不同地区不同高度的空气要进行混合。在大气的低层，空气分子运动的平均自由程很短，湍流混合作用要比分子扩散混合作用大得多，以湍流混合过程为主，在此高度范围内大气的组成与高度无关，气体均匀混合。在100千米高度附近，分子扩散与湍流混合两种作用大小差不多。在远高于100千米的高空，分子扩散起主要作用。从湍流混合到分子扩散的过渡地带称为“湍流层顶”，高度大约在100千米左右，通常把湍流层顶以下的均匀混合区称为均匀层，此层以上称为非均匀层。

对从地面到100千米高度的大气来说，可以看做是由于洁大气、水汽及气溶胶质粒等三部分组成的。

一、干洁大气

通常把不包含水汽的纯净大气称为干洁大气。根据对地面及30千米以下低层大气的抽样分析，证明了组成干洁大气的主要成份是氮、氧和氩。这三种成份约占干洁大气总容积的99.9%，还有少量的二氧化碳、臭氧、各种氮氧化物以及其它一些惰性气

体，从地面到90千米高度，空气的主要成分氮、氧、氩、还有微量的惰性气体，氦、氖、氫及氙等之间大致保持固定的比例，基本上不随时间、空间变化，称为常定成份。其它一些气体在大气中所占的比例随时间、地点而变，称为可变成份。

干洁大气中各种气体所占比例以及主要性质如表1.1和表1.2所示。

由表 1.1 看出，干洁大气中的主要成份是氮、氧和氩，就容积来说分别占总容积的78.09%、20.95%和0.93%，这三种气体总计占整个大气容积的 99.9% 以上，其余气体所占总容积不到 0.1%。同时可以从表中看出干洁大气的分子量为 28.966 接近于大气的主要成份氮的分子量 (28.016)。另外大气中绝大多数

表1.1 干空气的成份(25公里高度以下)

气 体	空气中的含量		分子 量	临界温度 (°C)	临界压强 (大气压)
	按 容 积	按 质 量			
氮 N ₂	78.09	75.52	28.016	-147.2	33.5
氧 O ₂	20.95	23.15	32.000	-118.9	49.7
氩 Ar	0.93	1.28	39.944	-122.0	48.0
二氧化碳 CO ₂	0.03	0.05	44.010	31.0	73.0
氦 He	1.8×10^{-8}		20.183	-228.0	26.0
氢 H ₂	5.24×10^{-4}		4.003	-257.9	2.3
甲烷 CH ₄	2.2×10^{-4}		16.04	-82.6	45.4
氪 Kr	1.1×10^{-4}		83.700	-63.0	54.0
氙 Xe	5.6×10^{-5}		2.016	-240.0	12.8
一氧化二氮 N ₂ O	5.0×10^{-5}		44.016		
氡 Rn	8.7×10^{-6}		131.300	16.6	58.2
臭氧 O ₃	1.0×10^{-6}		48.000	-5.0	92.3
干空气	100	100	28.966	-140.7	37.2

表1.2 干空气的特性

密度	当 $T=273\text{K}$ $p=1013.25\text{hPa}$ 时 $\rho=1.293\text{千克}\cdot\text{米}^{-3}$ 当 $T=273\text{K}$ $p=1000\text{hPa}$ 时 $\rho=1.276\text{千克}\cdot\text{米}^{-3}$
比热	定压比热 $c_p=1004\text{焦耳}\cdot\text{度}^{-1}\cdot\text{千克}^{-1}$ 定容比热 $c_v=717\text{焦耳}\cdot\text{度}^{-1}\cdot\text{千克}^{-1}$ $K=\frac{c_p}{c_v}=1.4$
导热率	于实验室中(分子的) $\lambda_m=2.40\times 10^{-2}\text{焦耳}\cdot\text{米}^{-1}\cdot\text{秒}^{-1}\cdot\text{度}^{-1}$ 于大气中(乱流的) $\lambda_t=3.35\times 10^3\sim 4.19\times 10^3\text{焦耳}\cdot\text{米}^{-1}\cdot\text{秒}^{-1}\cdot\text{度}^{-1}$

气体的临界温度都低于自然情况下大气中可能出现的最低温度，个别气体如二氧化碳的临界温度虽然较高，但其对应的临界压强大大超过其实际分压强。因此所有组成干洁大气的成份在自然情况下都呈气体状态。

表1.2列举了干空气的其它一些物理特性。干空气的密度是温度和气压的函数，在标准情况下，它约为水密度的1/800，其定压比热约为水的1/4。平静的空气是热的不良导体，它的导热率仅为水的20~30分之一。但当空气乱流混合作用强烈时，它的导热率会增大几十万倍。

氮和氧是大气中最丰富的气体，对于生物具有重大意义。氮是一种不活泼的气体，虽然植物不能吸收大气中的氮，但豆科植物能借其根瘤菌的作用，直接利用大气中的氮素，氮的氧化物也可随降水进入土壤，供给植物需要。另外氮是工业上用的硝酸，农业上用的氮肥的重要成份。氧不但为生物呼吸所必需，而且是很多主要化学反应所不可缺少的物质，决定着有机物的燃烧、腐蚀及分解等过程。

在干洁大气中臭氧和二氧化碳含量虽然很少，但它们的存在对人类活动及天气变化起到很大的影响。臭氧是氧的同素异性体，呈三原子结构(O_3)。高空臭氧的形成主要是氧分子吸收了波长在0.1微米~0.24微米(1微米=10⁻⁴厘米)的太阳紫外辐射后形成氧原子($\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{O}$ ，式中 $h\nu$ 是光子能量， h 是普朗克常数， ν 是光子频率)，而后氧原子在第三种中性粒子(M)的参