

☆

大气物理学基础

☆

许绍祖 主编

气象出版社

☆

大气物理学基础

许绍祖 主编

蒋龙海 沈春康 章澄昌 编
陈月娟 许绍祖 曹文俊

气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书是高等院校气象和气候等非大气物理类专业的“大气物理学基础”课的教材。

本书全面、系统地描述了大气物理学的概貌，概念准确、叙述简明。每章后均附有一定量的复习题、思考题和练习题，对于掌握、巩固和深化所学内容是很有帮助的。

本书可供高等院校大气物理和非大气物理专业的师生以及从事大气物理方面研究的科技工作者阅读参考。

大气物理学基础

许绍祖 主编

蒋龙海 沈春康 章澄昌 编
陈月娟 许绍祖 曹文俊

责任编辑 林雨晨

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路40号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 21 字数: 540千字

1993年5月第一版 1993年5月第一次印刷

印数: 1—4200

ISBN 7-5029-1161-8/P·0539 (课)

定价: 6.60元

前 言

本书是高等院校气象和气候等非大气物理类专业的“大气物理学基础”课的教材。

作为专业基础课的教材，本书将全面系统地介绍大气物理学各个方面的基础知识和基本理论，为学生描述大气物理学的概貌。本书力求概念准确，叙述简单、明晰，为学习后行课打下坚实基础。与此同时，鉴于有些领域在以后的课程中不再述及，本书将适当拓宽取材的广度并作必要的深入阐述，以适应将来工作的需要。

由于各校课程学时数不尽相同，在使用本书时，教师可根据各自的具体情况取舍内容。

每章后面都附有一定数量的复习题、思考题和练习题，学习时可选做其中的一部分，将有助于掌握、巩固和深化所学内容。

1988年高等学校气象类教材编审领导小组在成都召开的会议上，讨论了本书编写的大纲，次年组成编写小组具体负责本书的编写工作。分工如下：绪论及第七章，许绍祖；第一、二两章，蒋龙海；第三、四两章，沈春康；第五章，章澄昌；第六章，陈月娟；第八、九两章，曹文俊。许绍祖为全书主编。

本书大部分插图由石宗祥、吕焕英、王锡泉同志绘制，在此谨致谢意。

由于水平和经验等方面的原因，舛误和不当之处在所难免，热诚希望读者指正。

编者

1991年5月

目 录

前言

绪论	(1)
第一章 大气概述	(7)
§1 大气组成	(7)
§2 大气铅直分层	(27)
§3 空气状态方程	(34)
§4 主要气象要素	(37)
§5 气团和锋	(47)
习题	(53)
第二章 大气静力学	(55)
§1 大气静力学方程	(55)
§2 压高公式	(59)
§3 气压场的基本型式	(67)
§4 气压的时空分布	(80)
习题	(88)
第三章 大气热力学	(90)
§1 热力学的一些基本概念	(90)
§2 热力学基本定律的应用	(104)
§3 埃玛图的特性及用途	(122)
§4 可逆干绝热过程	(132)
§5 可逆湿绝热过程与不可逆假绝热上升过程	(139)
§6 等压的凝结、蒸发过程	(146)
§7 绝热混合过程	(152)
附录 温熵图简介	(165)

习题	(170)
第四章 气层静力稳定度	(176)
§1 气块法	(177)
§2 薄层法	(189)
§3 空气水平卷入对气层静力稳定度的影响	(195)
§4 整层升降对气层静力稳定度的影响	(203)
习题	(209)
第五章 大气中辐射能的传输	(212)
§1 辐射的基本概念	(212)
§2 热辐射基本定律	(222)
§3 大气对辐射能的吸收	(228)
§4 大气对辐射能的散射	(236)
§5 太阳辐射及其在大气中的传输	(248)
§6 大气中的长波辐射传输	(278)
§7 地面、大气、地-气系统的辐射收支和全球热量 平衡	(290)
§8 气温的变化和分布	(299)
附录: Elsasser辐射图及其应用	(313)
习题	(319)
第六章 大气动力学基础	(326)
§1 旋转地球上的大气运动方程	(326)
§2 大气中的平衡运动	(340)
§3 地转风随高度的变化——热成风	(347)
§4 大气中的非平衡运动——地转偏差	(352)
§5 连续方程及其初步应用	(362)
§6 大气运动的主要形态及其与天气演变的关系	(371)
§7 旋转地球上大尺度大气运动的特征	(391)
§8 风的空间分布及其随时间的变化	(396)
§9 大气边界层	(401)

习题	(412)
第七章 云、雾和降水物理学	(416)
§1 形成云的宏观过程	(417)
§2 主要云属的形成和宏微观特征	(427)
§3 云雾形成的微物理过程和云滴的凝结增长	(447)
§4 云中冰晶的产生、形状和凝华增长	(462)
§5 云粒子的碰并增长	(472)
§6 降水的形成过程	(483)
§7 冰雹	(492)
§8 人工影响云、雾和降水	(501)
习题	(505)
第八章 大气光学、电学和声学	(507)
§1 大气中的光学现象	(507)
§2 声波在大气中的传播	(551)
§3 大气中的电现象	(565)
习题	(591)
第九章 高层大气物理简介	(593)
§1 高层大气的物理结构	(593)
§2 臭氧层	(602)
§3 电离层	(617)
§4 磁层	(633)
§5 极光	(644)
习题	(650)
主要符号	(651)
常用数据	(655)

绪 论

地球的外层是空气，称为大气层或大气圈。大气层所包围的是由海洋、江河和湖泊等组成的水圈，和由土壤及岩石所组成的岩石圈以及生活在这三圈之中的动植物和各种形态的生命，即所谓生物圈。这四圈处于不断的运动之中，产生了种种自然现象和过程。诸如：冷热干湿、风霜雨雪、江河奔流、沧海桑田、山崩海啸……等等，它们带给人类的不仅有良好的生存环境也有各种自然灾害。为开发、改造自然，人类需要对自己生活其上的地球进行研究，这就是地球科学的由来。

大气圈、岩石圈和水圈是地球科学的研究对象，生物圈则是生命科学的研究对象。

地球科学的任务在于揭示地球本身的发展规律，揭示人类活动与地球环境相互作用的效应，从而为优化开发、利用地球资源、防治自然灾害、保护和优化生态环境，为国民经济发展提供基础理论和资料。地球科学有许多分支学科，主要有地理学、海洋学、地质学和大气科学等。

大气科学，以大气圈为研究对象。大气的状态(冷暖干湿，有害气体的分布等)和发生在其中的各种物理的和化学的过程和现象(如大风、暴雨、冰雹和雷电等)对人类的工农业生产、交通运输、军事活动和生活的各个方面有着密切的关系。因此人们渴望揭示大气状态变化的物理和化学过程，以及发生这些过程的机制和规律，提高人类对未来天气的预测和对灾害性天气的防御能力，并进一步促进对大气资源的开发和有利条件的利用。这些也就是

大气科学的任务。另一方面，人类活动对大气状态和大气过程也是有影响的。例如工业排放物对大气环境的污染，大气中温室气体（二氧化碳和甲烷等）含量的提高使全球气温上升，大片油田燃烧向大气排放大量固体粒子从而改变大气的辐射热收支以及人们常议论的“核冬天”等，这些问题的研究也是大气科学的任务。

迄今为止，人们对大气的研究，偏重于物理现象和过程方面。如各种尺度的大气运动，大气热能的传输（辐射能、湍流热通量和相变潜热），水的相变（云、雾、雨、雪的产生，大气的水份循环）以及各种大气光、电、声现象。近年来，大气中的化学过程也愈来愈受到人们的注意。

大气科学由大气动力学、大气物理学、天气学、气候学、大气探测学以及大气化学等基础学科组成。这些基础学科在各个领域的应用形成了大气科学的另一个分支——应用气象学。应用气象学有许多分支。这些学科的主要内容如下。

大气动力学：以流体力学和热力学为基础研究大气的动力学特性和运动规律。对各种尺度天气系统的发展和移动作出动力学的分析。如大尺度（水平范围 1000km 以上）的大气潮汐、长期大气环流、大气长波、季风环流、气旋和反气旋等；中尺度（几十至几百 km）的海陆风、大雷暴、飑线和中尺度切变线等；小尺度（40km 以下）的局地雷暴、山谷风和龙卷等。

大气物理学：研究大气中各种物理现象和过程的分支学科。内容很广，有很多分支。如研究辐射能在大气中传输过程的大气辐射学；研究水份相变和云雾降水形成过程的云雾和降水物理学；研究大气中光学、电学和声学的分别是大气光学、大气电学和大气声学；研究大气中各种热力过程的大气热力学；研究高层大气中各种物理现象和过程（如电离、极光、臭氧和磁层等）的高层大气物理学；研究大气边界层（约 1km 厚）中物理过程的大气边界层物理学等。

天气学：天气是指瞬时的大气状态。常用各气象要素（如温

度、湿度、压力、风速、云况和各种大气现象)的综合来表示。天气学是研究天气变化的物理本质和发展规律,并预报未来天气的学科。

气候学: 研究气候形成和气候特征时空分布的学科。一地的气候是指该地在某一时段内大量天气过程的综合特征,不仅包括该地区多年来经常发生的天气状况,而且也包括偶尔出现的极端天气状况。按所研究的空间尺度分类有大气气候学、中气候学和小(微)气候学;按研究时段分有古气候学、历史时期气候学和近代气候学等。

大气化学: 研究大气各种组分的形成、演化、输送和转化机制的学科。当前最引人注意的是大气污染化学。因为工业发展所造成的大气污染不断恶化人类的生活环境(如光化学烟雾的形成和平流层内臭氧层的破坏)。为防治这种污染,大气化学愈来愈受到人们的重视。

大气探测学: 获取大气状态和过程信息的学科,涉及观测仪器和观测方法二方面的问题。在地面用仪器测定各种气象要素(如气温、气压、地面风向风速和空气湿度等)和目测各种天气现象是地面气象观测的主要内容,用飞行器携带仪器测定高空气象要素是高空气象观测的主要课题。随着科学技术的进步,无线电、微波、红外、计算机和卫星等技术的引进,大大提高了大气探测的自动化水平和效率,特别是各种雷达机和气象卫星等遥感技术的应用,已使人们能在短时间获得广大空间范围内的各种气象信息。大大促进了气象业务和研究工作的开展。

大气科学有着广泛的用途。各种时段(短、中、长)的天气预测,为整个社会的各类活动所利用。大型水库的管理,海空交通,工程的设计和施工安排,渔业生产的安全,盐业生产的管理……都需要天气预测。大气科学与其它学科的结合形成了许多应用学科。例如研究农业生产与气象条件间相互关系的农业气象学;研究大气中水分与降水、地下水及径流诸方面关系的水文气象学,

研究航空(海)中气象问题的航空(海)气象学; 研究气象对人体影响的医疗气象学; 讨论天气及气候与工商业效率之间关系的工商业气象学; 讨论气象与战略、战术、补给和通讯关系的军事气象学; 研究人类活动(如工业排放废气)对大气环境影响的污染气象学等。

受地区特殊条件的影响, 天气、气候具有地区性的特点, 从而发展出一些大气科学分支如: 海洋气象学、热带气象学、山地气象学和极地气象学等。近年来随着航天技术的发展, 人们对地外行星大气的研究也作了尝试, 从而有宇宙(或行星)气象学名称的提出。

人类对大气的认识是从观测大气获得感性知识开始的。随后, 从日益增多的感性知识中总结出天气变化的规律, 使认识深化上升到理性阶段。这种感性和理性认识随着大气科学本身的发展和其它学科水平的提高不断地得到丰富和深化。例如把各地同一时间的气象资料填画在图上, 导致天气系统的发现, 而无线电通讯的发明, 使各地气象信息得到迅速的交换, 于是使实时天气图的绘制成为可能, 从而丰富了对天气系统的认识。并形成了以天气图分析为主要内容的天气学。把流体力学和热力学的成就应用于大气科学研究中, 对大气运动作出动力学和热力学的分析, 导致天气方程组的建立, 而电子计算机的问世使得求取这套天气方程组的数值解成为可能, 于是数值天气预报学应运而生, 天气预报工作也就向着客观化定量化方向迈进。

大气是一个统一的整体, 各地区之间互有关联, 因此对某地区天气的研究, 不能孤立地进行。针对这一特点, 已建立起全球性的天气监测网, 按统一的规定对大气进行观测, 并且把观测结果及时向全球各地发布。这些观测资料成了气象业务工作和研究工作的基础。除此之外, 当上述常规的监测网在空间密度和观测时间间隔等方面不能满足研究工作的需要时, 人们常就某一研究课题(例如强对流天气)在某一特定地区和时期里布置一个监测

网以获取有关的资料。并在观测工作结束之后，对资料进行分析作理论上的总结。这样的工作有人称之为实验。虽然它不同于一般意义下的实验，因为它不能根据人们的需要控制实验条件，也不能在同一条件下重复某一过程。但气象上也有一些真正的实验工作。例如某些力学问题可以在风洞中进行实验研究。某些云雾降水过程的研究可以在云室内进行。某些农业气象试验可以在能够调节气温、湿度、风速，气压和光照的人工气候室内实施。

因此，通过观测或实验获取大气状态和过程的资料，应用物理学、化学和大气科学本身的理论分析这些资料，总结出大气过程的规律性，并用来指导实践，这是气象学研究中的基本方法。

第一章 大气概述

包围在地球周围的一层气体，称为大气圈，有时也称为大气层或大气。如果从人造地球卫星上看地球大气，它好象是一层浅蓝色、透明的面纱。人们常说大气海洋，就是形容其范围之广阔。实际上，它比海洋大得多，也深厚得多，大气的厚度超过地球上最高山的高度和最深海沟的深度，其上界和宇宙星际气体相联。然而，人类活动的环境仅限于大气圈的底层，天气活动也多发生在20~30km以下的大气中。在人造地球卫星从高空拍摄的连续照片上可以看到，地球大气就象自然界的万物一样，处在永不停息的运动之中。

本章主要阐述地球大气概貌，它包括大气组成；大气铅直分布；空气状态方程；主要气象要素；气团和锋等。

§1 大气组成

1.1 大气演化

如同人类的起源和进化一样，地球大气也有它的起源和演化。那么地球大气是怎样起源的呢？它是怎样从原始大气状态演变成现代大气的呢？它是怎样在这漫长的岁月中始终把大气保持着，而不流散开的呢？关于地球大气的演化有各种假设，尚未有定论，

在此仅向读者作一些介绍。

在地球大气中，惰性气体（氦、氖、氩、氪、氙）的含量比太阳中要少。一般认为地球形成时根本无气体参与。或者在地球形成后不久，原始大气中的气体物质就丧失了。持这两种看法的人都指出：大概在 4.5×10^9 年以前，在地球形成的当时或稍晚，曾有一段时期地球上是不存在大气的。今天观测到的大气是由伴随着火山活动从地球内部排出的挥发性物质变成的。当然，很难看出我们所知道的现代大气与火山喷发出来的“原材料”——原始大气有何相似之处。现代大气就其质量来说，大约由76%的氮和23%的氧组成。但从火山喷发出来的气体却大约由85%的水汽，10%的 CO_2 ，以及百分之几的氮和硫或硫化物（ SO_2 和 H_2S ）混合组成。显然没有氧。

为了了解现在的大气是如何由地球内部排出的挥发性物质变成的，必须把大气看成是整个地球系统的一部分，而不是与地球隔离的实体，这个系统由水圈、生物圈和岩石圈所组成。系统中包含的挥发性物质的总量约为地球质量的0.025%。大气质量与地球系统中的其它部分相比是很小的。例如，它只有水圈质量的三分之一。

1.1.1 水圈的演化

当火山喷射时，大气只能容纳进入其中的很小一部分水汽，因此，地球表面最早的火山活动必定产生云雨，通过这一过程形成了地球表面的水体。现在水圈各组成部分如表 1.1 所示。

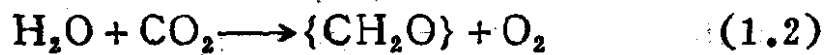
假如以过去一世纪中由火山喷发的（水）蒸汽率代表地球生命期内的平均蒸汽率，则现在水圈的总质量是很小的，比起进入大气的水汽总量要小两个数量级。对于这种偏差的可能解释是在海洋深处水体沿地壳接缝处渗漏，另一种可能是大量的水被紫外辐射所破坏。

1.1.2 大气中的氧和生命

大气中的氧至少有两种来源：水的离解和光合反应

表1.1 水圈的组成

名 称	百分比 (%)
海 洋	97
冰	2.4
淡水 (地下)	0.6
淡水 (江、湖等)	0.02
大 气	0.001



这两种反应均涉及对太阳辐射的吸收。(1.1)式要求吸收紫外辐射，(1.2)式要求吸收可见光辐射。

现已肯定，光合反应(1.2)式在地球上产生了大量的氧，它的量远大于目前大气中的氧含量。但还不清楚从地球形成时的氧化状态出发，通过光合反应产生氧的总量是否足以形成现在地壳物质所具有的氧化状态。

光解反应(1.1)式作为大气中的氧的来源还是一个有争议的问题。因为(1.1)式的反应速率存在着明显的不确定性，它取决于与之竞争同一紫外辐射的其它光化反应，并且在(1.1)式中氧的生成率还依赖于反应中产生的氢向空间的逃逸率。若逃逸率低于生成率，则(1.1)式中产生的大多数氧将与氢重新化合成水。

光合作用生成的氧与生物过程密切相关。(1.2)中产生的 $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ 单体是植物生命中形成细胞的糖类(碳水化合物)分子的基本构成部分。地球大气中氧很丰富，而金星和火星上没有或几乎没有生命活动，其中大气又几乎完全没有氧，这就促使人们认为地球大气中的大部分氧是由光合作用产生的。

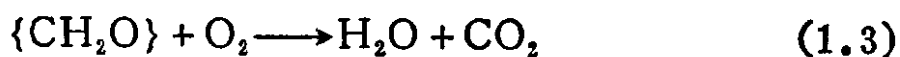
目前人们认为在 4×10^9 年以前，单细胞有机体当经历演化

的第一阶段时，要求一个无氧的环境，地质学家研究表明，在 $3 \sim 2 \times 10^9$ 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态水环境中发展的，这个环境位于液面以下足以避开致命的太阳紫外线的地方，但又相当接近液面，以便接受光合作用所需的可见光辐射。

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 O_3 层的发展，透过大气到达地面的紫外线愈来愈少，从而使植物生命在海洋中向上扩展进入最上层，进而扩大了接触可见光的机会，这种可见光是光合作用中必不可少的。于是形成了以下的增益放大过程：愈来愈多的氧—愈来愈少的紫外辐射—愈来愈多的可见光—愈来愈丰富的植物生命—产生更多的氧。通过这种过程，生命就缓慢地坚定不移地向液水表面推进，直到它最后出现在陆地上。据研究，植物最早出现在陆地上是四亿年以前。

1.1.3 氧和碳的平衡

光合反应每产生一个氧分子，就有一个碳分子被组织到有机化合物中，在有机物质被燃烧或腐烂时，这些碳原子中的大多数又被氧化了



当几万个碳分子参与光合作用时，总会有一个隐藏起来或“化石化”而未被氧化。地球上大多数未被氧化的碳包含在页岩中，小部分以比较浓缩的形式储存在化石燃料煤、石油、天然气中。生物圈中的有机碳储存期较短，含量也少，只占碳总储量的很少一部分，以各种形式储存的碳的相对含量如表1.2所示。

化石燃料的燃烧是光合作用的逆过程。根据目前燃料的消耗率计算，人类一年内燃烧的量相当于光合作用一千年生成的量。

在地球历史时期内，由植物生成的氧的净总量（即光合作用生成的氧，扣除有机物腐烂时，氧化有机物质所消耗的氧），只