

物理海洋丛书
王衍明 编著
青岛海洋大学出版社

DA QI WU LI XUE

大气物理学



WU LI HAI YANG
CONG SHU

大 气 物 理 学

王 衍 明 编 著

青 岛 海 洋 大 学 出 版 社

鲁新登字 15 号

大气物理学

王衍明编著

*

青岛海洋大学出版社出版发行

青岛市鱼山路 5 号

邮政编码 266003

新华书店经销

山东电子工业印刷厂印刷

*

1993 年 5 月第 1 版 1993 年 5 月第 1 次印刷

32 开本(850×1168 毫米) 15.125 印张 389 千字

印数 1—2000

ISBN 7—81026—332—3/P·20

定价：7.90 元

前 言

人类社会面临人口膨胀、资源紧缺和环境污染等一系列问题，海洋的开发利用是解决这些问题的一个重要途径。自70年代以来，沿海各国纷纷划定二百海里专属经济区，到1990年已有80多个国家和地区宣布建立海洋经济区。许多国家扩大并深化对海洋开发利用的领域，加强对海区的宏观控制和海区功能区划，并进行海洋基础理论的调查研究。

我国濒临西太平洋，跨越热带、亚热带和温带三个气候带，大陆架宽广，15m等深线以浅水域和滩涂面积约2亿亩，1989年海水养殖产量为1979年年产量的3.7倍。沿海主要港口码头泊位1240个，海运商船总吨位列居世界第八位，海盐年产量1300多万吨，一直保持世界第一位，近海油气田资源约为90—180亿吨，具有良好的开发潜力。总之，近年来我国海洋产业正在崛起，前景十分广阔。

海洋开发的历史表明，对海洋进行开发利用的成功与否，往往不仅取决于科学技术和管理水平，在很大程度上还依赖于对海洋环境要素分布变化规律的掌握。没有深入而全面地了解海洋状况，特别是不掌握物理海洋要素，例如流、浪、潮和风场等方面的系统知识，要想作出科学的结论是不可能的。因此，在对物理海洋进行系统研究的基础上建立海洋经济开发水域的环境综合保障及其预报体系，是进行海洋开发的一个重要条件。海洋所发生的各种物理过程，其中有不同类型、不同尺度的海水运动。如海洋密度分布不一致产生的“热盐环流”，由海面风应力驱动的风生流和风生环流，由天体引潮力所产生的潮汐运动，因各种扰动而产生的风浪、涌

浪、惯性波、行星波等多种波动,以及因上述种种运动所产生的涡流、混合等等,它们是使得海洋环境发生变化的基本动力或原因。这些动力学现象由于它们和海洋生产活动息息相关,很早便受到人们的关注,从学科发展来看,它们历史较长,研究的比较深入和系统,已建立了各自的体系。

我校物理海洋学和海洋气象学系,前身为原山东大学海洋系,她成立近40年了。早在1952年第一任系主任赫崇本教授便卓有远见地把动力海洋学分成海流、潮汐、海浪三门独立的课程进行讲授,使得这些分支学科发展较快,形成了各自的系统,并出版了专著;它们已能直接为生产、海防、航海等方面服务。嗣后,又有风暴潮、海雾等方面的专著问世。如今,浅海动力学、内波和海洋细粒结构、海气相互作用,海洋热学和水团等方面的研究均取得一定成果。上述工作为我们编写一套物理海洋学教材打下了良好基础。

开发利用海洋、开展海洋研究工作离不开人才的培养,而人才的培养又离不开教材,要想编写出既能总结本学科的知识体系的精华,又能反映当代本学科发展水平的教材是不容易的,我们愿为此作出努力。

本系列教材不仅适用于大学本科生的学习,对于海洋科学技术的研究、海洋环保、海洋工程、海洋水产、航海和从事管理、应用等方面的工作者均有参考价值。限于编著者水平,不恰当和错误之处,请读者批评指正。

文圣常

1990年10月于青岛

序

本书是以青岛海洋大学物理海洋与海洋气象系多年使用的“大气物理讲义”(海洋气象专业用)和“气象学讲义”(物理海洋专业用,徐天真编)为基础编写而成的。编写时主要参考了书末所列文献,并以我国高等院校气象类专业确定的教学大纲为依据。本书可做为气象类专业、海洋类专业的基础课参考教材,也可供从事海洋、气象工作的科技人员参考。学习本书需要具备必要的高等数学和物理学知识。

全书分八章,内容有大气概况、大气辐射、大气热力学、大气动力学、海洋气象、云物理学等,并将大气演化、高层大气、大气探测、遥感原理、大气湍流、云雾光学、大气电学等基础知识有机地结合到适当的章节中,本书编写重基础理论论证,主要向大学生们介绍大气科学的基本物理原理和海洋气象学的基础知识,并对范围广泛的大气现象进行阐述和解释。

大气物理学近年来有较快的发展,它是涉及到许多学科的应用基础科学。采用最新的探测技术和利用近代数理方法来描述大气物理过程的内在规律是当今大气物理学的显著特点。作为基础课的基本理论,需要在学科发展的基础上对所涉及到的基本概念和定律给予新的认识和解释,在本书中的大气辐射、大气热力学、大气动力学、云物理学等各章、包括一些最基本的定义的阐述都力求这样去做。学科研究领域的扩展,一些较成熟的理论也需要在专业基础课中有所体现,海洋气象这一章就是基于这种想法编入的。

本书力求作到数理严谨,并注意基本概念本身的物理实质,阐述要求简炼、循序渐进,易于理解和掌握,适宜于自学。

本书初稿完成后,承左中道教授、刘安国教授对全书进行了审阅,提出了修改意见,在此表示衷心的感谢,此外,本书所用图、表主要取自书末所列文献,恕不一一注明出处。由于编者水平所限,本书会有不少缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编者

1991年8月

目 录

第一章 大气概论.....	(1)
1.1 地球大气的起源.....	(2)
1.2 地球大气的成分和结构.....	(6)
1.2.1 大气质量.....	(6)
1.2.2 大气成分.....	(6)
1.2.3 干空气状态方程.....	(12)
1.2.4 大气成分随高度的变化.....	(14)
1.2.5 较轻成分的逃逸.....	(15)
1.3 气象要素.....	(17)
1.3.1 气温.....	(17)
1.3.2 气压.....	(20)
1.3.3 湿度.....	(23)
1.3.4 风.....	(30)
1.4 湿空气的状态方程.....	(33)
1.5 大气的垂直分层.....	(36)
1.5.1 对流层.....	(38)
1.5.2 平流层.....	(42)
1.5.3 中层.....	(42)
1.5.4 热层.....	(43)
1.6 大气气溶胶粒子.....	(44)
1.6.1 气溶胶粒子的潜分布特征.....	(45)
1.6.2 气溶胶粒子的源和汇.....	(47)

1.6.3 气溶胶粒子的大气效应	(49)
1.7 热力学图表上湿度量的查算	(52)
1.7.1 求饱和比湿(q_s)和实际比湿(q)	(54)
1.7.2 求相对湿度(f)	(54)
1.7.3 求饱和水汽压 E 和实际水汽压 e	(55)
1.7.4 求虚温 T_v (或 t_v)	(56)
第二章 大气中辐射能的传输	(57)
2.1 辐射概述	(57)
2.1.1 辐射的基本概念	(57)
2.1.2 辐射能的度量	(61)
2.2 辐射的基本定律	(64)
2.2.1 普朗克定律	(64)
2.2.2 斯蒂芬——玻尔兹曼定律	(68)
2.2.3 魏恩位移定律	(68)
2.2.4 基尔霍夫定律	(69)
2.3 太阳辐射	(71)
2.4 大气对太阳辐射的吸收和散射	(77)
2.4.1 大气对太阳辐射的吸收	(78)
2.4.2 大气对太阳辐射的散射	(84)
2.4.3 大气质量数	(89)
2.5 到达地面的太阳辐射	(91)
2.5.1 太阳直接辐射	(92)
2.5.2 天空辐射	(93)
2.5.3 总辐射	(93)
2.5.4 地面对太阳辐射的反射	(95)
2.6 地球辐射	(97)
2.6.1 地面辐射	(97)
2.6.2 大气辐射	(98)

2.6.3	地面有效辐射	(101)
2.6.4	长波辐射的传输	(102)
2.6.5	长波辐射的变温率	(107)
2.7	辐射平衡	(108)
2.7.1	地面辐射差额	(108)
2.7.2	地气系统辐射差额 行星反射率和 OLR	(109)
2.7.3	简单的全球辐射平衡模式	(111)
2.7.4	地气系统的热量平衡	(114)
第三章	大气热力学	(116)
3.1	基本概念和基本定律	(116)
3.1.1	系统	(116)
3.1.2	过程	(117)
3.1.3	功	(118)
3.1.4	内能	(119)
3.1.5	焓	(121)
3.1.6	熵	(122)
3.1.7	自由能和自由焓	(123)
3.1.8	定容比热和定压比热	(125)
3.1.9	热力学函数的计算	(128)
3.1.10	克拉珀龙——克劳修斯方程	(130)
3.2	干绝热过程	(134)
3.2.1	干绝热方程	(134)
3.2.2	位温	(135)
3.2.3	干绝热温度递减率	(137)
3.2.4	抬升凝结高度	(138)
3.3	饱和湿空气的绝热过程	(140)
3.3.1	含液态水的饱和湿空气的焓和熵	(140)
3.3.2	湿绝热方程和假绝热方程	(145)

3.3.3 湿绝热温度递减率	(146)
3.3.4 假相当位温和假相当温度	(147)
3.4 热力学图解	(150)
3.4.1 温度——对数压力图	(151)
3.4.2 温熵图	(154)
3.4.3 面积等价变换	(156)
3.5 热力过程及其温湿度参量	(159)
3.5.1 等压冷却过程 露点和霜点	(160)
3.5.2 绝热等压过程 湿球温度和相当温度	(164)
3.5.3 温湿度参量概述	(168)
3.6 大气中的混合过程	(170)
3.6.1 水平混合过程	(170)
3.6.2 垂直混合过程	(172)
3.7 热力学图解的应用	(176)
第四章 气压和气压场	(179)
4.1 重力和重力位势	(179)
4.2 气压的铅直分布规律	(184)
4.2.1 静力平衡方程	(184)
4.2.2 单位气压高度差	(185)
4.2.3 压高公式	(186)
4.2.4 均质(等密度)大气	(187)
4.2.5 等温大气	(188)
4.2.6 多元大气(等递减率大气)	(190)
4.2.7 标准大气	(191)
4.3 气压场	(192)
4.3.1 等压面	(192)
4.3.2 气压梯度	(194)
4.3.3 气压场的基本形式	(196)

4.3.4 气压系统的垂直结构	(198)
4.1 气压的变化	(200)
4.1.1 连续方程	(201)
4.1.2 气压倾向方程	(208)
4.1.3 气压的周期变化	(211)
第五章 大气层结的稳定度	(213)
5.1 判断层结稳定度的气块法	(215)
5.1.1 未饱和气层的静力稳定度判据	(217)
5.1.2 饱和湿空气静力稳定度判据	(219)
5.1.3 稳定气层中的振荡	(221)
5.2 厚气层的层结稳定度	(222)
5.2.1 气层的不稳定能量	(223)
5.2.2 厚气层的静力稳定度分型	(224)
5.2.3 对流凝结高度	(226)
5.3 位势稳定度	(228)
5.3.1 无水汽凝结时,气层升降过程中 温度递减率的变化规律	(228)
5.3.2 未饱和气层在整层上升达到 饱和时温度递减率的变化规律	(230)
5.4 判别层结稳定度的簿层法	(233)
5.4.1 上升下沉气流都是干绝热过程	(236)
5.4.2 上升下沉气流都是湿绝热过程	(238)
5.4.3 上升是湿绝热过程,下沉是干绝热过程	(238)
5.5 夹卷作用的影响	(240)
5.5.1 夹卷过程的图解分析	(240)
5.5.2 夹卷过程中上升气块的温度变化	(243)
5.5.3 一种夹卷过程的理论模式	(244)
5.5.4 积云的含水量	(247)

第六章 大气动力学	(249)
6.1 大气运动方程	(249)
6.1.1 旋转参考系中的运动方程	(250)
6.1.2 表观力	(254)
6.1.3 真实力	(257)
6.1.4 大气运动方程的标量形式	(260)
6.2 自由大气中的平衡运动	(266)
6.2.1 水平运动方程	(267)
6.2.2 地转风	(270)
6.2.3 梯度风	(273)
6.2.4 旋衡风	(278)
6.2.5 惯性风	(280)
6.3 地转风随高度的变化——热成风	(281)
6.3.1 P 坐标系中的热成风方程	(281)
6.3.2 Z 坐标系中的热成风方程	(284)
6.3.3 地转风随高度的变化与温度平流的关系	(286)
6.4 非地转运动——偏差风	(290)
6.4.1 偏差风的概念	(291)
6.4.2 偏差风的作用	(292)
6.4.3 偏差风的分解	(295)
6.4.4 摩擦层中的偏差风	(298)
6.5 大气运动封闭方程组	(300)
6.6 大气流场的特征	(304)
6.6.1 典型流场形式和流函数	(304)
6.6.2 垂直运动方程的简化	(306)
6.6.3 环流和涡度	(308)
6.6.4 环流定理和海陆风	(313)
6.6.5 大气环流的基本模型	(320)

6.7 大气能量	(323)
6.7.1 大气中内在能量的种类	(323)
6.7.2 常用的几种能量组合形式	(325)
6.7.3 大气能量方程	(329)
第七章 海洋气象	(332)
7.1 海气界面的物理状况	(333)
7.1.1 大气湍流概述	(333)
7.1.2 海洋大气边界层风廓线	(346)
7.1.3 海洋的物理状况	(353)
7.1.4 海水的热传导	(355)
7.2 海气间物质和能量的输送	(357)
7.2.1 海面湍流通量	(357)
7.2.2 水分和二氧化碳的循环	(364)
7.3 海气相互作用	(366)
7.3.1 海水对大气运动的响应	(367)
7.3.2 海流与大气的相互作用	(372)
7.3.3 海温异常和大气环流	(374)
7.3.4 海冰对天气气候的影响	(379)
7.4 海洋天气与气候	(381)
7.4.1 海陆风	(381)
7.4.2 海雾	(385)
7.4.3 爆发性气旋	(391)
7.4.4 台风	(393)
7.4.5 季风	(400)
7.4.6 海洋性气候和大陆性气候	(402)
第八章 云物理学	(404)
8.1 水汽的相变核化	(404)
8.1.1 平面水面或冰面相平衡水汽压	(405)

8.1.2 纯水滴相平衡水汽压	(407)
8.1.3 溶液面上的平衡水汽压	(411)
8.1.4 凝结核化过程	(413)
8.2 云的形态学	(416)
8.2.1 云的形成机制	(416)
8.2.2 云的分类	(417)
8.2.3 对流云	(418)
8.2.4 层状云和云雾光学现象	(423)
8.2.5 地形云	(426)
8.3 云和降水的微观特征	(427)
8.3.1 水云的微结构	(427)
8.3.2 冰雪晶的微结构	(432)
8.3.3 降雨的微观特征	(434)
8.3.4 冰雹的结构特征和生成理论	(437)
8.4 降水机制	(442)
8.4.1 暖云降水	(443)
8.4.2 冷云降水	(450)
8.5 积云的数值模拟	(452)
8.5.1 基本方程组	(453)
8.5.2 微物理过程处理	(455)
8.6 雷暴	(459)
8.6.1 雷暴云起电机制	(459)
8.6.2 闪电和雷声	(463)
主要参考文献	(466)

第一章 大气概论

包围在地球外部的一层气体总称为大气圈,简称为大气。行星大气就是围绕行星的气体层。表 1.1 给出了太阳系中九大行星的大气简况。从表中看出不同行星的大气在化学成分和物理结构方面都有很大的差异。比较九大行星的状况,唯有地球的表面环境、温度和大气成分适宜于生物的繁殖生长,其他行星上至今未发现任何生命现象存在。

表 1.1 行星大气简况

行星	平均表面温度 (K)	表面压力 (一个标准大气压)	重力加速度 (m/s^2)	主要气体成分	
水星	700~600(阳面) 100(阴面)		3.7		未发现大气
金星	750	90	8.8	CO ₂ (97%) N ₂ (2%)	被浓硫酸的 厚云覆盖
地球	288	1	9.8	N ₂ (78%) O ₂ (21%)	
火星	240	0.007	3.8	CO ₂ (80%)	大气稀薄
木星	134(云顶)	2(云顶)	26.2	H ₂ 、H ₂ 、CH ₄	
土星	78		11.3	H ₂ 、CH ₄ 、NH ₃	
天王星	62		9.7	H ₂ 、CH ₄	
海王星	46		11.4	H ₂ 、CH ₄	
冥王星	42		0.5		

1.1 地球大气的起源

为了解大气,需要知道它的演化,它的成分、质量的变化过程。在地球大气中,惰性气体(氦、氖、氩、氙)的含量远比太阳系中少。人们为了说明在地球大气中,为什么这些元素少到几乎并不存在,曾提出了各种理论。一般认为,大致在 45 亿年以前,在地球形成的当时或稍晚一些时候,曾有一段时期地球上是没有大气的。因而可以认为,今天观测到的地球大气是由伴随着火山活动而从地球内部排出的挥发性物质形成的。

现今的地球大气就其质量来说,大约由 76% 的氮(N_2)和 23% 的氧(O_2)组成。而火山喷射出来的气体却大约由 85% 的水汽, 10% 的二氧化碳(CO_2)以及只占百分之几的氮和硫化物(二氧化硫和硫化氢)混合而成,在火山的喷发物中显然没有氧。为了解释现今的大气是如何由地球内部排出的挥发性物质演化而成,必须把大气作为地球组合系统的一部分来考查。这个组合系统是由水圈、生物圈和称为岩石圈的沉积部分所组成。组合系统中包含的挥发性物质的总质量约为地球质量的 0.025%。大气质量只是水圈质量的 1/264,占整个组合系统的比例就更小了。

1. 大气中的水分:当火山爆发时,由于大气只能容纳进入其中很小一部分水汽质量,因此地球表面最早的火山活动必然产生云和雨,通过这一过程形成了地球表面上的水体。现今地球上水圈总质量约为 1.458×10^{21} kg,其中海洋占其质量的 94%,余下的 6% 之内,除地下水(土壤含水和地下水)之外,呈液态气态的极少,大部分冻结为固体的冰。大气中的水只占 0.001%(见 7.2.2)。

2. 大气中的氧至少有两个来源:水的离解



和光合反应