

大气科学概观

DAQIKEXUEGAIGUAN

[美] J. M. 华莱士 P. V. 霍布斯著

王鹏飞等译 上海科学技术出版社

大 气 科 学 概 观

〔美〕 J. M. 华莱士 P. V. 霍布斯

王鹏飞 章澄昌 曹文俊 张培昌 王保信 译

王鹏飞 阮忠家 校

上海科学技术出版社

Atmospheric Science
AN INTRODUCTORY SURVEY
John M. Wallace Peter V. Hobbs
ACADEMIC PRESS, 1977



大气科学概观

王鹏飞 章澄昌 曹文俊 张培昌 王保信 译

王鹏飞 阮忠家 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张19.75 插页1 字数472,000

1981年9月第1版 1981年9月第1次印刷

印数1—4,000

书号: 13119·941 定价: (科五) 2.30 元

译 者 的 话

近二十年来,气象学的研究领域,有很快的扩展,使内容有突破学科名称的趋势。研究的对象,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。因此,“气象学”这一学科名称,已逐渐有改称“大气科学”的趋势。在这种新情况下,很需要有“大气科学”的教科书,作为气象院校的专业基础参考教材。这是我们翻译本书的想法。

本书为美国华盛顿大学华莱士和霍布斯合编。全书共分九章:前三章介绍大气概貌、大气热力学和温带天气尺度扰动;第四、第五两章分别介绍大气气溶胶质粒和云雾降水的宏、微观物理学;第六、第七两章分别介绍大气的辐射传输和全球能量平衡;第八、第九两章分别介绍大气动力学和大气环流。其中大气化学、大气电学、大气光学、高层大气学、物理气候学、大尺度大气运动、大气湍流等,均按需要,在书内适当部分作有机的插入,使经典内容和新发展,获得恰如其分的安排。全书前后贯通、章节间能相互呼应,脉络较清晰、无割裂之感。大专院校的气象系(包括天气专业、气候专业)和大气物理系,均可按照本身教学特点,有所取舍地利用本书,进行教学。根据原作者的意见,本书不但可供大学低年级学生学习之用,还可供高年级学生、甚至研究生阅读之用。由于本书内容的叙述,较有条理,所以也可供气象工作者自学之需。

学科的发展,往往将一些发展成熟的理论,逐步下放到专业基础课中,以便专业课能轻装上阵,进一步开阔道路。这种下放,必然会引起专业基础课及专业课作必要的调整。本书内容,实际上体现了这一发展方向,这对我国编写专业课及专业基础课教材,很有参考价值。

本书附有大量习题,有助于提高分析和解决有关问题的能力。还附有一些著名气象学家的小传,也是本书的特色之一。

对于书中某些内容,译者曾进行了一些注释,以便于阅读。

必须指出,本书系为美国的大学而编的,其中有些内容或观点,并不全适合我国情况,希阅读或使用注意。

本书系由南京气象学院大气物理系的一些同志集体翻译。参加翻译的同志有:章澄昌(序言,第一、六、七章),张培昌(第二章),王保信(第三章),王鹏飞(第四、五章),曹文俊(第八、九章)。全书由王鹏飞、阮忠家校。

译文有错误或不当之处,请读者批评指正。

1979年5月于南京

序 言⁽¹⁾

大学里学习大气科学的好些不同水平的班级,例如低年级、高年级及研究生水平的班级都需要开设介绍大气科学概观的课程。大学的物理气象学和天气学实践等课程也需要大气科学概观这门课程来配合,本书就是为适应上述需要而撰写的。本课程向大学生介绍大气科学的基本物理原理,并对范围广泛的大气现象进行初步的描述和解释,这些现象在专业课程中还要详细涉及。在安排本书的内容时,我们假定学生已经学过大学一年级的微积分、物理学以及高中的化学。

本书主要内容大体是:物理气象和动力气象各占一半。在物理气象学的一般领域内,我们介绍了大气静力学和热力学的基本原理、云物理学和辐射传输(分别为第二、第四和第六章)。另外我们也选择性地穿插入大气化学、气溶胶质粒物理学、大气电学、高层大气学⁽²⁾和物理气候学中的某些课题。在动力气象中我们把大尺度大气运动(重点在中纬度)的描述,原始方程组的介绍和大气环流的初步解释(分别为第三、第八和第九章)包括进去,在云和风暴(第五章)的讨论中,我们力图把物理气象和动力气象两方面的材料结合起来。在章节的编排方面,我们有意识地把天气学方面的内容放在本书稍前一些(第三章),以作为日常天气图讨论的基础,它是这些概观课程内容的不可分割的一部分。

本书共分为九章,大多数基本理论性的内容包含在偶数章中(第二、第四、第六和第八章)。第一章和第三章几乎完全是描述性的,而第五、第七和第九章则主要是解释性的。奇数章中的大部分内容采用直叙式,对于研究生来说可以作为指定阅读材料。但是对于大学生来说,用作广泛的指定阅读内容,规定在一学期内读完它,仍是有困难的。为了上课时能充分利用本书,我们特意把理论性章节作这样的编排,即某些比较困难的内容,可以删略,却并不严重失去其连贯性。凡可以节删的内容,均表以脚注。其它章中的叙述性和说明性内容,可由教师决定取舍。

本书包含 150 道计算题和 208 道定性习题,它们是把基本物理原理应用到大气科学问题上的一些实例。另外还有 48 道计算题插在课文中,并给出解答。我们在设计习题时尽量减少数学处理,重点放在正确运用物理原理上。全书统一使用国际单位制,因为这种单位制在大气科学领域内已很快地被大家所接受了。单位和符号、普适常数以及求解计算题所需的其它资料已在扉页《一些有用的常数》中列出。

必须指出,各章末列出的许多定性习题,能启发学生提出一些独创性的见解。我们认为这些问题对促进课堂讨论和帮助学生准备考试是有用的。

本书在脚注中列有传记,对于在大气科学上有重大贡献的科学家的简单生平和主要工作作了介绍。内容虽然简短,但我们希望通过它给学生建立气象学长期历史发展以及气象

(1) 序言略有删节。——译者注

(2) 研究高层大气的化学和物理学的一门学科。——译者注

知识在物理科学中有明确的渊源的观念。我们在编传记时,采取一种原则,即仅对已经去世的和退休的个人才写在脚注传记中。

本书作者之一(华莱士)在从事本书著作期间,曾被特许在苏联科学院西伯利亚分院计算中心作六个月的交流访问,并在美国大气科学国家中心工作了一年。这两个研究单位的成员,对本书的科学内容均提出不少重要的建议。

一些有用的常数⁽¹⁾

普 适 常 数

通用气体常数(R^*)	8.3143×10^3 焦耳度 ⁻¹ 千摩尔 ⁻¹⁽²⁾
波尔兹曼常数(k)	1.381×10^{-23} 焦耳·度 ⁻¹ ·分子 ⁻¹
阿伏伽德罗数(N_A)	6.022×10^{26} 千摩尔 ⁻¹
斯蒂芬-波尔兹曼常数(σ)	5.6696×10^{-8} 瓦特·米 ⁻² ·度 ⁻⁴
普朗克常数(h)	6.6262×10^{-34} 焦耳·秒
光速(c^*)	2.998×10^8 米·秒 ⁻¹
真空的介电常数(或真空电容率)(ϵ_0)	8.85×10^{-12} 库仑 ² ·牛顿 ⁻¹ ·米 ⁻²

地 球

平均半径(R_E)	6.37×10^6 米
地球表面的重力加速度(g_0)	9.81 米·秒 ⁻²
自转角速度(Ω)	7.292×10^{-5} 弧度·秒 ⁻¹
太阳至地球表面的平均距离(d)	1.50×10^{11} 米
离太阳距离为 d 的垂直平面上的 太阳辐照度	1.38×10^3 瓦特·米 ⁻²

干 空 气

视分子量(M_d)	28.97
气体常数(R_d)	287 焦耳·度 ⁻¹ ·千克 ⁻¹
温度 0°C 和气压 1000 毫巴状态下的 密度(随 P/T 变化)	1.275 千克·米 ⁻³
定压比热(c_p)	1004 焦耳·度 ⁻¹ ·千克 ⁻¹
定容比热(c_v)	717 焦耳·度 ⁻¹ ·千克 ⁻¹
0°C 时的导热率(与气压无关)	2.40×10^{-2} 焦耳·米 ⁻¹ ·秒 ⁻¹ ·度 ⁻¹

水 物 质

分子量(M_w)	18.016
水汽的气体常数(R_v)	461 焦耳·度 ⁻¹ ·千克 ⁻¹
0°C 时液水密度	1.000×10^3 千克·米 ⁻³

(1) 原标题为“单位和数据”，包括国际单位(SI)制和十进单位制字头，考虑大家都比较熟悉，故已删去。——译者注

(2) 摩尔，也常译为克分子。原文为 Mole，为 1971 年 10 月第十四届国际计量大会决定增加的第七个基本单位符号。规定 1 摩尔的物质所含结构微粒数与 0.012 千克碳(¹²C)所含原子数相等，结构微粒可以是原子、分子、离子、电子以及其它粒子或这些粒子的特定组合体，例如 1 摩尔的分子、原子、离子分别含 6.02×10^{23} 个分子、原子、离子等。——译者注

0°C 时冰的密度	$0.917 \times 10^3 \text{ 千克} \cdot \text{米}^{-3}$
水汽的定压比热	$1952 \text{ 焦耳} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{千克}^{-1}$
水汽的定容比热	$1463 \text{ 焦耳} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{千克}^{-1}$
0°C 时液水的比热	$4218 \text{ 焦耳} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{千克}^{-1}$
0°C 时冰的比热	$2106 \text{ 焦耳} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{千克}^{-1}$
0°C 时的汽化潜热	$2.500 \times 10^6 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1}$
100°C 时的汽化潜热	$2.25 \times 10^6 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1}$
0°C 时的融解潜热	$3.34 \times 10^5 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1}$

目 录

译者的话

序言

一些有用的常数

第一章 大 气 概 貌

1.1 引言	1
1.2 大气的起源和组成	3
1.3 大气质量和气体成分的分布	7
1.4 大气中的荷电质点	10
1.5 温度的分布	14
1.6 地球大气中的风	18
1.7 降水	23
习题	29

第二章 大 气 热 力 学

2.1 气体定律	31
2.2 流体静力学方程及其应用	34
2.3 热力学第一定律	40
2.4 潜热	44
2.5 绝热过程	44
2.6 空气中的水汽	47
2.7 静力稳定度概念	54
2.8 热力学第二定律及熵	57
2.9 热力学函数及平衡条件	65
习题	68

第三章 温带天气尺度扰动

3.1 500 毫巴气流	72
3.2 地面气象要素	74
3.3 地面天气报告的说明	80
3.4 高空结构	86
3.5 厚度及其与铅直结构的关系	92
习题	95

第四章 大气气溶胶质粒和云的微物理过程

4.1 大气气溶胶质粒	97
4.2 水汽的核化凝结	106
4.3 暖云的微物理结构	112
4.4 暖云中云滴的增长	113
4.5 冷云的微物理	121
4.6 雷暴	133
习题	139

第五章 云 和 风 暴

5.1 云的形态学	143
5.2 气团雷暴	157
5.3 猛烈风暴	158
5.4 飓风	165
5.5 温带风暴	168
5.6 人工影响云和降水	173
习题	180

第六章 辐 射 传 输

6.1 辐射光谱	184
6.2 分子对辐射的吸收和发射	185
6.3 辐射的定量描述	186
6.4 黑体辐射	189
6.5 吸收率和比发射率	191
6.6 大气对太阳辐射的吸收	195
6.7 大气对红外辐射的吸收和发射	199
6.8 太阳辐射的散射	203
6.9 全球能量平衡中辐射传输的作用	204
习题	205

第七章 全球能量平衡

7.1 整体平均的大气能量平衡	209
7.2 高层大气的能量平衡	213
7.3 对流层的能量平衡	219
7.4 地球表面的能量平衡	224
7.5 能量平衡随时间的变化	226
习题	234

第八章 大气动力学

8.1	坐标系	239
8.2	旋转坐标系内的表观力	242
8.3	实际力	247
8.4	水平运动方程	249
8.5	铅直运动方程	255
8.6	热成风	256
8.7	热力学能量方程	260
8.8	连续方程	265
8.9	原始方程组	271
	习题	272

第九章 大气环流

9.1	引言	276
9.2	地球不自转时的热力环流	277
9.3	行星自转对热力环流的影响	281
9.4	热带的热力环流	284
9.5	斜压扰动	288
9.6	动能的损耗	292
9.7	动能循环	295
9.8	大气环流在水分循环中的作用	296
9.9	大气的能量输送	298
9.10	作为热机的大气	299
	习题	300

索 引

第一章

大气概貌

1.1 引言

大气科学是由一些从不同角度描述并探讨地球上和其它行星上的大气现象的有关学科所组成的。传统上,它可分为两门:一门叫气象学[Meteorology, 出自希腊文“meteoros”(意思是“上空的”)和“logos”(意思是“推理”)],它研究大气现象及其随时间变化的特征;另一门叫气候学,它研究构成气候的大气长期统计特性(例如象温度那样的各种测定量的平均值和变化范围以及象雨或大风那样的各种事件的频率,随地理位置、季节和一天中时间而变化)。

气象学传统上也可分为三个主要分支:物理气象学、天气学和动力气象学。物理气象学研究的是大气的组成和结构,电磁波和声波在大气中的传输,云和降水形成的物理过程,大气电学,以及与物理学和化学紧密相关的范围广泛的其它问题。最近物理气象学中高层大气学领域已经迅速发展起来,它专门研究发生于高层大气中的现象。天气学研究的是大尺度大气运动的状况及其分析和预报。在本世纪初,随着第一批台站网的建立,有了能同时提供大范围综观的天气资料的条件,天气学中天气分析和预报就在经验方法的基础上发展起来了。动力气象学研究的也是大气的运动及其随时间的演变,但是与天气学不同,它采用以流体动力学原理为基础的分析方法。随着天气分析和预报方法的逐步发展,天气学和动力气象学两者之间的差别迅速缩小。只有纯理论的动力气象学家不知道天气图是什么样子的,也只有纯天气的气象学家不会运用任何大气运动方程,但这两类人已经几乎没有了。

气候学也可以细分为许多分支,最基本的分类是物理气候学,描述气候学,应用气候学三门。物理气候学研究气候的基本成因;描述气候学系统地阐述全球性、地区性、局部地方和微尺度的气候统计特征;应用气候学,利用气候统计方法以解决实际问题⁽¹⁾。显然,各种尺度的气候均由气象过程来决定,因此物理气候学和气象学之间的差别并不表明这两门学科之间真的象目前表现的那样截然不同,而是这两个领域具有各自不同的历史发展的一种反映。目前人们进一步了解到气候是在连续变化的,不能仅仅依靠收集一些统计量来完全表征它们,应该象大多数气象现象那样,把统计量当作随时间变化的问题来处理,随着对这类事实认识的深化,气象学和气候学之间的区别正在进一步缩小。

正如大气科学中各学科分支之间的界限逐渐变得不明显那样,整个大气科学也变得与其它科学之间的隔离状态愈来愈少,让我们引证一些例子:

1. 高层大气学家、太阳物理学家和空间物理学家都在研究太阳扰动在地球高层大气

(1) 应用气候学所采用的方法,并不仅限于气候统计方法,也可结合一些物理性气候模拟,解决实际存在的问题。——译者注

中所引起的各种现象的机制;

2. 地球气候史模式的重建必须有大气科学家、地球化学家、地质学家、海洋学家和冰川学家们的共同努力;

3. 大气和海洋之间的相互作用正在愈来愈受到大气科学家和海洋学家们的共同注视;

4. 从事大气问题数值模拟工作的应用数学家和计算机学家的人员正在不断增加;

5. 大气污染问题需要具有大气科学、气溶胶物理学和化学方面知识的专家;

6. 对其它行星的大气, 以前主要是推测性的假设, 现在正利用遥感技术和空间探测器进行实验研究和理论研究。

当日益完善的人造卫星技术第一次为科学家们提供从空间有利位置观测和监视全球范围的大气的条件(见图 1.1), 而且高速电子计算机有可能用来对复杂的物理问题进行数值模拟时, 人们对于比较复杂的学科之间的问题就日益重视。这就使现代大气科学显示了强大的生命力。上述新的观测手段和计算工具对于十年前力所不及的复杂的学科间问题提供了攻坚的基础。



图 1.1 利用反射的可见辐射显示的地球图象

1975 年 6 月 12 日格林威治民用时 17⁰⁰

(诺阿照片)

目前不断充实着的大气科学知识正在广泛地应用于许多实际问题中, 包括

1. 预报影响人类活动的大气现象(例如逐日天气、飞机的天气事故、干旱、猛烈风暴、中断无线电通讯的高层大气事件);

2. 人类活动对大气环境影响(例如局地空气污染, 无意识活动对大气成分、天气和气候的影响等)的估量;

3. 选用某些物理措施进行局地尺度气象情况的利导(例如消雾, 抑制冰雹, 增加和重新分配降水等);

4. 应长期规划(例如土地利用, 建筑设计, 飞机和空间飞行器的技术要求等)的需求提供基本的大气统计资料。

在本书中, 我们吸取了各方面的某些观点, 搜集了大气科学范围内各学科目前正获得进展的内容, 同时还深入地介绍一些作为大气科学基础的传统学科的基本概念。

1.2 大气的起源和组成

在地球大气中, 惰性气体(氦、氖、氩、氙、氡)的含量远比太阳中要少(见表 1.1)。人们为了说明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。一般的看法或是认为地球形成时根本无气体参与(例如认为地球是由许多类似于陨星中的固体质粒相互并聚而成)⁽¹⁾, 或是认为在地球形成后不久, 原始大气中的气体物质就丧失了。这两种看法都指出大概在 4.5×10^9 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。可以确信我们今天观测到的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变成的, 如图 1.2 所示。



图 1.2 阿拉斯加[美]的圣·奥古斯丁(st. Augustine)火山在一次主爆发后的喷发。1976 年 2 月
(L. F. Radke 摄)

任何处于活动性火山可闻范围内的人, 很难看出我们现在所知道的大气与从火山喷发出来的“原材料”之间有何相似之处。现在的大气就其质量来说大概由 76% 的氮和 23% 的氧组成, 如表 1.1 所示。但作为对比的从火山喷射出来的气体却大约由 85% 的水汽, 10% 的二氧化碳以及量达百分之几的氮和硫或硫化物(二氧化硫和硫化氢)混合组成。在火山喷发物中显然没有自由的氧。

表 1.1 100 千米以下地球大气的组成

成 分	分子量	含量(占总分子数的比值)	成 分	分子量	含量(占总分子数的比值)
氮(N ₂)	28.016	0.7808(按质量计占 75.51%)	氖(Ne)	20.18	18×10^{-6}
氧(O ₂)	32.00	0.2095(按质量计占 23.14%)	氦(He)	4.00	5×10^{-6}
氩(Ar)	39.94	0.0093(按质量计占 1.28%)	氪(Kr)	83.7	1×10^{-6}
水汽(H ₂ O)	18.02	0~0.04	氢(H ₂)	2.02	0.5×10^{-6}
二氧化碳(CO ₂)	44.01	$325 \times 10^{-6(1)}$	臭氧(O ₃)	48.00	$0 \sim 12 \times 10^{-6}$

(1) 325×10^{-6} 表示百万分之 325, 以下均仿此。

(1) 这些物质即使包含有少量的挥发性物质(在地球表面温度范围内能以气体形式存在的物质)例如水, 但它们在地球形成时, 只能以冰的形式或以同固体物质构成化合物的形式出现。

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, 必须把大气看成是地球组合系统的一部分, 而不是一个与地球隔绝的实体。这个组合系统是由水圈(地面及地表以上水物质的总体), 生物圈(一切有生命的动植物)和称为岩石圈的沉积部分(地壳)组成的。组合系统中包含的挥发性物质总质量约为地球质量的 0.025%。大气质量与组合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, 这个事实很重要, 必须记住。

1.2.1 水圈的演化

当火山爆发时, 大气只能容纳进入其中很小一部分水汽质量(见 2.6 节), 因此地球表面最早的火山活动必定产生云和雨, 通过这一过程形成了地球表面上的水体。现在水圈各组成部分如表 1.2 所示。

表 1.2 水圈的组成部分^{(1),(2)}

成 分	占水圈质量的百分比	成 分	占水圈质量的百分比
海 洋	97	淡水(湖、河等)	0.02
冰	2.4	大气中的水	0.001
淡水(地下)	0.6		

(1) 总质量 = 1.36×10^{21} 千克 = 2.66×10^6 千克·米⁻²(相当于均匀分布在地球表面上)。

(2) 根据 H. H. Lamb «Climate: Present, Past and Future» methuen Co. Ltd., London, 1972, p. 482 给出的资料。

假如以过去一世纪中由火山喷放的蒸汽率代表地球生命期内的平均蒸汽喷放率, 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。对这种偏差的可能解释是在海洋深处水体沿地壳接缝产生渗漏, 另一种可能是大量的水被紫外辐射所光解而受到破坏。

假如我们接受下面的假设, 即金星、火星和地球一样, 是由类似的物质以相同的方式构成的, 那么就可以发生下列疑问: 为什么地球上存在海洋而火星或金星上就没有呢? 火星上不出现海洋是容易解释的: 这个行星的表面太冷, 以致水体不能以液态存在。若火星上水汽也是火山喷射的主要成分, 则大多数水体必定以冰的形式储存在极冠地区。最近“水手号”宇航器从火星获得的资料表明, 在上述地区确实有存在着冰的可能。至于在金星表面, 温度很高(≈ 700 K), 要想在那种条件下找出相当数量的液体水, 冰或水合物似乎是不大可能的。因此金星的固体物质在形成时所包含的水远比地球为少, 或说金星几乎失去了所有的水⁽¹⁾。

1.2.2 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



(1) R. M. Goody 和 J. E. G. Walker 在 «Atmospheres» Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1972, pp. 132~139 中讨论了水的一种可能的损失机制。

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。

现已完全确信, 光合反应 (1.2) 在地球上产生了大量的氧(产生量远大于目前大气中的氧含量, 这将在 1.2.3 节中进一步说明), 但是还不知道从地球形成时的氧化状态出发, 通过光合作用产生的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)作为大气中氧的来源还是一个有争论的问题。因为(1.1)的反应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, 而且在(1.1)中, 氧的生成率完全依赖于反应中产生的氢向空间的逃逸率(其机制将在 1.3.3 节中讨论)。若逃逸率远低于生成率(它们是性质完全不同的过程), 则(1.1)中产生的大多数氧将与氢再重新化合成水。

光合作用生成的氧与生物过程密切相关。由于在(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, 同时在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, 其中的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。下面我们继续根据这一假设进行讨论。

目前人们认为在 4×10^9 年以前, 单细胞有机体当经历演化关键的第一阶段时, 要求一个无氧的环境(即还原性大气)。地质学的根据表明, 在 $3 \sim 2 \times 10^9$ 年以前, 植物生命的原始形态已经发展到开始通过光合反应(1.2)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, 这个环境位于液面以下足以避开致命的太阳紫外辐射的地方, 但又相当接近液面, 以便接受光合作用所需的可见光辐射⁽¹⁾。

根据 7.2.4 节中所讨论的过程, 当大气中的氧逐渐增加时, 就导致了高层大气中臭氧(O_3)层的形成, 从而过滤掉了太阳辐射光谱中的紫外部分。随着臭氧层的发展。透过大气到达地面的紫外辐射愈来愈少, 促使植物生命在海洋中向上扩展进入最上层, 从而扩大了接受可见光辐射的机会, 这种可见光辐射是光合作用中必不可少的成分。愈来愈多的氧——愈来愈少的紫外辐射——愈来愈多的可见光辐射——愈来愈丰富的植物生命——产生更多的氧, 通过这种增益放大过程, 生命就缓慢地但却坚定不移地向液水表面推进, 直到它最后出现在陆地上, 那已大约是 4 亿年前的事了。

1.2.3 氧和碳的平衡

由(1.2)过程每生成一个氧分子, 就有一个碳分子与它结合并被组织到有机化合物中, 在有机物质呼吸或腐烂时, 这些碳原子中的大多数又被氧化了



尽管有几万个碳分子参与光合作用, 但总能有一个分子隐藏起来或“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, 而小部分以比较浓缩的形式储藏在化石燃料(煤、石油和天然气)中。生物圈中的有机碳储存期较短, 含量也少, 只占碳的总储量的很小一部分。以各种形式储存的碳的相对含量如表 1.3 所示。

(1) 单细胞有机体很可能起源于能接受到一些紫外辐射的表面附近。因为实验室试验证明, 当甲烷、氨、水和氢的混合物接受紫外光(或电晕放电的火花)照射后就形成了氨基酸(它是生命的基础)。其中有些新生成的分子在尚未被紫外光离解之前, 可能已输送到水中较深的地方。

另一种引起生命的途径是产生冻结的时候, 最近实验室试验已经证明, 当某些稀薄的水溶液形成冰时, 也会产生一些有机分子, 其中包括四个脱氧核糖核酸(DNA)成分之一的腺嘌呤(它是遗传讯息的载体)。

表 1.3 地表附近碳的相对含量⁽¹⁾

生 物 圈	海洋内生物中的碳	1
	海洋以外生物中的碳	1
气 圈	大气内 CO ₂ 中的碳	70
水 圈	海洋内溶解的 CO ₂ 中的碳	4,000
岩 石 圈	化石燃料中的碳	800
	页岩中的碳	800,000
	碳酸盐岩中的碳	2,000,000

(1) 以相对单位表示, 取自 P. K. Weyl. «Oceanography» John Wiley & Sons. New York. 1970.

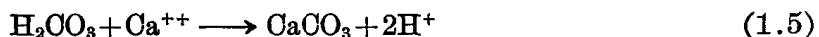
化石燃料的燃烧是光合作用的逆过程。以目前燃料的消耗率计, 人类一年内燃烧的量相当于光合作用一千年生成的量。当我们想起光合作用已经进行了几亿年, 显然这种消耗率是并不值得惊慌的, 而且我们还可以从这样的事实得到抚慰, 即: 地壳中储藏了大量的有机碳, 尽管从人类的开发利用来考虑含量还是太少了些。

在地球历史时期内, 由植物生命生成的氧的净总量(即光合作用生成的扣除腐烂分解掉的)只有 10% 储存于现在的大气中, 氧的大多数以氧化物例如 Fe₂O₃ 和碳酸盐类(CaCO₃ 和 MgCO₃)的形式存在于地壳中, 其中碳酸盐类的形成具有特殊意义, 因为它是在火山活动中释放的大量二氧化碳的主要的汇。

碳酸盐是通过发生在某些海洋有机体中的离子交换⁽¹⁾反应而生成的, 这类有机体中最重要的是单细胞有孔目。二氧化碳溶解后形成弱的碳酸溶液



随后又产生了一系列反应, 其净效应如下:



CaCO₃ 进入动物躯壳, 最后又被沉积在地壳的石灰石中。碳酸镁的形成也与此类似。(1.5) 中放出的氢离子同地壳中的金属氧化物产生反应, 从中夺取一个氧原子, 使自己变成另一个水分子。而金属氧化物缺少了一个氧原子后就有从大气中来的氧原子来代替它。因此当碳酸盐形成时, 大气中的氧会有所减少, 而碳酸盐分解时, 氧又会返回大气。根据这个道理, 人们早就认为有孔目等各种能形成碳酸盐的海生动物, 作为在碳酸盐形成过程中的中间体, 它们具有调节大气中氧的含量的本领, 使得过去几百万年以来, 大气中的氧始终维持不变。

石灰岩中到处出现海生动物化石, 说明在海水中, 离子交换反应对移除地球大气中的二氧化碳起了重要作用。火星大气以二氧化碳为主, 可能就是(至少部分是)由于火星表面没有液体水的缘故。金星大气也含有大量的二氧化碳, 但原因与火星不同, 这是金星表面温度很高而引起的, 在这样高的温度下, 金星大气中二氧化碳总量和表面岩层中的碳酸盐储量之间, 一定存在近似的平衡关系, 其反应为



有迹象表明, 地球大气中二氧化碳的移除率跟不上由于燃烧化石燃料而不断增加的二氧化碳的输入率。自从本世纪初期以来, 大气中的二氧化碳浓度一直在稳定上升, 如图 1.3 所示。输入增加率大致已达到燃烧化石燃料添加到大气中的二氧化碳输入率的一半。

(1) (1.5) 式即为离子交换的化学反应实例, 可以看出钙和氢交换了离子。——译者注