

Change and Prediction of Weather and Climate

天气和气候 的变化与预测

赵传湖 盛立芳 孙即霖 姜霞 编著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

天气和气候的变化与预测

赵传湖 盛立芳 编著
孙即霖 姜霞
周发琇 主审

中国海洋大学出版社

· 青岛 ·

内容简介

本书作者在积累了多年教学经验的基础上,编写了这本关于天气和气候的变化与预测的
通识教材,旨在使非大气科学专业的学生对天气现象和天气的变化有正确认识,了解天气预
报和气候预测中的不可知因素,提高探究自然的兴趣。全书共分四章,包括大气概述、天气系
统与天气的变化、气候变化、天气预报和气候预测及预估等。内容包括大气科学的基本概念
和理论、天气和气候变化的事实与规律、天气预报与气候预测及预估的基本方法。本书结构
完整、紧凑,取材广泛、深度适中,注意理论联系实际,结合最新的研究和教学成果,力求突出
教材的科学性、系统性和启发性,兼具通俗性和趣味性。

本书适用于非大气科学专业的学生,也可作为大气科学专业学生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

天气和气候的变化与预测 / 赵传湖等编著. —青岛:
中国海洋大学出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-5670-0391-0
I. ①天… II. ①赵… III. ①天气预报—高等学校—
教材②气候预测—高等学校—教材 IV. ①P45②P46
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 191689 号

出版发行 中国海洋大学出版社
社 址 青岛市香港东路 23 号 邮政编码 266071
出 版 人 杨立敏
网 址 <http://www.ouc-press.com>
电子信箱 dengzhike@sohu.com
订购电话 0532-82032573(传真)
责任编辑 邓志科 电 话 0532-85902495
印 制 日照日报印务中心
版 次 2014 年 7 月第 1 版
印 次 2014 年 7 月第 1 次印刷
成品尺寸 170 mm×230 mm
印 张 13.625
字 数 245 千
定 价 35.00 元

前 言

大气是地球上生物生存所必需的条件,天气和气候是人们每天都在谈论的话题。人们的日常生活、工农业生产等也都与天气和气候的变化有着密切的关系。随着现代科学的发展,尤其是人们在面临如全球变暖、臭氧层破坏、土地荒漠化、环境污染加剧等全球问题时,已经不能仅从大气本身的变化考虑,而必须从地球系统科学的角度分析才有可能得到解答。然而目前国内关于天气与气候变化的书籍,专业性非常强,缺少一本能对天气和气候作比较全面的介绍且通俗易懂的书,不能满足通识教育背景下大学生对大气科学专业和行业了解的需求。

我们在参阅多本教材和科普读物的基础上,通过整理非大气科学本科生通识课程讲义而编撰成了这本通识课教材。编写本书时,我们参考并融合了大气、海洋、环境、地质、生物等方面的材料,结合最新的研究成果和教学成果,力求在阐述天气和气候的变化时,兼顾学科交叉和各圈层相互作用方面的分析。教材深度介于专业性和科普性之间,在追求科学性和系统性的基础上,兼顾内容和表达上的趣味性,用相对浅显的语言,描述相关的基本概念和理论,结合与之相应的实例,理论联系实际,力争满足不同知识层面学生的学习需要。以期开拓学生的视野,满足学生探究大气奥秘的渴望。

本书共分四章,第一章由赵传湖完成,介绍大气的演化历史、成分和结构;第二章由盛立芳完成,介绍大气环流,常见天气系统的特征、变化规律及其对天气的影响;第三章由赵传湖和孙即霖完成,介绍气候的平均态、气候变化的事实及原因;第四章由孙即霖和赵传湖完成,介绍当前天气预报和气候预测的水平及所依赖的技术。全书由赵传湖和盛立芳统稿,经过多次集体讨论修改后定稿。大气科学的发展日新月异,尤其是在全球变化的背景下,极端天气和气候事件频发,天气和气候特征及其演变规律也是不断变化的。本书的编写是一个初步探索。我们期望在教学实践当中,能够结合更新的研究成果,对本教材进行不断补充、更新,甚至取得突破。

书稿承蒙周发琇老师审阅,提出了宝贵的意见和建议,谨致深切谢意。书稿大纲和全文审校过程中得到了黄菲、李春、屈文军、刘应辰、毛新燕等老师的支持和帮助,感谢万夫敬工程师提供部分数据资料,感谢陈文蕾老师给予的修改建议,感谢熊超伟和张梦晨参与校稿工作。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2014年6月

目 录

第一章 大气概述	(1)
1.1 地球系统	(1)
1.1.1 认识地球	(1)
1.1.2 地球系统的概念	(3)
1.1.3 地球系统的组成	(3)
1.1.3.1 行星系统	(3)
1.1.3.2 地核和地幔	(4)
1.1.3.3 岩石圈	(5)
1.1.3.4 水圈	(5)
1.1.3.5 生物圈	(7)
1.1.3.6 大气圈	(7)
1.2 大气的演化	(7)
1.2.1 地球的形成	(8)
1.2.2 大气圈的前世今生	(9)
1.2.2.1 原始大气	(9)
1.2.2.2 次生大气	(11)
1.2.2.3 现代大气	(12)
1.2.3 现代大气的成分	(13)
1.2.3.1 氮气	(14)
1.2.3.2 氧气	(14)
1.2.3.3 二氧化碳	(14)
1.2.3.4 臭氧	(15)
1.2.3.5 水汽	(17)
1.2.3.6 大气颗粒物	(18)
1.2.4 人类活动对大气成分的影响	(18)
1.2.4.1 温室气体含量的增加	(18)

1.2.4.2	臭氧层的破坏与臭氧洞	(19)
1.2.4.3	酸雨的危害	(21)
1.2.4.4	城市空气污染	(21)
1.3	大气的垂直结构	(22)
1.3.1	主要气象要素	(22)
1.3.1.1	气温	(23)
1.3.1.2	气压	(24)
1.3.1.3	湿度	(25)
1.3.1.4	风	(26)
1.3.2	大气的垂直结构	(30)
1.3.2.1	按气温的垂直结构分层	(30)
1.3.2.2	按大气的化学组成分层	(32)
1.3.2.3	按大气的电离状态分层	(33)
1.4	大气探测	(37)
1.4.1	大气探测发展简史	(37)
1.4.1.1	目测阶段	(37)
1.4.1.2	地面气象观测发展阶段	(37)
1.4.1.3	高空气象探测发展阶段	(37)
1.4.1.4	大气遥感发展阶段	(38)
1.4.2	大气探测的项目	(39)
1.5	天气与气候	(41)
第二章	天气系统与天气的变化	(42)
2.1	天气系统术语	(42)
2.2	大气环流	(46)
2.3	大尺度系统	(50)
2.3.1	阻塞高压	(51)
2.3.2	副热带高压	(53)
2.3.3	热带辐合带	(57)
2.4	天气尺度系统	(59)
2.4.1	锋	(59)
2.4.1.1	暖锋	(60)
2.4.1.2	冷锋	(60)

2.4.1.3	锢囚锋	(62)
2.4.1.4	静止锋	(62)
2.4.2	气旋	(62)
2.4.2.1	极地气旋	(64)
2.4.2.2	温带气旋	(67)
2.4.2.3	副热带气旋	(70)
2.4.2.4	热带气旋	(70)
2.5	中小尺度系统	(75)
2.5.1	雷暴	(76)
2.5.2	飏线	(78)
2.5.3	龙卷风	(80)
2.5.4	背风波	(83)
第三章	气候变化	(86)
3.1	气候与气候系统	(86)
3.1.1	气候概念的发展	(86)
3.1.2	气候系统的驱动力	(88)
3.1.3	气候系统内部的能量传递	(90)
3.1.3.1	大气的运动	(90)
3.1.3.2	大洋环流	(93)
3.1.4	气候系统内部的反馈过程	(97)
3.1.4.1	水汽—辐射反馈	(98)
3.1.4.2	云强迫及反馈	(98)
3.1.4.3	冰雪—反照率反馈	(98)
3.1.4.4	二氧化碳的反馈	(99)
3.2	气候系统的平均状态	(100)
3.2.1	时间平均的大气环流	(100)
3.2.1.1	地面气压场和风场分布	(100)
3.2.1.2	500 hPa 高度场分布	(102)
3.2.1.3	200 hPa 风场分布	(102)
3.2.2	时间平均的大洋环流	(104)
3.2.2.1	海水的性质	(104)
3.2.2.2	大洋表层温度、盐度和密度的水平分布	(105)

3.2.2.3 大洋温度、盐度和密度的垂直分布	(108)
3.3 气候变化的事实	(111)
3.3.1 气候变化的含义	(111)
3.3.2 地球早期的气候	(112)
3.3.3 大冰期—大间冰期交替	(113)
3.3.4 第四纪冰期—间冰期旋回	(116)
3.3.5 全新世气候变化	(118)
3.3.6 器测时代的气候变化	(122)
3.3.6.1 近百年气候变化的事实	(122)
3.3.6.2 东亚季风	(124)
3.3.6.3 厄尔尼诺、拉尼娜和南方涛动	(133)
3.4 气候变化的原因	(138)
3.4.1 气候变化的自然原因	(138)
3.4.1.1 太阳活动	(138)
3.4.1.2 地球轨道要素	(140)
3.4.1.3 火山活动	(141)
3.4.2 人类活动对气候的影响	(141)
3.4.2.1 人类活动对全球气候的影响	(141)
3.4.2.2 人为排放气溶胶对气候的影响	(143)
3.4.2.3 人类活动改变小气候	(144)
第四章 天气预报和气候预测及预估	(148)
4.1 概论	(148)
4.1.1 天气预报的发展史——从目测到器测	(148)
4.1.2 天气预报的困难——非周期性	(150)
4.1.3 大气科学中的确定性与不确定性	(151)
4.1.4 天气和气候的可预报性	(153)
4.1.5 气候预测发展和改进的途径	(155)
4.1.6 大气中的非线性现象	(155)
4.1.7 高指数环流和低指数环流	(156)
4.1.8 天气预报流程	(157)
4.1.8.1 搜集数据	(157)
4.1.8.2 数据同化	(157)

4.1.8.3 数值天气预报	(157)
4.1.8.4 输出处理	(158)
4.2 气象站天气预报	(158)
4.2.1 现代天气预报技术的发展趋势	(158)
4.2.2 天气预报的方法	(160)
4.2.3 提高预报准确率	(162)
4.2.4 气象台站进行天气预报的一般流程	(164)
4.3 中长期天气预报	(165)
4.3.1 中期天气预报概述	(165)
4.3.2 低频天气图预报方法	(169)
4.4 短期气候预测的物理基础及预测思路	(172)
4.4.1 短期气候预测方法	(173)
4.4.2 中国气候的年代际变率	(173)
4.4.3 影响短期气候变化的因素	(174)
4.4.4 短期气候预测建模	(175)
4.4.5 统计降尺度法	(176)
4.5 未来气候变化预估	(177)
4.5.1 21 世纪地表气温的预估	(179)
4.5.2 21 世纪降水的预估	(180)
4.5.3 21 世纪海平面的预估	(181)
4.5.4 温室气体排放的典型浓度路径	(182)
附录一 关于天气预报和气候预测的谚语	(185)
附录二 气象灾害预警信号	(189)
参考文献	(202)

第一章 大气概述

包围着地球的气体外壳称为地球大气。地球大气的演化经历了原始大气、次生大气和现代大气三个阶段。在地球产生以来约 46 亿年的漫长演化过程中,大气的成分和结构发生了非常显著的变化,这与生命发展进程紧密相关,对现代地球环境的形成产生了重要影响。

地球大气是一切生物包括人类赖以生存的最重要的环境。从地球表面到 90 km 左右高空的大气层中,特别是地表到 10 km 高度的大气层存在着不同时空尺度大气的运动。发生着各种物理过程,如风、云、雨、雪、雾、霜、雷、雹的形成等;也发生着各种生物化学过程,如稻田排放甲烷、燃料燃烧排放二氧化碳、工厂排放二氧化硫、汽车产生氧化亚氮等。

本章将在简要介绍地球系统起源和大气演化的基础上,重点介绍大气的成分、垂直结构和大气探测等内容。

1.1 地球系统

从“天人合一”的原始地球观,到对地质学、气象学、海洋学和生态学等单一学科的细致研究,再到逐渐形成统一考虑各子学科的地球系统科学的观念,人类自诞生之日起就开始了自然界奥秘的探索与追求。大气科学是这些子学科中不可或缺的部分,要认识大气中的各种现象和过程,首先要对地球系统概况有一个总体的认识。

1.1.1 认识地球

太空研究的发展使得人类有机会从太空中看地球。从地球之外看这个蓝白相间的世界,让人们不禁感叹能生活在这个美丽的星球上是多么幸运(图 1.1)。但是,人类对于地球形状的认识,却是经历了漫长的过程。远古时代,人类先祖凭借直观的感觉,产生了“天圆地方”的原始认识;直到古希腊时,思想家亚里士多德(Aristotle)依据帆船离岸时船身由下而上渐渐消失的事实和地球黑

影造成了圆弧形的月食的例子,第一次对大地是球形的观点作出了论证。进入航海时代后,人类又通过全球航行直接证明大地确是个球体。近三十年来,人们利用卫星对地球进行观测,发现地球的赤道部分略鼓,北极有点尖,南极有点凹。这是人们对地球形状的新认识。尽管如此,不仅测量数据还存在一定的误差,地球的形状也不是永恒不变的。今天人们所获得的有关地球形状的各种数据只能代表今天的地球,在此之前或之后,地球都可能有另外的形状。

科学作为人类的一种认识实践活动,不断积累、发展、提高、变化,不断地更新、不断地前进着。与对地球形状认识过程相伴随的,是人类对地球上生命形式及其生存环境的思考。文明史创造中,古希腊、巴比伦、古埃及和古中国都有辉煌的一页,对天文学、数学、地学和生物学等都有着相当精彩的论述。1543年,哥白尼(N. Copernicus)的《天体运行论》问世,标志着近代自然科学的诞生。自此之后,地球科学的各个分支,包括大气科学、海洋科学、地理科学和地质科学等,获得了长足的发展,专业划分也越来越细,单一学科的内容更为丰富。20世纪后半叶,随着人们对地球上物理、化学、生物作用过程的认识不断深入,彼此割裂的单一学科研究已无法解决人类面临的资源、环境、灾害等重大问题,这就需要对各个学科进行综合分析。



图 1.1 阿波罗飞船上看到的地球(Lutgens 等,2004)

20世纪60年代,英国大气科学家拉伍格克(J. Lovelock)提出了盖娅假说,并由他本人及其合作者们不断研究和发展。盖娅假说认为,地球是活着的,地球本身就是一个巨大的有机体,具有自我调节的能力。地球表面的沉积物和大气层的温度,反应气体的化学、氧化还原状态及 pH 值等,是由生命有机体的代谢、行为、生长和繁殖来保持动态平衡的。盖娅假说提供了一种新的自然观,其主要内涵是生物对环境有着显著的影响,生物的进化和环境的变化交织在一起,互相影响。该假说从整体角度自上而下看待地球的方法,有助于人们更好地认识地球及其周围的世界。

1.1.2 地球系统的概念

20世纪80年代以来,地球科学发展更为迅猛,科学家们在面对全球环境挑战时,普遍认识到必须把地球的各个组元或子系统——主要是地核、地幔、土壤、岩石圈、大气圈、水圈、生物圈(包括人类社会)——统一研究,而提出了地球系统科学的概念。

(1)狭义概念:地球系统科学是为了解释地球动力、地球演变和全球变化,对组成地球系统各部分、各圈层相互作用机制进行综合研究的一门科学。地球系统则是由地核、地幔、岩石圈、水圈、大气圈和生物圈相互作用而组成的统一体(图 1.2)。

(2)广义概念:地球系统科学跨越一系列自然科学与社会科学。地球系统是把地球看成一个由相互作用的地核、地幔、岩石圈、水圈、大气圈、生物圈(包括人类社会)和行星系统等构成的统一系统。地球系统科学是一门重点研究各组成部分之间相互作用的科学,以解释地球的动力、演化和全球变化。其目标是为了了解整个地球系统的过去、现在及未来的行为。

1.1.3 地球系统的组成

1.1.3.1 行星系统

太阳系是由太阳、八大行星和它们的卫星、众多的小行星、彗星和流星体以及行星际物质组成的天体系统。除了太阳之外,此天体系统的主要成员是行星,常称作行星系。太阳是太阳系的中心天体,太阳的质量占整个太阳系总质量的99%以上。太阳系有八大行星,按照离太阳的平均距离由近到远,分别是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。八大行星绕太阳公转。除水星和金星外,其余行星都有卫星,卫星围绕各自的行星转动。另外,行星和

卫星都有自转。

1.1.3.2 地核和地幔

地震波是震源或人工爆炸(如核爆炸)产生的弹性波,在地球内部传播时会因为内部物质密度的不同而发生折射与反射。地震波中的横波只能在固体物质中传播,速度较慢;纵波既可以在固体中传播,也可以在液体中传播,且传播速度较快。人们综合全球地震记录,根据地震波的传播特点,探知地球内部有三大圈层:地壳、地幔、地核。地壳的厚度很不均匀,海洋地壳平均厚度仅约 6 km,大陆地壳厚度为 20~70 km(青藏高原),可粗略地取地壳平均厚度为 33 km。地壳以莫霍面与地幔分界。地幔分为上地幔层、过渡层和下地幔层,除地幔上部有一层软流圈是熔融态外,其余部分主要是固态的。地幔底部由古登堡面(地球深处大约 2 900 km 处)跟地核分界。地核分为外核、过渡层和内核,外核是液态的,内核则可能是固态的。

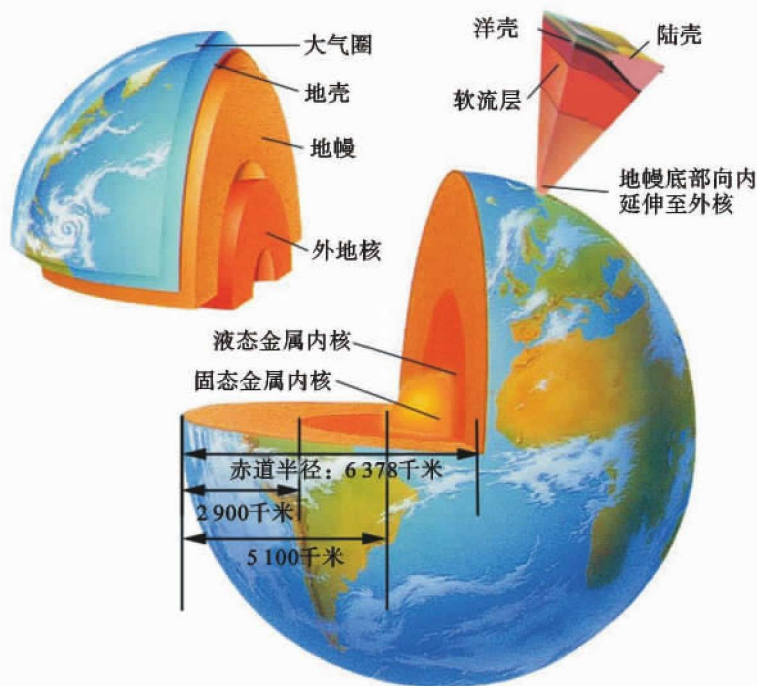


图 1.2 地球的圈层结构

(<http://www.particle2cosmos.com/home/?action-viewnews-itemid-13>)

1.1.3.3 岩石圈

地壳和软流圈以上的上地幔顶部(软流圈是地幔的一部分弱塑性变形区域,是岩浆的主要发源地之一。岩石圈与软流圈的边界,定义在 1300°C 等温线。此线以上的岩石圈为刚性变形,此线以下的软流圈为黏滞变形)都是由刚性岩石组成,称为岩石圈(图1.2和表1.1)。岩石圈厚度不一,从不足50 km到125 km以上,平均约为75 km。岩石按成因可分为火成岩、沉积岩和变质岩三类。火成岩又叫岩浆岩,是由岩浆冷却和结晶形成的,占地壳岩石体积的64.7%。沉积岩又叫水成岩,是地表中最多的岩石(占地表裸露岩石的75%),但只占地壳岩石的小部分(7.9%)。沉积岩是其他岩石的风化产物和一些火山喷发物等,经过水流或冰川的搬运、沉积和成岩作用形成的岩石,富含矿产资源(煤、石油、铁、铝、盐类等)。变质岩是由火成岩或沉积岩在物理—化学环境(温度、压力、热液等)改造下形成的,其矿物成分和结构都发生一系列变化(变质过程)。根据成因不同,可将变质岩分为区域变质岩、接触变质岩、冲击变质岩等。

表 1.1 地球内部主要物理性质和圈层划分(刘本培,2000)

圈层名称		特征	其他	
地壳	上地壳	固态,陆壳区横向变化大,许多地区夹有中间低速层	岩石圈	构造圈
	下地壳			
地幔	上地幔	盖层	固态	软流圈
		低速层*	塑性为主	
		均匀层	固态,地震波波速较均匀	中间圈
	过渡层	固态,地震波波速梯度大		
	下地幔	固态,下部地震波波速梯度大		
地核	外核	液态	内圈	
	过渡层	液态,地震波波速梯度小		
	内核	固态		

注:*软流圈存在部分熔融,地震波在软流圈中传播的波速下降10%左右,形成一个低速区。

1.1.3.4 水圈

地球上除了存在于各种矿物中的化合水、结合水以及为深层岩石所封存的液态水以外,海洋、河流、湖泊、沼泽、冰川、积雪、地下水和大气中的水等共同组

成了地球上的水圈。地表水约覆盖地球表面总面积的 71%，其中主要是海洋覆盖(70.8%)。在地球的全部水中,海洋占 97%，陆地水不到 3%，大气中水仅占 0.001%。陆地水的 77%左右在冰盖(格陵兰和南极)和冰川中,其余的是地下水。

水圈中的水分处于不停的运动中,从海洋到大气、到陆地,再归于海洋,形成水循环(图 1.3)。在太阳辐射的作用下,地球上的水体、土壤和植物叶面的水分通过蒸发和蒸腾作用进入大气,被气流输送到其他地方。在一定的条件下,水汽遇冷凝结成云致雨,又回到地面。降落到地面的水一部分补给地下水,大部分经流动汇集到江河湖海。在运动过程中,水又重新产生蒸发、输送、凝结、降水和径流等变化。地下水又可以涌出地表成为河流及湖泊的补给水,再经蒸发进入大气。降水、蒸发和径流是水分循环中的三个重要环节。通过水循环,水圈各水体中的水互相交换,不断更新。

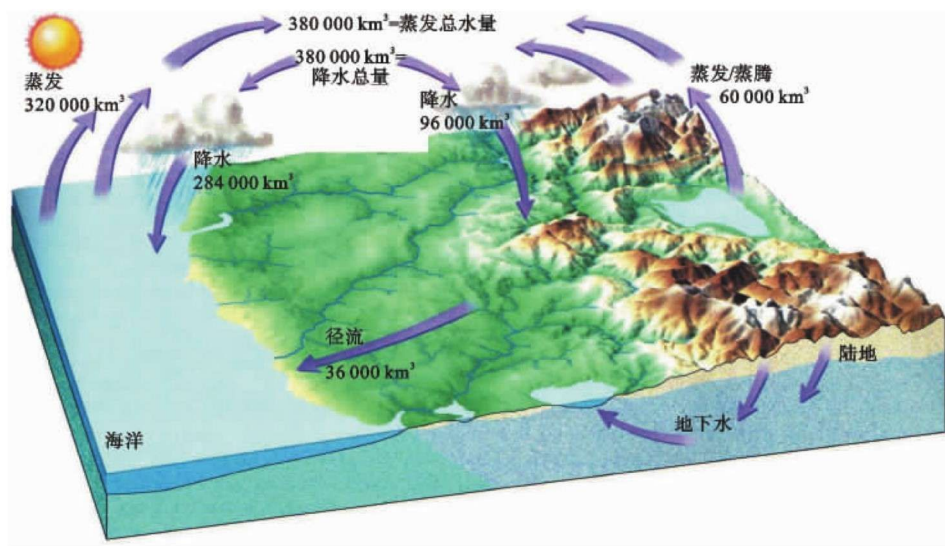


图 1.3 地球上的水循环(Lutgens 等,2004)

地球上各个水体的更新期差别很大。大气中的水更新期一般为 9~12 天,河流中的水更新期一般为 12~20 天,潜水面(埋藏在第一个隔水层之上的水称为潜水,潜水的自由表面称潜水面)以上的土壤水更新期一般为 15~30 天,湖泊水更新期平均为几十年,地下水更新期平均为几百年,海洋水更新期平均为几千年,冰川水更新期长达一万年。

海洋对全球大气环流和许多地区的气候异常有重要影响,通过海—气相互作用来影响大气环流、水循环和气候变化。据估计,达到地表的太阳辐射能约

80%被海洋表面吸收,通过海水内部的运动,热量向下传输混合。若仅考虑 100 m 深的表层海水,其总热量就占整个地球四圈系统(岩石圈、水圈、大气圈、生物圈)总热量的 95.5%,可见其在地球系统中的重要性。

1.1.3.5 生物圈

生物圈是地球表层有生命活动的圈层,包括植物、动物和微生物等,并包括所有生物存在的部分岩石圈、水圈和大气圈。生物只在一定的物理环境(大气、水、土壤、阳光、温度等)下才能生存;另一方面生物也起着保护和改变地球环境的作用。生物对于大气和海洋的二氧化碳平衡,气溶胶粒子的产生以及其他气体成分和盐类有关的化学平衡等有很重要的作用。

生物圈的形成是地球外部圈层(大气、水、生物与岩石圈表层)互相作用的产物,反过来,生物圈也可对地球外部其他圈层产生巨大的作用,使其物质成分或面貌发生变化。植被可以随着温度、辐射和降水的变化而发生变化,反过来又影响地面粗糙度和反射率以及蒸发、蒸腾和地下水循环。动物群体变化会影响植物生态和气候变化。人类活动既受大气、水、生态环境的影响,又通过工农业生产和城市建设不断改变土壤、水的利用状况,从而对大气、水和生态环境产生影响,并对气候变化产生影响。人类作为生物圈的特殊组成部分,其活动在现今大气环境的变化中起了重要作用。

1.1.3.6 大气圈

包围在地球表面的大气层称为大气圈。虽然就质量而言,地球大气圈只占地球质量的微少部分,却跟人类生活息息相关。它不仅提供了我们呼吸的空气,而且阻挡了太阳到达地面的有害辐射。大气与地表及其与宇宙空间的能量交换形成了多种多样的天气与气候。如果没有大气圈的存在,不但生命将不复生存,而且地球各圈层之间的许多相互作用和过程也将不再出现,地球将会是一个沉寂而少变的世界。

1.2 大气的演化

地球大气与太阳系中其他星球的大气很不相同,在目前的认知水平上,人类尚未发现另外一个天体能像地球一样有适合生命存在的环境。现在的大气圈是地球长期演化的结果,其发育和演变又受到地球其他圈层发育演变的影响。