

第一章 概述

包围地球的空气称大气层。虽然它的总质量只有地球的 120 万分之一 但是它是一切生物和人类赖以生存最重要的环境。并且，从地表到 80 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各种不同尺度大气的运动，发生着各种物理现象和天气现象，如雾、霜、冰雪和雨、冬季的寒潮、夏季的台风、暴雨、冰雹、雷电等 以及发生着各种化学现象 如温室气体 CO_2 稻田排放的 CH_4 、工厂烟囱经常排放的 SO_2 、汽车产生的 N_2O 等。因此 大气科学是自然科学中非常重要的学科之一，它有着广泛的研究内容；并且，它有着自己独特的研究方法和研究特点。本章将介绍大气科学的重要性、大气科学的研究内容、研究方法与特点。

第一节 大气科学的重要性

由于地球大气是一切生物和人类赖以生存最重要的环境。一切生物和人类的生存均需要阳光、空气和清水 不仅空气直接与大气有关 而且阳光也要经过大气才到达地面 至于清水主要来自天空的降水，它们也与大气密切相关，因此，大气科学可以说是自然科学中最重要的学科之一。

一、大气科学理论在自然科学中的作用

不仅大气科学所研究的现象是自然界中重要的现象，而且大气科学的理论对自然科学的发展也起了很大作用。20 世纪 20 年代挪威著名气象学家皮叶克尼斯 (V. Bjerknes) 提出斜压大气和环流理论，推动了整个宏观流体动力学的研究；1922 年英国科学家理查逊 (L. F. Richardson) 提出逐步积分的概念，促进了后来计算机技术的发明和发展；30 年代著名的美籍瑞典气象学家罗斯贝 (C. G. Rossby) 提出 我国著名气象学家叶笃正、曾庆存所发展的大气适应理论说明了在大气、海洋这种自然界中质量的分布与运动互相作用，运动产生于质量分布不均匀中，而质量的分布是在运动中形成的，这是自然辩证法的一个很好的发展；在 60 年代初，美国伟大气象学者洛伦兹 (E. N. Lorenz) 提出分岔、混沌和怪吸引子概念，他提出科学上的确定论与随机论不能截然分开，它们是可以互相联系起来的，这被公认为当代自然科学的重大突破。这些概念的提出不仅使气候动力学大大发展 而且使数学、物理学、生物学等自然科学取得重大突破，同时使社会科学得到很大发展。哲学界认为自然科学发展中有三次革命：第一次科学革命是 17 世纪初牛顿创立的经典力学，它使观测和实验所得到的科学现象上升为理论，产生了近代自然科学理论；第二次科学革命是 20 世纪初爱因斯坦提出的狭义和广义相对论，为量子力学等现代科学的发展提供了理论基础；第三次科学革命就是伟大气象学家洛伦兹所提出的非线性的‘分岔、混沌和怪吸引子’概念 这个理论把自然界的确定变化与无序变化联系起来，从而可以描述自然界物体运动的多样性、奇异性和复杂性。

从上面一些例子可以说明大气科学的理论对于自然科学的发展是有很大大作用的。

二、大气科学研究在国民经济建设和社会发展中的作用

大气科学研究对于国民经济建设和社会的发展有着重大作用，下面从大气科学在防灾减灾、环境保护、航线航路安全等方面来论述它的作用。

（一）在防灾减灾中的作用

大气科学与社会和经济的发展有着密切关系。发生在大气中的各种现象及其变化，如雨水和温暖等可以造福人类，但是它们也可带来严寒、酷暑、干旱和雨涝、冰雹、龙卷等灾害性气候和天气，这些都直接影响了工农业生产、交通运输和人民生活，甚至威胁了人民的生命财产。发生在大气中的气象灾害，每年给全世界带来数百亿美元的经济损失。

我国是世界气候脆弱区之一，气候异常给我国带来了严重气候灾害，尤其是旱涝灾害。一般年份，旱涝灾害的受灾面积可达 $0.3 \times 10^8 \sim 0.4 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，重灾年可达 $0.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，约占耕地总面积的 $1/3$ 。这些灾害每年约造成 $200 \times 10^8 \text{ kg}$ 的粮食损失和 1000~2000 亿元的经济损失，约占 20 世纪 90 年代国民总产值的 $3\% \sim 6\%$ 左右。这就是说，全国人民辛辛苦苦一年所取得国民经济的发展增加值，其中一部分要被严重的气候和天气灾害损失掉。因此，气候和天气灾害的成因及预测已成为我国大气科学的前沿研究问题。

习惯上，人们把气候灾害与天气灾害统称为气象灾害，其实两者还是有区别的。天气灾害是指局地性、短时间的强烈天气而带来的灾害，如台风、暴雨、冰雹、龙卷风等，这类天气常伴有强风和暴雨，对农作物生长有很大的毁坏作用；而气候灾害则是大范围、长时间的气候异常造成的灾害，如长时间气温偏高、偏低、或降水量偏多、偏少等。气候异常会带来干旱、洪涝、低温、冷害等，较严重的会对农业、工业、牧业、水利、交通等产生巨大影响，造成巨大经济损失。

20 世纪 90 年代以来，我国因气象灾害造成的经济损失每年平均在 1000 亿元以上。1991 年夏季淮河流域及长江中、下游地区发生的特大洪涝，以及华南和河套地区的严重干旱，约造成 1200 亿元的经济损失；1994 年江淮流域的严重干旱及华南与江南地区严重洪涝造成的经济损失竟达到 1800 亿元；1997 年因受厄尔尼诺事件的影响，气象灾害约造成 1975 亿元的经济损失；1998 年夏季长江流域和嫩江、松花江流域发生的特大洪涝，造成了约 2600 亿元的经济损失。我国气候灾害中以干旱与雨涝两种气候灾害最为严重，约占气象灾害总损失的 78%。由于气候和天气灾害造成的经济损失如此之大，因此，研究这些气候和天气灾害的发生及成因，特别是关于这些气候和天气灾害预测机理和方法的研究是当前国际科学研究的热门课题，更是我国社会发展和经济建设中急需研究的一项重要科学问题。

（二）在环境保护中的作用

大气为人类生活和生物的生存提供环境条件，然而，人类在生产和生活过程中也不断影响着大气环境。随着世界各国工农业的不断发展，大量使用化石燃料和燃烧有机物、大量施用化肥、人类生活中大量使用冰箱和汽车、汽车尾气大量是氮氧化合物、冰箱大量使用氟里昂，而氟里昂将会破坏大气中的臭氧 (O_3)，由于水稻种植和有机物的腐化会产生大量甲烷 (CH_4)。这就是说人类活动大量产生温室气体；另一方面，由于工农业生产大量砍伐森林，吸收二氧化碳大大减少。这样大气中温室气体浓度不断增加，从而导致全球气温上升。根据科学家的估算，当二氧化碳增加 1 倍时，全球气温将升高 1.5°C 左右。由于全球气温升高，这将导致全球海平面升高，到 2050 年前后，海平面平均将要升高 22 cm 左右，并且干旱化、荒漠化加剧，水资源缺乏；此外，全球生态系统、人类居住的环境恶化、水资源和空气污染等严重地影响着人类的生

活。因此，大气环境变化不仅是当前全世界各国政府和人民普遍关注的问题，而且也是各国政府制定工农业发展规划和决策必须考虑的问题。

研究大气的成分如何变化及其在大气中如何通过物理的、化学的和动力的过程来改变着地球环境也是大气科学主要研究内容之一。大气科学的研究结果可以告戒全世界人民和政府如何来保护地球大气和人类的生存环境。因此大气科学不仅对于环境保护具有重要作用，而且对于各国经济可持续性发展也是必不可少的一门学科。

(三) 大气科学在现代交通运输上的重要作用

1. 对飞机起飞、飞行和降落的影响

从第二次世界大战之后，飞机已逐渐成为世界上快速、方便的交通工具，到 20 世纪 90 年代每天都有千万次航班的飞机在大气层中飞行。由于飞机的速度很快，每小时上千公里，因此空中的颠簸、能见度、雷电等严重地影响起飞、飞行和降落的安全。空中颠簸主要是由于气流切变大而产生湍流以及由于强盛积云对流产生强的垂直运动所致。空中颠簸过强容易使飞机受到破坏，有时也会引起空难事故。并且机场能见度太差严重影响飞机起飞和降落，大气中雾将直接影响机场的能见度，据统计，美国由于浓雾每年机场大概关闭 115 h (小时) 造成很大损失。我国一些海滨城市冬、春季浓雾也经常发生严重影响机场能见度。由于能见度太差，飞机起飞或降落看不清跑道，从而在一定程度上也影响飞机的起飞和降落，甚至产生空难事故。雷电经常破坏地面上的建筑物，在空中当然会毁坏飞机，特别在机场上空发生的雷电，对飞机的起飞和降落有严重影响。因此在雷电发生的时候，为了确保飞机起飞和降落的安全，机场一般将会关闭。由于雷电时间比浓雾时间短，故机场遇到雷电天气时会短时间关闭，待产生雷电的中尺度天气系统过境后才重新开放。此外，暴雨或大雪天气，由于跑道滑，且能见度也受影响，在一定程度上也影响飞机的起飞与降落。

综上所述，对于雾、雪、雷电等的准确预报对保证飞机飞行安全是极其重要的。

2. 对海港和轮船航行的影响

轮船由于可以运输较重的货物，因此它是现代洲际之间货物主要运输工具。海浪、海冰、风暴潮等严重影响海上轮船的航行。由于台风、强风暴引起的巨浪经常使轮船发生海难事故，特别在大西洋由于强风暴引起的海难时有发生。并且，全世界较大海港有 3000 个，年吞吐量约 50×10^8 t (吨)，其产值 10000 亿美元以上，而由于台风、寒潮或强风暴引起的风暴潮不仅将对海港吞吐产生严重影响，而且还对海港建设起一定破坏作用。我国是多台风、多寒潮的国家，经常在沿海引起风暴潮，如 1994 年 8 月 21 日 17 号台风在浙江省瑞安登陆，由于台风带来了强风暴潮给浙江沿海海港造成重大损失。

据统计，我国 1966~1990 年发生浪高 6m 以上的狂浪有 700 次，平均每年 28 次，出现 8 m 以上的狂涛有 146 次，平均每年 5.8 次。一般海上浪高大于 4 m 的巨浪极易造成恶性海难，由此可见，狂涛对海上轮船航行、海上生产作业肯定会造成重大生命和经济损失。由此可见，准确的天气预报对于避免恶性海难事故和保证海上生产作业、生命和财产的安全是极其重要的。

此外，海冰对于航海和海上作业也有很大影响，造成上千人死亡的著名的“泰坦尼克号”海难事故就是由于海冰所造成。在我国北方海域，渤海和黄海北部冬季经常受寒潮影响，因而经常有结冰现象，例如 1964 年冬季华北、东北和渤海海域遭遇一次强寒潮的袭击，整个渤海海面被海冰封锁，不仅许多航行的船舶、正在作业的渔船都被冻结在海上，而且有两个在海上作业的石油平台也被海冰推倒，造成了严重经济损失。因此，由于寒潮造成的海冰对于海上航行的

轮船、作业的渔船、石油平台会造成严重损失，正确预报寒潮与海冰对于海上航行与作业也很重要。

3. 对于铁路和高速公路交通的影响

由于汽车迅速发展，地面上一般车道满足不了迅速发展汽车的需要，造成汽车拥堵，因此，高速公路急剧发展。由于在高速公路行驶的汽车速度很快，因此，能见度或暴雨雪对于高速公路行驶汽车的安全有十分重要的影响。由于浓雾和暴雨而关闭高速公路在沿海冬、春、夏季时有发生，而由于浓雾和暴雪关闭高速公路在北方冬、春季也不是偶见。因此，浓雾、暴雨雪的准确预报对于保证高速公路的安全行驶十分重要。

铁路是当代陆路上最主要的客、货运交通工具，气象条件对于铁路运输也有重要的影响。由于暴雨造成的洪涝经常冲垮铁路，如 1963 年 8 月由于华北连降暴雨而引起严重洪涝，津浦铁路许多路段被冲垮，济南到天津段的客、货运中断了 1 个多月，给这地区的经济造成严重损失。由寒潮引起的暴风雪也会造成铁路运输的中断。1999 年 4 月 23 日兰新铁路西端的哈密地区由于受从西伯利亚来的强寒潮引起的暴风雪袭击，几十列客、货车都无法运行，停滞在十三间房车站附近。因此，准确的灾害性天气预报对于铁路运输也是很重要的。

从上可见，大气科学所研究的一些问题已成为各国政府在社会发展和经济建设规划时必须考虑的科学问题。

第二节 大气科学的研究对象与研究内容

一、大气科学的研究内容与对象

大气科学要研究空气是如何流动的，空气成分是如何变化的，阳光如何从太阳经过大气到达地面又如何被反射回大气，天空为何会降水等等现象的机理。因此，大气科学是研究地球大气状态的演变和发生在大气的动力、物理、化学的各种现象的形成原因及其随时间和空间的演变规律，以及研究如何采用这些规律为人类服务和人类活动对大气影响等方面的一门科学。大气科学研究对象是覆盖整个地球的大气圈以及大气圈与地球的水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈之间的相互作用。近年来，随着宇宙飞船的发展，大气科学的研究范围已延伸到发生在某些行星的大气现象。

大气科学是一门古老的学科。有关天气、气候的知识起源于人类长久的生产劳动和社会生活经验中。近代的气压、温度、湿度和风等测量仪器的发明使大气科学逐步发展成为能够用物理量定量来描述的学科。最近几十年来，随着气象卫星和高速电子计算机的发展以及气象卫星的红外和微波等遥感新技术的应用，使大气科学得到迅速发展。目前，大气观测网已遍布全球，其观测数据通过现代通讯系统使各种大气信息迅速传递到全球每一地区，特别是近几年发展起来的“信息高速公路”为大气信息的快速传递提供方便的手段，这也为大气科学的发展提供一个良好的条件。

大气中各种现象，大到全球气候和大气环流的演变，小到冰晶和雨滴的形成，从全球污染物的输送到某一烟囱的排放都可应用近代物理、化学和流体力学的数学形式来表示，并借助于高速电子计算机可以把这种现象和演变模拟出来，从而来预测这些现象的演变。经过几十年的努力，人类已经能够运用高速电子计算机把 1~10 d 的天气以及月—季度气候异常的趋势在

不同程度上把它预报或预测出来，使之为国家经济建设、社会发展、人类生活和防灾减灾服务。

二、大气科学研究内容的综合性

大气科学之所以能够成为今天这样一门综合性学科，首先是由于人类社会和经济的高速发展对大气科学发展的需求。工业生产的污染物的大量排放，带来了诸如温室气体 CO_2 和 CH_4 等浓度的增加，改变了大气成分的分布，造成了全球增温；由于人类生活使用大量冰箱，而冰箱中氟里昂泄漏招致平流层臭氧的耗损；硫、氮氧化物排放造成严重的酸雨，这些污染问题使得大气化学有了很大发展。其次是由于人们认识到大气环流和气候变化不仅仅是大气内部动力、热力过程所决定，而且也是由于大气、海洋、陆地、冰雪和生物圈相互作用的结果。因此，把地球大气、海洋、陆面、冰雪和生物圈看成是一个完整的相互作用的体系，这就必然要拓宽大气科学的研究内容。这种内容的拓宽使得大气科学与地质学、地理学、海洋学、冰川学、生态学等相关学科相互交叉和相互渗透，从而使得大气科学成为地学中一门综合学科。

大气科学的综合性还表现在它对新的其他相关学科学术思想的敏锐。最近 20 多年来大气科学发展的事实说明了许多数学、物理学新成就很快就在大气科学中得到应用，如摄动论、奇异摄动理论、耗散结构理论、分数维理论都在大气科学中得到广泛应用。由于大气科学一个重要研究内容是大气与地球其他各圈层的相互作用，因此，非线性动力理论最早来源于大气科学，目前在自然科学理论界、工程技术界掀起研究热潮的灾变理论、混沌理论和分岔理论最早都是气象学家提出的。

三、大气科学的分支学科及研究内容

大气科学是一门分支学科众多的综合性学科，它包括了气象学、大气物理学和大气化学与大气环境学。其主要分支学科有大气探测学、天气学、动力气象学、气候学、大气物理学、大气环境学、大气化学和应用气象学等。近年来“全球变化”已逐渐成为大气科学的一个分支学科。

(1) 大气探测学：它主要研究各种大气要素观测仪器、方法和大气常规观测仪器原理、构造与观测方法、地基遥感与空基遥感仪器原理、构造和观测方法等。

(2) 天气学和大气环流：它主要研究大气中如暴雨、龙卷风、飑线、台风、气旋、反气旋等天气系统特征、变化规律以及大气环流系统，如季风、副热带高压、阻塞高压和西风带槽脊等的特征、演变规律和成因以及天气预报原理和方法。

(3) 动力气象学：有的国家也称大气动力学，它主要研究控制大气运动的基本动力、热力方程组，大气中动力、热力过程的基本问题，大气中各种空间尺度运动的物理机制等。

(4) 气候学：它主要研究全球和区域气候季节内、季节、年际以及年代际和更长的时间变化规律和成因、全球气候系统各圈层相互作用过程和机理以及人类活动对气候的影响。

(5) 大气物理学：它主要研究大气各层（对流层、平流层、中间层、电离层等）结构与成分，大气中所发生的声、光、电和雾、霜、雪、雨等物理现象及机理，大气热力学原理以及人工局部影响大气中发生的物理现象的原理。

(6) 大气环境学：它主要研究大气边界层的物理过程、大气污染及其污染物在大气中的扩散过程、酸雨、环境保护与治理等。

(7) 大气化学：它主要研究大气温室气体和痕量气体、气溶胶的化学过程及其气候效应，在大气、海洋中化学物质的循环过程以及它们对全球气候的影响。

(8)应用气象学：它主要研究天气学和气候学在工农业、交通运输、水文、医疗等领域的应用以及天气、气候灾害对工农业、交通运输和国民经济的影响。

第三节 大气科学的研究方法

大气科学是一门最重视理论与实际相结合的学科，是建立在大量观测事实基础上的学科，也是地学中一门与数学、物理和化学联系最广泛、最密切的边缘学科。

一、观测是大气科学的基础

大气科学的研究对象是地球大气，故不同于力学、物理、化学等一些可以在实验室作实验的学科。大气科学的一切知识均来源于对大气中发生的物理的、动力的和化学的现象进行实地观测，然后根据观测事实分析出这些现象变化的规律和成因。因此，大气科学中每一推论和原理均来源于实际观测，或用实际观测事实来证实过的。

(一) 观测手段的发展在大气科学发展中的作用

由于大气科学的主要研究内容是研究大气状态以及发生在大气中各种物理、动力和化学现象及其它们的变化规律，这就要求必须在全球各个地方对大气状态以及发生在大气中各种现象进行长时段的观测，然后从这些观测资料中来分析大气状态以及所发生的动力、物理和化学现象的变化规律。

大气科学的发展历程说明了大气科学每一重要发展都与观测手段、方法和观测资料的收集、整理分不开。大约在 16 世纪末到 17 世纪中，气象观测仪器如温度表、气压计、雨量器相继发明，使天气变化能够得到定量的记录，而且使得天气变化可以用气压、温度和湿度等物理量来表示和描述。从 17 世纪中期以后，由于航海事业发展，导致了气象观测仪器大量应用，这使得气象学诞生。并且在 1860 年前后，由于无线电报的发展，使得世界各地观测的地面气压、温度、降水的资料信息可以迅速通过电报集中和传递，从而形成了有一定密度的地面观测网，并随之产生了天气图；由于地面天气图的出现，这才促使挪威著名气象学家皮叶克尼斯(J. Bjerknes)创立了锋面学说，从而奠定了近代天气学基础。并且在 1928 年无线电探空仪的发明，以及由于第二次世界大战对气象预报的需求，使得高空观测网迅速建立，从而出现了高空环流图。这为以罗斯贝(C. G. Rossby)为首的芝加哥学派提出的控制天气变化的罗斯贝波和准地转理论提供了观测事实，从而奠定了近代大气环流理论和大尺度动力学的基础；从 20 世纪 60 年代以后，气象卫星的发射成功以及气象卫星的更新换代，这不仅使得广大海洋、高原无法建立气象观测站的地方可以通过气象卫星来获得气象观测资料，从而大大提高了天气预报的准确率，而且由于气象卫星学的需求，大大促进了大气遥感、卫星气象学、大气辐射和大气光学的发展。因此，到了 20 世纪 70 年代后，大气科学已发展成为分支学科众多的综合性学科。

从 20 世纪 90 年代开始由于空间和地面遥感以及气象信息系统的高度发展，已经形成了多种观测手段的三维空间连续监测全球大气变化的全球大气探测系统。

(二) 全球观测系统对当代大气科学发展的作用

由于大气科学发展必须对全球各个地方的气象要素进行观测，这就依赖于全球大气观测系统的完善。但是，直到 20 世纪 70 年代到 80 年代，全球地面、高空、飞机和气象卫星的观测精度还远不能满足实际天气和气候预测的要求。

表 1.3.1 大尺度天气数值预报所需求的气象要素的观测精度和分辨率

气象要素	精度和分辨率
地面气压 P_s	1 hPa
水平风 V	3 m/s
气温 T	1 °C
相对湿度 q	5%
水平分辨率	约 500 km
垂直分辨率	约 1 km
时间分辨率	约 6 h
观测值代表范围	水平:100 km,垂直:0.5 km 时间:1 h

依据由数值模式所作数值试验的结果,要较准确作出几天的大尺度天气的数值预报,其要求气象要素的观测精度和分辨率如表 1.3.1 所示。从表 1.3.1 可以看出,要比较精确地作出大尺度天气的数值预报,它要求地面气压观测值精度为 1 hPa 水平风速误差为 3 m/s 气温误差为 1°C 相对湿度为 5% 观测值水平分辨率约 500 km 垂直分辨率为 1 km 观测的时间间隔为 6 h。而现行气象观测网所能达到的观测精度和分辨率见表 1.3.2。

表 1.3.2 现行气象观测网的观测精度和分辨率

观测系统	要素	精度
地面观测	P_s	0.5 hPa
	T_s	1°C
无线电探空 10 层	T	1°C
	V	3 m/s
极轨卫星 10 层	T	2~3°C
静止卫星 2~3 层	V	4 m/s
商用飞机 1 层	V	4 m/s

把表 1.3.2 与表 1.3.1 对比,可以看出:现行气象要素的观测精度是可以满足大尺度天气数值预报的要求。但是现行的观测网高空观测每天只有两次,还达不到每天 4 次观测的要求;水平分辨率在陆地平原地区可以达到 500 km 有一观测值 在高原、沙漠、海洋地区测站非常稀少,气象观测值在水平分辨率、垂直分辨率和时间分辨率还远不能满足大尺度天气变化和气候预测的要求 更不能满足中、小尺度天气变化预报的要求。为此 大气科学要发展 就必须把现行全球观测系统的观测分辨率和精度提高。世界气象组织(WMO)制定了 3 个大气科学和水文学长期发展规划,这些规划都是把发展地球大气的观测系统放在首位。

为了提高大气科学的观测手段,国际上正在发展全球观测系统(GOS)它由陆面天气监测系统和气象卫星系统组成。从 20 世纪 90 年代开始,由于空间和地面遥感以及气象信息系统的高度发展,已经形成了多种观测手段的三维空间连续监测全球大气变化的全球大气探测系统。到 90 年代末全球观测系统将向全世界各个国家和地区提供如表 1.3.3 所示的全球气象观测资料。可见这个观测系统可满足天气预报和气候预测对观测精度与分辨率的要求;并且将发展

全球大气监测系统 (GAW) 这个系统可以对全球的臭氧、大气本底成分、各种不同时空尺度的海洋和大气污染物质的扩散、传输、化学变化和沉降进行综合监测。这监测系统的建立将有助于全球环境问题的研究，特别是有助于全球大气的物理和化学特性变化的监测和深入研究；此外，将在世界天气监视网全球观测系统和综合性全球海洋服务系统的基础上建立全球气候观测系统 (GCOS)，全球气候观测系统主要是监测全球气候要素的变化以及气候系统中云-辐射的变化，海洋、水文、陆地生态系统和冰雪的变化。全球气候观测系统的建成将使大气观测系统和海洋、水文、陆地和冰雪的观测系统统一起来，并以此综合观测系统来代替现在全球各地日常进行的气象常规观测的世界天气监视网 (WWW)。这就能够综合研究全球气候系统的变化。

表 1.3.3 20 世纪 90 年代末全球观测系统可提供的
全球气象要素和洋面温度的观测精度和分辨率

观测系统	气象要素	精度	水平分辨率	垂直分辨率	观测次数
地面观测	气压 P_s	1.0 hPa	250 km		4 次/d
	温度 T_s 和露点	0.5°C	250 km		4 次/d
	风速 V_s	1~2 m/s	250 km		4 次/d
高空观测	温度	对流层 0.5~1°C 平流层 1~2°C	250 km	对流层 10 层 平流层 5 层	2~4 次/d
	风速	对流层 1~2 m/s 平流层 2~3 m/s	250 km	对流层 10 层 平流层 5 层	2~4 次/d
	相对湿度	10%	250 km	4 层	2~4 次/d
卫星观测		随纬度而异	>3 km	低、中、高三层和云顶高度	8 次/d
洋面温度		3 d 平均约误差 0.5°C	250 km		3 d 平均

(三) 大型大气科学综合观测试验是发展大气科学研究的有效方法

大气科学经过近 3 个世纪的发展 特别是近 100 年来的迅速发展，它已成为一门综合性学科，而大气科学问题往往是全球性的，因此，当今大气科学的重大计划均是由一些综合性大型大气观测试验所组成。所谓大型综合观测试验，它是以解决特定的前沿科学问题为目标，在一定期间内，在全球范围或某一地区利用多种观测和探测手段，组织多分支学科参加的综合性观测试验，以获取常规气象观测网不可能得到的资料，从而对特定的大气科学综合性问题进行深入分析和研究，使某一特定大气科学综合性科学问题得到解决。如在 1978 年 12 月~1979 年 11 月实行的全球大气研究计划第一次全球大气观测试验 (FGGE) 全球有 140 多个国家加入了这个观测试验，参加试验有地面气象观测站 9 200 个 高空观测站 1 000 个 静止气象卫星 5 颗 出动了 50 艘船 100 架飞机 施放了 300 个高空气球和 300 多个海洋浮标。通过这个试验不仅获取了空前未有的一套高质量的、完整的大气观测资料，而且为确定天气可预报性极限提供了最佳气象观测系统。从 1985 年开始执行的热带海洋与全球大气研究计划 (TOGA) 在前 5 年已建立了一个以高空观测站、船舶、卫星和浮标组成的热带地区海洋和大气相互作用的观测系统，其观测内容为 20°N~20°S 热带海洋和全球大气的基本要素场以及热带海-气相互作用通量。这个试验的重点是观测全球大气的风场、高度场、温度场和水汽场、热带上层海洋的温盐场结构、海面高度、海流以及海洋生物和营养物等。通过此试验建立了一个热带太平洋大气

海洋观测系统 TAO), 定时向世界各地提供热带太平洋的海面温度 (SST)、海面附近风应力、热带太平洋表层各层的温度和盐度以及热带地区的射出长波辐射 (OLR)。由于这个观测系统的建立, 使得热带太平洋发生的厄尔尼诺 (El Niño) 南方涛动 (Southern Oscillation) 现象 (简称为 ENSO 现象) 发生机理的研究大大深入一步, 并且大大提高了 ENSO 的预测能力。

二、分析和诊断是大气科学基本的研究方法

由于大气科学是研究发生在地球大气中各种现象、演变规律和成因的科学, 为了研究这些现象的产生原因和变化规律, 就必须在全球每天进行各种要素变化的观测, 这些气象要素包括风、气压、温度和湿度等。对这些观测值的分析和根据现代统计和物理法则来诊断这些要素变化的规律来获取发生在地球大气中各种现象及它们演变规律和成因是大气科学最基本的研究方法。

(一) 天气图和气候平均图分析

各种气象要素的观测站在地理分布上是很不均匀的, 一般集中在陆地, 在北半球测站稠密, 而海洋和高原测站非常稀少; 并且高空气象观测根据国际规定, 一般全球统一在格林威治时间 00:00 GMT 与 12:00 GMT 观测, 而地面气象观测一般每隔 6 h 或 3 h 观测一次, 因此, 气象观测值在时间、空间均不连续。由于全球同时观测, 这样可以根据最优内插法和大气运动法则把全球地面上和高空各种气象要素在该面上的分布在一张图上分析出来, 这通称为地面和高空天气图。一般在气象上并不直接分析等高面上的气象要素分布, 这是因为气压随高度而下降, 而气温也是高度的函数, 但可以看成是气压的函数, 这样可以把等压面上分析等高线来代替等高面上等压线; 并且, 用气压作为垂直坐标的大气运动方程组要比用高度来作为垂直坐标的方程组简单得多 因此在气象上一直分析等压面上气象要素分布。如图 1.3.1 是 2005 年 3 月 20 日格林威治 12:00 GMT, 500 hPa 天气图, 图中实线是等高线, 虚线是等温线。从图 1.3.1 可以看到, 在纬度高的地方等压面高度较低, 在纬度低的地方等压面高度较高; 风吹的方向与等压面的等高线平行, 等高线间隔越小, 风速越大。

在气候研究中, 还经常用到气候平均图。所谓气象要素的气候平均是指气象要素对一段时间的平均 如对 5 天、1 个月、1 个季度等时段平均或某一时段平均的气象要素的多年平均。如通常所言的 1999 年 7 月份平均气温 则指 1999 年 7 月 1 日到 31 日气温的平均值 而 7 月份气温的气候平均值 则指多年 7 月份气温的平均值。按世界气象组织规定, 在 2000 年以前的气候平均值 取 1961~1990 年气象要素的平均, 而从 2001 年起, 气候平均值则取 1971~2000 年气象要素的平均。此外, 在气候研究中还经常应用到某气象要素的距平值, 它是指某时段平均的气象要素值与多年气候平均值的偏差, 如通常说 1999 年 7 月份气温偏高 1.0°C 是指 1999 年 7 月份平均气温比 1961~1990 年 30a 年 平均的 7 月份气温高了 1.0°C

(二) 四维分析

上面分析是三维分析。这种分析方法 由于海洋和高原地区缺少定时观测资料 因此在海洋和高原上空很难分析。这样, 飞机、气象卫星对这些地区观测的气象资料在分析时尤其重要 但飞机只能沿它飞行的航线、气象卫星只能沿它运行的轨道对地球大气或地面进行观测 这些资料不是定时的 而是非定时的 如何把这些资料引用到日常天气预报中 这就要求应用最优内插方法或者动力学方法的分析技术分析的三维气象要素分布中内插上飞机和气象卫星获得的随时间变

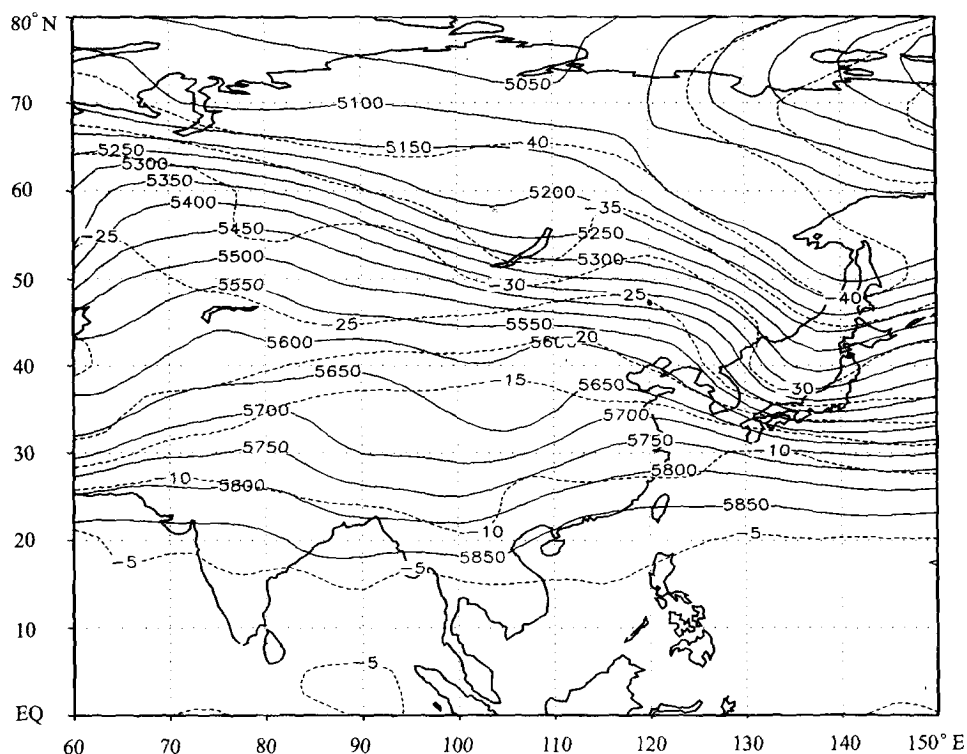


图 1.3.1 2005 年 3 月 20 日 12:00 世界时 500 hPa 天气图
图中实线表示等高线；虚线表示等温线

化局部的气象资料，这就是四维分析。四维分析是当今数值天气预报业务最常用的分析方法。

四维分析方法与传统的天气图分析方法不同，它利用最优内插方法或变分方法把一个数值天气预报模式的预报值与卫星、飞机等非定时气象要素值的最优同化到定时观测时刻的气象要素值，从而可以弥补定时观测系统在海洋和高原上空没有资料之不足。如图 1.3.2 所示，它是一个连续分析系统，这个系统中利用数值天气模式，不断输入定时和非定时观测系统所观测的资料，从而可以分析出天气图。

(三) 气候分析

1. 气候图分析

大气科学中的分析方法随着研究对象的不同其分析方法也不同，如研究月、季度或年的气候变化，这就必须应用统计方法来求气象要素月、季度或年的平均值、方差，偏差等。我们可以应用与上面相同的三维分析方法来分析这些气候图。

2. 时间序列分析

这种分析方法直接从所观测气象要素随时间演变的序列，并利用某一统计方法建立统计模型。

3. 点聚图分析

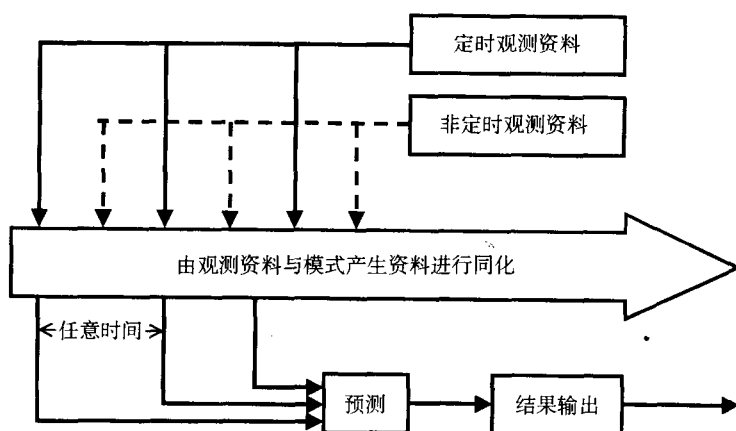


图 1.3.2 四维资料同化分析系统示意图

这种分析方法把一个气象要素观测值与另外某一气象要素值或物理因子的关系以点子集聚区来表示，或以它们之间的一定概率关系曲线来表示。

4. 多元分析

多元分析方法是某一气象要素变化的众多物理因子中应用现代统计方法从中筛选出若干主要因子，然后对筛选出的因子进行分析和综合统计，其中逐步回归和判别分析是多元分析中最常用的分析。

5. 周期分析

周期分析方法是利用某一气象要素的时间序列，并利用周期分析方法来找出这一气象要素变化的周期；也有利用某一气象要素场的时间序列作经验正交展开，从展开系数（也称时间系数）变化的周期找出这一气象要素场的时空变化规律。这个方法在当今大气科学的天气和气候变化分析研究中经常使用。

（四）诊断分析

1. 相关分析

这个方法是利用统计方法找出不同气象要素之间的关系或某一气象要素与控制此要素变化的物理因子的关系，从而确定气象要素变化的可能控制因子。

2. 动力诊断方法

这种方法是利用实际大气要素场的观测资料，并根据物理上或动力上的原理来分析这些大气物理量应满足的物理上或动力上的关系，从而证明大气中所发生现象的变化应满足的物理上或动力上的定则。大气科学许多现象的规律和成因所满足的定则是利用这种诊断方法来发现的。

三、数值模拟对于大气科学研究发展的作用

大气科学一个重要特点是不能在实验室作实验，但是有了电子计算机以后，它可以借助于电子计算机和大气运动方程组的数值模式，通过改变模式的物理因子或改变初始场的结构，或改变模式边界条件，从而来模拟大气状态及其变化情况，并且可以预测出今后的变化。这使得

本来无法进行实验的大气科学变成可以利用计算机来对大气的变化进行各种实验，因此，这种方法由于具有许多优点，它发展相当迅速，现在已成为大气科学研究的一个重要手段。

（一 数值模拟的优点

1956年菲利普斯(Phillips)首先利用电子计算机对大气环流的变化作了简单的数值模拟，其模拟的结果不仅与实际比较吻合，而且它具有以下几个优点：(1)它可以同时处理大气中动力学、热力学过程以及初始条件和边界条件；(2)它可以克服非线性数学上处理的困难；(3)可以定量地讨论大气环流的变化；(4)可以人为地改变各种动力、热力过程，从而通过计算机的计算来讨论这些动力、热力过程的改变对大气环流变化的作用；(5)可以计算出不能观测或暂时无法观测的物理量，如垂直运动是暂时无法观测的物理量；而涡度、散度是不能观测的物理量。由于数值模拟有以上这些优点，它从20世纪60年代起不断发展，已迅速在整个大气科学界广泛应用。

（二 数值模拟是大气科学的一门重要分支学科

正是由于数值模拟有如上的优越性，因此在20世纪60年代一些先进国家就开始发展大气环流数值模式。从80年代随着大容量高速计算机的发展，国际上大气环流和气候数值模拟取得重要进展。如今大气环流数值模拟不仅仅是一种大气科学重要的现代化实验手段，而且已发展成为大气科学的一门重要的分支学科。大气环流能够成功地利用高速电子计算机进行数值模拟，这是大气科学发展的一个重要成就。数值模拟经过40多年的发展，它已具有如下特点：(1)目前所用的大气环流和气候数值模式不仅只是描述大气环流的状态模式，而是耦合气候模式，把大气环流模式、海洋模式、陆地模式、海冰模式、陆面模式、生态模式耦合起来，变成耦合气候系统模式；(2)数值模拟的对象不仅仅只是大气环流的平均状态，而是包括大气环流、海洋环流、冰雪、陆面状况甚至生态的月~季度、年际、年代际或更长时间尺度的变化，甚至几万年前的古气候状况都可以利用数值模拟来复原；(3)由于超大型计算机的迅速发展，在当今的气候数值模式中辐射引起的加热、冷却在模式计算的每步都作为气温、水汽和云量的函数来计算；并且在数值模式中对中、小尺度系统的考虑非常细致，例如，在模式积分的每一步都考虑到积云中的水汽凝结、水滴蒸发所产生的加热、冷却的变化；(4)由于数值模拟的飞快发展，它普及到大气科学的每一领域。近年来，由于中、小尺度暴雨系统和积云发生、发展的数值模拟水平日益提高，从而可以细致地研究暴雨系统的结构与演变；数值模拟也广泛地用于大气环境和大气化学的研究。近几年来耦合气候模式不仅广泛地用来研究温室气体 CO_2 、 CH_4 的气候效应和全球增温的模拟和预测，而且也用来研究污染物的跨区域输送、臭氧和其它痕量物质的输运以及它们的气候效应。因此，随着数值模拟的发展，大气环流和大气化学的研究也得到不断发展。在今天，数值模拟不仅是研究气候系统变化的重要手段之一，也是研究大气环境变化及其调控机理的很有效方法。

（三）数值模拟是天气气候预测研究中一个很重要的研究手段

大气科学研究的一个很重要的目的是提高对天气、气候变化的预测水平，减轻天气、气候灾害所造成的经济损失，而天气或气候的数值模式是天气、气候预测中必须应用的一个很重要的手段。因此，模式的性能好坏是决定数值天气、气候预测的水平。如何来考察数值模式性能的好坏？这必须靠大量数值模拟来检验。一个对过去天气和气候变化模拟很好的数值模式，它

对预测天气和气候变化预测的准确率也会高；相反，一个对过去天气和气候变化模拟能力很差的数值模式，用它作出的天气和气候变化预测的准确率也不会高。当然，作天气和气候模拟的数值模式与作数值预测的数值模式有所差别，作天气和气候数值预测的模式必须经过大量预测试验之后得到模式预报值与实况的偏差的统计量 即“气候漂移”或“天气系统预报的“系统误差” 利用此“气候漂移”或“系统误差”的订正值对作数值模拟的数值天气或气候模式作订正，这样才能利用此模式作天气和气候的数值预测。随着计算机的不断发展，大气科学数值模拟将不断发展 特别是“高速信息公路”的发展为大气科学的数值模拟的发展提供更快、更方便的信息来源，从而更加促进数值模拟的开展。

以上可见，大气科学的研究方法不同于数学、物理和化学的研究方法，它不能从实验室实验得到某些原理或结论。它的研究必须基于大气及其周围的大量观测事实，利用大型计算机进行数值模拟或分析诊断，从而得到某些科学结论和原理。

第二章 大气的成分、结构与状态

第一节 太阳系的行星大气

大家都知道 地球是太阳系中一个行星 如表 2.1.1 所示,它是离太阳较近的行星之一。除地球外 还有水星、金星和火星 它们离太阳约 $57.9 \times 10^6 \sim 227.9 \times 10^6 \text{ km}$ 而木星、土星、天王星、海王星和冥王星是离太阳较远的行星,它们离太阳约为 $778.3 \times 10^6 \sim 5900 \times 10^6 \text{ km}$ 。

表 2.1.1 太阳系中的行星特性

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
离太阳的平均距离($\times 10^6 \text{ km}$)	57.9	108.2	149.6	227.9	778.3	1 427	2 869.6	4 496.6	5 900
公转周期	88 d	224.7 d	365.26 d	687 d	11.86 a	29.46 a	84.01 a	164.8 a	247.7 a
自转周期	59 d	24.3 d 逆行	23 h 56 min 4 s	24 h 37 min 23 s	9 h 50 min 30 s	10 h 14 min	11 h 逆行	16 h	6 d 9 h
赤道半径(km)	2 440	6 050	6 380	3 390	71 400	60 000	25 900	24 700	3 000(?)
质量(地球=1)	0.055	0.815	1.0	0.108	317.9	95.2	14.6	17.2	.1(?)
密度(水=1)	5.4	5.2	5.5	3.9	1.3	.7	1.2	1.7	?
大气(主要成分)	无	二氧化碳	氮、氧	二氧化碳 氢(?)	氢、氦	氢、氦	氢、氦 甲烷	氢、氦 甲烷	未测出

一、地球大气

太阳系的行星和太阳一样,都由宇宙漂浮的轻原子(氢或氦)星云气体或轻尘逐渐凝聚而成。各个行星外围大气所含的气体不一样。地球大气主要成分是氮气和氧气,正如表 2.1.2 所示 地球大气中 78%容积是氮气 约 21%是氧气。

地球大气除了氮气和氧气外 还含有水蒸汽 但水蒸汽含量随时间、地区而不同 如在潮湿的我国东部季风区,空气中含水蒸汽的成分较大,而在西北的干旱区则空气中含水蒸汽的成分较小。若不考虑水蒸汽,对干空气而言,则空气的组成在高度约 80 km 内几乎是一致。与太阳的组成相比,则地球大气中氢气与氦气显得微乎其微。

地球大气中还有二氧化碳(CO_2) 由于它是具有温室效应的气体 因此 它虽然在大气中含量很少,但对大气的气温却起到很重要的作用。 CO_2 气体对太阳辐射不吸收,让太阳辐射直接到达地面,而对地表和大气的长波辐射具有强烈的吸收作用,因此,它对大气起到加热的作用,即起到温室的玻璃或塑料薄膜的作用,故一般又把 CO_2 称为温室气体。随着工业化的进展 地球大气 CO_2 浓度不断增加,使得大气温度不断升高,这已引起全球科学家的关注。此外,地球大气中还有臭氧(O_3) 它是 1913 年才发现的一种在地球大气中含量极少(在大气层平均

厚度只有 0.15~0.45 cm) 的气体。由于它能吸收太阳紫外辐射，因此，它对人类和生物起到重要的保护作用，并且，它对上层大气温度会起到降温作用。地球大气中还有如氩、氖、氦、氙、氢等多种微量气体。

表 2.1.2 地表附近的大气组成

成分	分子式	存在比率(%)	
		容积比	重量比
氮分子	N ₂	78.088	75.527
氧分子	O ₂	20.949	23.143
氩	Ar	0.93	1.282
二氧化碳	CO ₂	0.03	0.0456
一氧化碳	CO	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵
氖	Ne	1.8×10 ⁻³	1.25×10 ⁻³
氦	He	5.24×10 ⁻⁴	7.24×10 ⁻⁵
甲烷	CH ₄	1.4×10 ⁻⁴	7.25×10 ⁻⁵
氙	Kr	1.14×10 ⁻⁴	3.30×10 ⁻⁴
一氧化氮	N ₂ O	5×10 ⁻⁵	7.6×10 ⁻⁵
氢分子	H ₂	5×10 ⁻⁵	3.48×10 ⁻⁶
臭氧	O ₃	2×10 ⁻⁶	3×10 ⁻⁵
水蒸汽	H ₂ O	不定	不定

二、金星大气

金星是太阳系中离地球较近的行星，是我们的邻居，在晴朗的夜晚用肉眼就能见到金星。1960年以前，人们普遍认为金星可能是地球的孪生兄弟，无论它的大小和密度都与地球相差无几。然而，根据近年来宇宙探测器探明的数据表明，金星大气与地球大气相差甚大 金星表面大气压是地球表面气压的 90 倍 这就是说 在地球上海洋 900m 深的压力才与金星表面大气压相同 并且 正如表 2.1.3 所示，金星大气中 96%是二氧化碳 (CO₂)，其余大部分是氮气 (N₂)。由于金星大气大部分是 CO₂ 因此 金星大气的温室效应很厉害 金星表面温度可达 720 K 之高。由于金星大气处于这么高的高温，因此，金星大气环流与地球大气环流有很大不同。

表 2.1.3 金星火星和地球三大行星大气的主要成分

行星 成分	金星(无生命)	火星(无生命)	地球(有生命)
CO ₂	96.4%	95.3%	0.033%
N ₂	3.4%	2.7%	78.08%
HCO ₂	0.135%	0.03%	0.1%~1%
O ₂	69×10 ⁻⁹	0.13%	20.94%
Ar	18×10 ⁻⁶	1.6%	0.934%

三、火星大气

火星也是离地球较近的一个行星，它的赤道半径只有地球的一半左右，它的大气是很稀薄的 其表面气压尚不及地球的 7%。如表 2.1.3 所示 火星大气 95%是 CO₂ 其余为 N₂ 和 Ar。

人们以为火星大气温度一定很高，其实火星表面大气的温度并不高，一般处于 180 K 的低温。正因为火星大气温度很低，并且，火星大气主要成分是 CO_2 ，故它不可能有生物存在。火星两极终年被干冰 (CO_2 的凝结物) 所覆盖。2004 年从火星探测器对火星地形地貌的探测结果推断，火星上可能曾经有水，这引起全世界科学界的广泛兴趣和关注。

四、木星大气

木星与土星属于地球较远的外行星，它们的体积特别大。木星赤道半径为地球的 11 倍多。木星大气 85% 是氢 (H_2)，15% 是氮气 (N_2) 与甲烷 (CH_4) 等。木星大气的下垫面并不像地球有固体的表面，而是由分子状的液态氢所组成。

第二节 地球大气的起源

从上面可以看到，地球大气不仅与距离它很远的木星大气不同，也与离它较近的金星、火星大气不同。那么，地球大气是经过怎样的演变才形成目前这样的状态？关于这个问题有两种看法：一是认为在 45 亿年前，地球形成时根本没有大气；还有一种看法是认为原始地球的表面有深厚的氢与氦所覆盖，但这种原始大气由于太阳风，使得地球大气的气体分子具有超越逃逸地球的很高速度，地球气体全部从地球表面逸散光。因此，现在的地球大气状态并不是从地球原始大气慢慢演变而成，而是由于火山爆发或温泉喷发，从地球内部各种气体渗出并笼罩在地球表面而演变形成的。从火山喷出的气体有 85% 为水汽，10% 为 CO_2 ，另外还有 N_2 和其他气体。除了 O_2 外，其他成分为目前大气所含的成分。那么，问题是现在地球大气中的 O_2 如何形成的？经过科学家长久的研究，表明了现在地球大气的 O_2 是由水汽分解和光化反应而产生的，即，



反应式 (2.2.1) 光化学反应要求吸收紫外辐射，而 (2.2.2) 式光化学反应要求有可见光辐射。由于金星和火星没有或几乎没有生命活动，由于它们大气几乎没有 O_2 ，这就使得科学家提出地球上的 O_2 可能是光合作用所产生。这就是说，光合作用所生成的氧与地球上生物过程密切相关。在 (2.2.2) 式中 $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ 是碳水化合物，它是形成生物细胞分子的基本构成部分， O_2 是地球大气的重要组成部分。

在 40 亿年前，单细胞有机体经历了一个无 O_2 的环境，而在 30~20 亿年前植物生命的原始形态已经发展到开始通过光合反应来释放少量的 O_2 ，这个环境可能逐渐接近水面以便接受光合反应需要的可见光。由于光合作用，大量 O_2 产生，导致高层产生 O_3 层，从而过滤太阳辐射的紫外部分，因此 O_3 层愈厚，到达地面的紫外辐射愈少，使得大量植物能够从海洋的深层逐渐扩展到海洋的最上层，以便增加接受可见光的机会。这样就形成愈来愈多的 $\text{O} \rightarrow$ 愈来愈少的紫外辐射 $\rightarrow$ 接受愈来愈多的可见光辐射 $\rightarrow$ 愈来愈丰富的植物生命 $\rightarrow$ 通过光合作用释放更多的 O_2 。这样生命缓慢地从海洋向陆地推进，最后占领整个陆地，这大约在 2.4 亿年前。因此，伴随着地球生物的演化过程，才逐渐形成现在地球大气的状态。

现在地球大气的成分与状态也并不是不变，它无时无刻也在缓慢的变化。现在由于人类大量发展工业，这不仅不断地增加 CO_2 的排放源，而且，由于工业建设和为着人类生活所需，大

量砍伐森林 破坏植被 这就减少光合作用 使得吸收 CO_2 减少 即 CO_2 汇减少。因此 地球大气中 CO_2 浓度不断增加，导致全球变暖。

第三节 大气的垂直结构

地球大气层的温度、压力和湿度是表示大气状态的重要物理量。它们不仅在水平方向有很大变化 而且随高度也有一定规律的变化。图 2.3.1 是大气温度的垂直变化。从图 2.3.1 可以看到，由于大气温度变化在不同高度其变化规律不同，因此，气象学家就依据大气温度变化的规律把大气层划分成不同的层次。

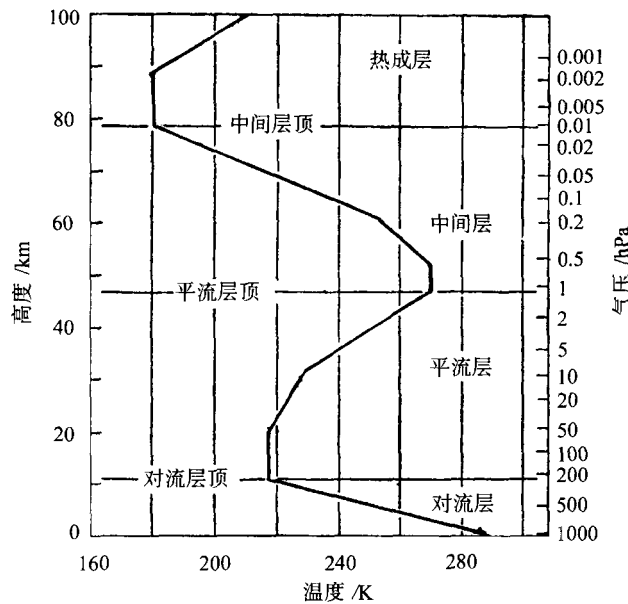


图 2.3.1 地球大气温度的垂直变化

一、对流层

地球大气最低一层称为对流层 (troposphere) 平均高度约为 11 km 在赤道附近可到 16 km，高纬度地区为 8.5 km。对流层温度变化的最大特点是：温度随高度递减，递减率为 $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 就是说在这一层中 每升高 1.0 km 温度就降低 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 如在广州夏季地面气温约 $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在它上空 3.0 km 处空气温度约 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。对流层是大气运动最活跃的一个层，“tropo”是希腊语 其意思是“混乱”这就是说 这一层空气运动是丰富多采。由于对流层连接高山、海洋、陆面 并且 在这一层高层空气冷 低层空气暖 暖空气上升 冷空气下沉 从而形成对流运动 并且由于冷、暖水平分布不均 从而形成各种尺度的大气运动 如高低压、锋面和台风等 带来各种天气现象。由于海洋和陆面受热后会向大气加热 并向大气蒸发水蒸汽 蒸发的水蒸汽受高山的抬升，并在抬升过程中凝结，从而形成降水。

通常从地面到高度约为 1 km 这一对流层底层又称大气边界层。在这一层里，大气运动不