



大气科学概论

周发琇
编

青岛海洋大学出版社

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湍流、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、内波和海洋细微结构、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 言

海洋与大气之间不间断地进行着动量、热量和物质交换。海面上的风和气压变化，在海洋中引起一系列的海水运动的物理过程；海洋的温度分布直接影响大气的运动状态。凡此种种表明海洋与大气构成一个相互作用的系统，这是一个十分复杂的耦合系统。近代已经建立起一种海洋环流与大气环流耦合的数值模式，做出了若干有益的实验结果。从认识海洋—大气这个系统的意义上讲，一个物理海洋学家需要大气科学的基本知识是显而易见的。这也正是青岛海洋大学物理海洋专业设置《大气科学概论》课程的依据。

本书是在物理海洋专业原《气象与天气学》讲义的基础上改编而成。根据新的教学大纲保留了原讲义的大气结构、大气热力学、大气动力学、大气边界层、大气环流各章的基本内容；压缩了天气学内容；增加了大气辐射、数值天气预报及其产品应用和现代气候学问题三章。在编写过程中，尽可能编入最基础的、比较成熟的知识和本原理，并且注意吸收近代的若干新成果，尤其关于海洋—大气相互作用以及现代气候学若干问题，其中有些观点未必成熟，但却是“热点”。考虑到新大纲涉及到大气科学主要领域的基本内容，故改名为《大气科学概论》。

本课程是物理海洋专业的必修课程，在教学过程中配有适量的习题和练习，以巩固和深化对基本知识的理解。

本书共11章，前10章由周发秀编写，最后一章由于慎余编写。全书插图由张增辉清绘，谨此致谢。由于编者水平所限加之时间

间仓促，书中不当和错误之处在所难免，诚恳地希望读者批评指教。

编 者

1990.9

目 录

前 言

序 言

第一章 地球大气	1
§ 1.1 地球大气的组成	1
§ 1.2 大气气溶胶	4
§ 1.3 大气的铅直分层	7
§ 1.4 描述大气的主要参数——气象要素	11
§ 1.5 大气的状态方程	18
§ 1.6 大气静力学	24
第二章 大气中的辐射能	34
§ 2.1 辐射及其度量	34
§ 2.2 热辐射的基本定律	37
§ 2.3 大气上界太阳辐射的分布与变化	41
§ 2.4 大气中太阳辐射的减弱	46
§ 2.5 到达地面的太阳辐射	50
§ 2.6 地面和大气的长波辐射	54
§ 2.7 地面、大气及地—气系统的辐射平衡	57
第三章 大气热力学基础	63
§ 3.1 热力学第一定律及其应用	63
§ 3.2 干空气的绝热过程	67
§ 3.3 湿绝热过程	70
§ 3.4 假绝热过程	74
§ 3.5 热力学图解	77

§ 3.6	大气静力稳定度	84
§ 3.7	厚气层的静力稳定度	90
§ 3.8	整层空气升降时的稳定度变化	94
第四章	大气动力学基础	98
§ 4.1	作用于地球大气的力	98
§ 4.2	球坐标系中的运动方程	106
§ 4.3	自由大气中的平衡运动	113
§ 4.4	连续方程	124
§ 4.5	大气运动的基本方程组及其简化	128
§ 4.6	连续方程和热力学方程的简化	134
§ 4.7	P坐标系中的运动方程组	138
§ 4.8	涡度和涡度方程	143
§ 4.9	大气中的声波和重力波	151
第五章	大气边界层	158
§ 5.1	大气湍流和雷诺应力	158
§ 5.2	近地面层的湍流输送	161
§ 5.3	大气边界层中风随高度的变化	164
§ 5.4	海陆风环流	171
第六章	大气环流	175
§ 6.1	北半球平均流场特征	175
§ 6.2	控制大气环流的基本因子	182
§ 6.3	经圈环流与高空急流	185
§ 6.4	角动量平衡和输送	193
§ 6.5	对流层中的热量、水分和能量平衡	196
§ 6.6	季风环流	200
第七章	中纬度天气系统	203
§ 7.1	锋面系统	203
§ 7.2	锋面气旋	212

§ 7.3	中纬度扰动的诊断分析	218
§ 7.4	反气旋和寒潮	226
§ 7.5	大气长波	230
§ 7.6	中小尺度天气系统	236
第八章	低纬度天气系统	241
§ 8.1	低纬度环流的基本特征	241
§ 8.2	副热带高压	246
§ 8.3	热带辐合带	250
§ 8.4	东风波	252
§ 8.5	台风	254
§ 8.6	热带扰动的理论分析	266
第九章	天气预报	273
§ 9.1	天气的可预报性	273
§ 9.2	天气图及其分析	278
§ 9.3	天气形势预报	288
§ 9.4	风及其预报	298
§ 9.5	海雾及其预报	307
§ 9.6	温度及其预报	326
§ 9.7	降水及其预报	330
第十章	数值天气预报及其产品应用	341
§ 10.1	数值天气预报的科学基础	341
§ 10.2	地转预报模式的建立	345
§ 10.3	地转斜压模式	351
§ 10.4	数值方法	356
§ 10.5	正压涡度方程的数值解法	369
§ 10.6	客观分析与初值形成	376
§ 10.7	数值天气预报的产品应用	387
第十一章	现代气候学问题	394

§ 11.1 现代气候学的提出.....	394
§ 11.2 人类活动对气候的影响.....	403
§ 11.3 海气相互作用与气候变化.....	418
§ 11.4 近代气候变化.....	441
附录 常用物理常数.....	448
参考文献.....	449

第一章 地球大气

本章主要讨论地球大气的组成，垂直分层。温度、气压和湿度是反映大气状态的主要气象要素，在通常的大气条件下，空气可以看成是理想气体，并且处于静力平衡态。因此，理想气体状态方程和静力学方程是本章的两个基本方程，也是经常应用的两个方程。

§ 1.1 地球大气的组成

地球大气由多种气体组成，并掺有一些悬浮的固体和液体微粒。在85km以下的各种气体成分中，一般可分为两类。一类称为定常成分，各成分间大致保持固定比例，这些气体主要是氮(N_2)、氧(O_2)、氩(Ar)和一些微量惰性气体氖(Ne)、氪(Kr)、氙(Xe)及氦(He)等；另一类称可变成分，这些气体在大气中的比例随时间、地点而变，其中包括水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、臭氧(O_3)和一些碳、硫、氮的化合物如一氧化碳(CO)、甲烷(CH_4)、硫化氢(H_2S)、二氧化硫(SO_2)等。

通常把除水汽以外的纯净大气称为干洁大气，简称干空气。干空气的四种主要成分列入表1.1.1。

由表1.1.1可见，氮、氧、氩三种气体就占了空气容积的99.66%，如果再加上二氧化碳，则剩下的次要成分所占的容积是极微小的。干洁大气的平均分子量为28.966。观测结果表明，实际大气在85km以下，由于大气运动和分子扩散的结果，使得

表1·1·1 干空气的主要成分 (25km以下)

气 体	分子量	含量(%)		浓 度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	比气体常数 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	
		按容积	按质量			
常定成分	N_2	28.0134	78.084	75.52	9.76×10^8	296.80
	O_2	31.9988	20.948	23.15	2.98×10^8	259.83
	Ar	39.9480	0.934	1.28	1.66×10^8	208.13
可变成分	CO_2	44.0099	0.033 (近地面平均)	0.05	$(4-8) \times 10^8$	188.92

空气充分混合，干洁大气中各成分的比例得以维持常定。因此，可以将85km高度以下的干空气当做一种分子量为28.966的单一气体。这样，将使有关的运算简单化。

大气的高层，主要成分仍为氮和氧，其他气体的含量减少。高层大气中，氧分子吸收太阳紫外辐射离解成氧原子，氧原子的浓度在100km高度处达到峰值。随着氧原子数的增加，氧分子迅速减少。在500km以上，占统治地位的是原子氧、原子氢、原子氮以及分子氮和分子氧。在1000km高度，大气的主要成分就只是原子态的氮、氢和氧了。

氧气占地球大气质量的23%，丰富的氧气是动植物赖以生存、繁殖的必要条件。除了游离存在的氧气以外，氧还以硅酸盐、氧化物和水等化合物形式存在，在高空则还有臭氧及原子氧。因此，氧约占包括海洋和大气在内的地壳质量的49.5%。

大气中氧气的最主要来源是植物的光合作用。植物在光合作用中，吸收二氧化碳放出氧气。

低层大气中，主要成分的氧和氮都保持一个稳定的比率。高层大气中，氧分子吸收太阳紫外辐射发生光化学变化，其结果就

在平流层内形成臭氧层，原子氧浓度也随高度而增加。

臭氧主要分布在10—40km高度处，近地面含量很少，极大值在20—25km附近。臭氧在大气中的比例虽然极小，但因它具有强烈吸收太阳紫外辐射(0.2—0.3 μm)的能力而显示出其重要性。臭氧层一方面直接加热平流层，决定平流层的温度场和环流，进而影响其下的对流层；另一方面阻挡了强紫外辐射到达地面，保护了地球上的生命。臭氧层浓度的减少或增加，会对气候变化和人类生活带来巨大影响，因此，目前世界上对臭氧的观测和研究都很重视。

空气中的微量成分包括臭氧、水汽及碳、硫、氮的化合物，它们的含量虽少，但和人类的关系却很密切。

大气中二氧化碳只占整个大气容积的万分之三，多集中在20km以下。它主要是有机物燃烧、腐烂和生物呼吸过程中产生的。因此，在大工业区、城市上空，空气中二氧化碳的含量较多，有的地区其含量可超过万分之五；在农村和人烟稀少的地区，其含量较少。二氧化碳含量的变化主要是燃烧煤、石油、天然气等燃料所引起的，火山爆发及从碳酸盐矿物、浅地层里释放二氧化碳是次要原因。因此，随着工业的发展及世界人口的增长，全球大气中二氧化碳含量也逐年增加。

二氧化碳能强烈地吸收地球表面发出的长波辐射并放出长波辐射。这种“温室效应”在二氧化碳浓度不断增加时，可能会改变大气热平衡，导致大气低层和地面的平均温度上升，这将引起严重的气候问题。

实际大气中，除上述气体成分外，还含有水汽及其液态、固态微粒。含有水汽的空气称为湿空气。大气中水汽约含13,500 km^3 ，占地球总水量的0.001%。大气中水汽的主要来源是水面，特别是海洋表面的蒸发。水汽上升凝结形成水云或冰云以后，又以降水的形式降到陆地和海洋上。

大气中的水汽含量随地区、时间和气象条件的变化而异，一般说来，地面大气中的水汽含量随着纬度的增加而减少。水汽的年变化也很大。观测结果表明，从地面到高空，每升高1.5~2.0 km，水汽含量减少 $\frac{1}{2}$ ，到达5 km高度上，水汽含量减少到地面含量的 $\frac{1}{10}$ 。在8~10 km以上，水汽就非常少了。

大气中水汽含量虽少，但它是唯一能发生相变的大气成分，在天气变化中起着十分重要的作用。同时，水汽能强烈吸收和放出长波辐射能，在相变过程中还能释放和吸收热量。因此，水汽在大气能量转换过程中以及大气与地面的能量交换中起着重要的作用。

§ 1.2 大气气溶胶

大气气溶胶是指悬浮在大气中沉降速率很小的固体、液体质粒和气体介质一起的统称。其尺寸谱分布很广，例如凝结核的半径可小于 $0.1\mu\text{m}$ ，而雨滴冰晶的半径可达到毫米量级。这些悬浮在大气里的固体和液体粒子称气溶胶粒子。这些粒子在云物理学和大气污染中都占有重要地位。它们可以影响太阳辐射，进而影响地面温度；影响能见度，污染空气；但又是降水不可缺少的凝结核心。

1.2.1 气溶胶的成份和浓度

气溶胶粒子的主要来源有两种：自然源和人工源。自然源包括火山灰、宇宙尘埃、陨石灰烬、植物花粉和孢子、岩石风化后的粉尘，森林着火后的灰烬及海水溅沫蒸发后残留在空中的盐粒等。人工源主要是人类活动和工业生产过程中排放的烟和粉尘等；此外，化学武器和核武器试验也会产生微粒和放射性裂变物。气象上关心的气溶胶粒子及其尺度谱列于表1.2.1。

大气中的气溶胶粒子，在不同时间和地点的分布不同。通

表1·2·1 气溶胶质粒成分和尺度谱

气溶胶质粒成分	球半径 (厘米)
小离子	$<10^{-7}$
中等离子	$10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$
大离子	$2 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$
爱根核	$2 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$
烟、尘埃、霾	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
大凝结核	$10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
巨凝结核	$3 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$
云或雾滴	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$
毛毛雨滴	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$
雨 滴	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$

常大粒子因重力沉降作用很快落到地面，因此它主要集中在近地面或源地附近。直径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子可随气流升得很高，飘得很远。

近地面大气层的气溶胶粒子浓度，一般陆地大于海洋，城市大于农村。而城市上空的粒子又随工业发展，人口增多而增加。在时间上，一般夜间悬浮的粒子多于白天，冬季多于夏季。

1·2·2 气溶胶粒子的源和汇

在地球表面附近测得的爱根核浓度，随时间和地点的变化很大，甚至可以相差 1—2 个量级。例如在洋面上平均为 10^3cm^{-3} ，在农村平均为 10^4cm^{-3} ，而在城市污染的空气平均可达 10^5cm^{-3} 甚至更大。另外观测到爱根核随高度减少，说明陆地是气溶胶粒子的重要源地，人类活动尤其工业生产的影响特别重要。在陆上和海上都能观测到大量爱根核，说明除燃烧能产生大量爱根核外，还有其他原因能产生爱根核，这就是气—粒转换作用。例如云中 SO_2

和 NH_3 相互作用可产生硫酸盐，当云滴被蒸发后，便剩下硫酸盐粒子；过饱和气体通过气溶胶粒子核化及气体分子吸收太阳辐射而发生光化反应得到气溶胶粒子。

大核和巨核可由风刮起的尘埃、植物孢子和花粉、海面上气溶胶的破裂、工业活动及爱根核聚并而成。

平均而言，气溶胶粒子移出和移入大气的速率近似相等。理论研究表明，平均直径为 $0.01\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子浓度为 10^5cm^{-3} ，在30分钟内由于凝聚会减少一半。而浓度为 10^3cm^{-3} 的直径为 $0.2\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子，若因凝聚减少一半，则需要500小时。可见凝聚主要在直径小于 $0.2\mu\text{m}$ 的粒子之间进行。它虽未从大气中移走，但使爱根核移出其尺度段。

降水可改变能见度。降水前，气溶胶粒子是云滴的核心，水滴形成并下降会兼并大量气溶胶粒子使其移出大气，从而使能见度变好。另外，气溶胶粒子会与地面障碍物相碰被吸收。大粒子会直接沉降移出大气。在全球范围，降水过程可使气溶胶粒子从大气中移走80—90%，直接沉降可移走10~20%。

1.2.3 气溶胶粒子的气象意义

由于气溶胶粒子大小不同，物理化学性质和几何形状也不同，因此其气象意义各异。气溶胶粒的尺度范围与大气电学、大气化学、大气辐射和大气光学以及云和降水过程之间的关系列入图1.2.1。

带有电荷的分子聚集体，称为离子。空气中离子的种类和数密度决定空气的电导率，从而影响晴天大气的电场。空气电导率主要是小离子的贡献，城市大气的大离子及中性离子的数密度占优势，它们可以捕获小离子而使电导率变小，大气电场变大。另一方面，大气污染物可使太阳辐射减弱。

很多大气化学过程与气溶胶密切相关。固体气溶胶粒子吸收空气中微量气体，会发生化学反应；液体气溶胶粒子吸收气体也

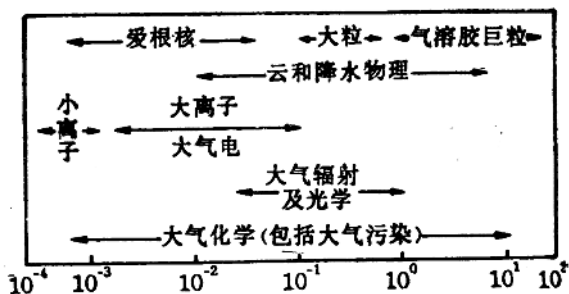


图1·2·1 气溶胶粒子直径 (μm) 与气象过程的关系

会使溶液中有化学反应。在严重污染的空气中，气溶胶粒子起强烈的大气化学反应，例如逆温层下积聚的粒子和 SO_2 的反应。 SO_2 转化为硫酸盐会产生烟雾。

气溶胶粒子能吸收并散射辐射，从而改变大气透明度，它的增多可减少太阳直接辐射，增大散射辐射，也增加大气长波逆辐射，久而久之将会破坏地球的辐射平衡。

气溶胶粒子可作为大气中水汽凝结的核心，大的水溶性气溶胶粒子最容易使水汽凝结，是成云制雨的重要条件。如果没有气溶胶粒子作为水汽凝结的核心，即使大气达到过饱和状态，水汽仍不能凝结。据实验，在纯净的空气中，相对湿度达到300—400%，也难以有凝结发生，但只要投入少许吸湿性盐粉，水汽马上凝结成云雾水滴。

§ 1.3 大气的铅直分层

地球大气在不同的高度有不同的特征，因此可以分成若干层。最常用的分层方法是按大气的温度结构分层，即根据铅直温度梯度的方向，把大气分成对流层、平流层、中层和暖层（图1·3·1）。

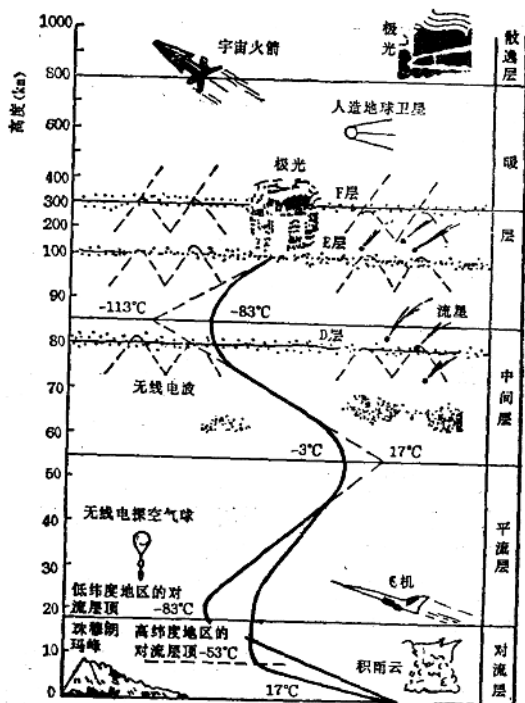


图1·3·1 大气层结构示意图

1·3·1 对流层

对流层是大气的最低层，下界是地球表面，上界是对流顶。对流层的主要特点是：温度随高度降低；大气的铅直混合强；气象要素水平分布不均匀。

大气吸收的总能量中，直接吸收太阳辐射能约占10%，吸收地面发射的红外辐射约占90%。低层大气受地面加热，产生强烈的铅直运动，因此对流层内大气温度的铅直分布主要是由大气与地面热量交换以及大气的对流、湍流运动决定的，总趋势是温度