

GAOKONGQIHOUXUE

GAOKONGQIHOUXUE

GAOKONGQIHOUXUE

GAOKONGQIHOUXUE

GAOKONGQIHOUXUE

GAOKONGQIHOUXUE

高空气候学

邹进上 江静 王梅华

编著

气象出版社

高空气候学

邹进上 江 静 王梅华 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了高空气候环境特征及其支配因子,详细介绍了与航空活动有关的一些气候问题,例如,急流与颠簸,云气候学,对流层顶预报等。书中力求反映近年来国内外有关高空气候环境的最新研究成果。

全书共分八章,内容包括:高空气候环境及其支配因子;大气环流,特别是东亚环流的季节变化规律;青藏高原对环流和高空气候的影响;北半球非周期性大型过程;急流;湿度场与云场,也包括人工云的形成和发展;对流层顶及其预报等问题。

本书可作为高等院校气象、气候专业,地理、水文专业,环境保护专业和航空气象专业师生们的参考用书。也可供气象部门、国防部门、民航部门中从事气象与气候研究和业务保障的预报员、科技人员和研究人员参考。

高 空 气 候 学

邹进上

江 静 编著

王梅华

责任编辑 曾令慧

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.25 字数: 287千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 1—1000 定价: 2.45元

ISBN 7-5029-0428-X/P·0246 (课)

前 言

高空气候学，从狭义来讲，是研究高空大气环境特性、结构、演变及其预报的一门科学。它的基本核心是研究围绕地球的自由大气中各种气候要素的时空变化规律以及大气环流问题。从广义来讲，高空气候的形成是天文、地理（包括大气、海洋与大陆及其相互关系）与生物诸因子相互作用的结果，所以它的研究内容和范围很广，涉及到水圈、大气圈、冰雪圈、生物圈和岩石圈。它既是气候学的一个分支，也与天文学、海洋学、地理学、化学、生物学等存在广泛的联系。

随着科学技术的进步，现代探测手段的改善，高空气候学研究也更趋活跃。近年来，新资料、新成果不断涌现，人类活动领域也日益从低层向高层扩展，各种研究成果的应用更是受到各部门的广泛注意。航空事业的发展，国防尖端武器试验以及国民经济建设对大气环境所提出的多种要求，反过来又促进了高空气候学的发展。

早在60年代初期，当作者在国防科研部门服务时，曾惊奇地发现，夏季在我国新疆、甘肃、宁夏地区上空副热带西风急流十分强大，12—16公里高度上出现急流核，实测风速可达40—50米/秒以上，大大地超过了该地区的冬季风速。人工放射性烟云从我国西北上空运行至大陆东岸出海仅需13—15小时，其质点轨迹大致与40°N纬线平行。这一现象引起了广大气象工作者和作者对研究高空气候的浓厚兴趣。70年代初作者有幸和中央气象局的同事们共同撰写了《中国高空气候》一书（科学出版社出版，1975），书中总结了东亚大气环流（包括急流）的基本性状和季节演变规律，各种要素场的时空分布特点以及与军事气候有关的

若干实际问题。

1975年5月，作者又回到南京大学气象系任教。为满足教学、科研和实际应用的需要，作者又广泛收集资料，精选文献，重新编写了这本高空气候学。一方面在书中充实了有关高空气候环境、大气环流的基础知识，另一方面，也力图反映本学科的最新成就。

全书共分八章。第一章阐述高空气候环境及其支配因子，其中包括地球大气的组成与结构，臭氧 (O_3)、二氧化碳 (CO_2)、硫化物 (SO_x)、氮化合物 (NO_x) 等痕量气体及其他污染物。第二章与第三章为大气环流及其演变，着重讲述东亚大气环流特征与青藏高原对东亚环流的影响。第四章讨论北半球非周期性大型过程，包括副热带高压、南亚高压、极涡几个行星尺度系统，这些系统的非周期性变化会导致某些地区高空和地面气候发生异常。第五章叙述大气急流，特别强调东亚急流特征、分类与演变以及与急流有关的飞机颠簸问题。第六章讲述高空湿度场及其时空变化，比湿、水汽含量与暴雨之间的关系。第七章为云的气候学，主要论述云对气候的影响，自然云的时空分布规律，也简要介绍人工云形成和发展的一些特点。第八章叙述与航空活动有关的对流层顶结构、演变及其预报问题。

在本书写作过程中，得到我的同事和学生们的的大力支持和协助，作者表示由衷的感谢。钱建华讲师、李翠华博士、余勇、翟盘茂、吴娟、刘健硕士仔细阅读了本书全部初稿并提出了宝贵意见。石宗祥、金仪璐同志代为精心制图。作者在此深表谢忱。

邹进上

1989年国庆节于南京大学大气科学系

目 录

第一章 高空气候环境及其支配因子	(1)
第一节 关于行星大气的基本概念	(1)
第二节 地球大气的组成与结构	(6)
第三节 臭氧	(15)
第四节 大气污染物	(29)
第五节 支配高空气候环境的基本因子	(39)
参考文献	(45)
第二章 大气环流基础	(47)
第一节 决定大气环流的基本因子	(47)
第二节 大气经向平均结构与环流的季节变化	(60)
第三节 对流层中上部平均流型	(65)
第四节 平流层中低层平均流型与环境	(73)
第五节 南半球平均环流特点	(80)
参考文献	(86)
第三章 东亚大气环流特征	(88)
第一节 东亚风场的垂直结构	(88)
第二节 东亚平均流场	(98)
第三节 东亚纬向环流及其季节变化	(103)
第四节 东亚经向环流和经向垂直环流圈	(109)
第五节 东亚平流层下部平均环流及其季节转换	(116)
第六节 青藏高原对东亚环流的影响	(127)
参考文献	(137)
第四章 北半球非周期性大型过程	(139)
第一节 环流分型与环流指数	(139)
第二节 副热带高压的进退与盛衰	(151)
第三节 南亚高压的南北移动与东西振荡过程	(160)

第四节	极涡活动与分裂·····	(173)
第五节	平流层冬季爆发性增温·····	(179)
第六节	寒潮低温与盛夏高温·····	(182)
参考文献	·····	(187)
第五章	急流·····	(190)
第一节	急流的定义、分类和各类急流的基本特征·····	(190)
第二节	东亚急流的空间结构特点及其季节变化·····	(200)
第三节	急流与降水·····	(218)
第四节	急流与飞机颠簸·····	(226)
参考文献	·····	(231)
第六章	高空湿度场·····	(233)
第一节	比湿的分布及其季节变化·····	(233)
第二节	比湿随高度的分布·····	(243)
第三节	比湿与降水·····	(246)
第四节	大气中的水汽总含量·····	(251)
第五节	我国暴雨代表性水汽含量的统计分析·····	(264)
第六节	温度露点差·····	(266)
参考文献	·····	(272)
第七章	云的气候学·····	(273)
第一节	云与气候·····	(273)
第二节	全球云量分布·····	(277)
第三节	云的上界和下界·····	(285)
第四节	我国云量的地理分布特点及其季节变化·····	(288)
第五节	人工云的形成和发展·····	(299)
参考文献	·····	(304)
第八章	对流层顶及其预报·····	(306)
第一节	定义和确定标准·····	(306)
第二节	对流层顶下界的平均高度和温度的全球分布及其季节变化·····	(308)
第三节	对流层顶的地理分类·····	(316)
第四节	极地与热带对流层顶的时空分布·····	(320)

第五节 我国对流层顶的时空分布特点·····	(325)
第六节 对流层顶与大气环流·····	(338)
第七节 对流层顶的预报·····	(344)
参考文献·····	(348)

第一章 高空气候环境及其支配因子

地球四周包围着一层厚约3000公里的大气，人类就生活在这浩瀚的大气圈底层。显然，和人类关系最密切的是从地面到30公里左右这一层大气。随着现代科学技术的发展，人类的活动范围与研究领域大大地扩展了。例如，大型喷气式客机的飞行、平流层气球与火箭的施放、人造卫星发射、航天飞机试航、放射性微粒与火山灰污染预报，无不需要了解高空气候环境与气象情况。同时，高空大气的温压湿结构以及环流的周期性变化和非周期性变化直接影响近地层的天气与气候。

本章简要地介绍行星大气的概念，地球大气的组成与结构特点，臭氧、二氧化碳和其他污染物质对气候环境的影响，最后综合论述关于支配高空气候及其变化的几个主要因子。

第一节 关于行星大气的基本概念

在讨论地球大气组成与结构之前，先介绍有关行星大气（也包括地球大气）的一些基本概念和数据。表1.1列出了有关金星、地球、火星、木星的一些大气特性资料[1]。

由表1.1可见，离我们最近的几个行星都有大气和云层包围着，其中以金星的云层最深厚，金星与火星大气的主要成分是二氧化碳(CO_2)，而地球大气的主要成分是氮、氧、氢、水汽与二氧化碳(CO_2)等。

在太阳系中行星所接受到的唯一能源是太阳能。太阳作为6000开的黑体，所发射的辐射能主要集中在0.47微米附近的可见

表1.1 有关行星大气的某些特性资料

特 性 行 星	平均表面 温度(K)	表面气压 (大气 压)*	重力加速 度 g (cm/s ²)	主要成分	空气分 子量 M _r	云层覆盖 情况
金 星	750	90	884	CO ₂ >90%	44.0	全部为深厚 云层覆盖
地 球	280	1	981	N ₂ 78% O ₂ 21% H ₂ , H ₂ O	28.8	约50%为 H ₂ O云层覆盖
火 星	240	0.007	370	CO ₂ >80%	44.0	很薄的 H ₂ O云
木 星	134**	200**	2600	H ₂ , H _e	2.0	NH ₃ 云

* 以地球表面上的大气压为单位, 1 个大气压=1013mb=1013hPa。

** 云顶上的温度和气压。

光谱区。行星接受太阳辐射能的多少与距太阳的远近有关, 太阳辐射到达行星表面, 一部分被反射返回太空, 一部分被吸收。行星吸收辐射后, 增高表面温度并以红外辐射形式再返回太空。

令行星表面的有效温度为 T_e , 反照率为 A (对地球而言, 平均为0.35), 行星所获得的太阳辐射应与行星本身所放出的红外辐射相平衡, 于是有

$$4\pi R^2 \sigma T_e^4 = \pi R^2 (1 - A) F / D^2 \quad (1.1)$$

此处 $\sigma = 5.75 \times 10^{-5}$ 尔格·厘米⁻²·秒⁻¹·开⁻⁴, 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, D 为行星与太阳之间的距离 (对地球而言, $D=1$), R 为行星半径, F 为与太阳光束垂直的行星表面上的太阳辐射通量, A 为反照率。(1.1)式右边为行星所吸收的太阳辐射能, 左边为行星放射出的红外辐射。从(1.1)式可以算出某些行星的有效温度 T_e , 如表1.2所示。表中还列有实测平均温度近似值(T_m), 以资比较。

由上表可见, 金星、地球与火星的有效温度和实测平均温度非常接近, 只有木星例外。木星实测温度比有效温度高, 其原因

表1.2 某些行星的天文特征与参数

项 目 行 星	D	R (km)	A	T _e (K)	T _m (K)	绕太阳转 动周期 (d)	自转周期 (d)
金 星	0.72	6053±3	0.77	227	230	225	-243
地 球	1.00	6371	0.35	256	250	365	1.00
火 星	1.52	3370	0.22	216	220	687	1.02
木 星	520	71600— 67900	0.58	98	130	4339	0.41

除了吸收太阳辐射能而外，另一方面是靠木星内部供给能量。金星表面温度与它的有效温度相差很大（相差523开）。因为金星上全为深厚的云层所覆盖。这种云层主要是二氧化碳（CO₂）所组成，其次是二氧化硫（SO₂）和尘埃，还含有微量的氩、氖等惰性气体。这种云层对长波辐射来说，几乎是不透明的，因而能防止长波辐射外逸，并能允许少量短波辐射通过大气圈抵达行星表面，从而使表面温度升高。此即通常所说的温室效应。

温室效应与水汽的关系十分密切，尤其是在有云的夜晚，这种效应更是显著。水从地面蒸发，水汽浓度随星体表面温度的升高而增大，从而产生一种正反馈机制。这对金星大气尤为重要。可以设想，金星上早期的水量与地球上的水量相当，但金星表面温度总是高于水的沸点，于是蒸发加强，水汽浓度不断增大，从而温室效应也不断加强。因此，金星上不存在液态水。早期的金星大气应是水汽组成的。到达金星大气顶部的太阳紫外辐射使水汽分解为氢与氧，最后氢气外逸，而氧因各种氧化过程消耗殆尽。所以金星上只有少量的水，而在金星大气中却含有大量的二氧化碳。

大气成分直接影响辐射能的传输和热量平衡，从而在一定程度上决定了行星大气的温度分布。图 1-1 上部为金星、地球、火星大气温度的垂直分布。下部为相应的大气稳定度指数随高度的

分布廓线。根据温度垂直分布特点，可以看出，地球大气一般分为对流层、平流层、中间层、热层和外层，其中对流层非常不稳定，中间层稳定度相对地也较小。金星和火星大气均只有对流层、热层和外层。金星对流层底部是不稳定的，其次是在50—60公里的地方也很不稳定，这里是稠密云层所在。

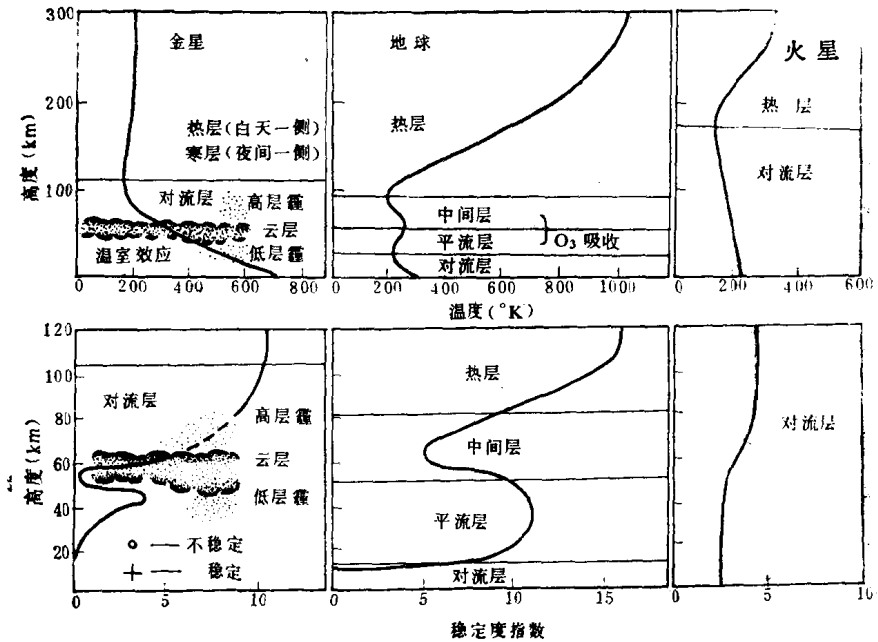


图1-1 金星、地球、火星大气温度和稳定度指数随高度的分布 (引自王宝贯，1987)

金星大气的主要成分是二氧化碳，大气上界的太阳辐射通量密度约为 $0.85 \text{卡/厘米}^2 \cdot \text{分}$ ($593.13 \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2}$)¹⁾，行星反照率为0.77，表面密度约为 $6.3 \times 10^{-2} \text{克/厘米}^3$ 。30公里以下金星大气温度随高度的详细分布如表1.3和图1-2所示。

火星大气的主要成分也是二氧化碳，但它距太阳为1.52天文

1) $1 \text{卡} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{分}^{-1} (\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) = 697.8 \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

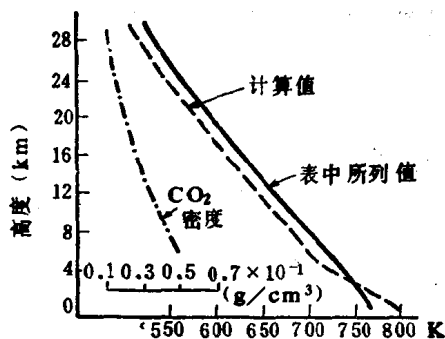


图1-2 金星大气温度的垂直分布廓线

表1.3 金星大气温度随高度的分布

高度(km)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
温度(K)	768	742	715	690	664	638	613	588	565	540	515

单位，所以火星大气上界的太阳辐射通量密度比较小，约为 $153.52 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ ，行星反照率约为0.25，表面大气密度为 $1.94 \times 10^{-5} \text{ 克/厘米}^3$ ，向上递减，到30公里附近降低到 $0.5 \times 10^{-6} \text{ 克/厘米}^3$ 。图1-3为火星对流层底层30公里以下大气温度随高度的分布。图1-2和图1-3左边均附有计算时所取的二氧化碳含量随高度的分布资料。

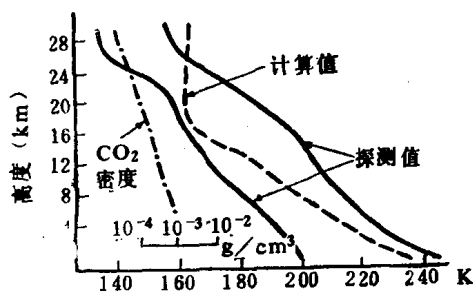


图1-3 火星大气温度的垂直分布廓线

行星大气总是处于行星重力场内,因此,大气密度均随高度而减小。由于大气垂直运动速度一般比较小,所以静力学方程成立,即:

$$dp = -\rho g dz \quad (1.2)$$

式中, ρ 为行星大气密度, g 为重力加速度。由于大气的总厚度与行星半径相比, 仍然很小, 所以在大气层内, g 可粗略地视为常数; p 为 z 高度上的气压。理想气体的状态方程为

$$\rho = \frac{Mrp}{R^*T} \quad (1.3)$$

此处, Mr 为空气分子量, 对于地球大气而言, $Mr = 28.8$; T 为温度 (开); R^* 为普遍气体常数 (尔格·摩尔⁻¹·开⁻¹)。于是方程式 (1.2) 可以写成

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{H} \quad (1.4)$$

积分, 即得

$$p = p_0 \exp \left[- \int_0^z \frac{dz}{H} \right] \quad (1.5)$$

此处 p_0 为 $z = 0$ 处的气压, $H = \frac{R^*T}{Mr g}$ 为标高。(1.5) 式称为行星大气的压高公式。由于不同行星上的 Mr , g , T 等参数均不相同, 因此, 气压随高度的递减率也不一样。

第二节 地球大气的组成与结构[2]

地球大气的总质量约等于 5.27×10^{18} 吨, 略少于地球总质量 (5.98×10^{21} 吨) 的百万分之一。地球大气是由各种混合气体组成, 由于地心引力作用, 这些气体总是包围在地球四周, 厚约 3000 公里。80 公里以下的大气中最主要的成分是氮 (N_2 , 按容积为 78.09%, 下同)、氧 (O_2 , 20.95%) 和氩 (Ar , 0.93%), 此外, 经常混合着少量的二氧化碳 (CO_2)、氢 (H_2)、氖 (Ne)、氦 (He)、氪 (Kr)、氙 (Xe) 等。大气中还含有一些含量变

动不定的气体，如臭氧 (O_3)、甲烷 (CH_4)、氧化氮 (N_2O)、水汽 (H_2O) 以及其他一些天然的和工业产生的痕量气体。

氮是大气中最多的气体成分，它在自然条件下，可通过豆科植物的根瘤菌作用，固定到土壤中，成为植物所需要的氮化合物。空中闪电能将大气中的氧和氮结合成一氧化氮，然后被雨水吸收并渗入土壤中成为硝酸盐。

氮对太阳辐射远紫外光谱区30—130纳米 (nm) ¹⁾ 具有选择性吸收。

氧是大气中次多的气体，它是人类赖以维持生命、动植物赖以生长所不可缺少的。由于植物呼吸和光合作用，氧浓度趋向稳定，而植物本身的演化又将适应大气环境条件。可见，大气中的一部分氧是植物产生的，二者之间的相互作用十分清楚。

氧在波长 $\lambda < 242$ 纳米的辐射作用下受到分解，大气中臭氧层的形成就是和氧的这种分解作用有关。

二氧化碳多集中在20公里以下，含量仅占整个大气体积的万分之三，大致为 2.4×10^{12} 吨。在水温低的情况下，它易溶于海水之中。所以，海洋中的二氧化碳比大气中的含量可能要多几倍。可见，海洋是一个巨大的气体贮存库，它的贮存与释放主要取决于水温。

二氧化碳的含量是可变的，它受一系列因子的影响：如，海洋温度、火山活动、植物的光合作用与呼吸、生物氧化、化石燃料与木材的燃烧、森林火灾等。一般在人烟稠密的工业区，含量较高，在农村含量减少^[3]。

二氧化碳对太阳短波辐射吸收很少，仅在 $\lambda = 4.3$ 微米附近有较弱的吸收带，但它对地球长波辐射的吸收却相当强烈，特别是在 $\lambda = 12.9—17.1$ 微米范围内。

臭氧是地球大气中有效地吸收太阳紫外线的唯一气体，它是

1) 1 nano meter (nm) = 10^{-9} 米。

一种对生物圈特别重要的保护物。臭氧的产生必须有自由氧原子存在。氧原子由太阳紫外线、宇宙线和闪电放电分解氧分子而成。后两种作用只在低层大气中发生。在对流层以上（15—60公里）的大气中，氧原子的主要来源是紫外辐射对氧分子的光解作用。

臭氧有几个吸收带，最强的吸收带是在紫外区，称为哈特利带，大致分布在波长为 $22-32 \times 10^{-6}$ 厘米。最大吸收系数在 $\lambda = 25.53 \times 10^{-6}$ 厘米。这种波长的光线透过 0.007 厘米的臭氧层以后，可以使原光强减弱到 1/10。与哈特利带相毗邻的是哈金斯带，它处于 $30.00-34.50 \times 10^{-6}$ 厘米光谱区。在红外区臭氧还有 4.7 微米、9.6 微米及 14.1 微米三条吸收谱线。

水汽 (H_2O) 在大气中是一种可变气体。水汽含量不仅随季节和地点而变化，而且与大气环流、海陆分布密切相关。大气中水汽含量虽少，但它会发生相变，云雾与降水即是相变的产物。

水汽的吸收带大部分集中在红外区。在波长近于 6 微米的地方，水汽有一个强烈的吸收带，它一直延伸到 8.5 微米。在 8.5—12 微米区域内，吸收极弱，因而人们把这一区域称为大气透明区，或称为“大气窗”。从 18 微米附近开始，水汽吸收带再次增强。正由于这个强烈吸收带的存在，以致长波辐射实际上不能透过远红外光谱区。

组成大气的各种气体，不仅物理化学性质不同，而且不同气体的个别分子具有不同的循环方式[4]。二氧化碳通过光合作用转变为植物组织，通过木材和化石性燃料的燃烧，或者通过动物、植物的呼吸再进入大气中，或溶于海水，再自海洋释放出来。

氧也是通过光合作用与呼吸，通过和二氧化碳同样的循环方式，进入大气之中。

水汽的循环方式则不同，水汽以降水的形式下落，由地面径流汇入江河，再从江河流入海洋，然后自海洋蒸发或者自植物蒸散又回到大气之中。水循环是很剧烈的，一次循环大约只需要 9

天。但一个完整的二氧化碳分子循环需要 300 年。一个氧分子循环需要 2000 年，大气中的氮通过固氮过程，再释放回到大气中，一次大约需要 10^7 年 [4]。

大气中除了各种气体以外，还悬浮着各式各样的固体杂质和液态微粒，组成了大气气溶胶。这些气溶胶粒子的大小、形状各异，物理化学性质千差万别，它们随气流飘动或沉降。大气气溶胶粒子对辐射的吸收与散射、云雾降水的形成、大气污染以及大气光电现象的产生具有重要作用。

根据地球大气温度垂直分布特性，同时考虑其他物理性质，通常将大气圈分为五层。各层的特点如下 [4—5, 2]。

一、对流层

对流层是地球大气的最低层，它与人类活动的关系最密切。多年观测表明，对流层顶的下界（或上界）是随纬度和季节而变化的。在热带平均为 17—18 公里，在温带平均为 10—12 公里，高纬和两极地区只有 8—9 公里。夏季对流层的厚度大于冬季。

对流层内集中了约 75% 的大气质量和 90% 以上的水汽，同时对流运动与湍流十分强烈，从而使上下层的水汽、尘埃及热量等发生强烈垂直交换。一切重大的天气现象，如云雾、降水、雷暴等都发生在这一层。飞机颠簸也是在这一层内强烈。

对流层内的主要特点是气温随高度而降低，平均直减率 $\gamma = 0.65^\circ\text{C}/100\text{米}$ 。在对流层的上界气温一般下降到 -55°C 以下。直减率是随时间、地点（纬度）、高度而改变的。夏季中纬度，在 2 公里以下的低层大气中，直减率 γ 大约为 $0.5^\circ\text{C}/100\text{米}$ ；4—6 公里气层内， γ 大约是 $0.6^\circ\text{C}/100\text{米}$ ；6—8 公里气层内， γ 大约是 $0.7^\circ\text{C}/100\text{米}$ 。在 12 公里高度以上， γ 急剧减小，甚至变成负值，即所谓对流层顶逆温。在低纬，由于对流强盛，往往在 17—18 公里以下， γ 均为正值，因此，最低温度常出现在赤道上空。

“标准大气”是表示特定纬度平均大气状态的温高关系。在进行压力高度计校准、飞机和火箭设计以及弹道计算时，需要了