

第一章

气候系统与全球变化

气候系统是那些能够决定气候形成及其变化的各种因子的统一体。气候系统包括五个物理组分：大气圈、水圈、冰雪圈、陆地表面和生物圈。

气候与人类息息相关，它是人类生存的基本物理环境的主要部分之一，是最容易被人类感受到的生存环境部分，给人以直接的刺激作用，使人感受到冷暖、干湿及其变化；反过来又深受人类活动的影响。从古埃及文明的衰落，到玛雅文化的毁灭；从全球气候变暖、酸雨、臭氧洞扩大到沙尘暴的肆虐，人类文明的发展无不关乎到气候系统及生态环境异常变化，这些影响又困扰着人类社会，阻碍了人类社会的进步和发展，甚至危及到人类的生存。人类社会不得不开始反省、认识并试图改变这一变化的进展。

从失落的古代文明说起

人类只有一个地球。集天地之灵气，采万物之精华，勇敢的人类从洪荒时代走到了文明的世纪。人类的智慧创造了经济发展的奇

迹，无知与贪婪却留下了可怕的恶果。

人类既是环境的产物，又是环境的改造者。人类在其发展进程中，运用自己掌握的知识，通过劳动，不断改造自然，创造新的生存条件。在征服自然走向文明的历史进程中，人类取得的每一次进步几乎都伴随着对地球环境的巨大冲击。

古代文明的失落与人类活动

历史学家曾用了一句话来勾画历史：“文明人跨越过地球表面 在他们的足迹所过之处留下一片荒漠。”人们常说 历史是一面镜子。曾经辉煌的古文明的消失，使我们现在只能从文字记载和考古发现中去了解它们。世界古文明策源地的共同悲剧，就是对现代人类的警示。

古埃及文明：北非是人类文明的摇篮之一，巍峨耸立的金字塔、图腾卡蒙法老墓及亚历山大灯塔为代表的埃及文化达到了当时人类文明的巅峰。古埃及文明可以说是“尼罗河的赐予”。在历史上，每到夏季，来自上游地区富含无机物矿物质和有机质的淤泥随着河水的漫溢，都要给埃及土地留下一层薄薄的沉积层，其数量不致于堵塞灌渠、影响灌溉和泄洪，但却足以补充从田地中收获的作物所吸收的营养，近乎完美地满足了农田对于有机质的需要，从而使这块土地能够生产大量的粮食来养育生于其上的众多人口。正是这样无比优越的自然条件造就了埃及漫长而辉煌的文明。然而由于尼罗河上游地区的森林不断地遭到砍伐，以及过度放牧、垦荒等，使水土流失日益加剧，尼罗河中的泥沙逐年增加，埃及再也得不到那宝贵的沃土，昔日的“地中海粮仓”从此失去了往日的辉煌，埃及文明创造者们留给子孙后代的遗产，除了古老的文明外，还有 90%完全沙漠化的土地。

巴比伦文明：人类文明的另一个发源地美索不达米亚经历了同样的遭遇。美索不达米亚平原位于幼发拉底河和底格里斯河之间（现伊拉克境内）公元前 这里曾经是林木葱郁、沃野千里 富饶

的自然环境孕育了辉煌的巴比伦文化——“楔形文字”、《汉穆拉比法典》、60进制计时法……苏美尔、亚述、阿卡德和巴比伦人相继在公元前4000年至公元前2000年间，创造了令世人叹为观止的城市文明。然而，巴比伦人在创造灿烂的文化、发展农业的同时，却由「无休止地垦耕、过度放牧、肆意砍伐森林等，破坏了生态环境的良性循环，使这片沃土最终沦为风沙肆虐的不毛之地，漫漫黄沙使巴比伦王国在地球上销声匿迹。那座辉煌的巴比伦城，直到近代才由考古学家发掘出来，重新展现在世人面前。

印度文明：南亚的印度河流域，是人类早期文明的发祥地之一。4000年前，那里曾是气候宜人、农业发达、物产丰富的肥沃良田，盛产小麦、芝麻、甜瓜和棉花，是名符其实的粮仓。然而，由于人类无休止地向大自然索取，毫无顾忌地开垦，使温德亚山和喜马拉雅山南麓的水土大量流失淤塞了河道，破坏了生态结构和生态平衡，使肥沃的土地变成了不毛之地，终于形成了今日 $65 \times 10^4 \text{km}^2$ 的塔尔沙漠。

复活节岛的兴衰：复活节岛是太平洋上一个偏僻荒凉的小岛，面积不足 400km^2 ，人口最多时也不过7000人。它距最近的大陆——南美洲西海岸有3000km之多，距最近的有人居住的岛屿——皮特凯恩岛也有近2000km之遥。但是它的一部文明兴衰史，却是昭示人类未来的一面镜子。

1722年复活节，荷兰海军上将罗格温（Roggeveen）乘阿雷纳号船到了一个无名岛屿，成为访问该岛的第一个欧洲人。复活节岛也因此而得名。使欧洲人感到震惊的是岛上600余尊高大的石雕像和一个极其落后野蛮的原始社会，两者形成鲜明对照。当时岛上大约有3000人都生活在破烂的芦苇棚或山洞中。为了生存，岛民之间整日械斗不断，因为食物极度匮乏，人们甚至同类相食。后来不断有来自欧洲的探险者登上复活节岛，包括著名的库克船长（1774年）。1770年，西班牙人占领了复活节岛，但是由于距离遥远，人口稀少，资源匮乏，西班牙对这里从未实行真正的殖民统治。

所有的来访者无不为岛上存在的文明遗迹与落后野蛮的社会现实之间的巨大反差而感到困惑。

考古学家证明，复活节岛曾经有过辉煌的文明。并认为复活节岛的居民属于波利尼西亚人，公元 5 世纪到达复活节岛，已是全球大迁移的晚期。当时复活节岛上土壤肥沃，温度、湿度很高，但是水源奇缺，岛上无常年性河流，仅有的淡水来自死火山形成的湖。由于与世隔绝，生物物种很少，只有 30 种本地植物、几种昆虫、两种蜥蜴，没有哺乳动物，岛屿周围水域中鱼也不多。波利尼西亚人在家乡时主要食用鸡、猪、狗、波利尼西亚鼠以及甘薯、芋头、两色果、香蕉、椰子和白薯。但是移民们很快发现这里的气候不适宜亚热带植物（如两色果和椰子）的生长，芋头和甘薯的产量也很有限。移民的食品因此只限于白薯和鸡。这种单一的农业文明使移民们一度生活得很悠闲。据估计，5 世纪时复活节岛的移民不超过 20~30 人。后来人口缓慢增长，大家庭成为基本的社会单位，有亲属关系的家庭组成了部族，每个部族有自己的宗教中心和祭祀活动，族长组织这些活动，并在族内分配食物。

花粉分析表明，当时岛上草深林密。而后来的造神运动——建造和运输雕像构成了对林木最大的需求，也直接导致了复活节岛的衰亡。当时的居民散居在农舍中，并在农舍周围播种庄稼；社会活动则集中在祭祀中心，即被称为阿库 Aku 的大石头平台。人们在这里举行葬礼、祭祀和纪念亡故的族长。岛民们精心组织宗教仪式，沿着海岸线在全岛建造了 300 多处宏伟的阿库，每一处阿库有 1 至数尊石像。这些石像成为复活节岛文明一度兴盛的见证。

制作石像是一项巨大的工程。每尊石像约 6m 多高，几十吨重。在采石场制作，再运输到全岛各处的阿库。因为缺乏运输设备，岛民就砍伐森林，用圆木滚动雕像。1550 年，复活节岛人口达到 7000 人，部族之间的争斗开始加剧。人们竞相建立阿库，以树立本族的权威。到 16 世纪，岛上共建了几百个阿库，竖立了 600 多尊雕像。然而就在此时，由于岛上森林被砍伐殆尽，运输雕像的工作

得不停了下来。几百尊未完成的雕像遗落在采石场周围。

森林消失对岛民的生活和生产产生了严重影响。从 16 世纪初开始，树木匮乏迫使许多人不得不去住石洞。一个世纪以后，人们已经找不到适用的木材制船，渔业生产也难以为继。森林砍伐还使得水土流失日趋严重，农业收成锐减，粮食供应出现危机。更为严重的是，没有了船，岛民甚至无法逃避环境厄运。社会和文化危机也接踵而至。不能继续竖立雕像，使人们产生了信仰危机。为了争得有限的资源，部族之间开始了无休止的战争。战争的主要目标是破坏对方的阿库石雕像在战争中被推倒。到 1830 年岛上已经没有站立的雕像了。

18 世纪登上复活节岛的欧洲人看到，除了火山口的底部外，岛上的森林已经荡然无存。1877 年，秘鲁人宣布岛上的全体居民成为他们的奴隶，但是此时岛上只有 110 名老人和儿童。最后复活节岛被智利接管，成为一个由英国公司管理的有 40000 只羊的牧场，岛上最后剩下的几个人生活在一个小村庄里。

复活节岛的岛民一度建立了繁荣的物质文明，但是当社会和经济发展超越了资源的承载力时，文明就走向衰败。复活节岛的岛民没有认识到，他们生活在一个几乎与世隔绝的岛上，他们的生死存亡与小岛上有限资源的可持续性息息相关。如果他们不能协调环境与发展关系，只能看着资源一点点被消耗殆尽，自己一步步走向死亡。

玛雅文明的消亡：在美洲的三大印第安文明中，4 世纪兴起于中美洲尤卡坦半岛的玛雅文明是最早的仪式文明和都市文明，比北方墨西哥的阿兹特克文明和南方秘鲁的印加文明都要早数百年。当时的玛雅人兴建了规模巨大、功能完备的城市，并有着极为先进的数学体系和天文历法。但是这样一个高度发达的文明却在 10 世纪时突然消失，一直是不解之谜。经过多年研究，目前被学术界普遍认同的一种看法是，玛雅文明是由于当地连年发生旱灾，摧毁了古文明赖以生存的农业。而玛雅人又没有打井筑渠的水利知

识，在河流湖泊干涸断流之后，农业的歉收引起了一系列连锁反应，巨大的都市文明最终分崩离析，解体成中美洲丛林中若干支印第安部落。但是导致尤卡坦半岛地区旱灾频发的原因是什么？这一直是学术界争论的重点。美国佛罗里达州大学地质学家戴维·霍德尔在最近的研究中提出：玛雅文明的消失与太阳的周期性活动增强有关。这位学者发现，玛雅地区发生的旱灾有着明显的周期性，大旱灾每隔 208 年就发生一次，最严重的一次发生在公元 750 年至 850 年，这正是玛雅文明消失的年代。而一些专家曾经提出，严重的干旱是玛雅人口剧增、森林受到无节制破坏的必然结果。

玛雅人有着复杂的宗教体系，所有的城市都是以宏伟巨大的金字塔和神庙为核心，在兴建金字塔和神庙时，玛雅人习惯于用白石灰来粉刷外墙。烧制石灰需要大量木柴，玛雅人便开始砍伐森林。随着城市规模不断扩大，金字塔修建得日益增高，对木柴的需求量也越来越大，最后，大片森林被砍伐殆尽，当地的环境也逐渐恶化，干旱自然不可避免。对此，目前在墨西哥南部和中美洲各国广泛分布着的玛雅金字塔遗迹，就是最好的证明。

中国古代文明的兴衰与人类活动

黄河流域的变迁：黄河流域是华夏文明的发祥地。据考证，4000 多年前 这里森林茂盛、水草丰富、气候温和、土地肥沃，商代时黄河流域的森林覆盖率曾达到 50% 以上，先民在此逐水而居，繁衍生息，创造了辉煌的古代文明。

秦始皇统一中国之后，开始大兴土木，毁伐森林。为修建阿房宫，砍光了整个蜀地山岭上的树木。故有“蜀山兀，阿房出”之说。

到了汉朝，人口剧增，粮食需求急剧增长，毁林开垦就成为解决粮食问题的最重要手段。于是，出现了规模空前的大垦殖，耕地面积由秦时的 10^8 亩 左右 上升到西汉时期的 8×10^8 亩 土地的

① 1 亩 = 666.6 m^2 ，下同。

增加多为毁林开垦所造。现在的乌兰布和沙漠在西汉之前还是植被很好的地区，经过历代砍伐开荒，到了北宋，这里已是“沙深三尺 马不能行 行者皆乘橐驼”的地区了。

东汉至隋朝年间 由于战乱 人口锐减 环境压力相对减轻 生态环境有了一定的恢复。后至唐朝，经济繁荣趋于鼎盛，人口急剧增长，又开始了新一轮更大规模的毁林开垦，仅新垦土地就达 6×10^8 亩。史称“开天宝之中 耕者益力 四海之内 高山绝壑 耒耜亦满”。这种对“高山绝壑”的开垦，使水土流失日益加剧。黄土高原沟壑纵横，满目疮痍；黄河泥沙含量不断增加，中华民族的这条“母亲河”成为世界上泥沙含量最高的河流；黄河流域水土流失使黄河的河床日趋增高，下游河段竟高出地面几米甚至十多米，形成“悬河”遇到暴雨时节 河水便冲决堤坝 泛滥成灾 黄河因此而成为名符其实的“害河”。

天灾加上人祸，使黄河流域经济渐趋衰落，等到安史之乱之后 昔日繁华的黄河流域 竟到了“居无尺椽 人无烟灶 萧条凄惨，兽游鬼哭”的地步。田地荒芜，水利失修，人口大量死亡和南移，使黄河流域社会经济开始衰落，曾经孕育了灿烂文明的黄土高原成为我国最贫穷的地区之一。

楼兰古国的消失：1900年 斯文·赫定的探险队进入了塔克拉玛干沙漠东部的罗布泊地区，发现了在历史上赫赫有名后又销声匿迹的楼兰。这时楼兰古城消失于沙漠之中已经1500年了。

楼兰国始建于公元前176年 消亡于公元630年 共有800多年历史。楼兰城是楼兰国前期重要的政治经济中心，在丝绸古道上盛极一时。当时这里地势平坦，水丰草茂，盛产鱼虾蒲苇野麻，有玉石、驴马、马鹿、骆驼等物产 物产富饶 人口兴旺。

在古丝绸之路上，楼兰道是主要的通道，它从敦煌的玉门关、阳关，翻过三陇沙、阿齐克谷地和白龙堆，经土垠抵楼兰古城，再沿孔雀河岸到西域腹地。楼兰是塔里木盆地东部的十字路口，往西、往东、往南、往北可通向西域全境，形成交通网络，楼兰是古西域交

通枢纽。楼兰古城作为一个丝绸之路上的重要城市，在活跃了几个世纪之后突然消失了，直到 20 世纪初才被探险家发现。古楼兰是如何突然消失的？那深埋在沙漠之下的古城要告诉人们什么？

塔里木河与开都河在今新疆尉犁县境汇合后形成孔雀河，孔雀河自西向东流，最后注入终点湖罗布泊。楼兰的城池、寺院和村落广布于孔雀河下游两岸和罗布泊湖畔。没有水是导致楼兰古国消亡的最根本的原因。而水的减少直到消失，既有气候变化的原因，也有人为原因。在解剖已有 3800 年历史的楼兰美女时发现其肺部沉积有大量沙土，说明当时气候已经开始恶化了。

楼兰地处塔里木盆地最低洼地带，塔里木河下游经常改道，使得罗布泊实际上成为不断游移的湖泊；塔里木河下游不断改道还几度造成孔雀河断流，从而最终导致终点湖罗布泊的枯竭；而楼兰人为大兴土木以及其奇特墓葬形式“太阳墓”砍伐了大量树木，使土地失去了涵养水源的能力，最终带来了生态恶化，使塔克拉玛干大沙漠不断东侵，楼兰古城最终消失于漫漫风沙之中。

古楼兰是如何神秘消失的？

2001 年，北京电视台组织了大型电视科考系列报道活动“百年发现世纪穿越——人与水的记忆”。11 月 14 日，科考队一行从库尔勒向位于罗布泊西岸的楼兰古城进发，他们穿过奇形怪状的雅丹地带“龙城”，进入到了广阔平坦的罗布泊湖盆。在罗布泊，最大的感慨是，所谓“沧海桑田”的变迁，可能并不需要预想中那么长的时间，在坚硬无比、绵延不绝的盐碱壳子上颠簸，很难想象，50 年前这里还可以划船，还能打上 1m 多长的鱼。中上游的引水灌溉和水库的修建使塔里木河不再注入罗布泊，1972 年，罗布泊蒸发完了最后一滴水，成为一片死亡之海。因为水的消失，一个湖的废弃乃至一个城市的废弃，这样的故事在塔克拉玛干沙漠中并不鲜见。比如楼兰，当天黄昏，车队用整整一个下午的时间走过 18km 极其难走的雅丹地貌，终于到达楼兰古城。面对黄昏中的楼兰

古城，有谁能不动容呢？在夕阳的金色光辉中，高大的佛塔和“三间房”苍凉而悲壮，千年前的木桩在晚霞中好似要燃烧起来，陶罐的碎片撒了满地，粗大的胡杨树树枝像干枯的绳子一样卷曲，轻轻一碰就会碎掉……

1900年3月初，瑞典探险家斯文·赫定率领的探险队沿着干枯的孔雀河左河床来到罗布荒原，在穿越一处沙漠时发现他们的铁锹不慎遗失在昨晚的宿营地中。赫定只得让他的维吾尔族助手阿尔德克回去寻找这位助手回来的时候，不仅带回了铁锹，而且还拣回了几件木雕残片。赫定见到残片非常激动，第二年3月，他回到这里进行挖掘，发现了大批文物。这就是令世界震惊的楼兰古城。

历史上，楼兰属西域三十六国之一，楼兰城位于罗布泊西北岸边，孔雀河南岸7km处，是楼兰故国的都城，是楼兰国前期重要的政治经济中心，在丝绸古道上盛极一时，楼兰道是古丝绸路上主要的通道，是古西域交通枢纽。

楼兰古城作为一个丝绸之路上的重要城市，在活跃了几个世纪之后突然消失了，直到20世纪初才被探险家发现。楼兰究竟是如何神秘消失的？一直是近代学者多年争论不休的一个问题。

一个说法是战争，认为楼兰是为刀零所灭，或者是被北方匈奴游牧民族所灭。但气候恶化论是目前较占上风的论点，认为是因为自然变化造成国家大迁移。

也有考古专家认为，政治和社会巨变是楼兰废弃的诱因。

不管怎样，楼兰荒废最根本的原因还是没有水，著名历史地理学家王守春认为，水的减少直到消失，除了气候变化的原因，更主要的是人为原因。从历史上看，也多次发生过由于人口的增加，上游对河水的过度引取，使下游河流来水减少和河道的不稳定，最终导致下游古遗址废弃的事情。

还有一种说法认为，楼兰人为大兴土木以及其奇特墓葬形式“太阳墓”砍伐了大量树木，最终带来了生态恶化。“太阳墓”外表奇特而壮观，围绕墓穴的是一层套一层的共七层由细而粗的原木。木桩由内而外，粗细有序。圈外又有呈放射状四面展开的列木，整个外形酷似一个太阳，在已发现的七座墓葬中，成材原木达一万多根，数量之多，令人咋舌。

古人云：“今之于古也，犹古之于后世；今之于后世，亦犹今之于古也。”楼兰留下的“人与水的记忆”，是一段惨痛的历史。

不过，看一看今天的罗布泊，看一看塔里木河下游大量因缺水而衰败的胡杨林，我们也足以担忧，我们留给后人的记忆，将是什么样的历史呢？

古文明衰落的启迪

纵观古代文明，它们都在兴盛繁荣和辉煌了十多个世纪之后毁灭了，或者埋藏在沙漠下，或者遗留在荒野中，成为历史陈迹，只有在考古发掘中证明它的存在。文明人主宰环境的优势仅仅只能持续几代人。这些文明在经过几个世纪的成长与进步之后迅速地走向衰落和覆灭，其平均生存周期为 40~60 代人（1000~1500 年）。在大多数情况下，文明越是灿烂，它持续存在的时间就越短。文明之所以会在孕育了这些文明的故乡衰落，主要是由于人们毁灭了支撑文明生存和发展的环境。一部文明的兴衰史，实际上就是一部人类征服自然、盘剥自然并最终自食恶果的辛酸史。

从古文明的兴衰中，我们能得到一些什么样的教训和启迪呢？

启迪之一：倡导一种尊重自然、善待自然的伦理态度，将是人类文明持续的基础。自然环境是我们赖以生存的母体，人类不过是自然之子，当我们从自然母体中汲取营养而创造文明时，我们不要忘记自然母亲的恩德，更不能做一个以怨报德的不孝子孙。而应自觉充当维护自然稳定与和谐的调节者。

启迪之二：拜自然为师、循自然之道的理性态度，是人类文明发展的不竭动力。许多古文明之所以从强盛走向衰落，是因为他们在文明发展过程中很少或根本没有遵循自然规律和生态规律，对自然界肆意开发和掠夺，从而导致自然生态系统的崩溃，最终酿成文明的衰败。而今天，我们仍未汲取应有的教训，甚至采用更强大的手段破坏着更大范围的生态系统。如果说，过去的农业文明和游牧文明破坏的只是局部的生态系统，最终导致一个区域性的文明衰败；那么现在的工业文明破坏的则是整个地球生态系统。因此，人类必须从现在起，拜自然为师，循自然之道，按照自然规律和生态规律办事，从自然界中学习我们的生存和发展之道。

启迪之三：倡导一种保护自然、拯救自然的实践态度，将是人类文明长盛不衰的根本保证。人类在不断吞噬自然的躯体，同时也

在品尝自己所酿造的苦酒。今天，人类比任何时候都能领略到气候变化的威胁。

政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 2001 年的评估报告显示, 20 世纪全球表面平均温度增加了 $0.6\text{C} \pm 0.2\text{C}$ 而过去 50 年观测到的大部分增暖可以归咎于人类活动。如果人类再不动, 对自然仅仅说一声遗憾或者抱歉, 那么, 100 年后, 全球平均地表气温将继续上升, 巨大的热浪将会席卷地球每一个角落, 海洋中漂浮的冰山将会融化得无影无踪。面对如此可怕的前景, 我们必须以人类的良知、远见和气魄, 采取坚实的行动, 来弥补前人以及我们自己对自然所犯下的过错。

气候系统及其驱动过程

气候系统

气候与人类息息相关, 它是人类生存的基本物理环境的主要部分之一, 是最容易被人类感受到的生存环境部分, 给人以直接的刺激作用, 使人感受到冷暖干湿及其变化。

人们对气候及气候系统的认识有一个发展过程。在 20 世纪 50 年代之前, 气候被用于描述一个地区的统计平衡状态, 用一些气候因子 (如温度、气压、降水、湿度、风等) 的统计平均值来说明。

20 世纪 50 年代以后的研究发现, 前面定义的“气候”在不同时间尺度上仍然表现出不同的特征。一个地区的气候并不处于统计“平衡”状态, 而是经历着不同时间尺度的变化, 因此需要从“过程”的角度来研究气候。气候的形成和变化是非常复杂的物理、化学和生物过程, 在较长的时间尺度和较大的空间尺度上, 大气运动必然受到海洋、陆地、冰雪等诸多因素的影响, 是人类居住的地球表层系统中各个圈层相互联系、相互作用的结果, 因此, “气候”概念中增加了新的内容。到 70 年代传统的“气候”概念和领域从单一的大气行为逐渐扩展成“气候系统”概念和领域, 即包括了大气

圈、水圈、冰雪圈、陆地表面和生物圈等各部分从“系统”的观点出发，研究有关全球及区域气候和环境的整体行为与个体行为。

气候系统是那些能够决定气候形成及其变化的各种因子的统一体。按照世界气象组织（WMO）的意见，完整的气候系统应包括五个物理组分：大气圈、水圈、冰雪圈、陆地表面和生物圈，如图 1.1 所示。

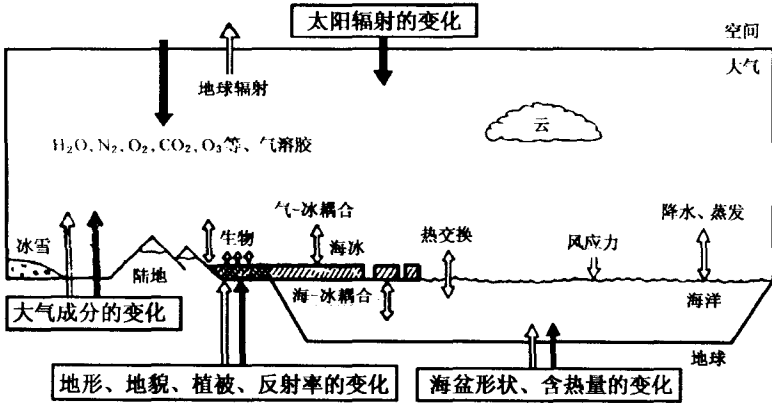


图 1.1 气候系统示意图

图中实箭头表示气候变化的外部过程，空箭头表示气候变化的内部过程

大气圈：大气圈是地球的气体包围圈，也是气候系统中最活跃的、变化最大的组成部分。

大气是由多种气体混合组成的气体及浮悬其中的液态和固态杂质所组成。大气中气体的主要成分是氮(N₂)、氧(O₂)和氩(Ar)。而臭氧、二氧化碳、甲烷、氮氧化物(N₂O、NO₂)和硫化物(SO₂、H₂S)等在大气中的含量虽很少，但对大气温度分布及人类生活却影响很大。由于人类活动的加剧，近数十年来大气中的二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等温室气体有与年俱增的趋势。大气中水汽含量虽不多，但它是天气变化中的一个重要角色。水的相变和水分循环不仅把大气圈、海洋、陆地和生物圈紧密地联系在一起，而且对大气运动的能量转换和变化，以及对地面和大气温度都有重要的影响。大气中还

悬浮着多种固体微粒和液体微粒，统称大气气溶胶粒子。

由于人类活动的加剧，空气中增加了许多污染物质，这些污染物质有污染气体，也有固体和液体气溶胶粒子。污染物质的含量虽微小，但对人类和气候环境的危害很大，成为全球瞩目的环境问题。

地球大气的密度、温度、压力、成分和电磁特性等都随高度变化，具有多层次的结构特征。按照温度随高度的变化，在垂直方向上，可将大气分为五层，即对流层、平流层、中间层、热层和散逸层。对流层是大气圈最低的一层，赤道地区对流层约 16~17km，两极附近只有 8~9km。对流层虽然较薄，但却集中了整个大气质量的 3/4 和几乎全部的水汽，主要大气现象都发生在这一层中，是对人类活动影响最大的一层。自对流层顶到 55km 左右为平流层，平流层内存在着大量臭氧能够直接吸收太阳紫外辐射，保护地表的生态系统。人类活动不仅影响对流层，而且影响了平流层。

水圈：天然聚集的水和人工聚集的水均称为水体，水圈是地球表层水体的总称，包括海洋、湖泊、江河、地下水和地表上的一切液态水，水圈处于连续的运动之中，通过水的循环，水圈的各部分互相交换，不断更新。通过这个过程，水圈的各部分联系在一起，构成了地球水循环的主要内容。

在气候形成和变化中，海洋的作用最重要。海洋在气候系统中是一个巨大的能量贮存库，是驱动地球环境其它部分的重要驱动源之一。据估算，到达地表的太阳辐射能约有 80% 为海洋表面所吸收。通过海水内部的运动，海洋上层平均厚度约 240m 的水温有季节变化，其质量为 $8.7 \times 10^{10} \text{t}$ ，热容量为 $36.45 \times 10^{16} \text{MJ}/\text{C}$ 。大气、海洋活动层和陆地活动层的质量比是 1 : 10.4 : 0.55，热容量比是 1 : 68.5 : 0.45。无论从动力学还是热力学效应来看，海洋在气候系统中具有最大的惯性，是一个巨大的能量贮存库。如果仅考虑 100m 深的表层海水，即占整个气候系统总热量的 95.6% 可见其在气候系统中的重要性。上层海洋或冰与大气的相互作用时间尺度为几个月到几年，而深层海洋的热力调整时间则为世纪尺度。

陆面 陆地表面包括山脉、地表岩层、沉积物和土壤等，它们具有不同的海拔高度和起伏形势，可分为山地、高原、平原、丘陵和盆地等类型。它们以不同的规模错综分布在各大洲之上，构成崎岖复杂的下垫面。在此下垫面上又因岩石、沉积物和土壤等性质的不同，其对气候的影响更是复杂多样。例如海陆分布和大地形对大气环流的形成起着重要作用，地表层土壤作为大气中主要微粒来源对气候变化影响很大。陆地表面的变化主要源自于地质运动，其变化时间尺度甚长，对地质时期气候变化的影响作用巨大。

冰雪圈：冰和雪是水的固态形式，与液态水和气态水相比，冰和雪是相对稳定的，因此将它们从水圈中提出来，单独列为冰雪圈。冰雪圈包括大陆冰原、高山冰川、海冰和地面雪盖等。目前全球陆地约有 10.6% 被冰雪所覆盖。海冰的面积比陆冰的面积要大，但由于世界海洋面积广阔，海冰仅占海洋面积的 6.7%。陆地雪盖有季节性的变化，海冰有季节性到几十年际的变化，而大陆冰原和冰川的变化要缓慢得多，其体积和范围显示出重大变化的周期在几百年甚至几百万年。冰川和冰原的体积变化与海平面高度的变化有很大关系。由于冰雪对太阳辐射的反射率很大，而在冰雪覆盖下，地表（包括海洋和陆地）与大气间的热量交换被阻止，因此冰雪对地表热量平衡有很大的影响。

冰雪圈的分布范围对地球表面的温度变化极为敏感。冰雪覆盖面上由于温度低，蒸发量小，抑制了地表面与大气间的水分交换，因此冰雪覆盖不仅起到致冷的作用，还起到致干的作用。

生物圈：生物圈主要包括陆地和海洋中的植物，在空气、海洋和陆地生活的动物，也包括人类本身。生物圈的厚度约 30km，上至大气圈平流层的中部，下到深海海底，生命现象在陆地、海洋和大气底层中到处都存在。但绝大部分生物集中在地面以上 100m 至水下 200m 之间，这里是生物圈的核心部分。

生物圈是大气、水和地壳长期演化的产物，又参与了地表、和大气的深刻改造。生物圈的各部分在变化的时间尺度上有显著

差异，但它们对气候的变化都很敏感，而且反过来又影响气候。生物对于大气和海洋的二氧化碳平衡、气溶胶粒子的产生，以及其它与气体成分和盐类有关的化学平衡等都有很重要的作用。

陆地上的植被和海洋浮游生物、特别是海洋浮游植物是生物圈中最重要的部分，与其它圈层存在有密切的联系。通过植被的生长，将土壤、大气、水和植被紧密联系在一起，进行物质、能量的传递和交换，把太阳能转换为生物化学能，并吸收二氧化碳，释放出氧气。

人类活动既深受气候影响，又通过诸如农牧业、工业生产及城市建设等活动，不断改变土地、水等的利用状况，从而改变地表的物理特性以及地表与大气之间热量与水分的交换，对气候产生影响。

气候系统是一个巨大而复杂的系统，是大气圈、水圈、陆地表面、冰雪圈、生物圈相互联系、相互作用的整体，是一个与外界进行物质和能量交换的开放系统。它的每一个组成部分都具有十分不同的物理性质，并通过各种各样的物理过程、化学过程和生物过程同其它部分联系起来，共同决定各地区的气候特征。气候系统的任何变化都会影响到人类的生存与发展，反过来，人类的生产和生活活动也必然对这一系统产生深刻的影响。尤其是人类社会进化到高度物质文明的今天，人类的这种影响越来越深刻，范围越来越广泛。

驱动全球气候系统的基本过程

驱动全球气候系统的基本过程是在太阳辐射对地-气系统的加热和地面、大气层向太空发射长波辐射的冷却的共同作用下，低纬度获得的热量多，高纬度获得的热量少，形成纬度间的温度梯度。同时由于海陆的热容量不同形成海陆之间的温度梯度。纬度间和海陆间的温度梯度推动了大气环流，大气环流形成了风系。

海洋受盛行风、地球自转作用、海岸和岛屿的分布和形状、海水密度分布不均匀等的影响，形成海洋环流。大气环流和海洋环流把热量从高温地区输送到低温地区，使各地区的热量处于动态平衡状态，如偏离平衡状态将使气候发生变化。

地球上的气候一直在经常和广泛地发生着波动。不同时间尺度的气候和环境变化有不同的驱动因素，有许多自然因素可使气候发生变化。可能影响气候变化的主要因素如图 1.2 所示。

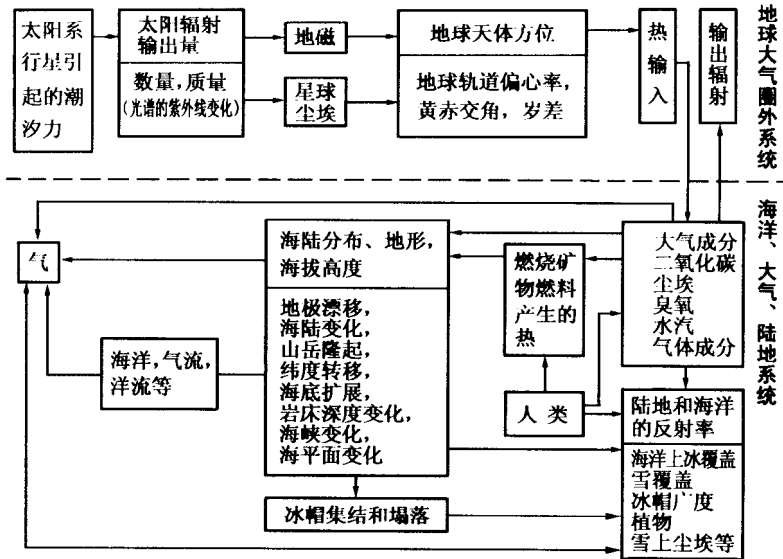


图 1.2 影响气候变化的可能因素

目前人类最为关心的是十到百年尺度上的全球变化，因为它与当前人类社会面临的问题和如何发展关系最密切。但人们还不能完全清晰地描述十到百年尺度上全球变化过程，就目前的认识水平来说，驱动全球气候系统变化的主要过程有：

大气化学成分的控制和调节：如果不考虑人类活动的影响，大气化学成分在很大程度上是由生物圈、特别是植被对气体的吸收和排放过程决定的。植被可以与大气进行气体交换，产生许多微量气体 其中包括二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等温室气体。这些气体还与其它源于生物的微量气体，如一氧化碳、氮氧化物等，在消耗臭氧中扮演重要角色。人类活动排放大量的化学物质，将对全球大气化学成分的控制和调节产生重大影响。

平流层过程：平流层中 20~30km 存在着大量臭氧，臭氧层能够直接吸收太阳紫外辐射，使温度显著升高。在平流层内，气温随高度增加而升高。臭氧层吸收太阳紫外辐射以及臭氧等发射长波辐射的不均匀，造成不均匀加热，驱动了平流层的大气环流。臭氧层大大降低了到达地表的对生物有杀伤力的短波辐射（波长小于 $0.3\mu\text{m}$ ）强度，从而保护着地表生物和人类。如果平流层中的化学成分发生了变化，例如臭氧被大量消耗或大量硫化物气溶胶进入平流层，就可能影响平流层和对流层的热力结构，调整大气环流。

海洋物理过程：正如前面已经提到的，海洋是一个巨大的能量和物质贮存库。海洋过程包括海洋物理过程和海洋生物化学过程。海洋的物理过程对于气候的形成和变化作用十分突出。海洋不但在地表-大气系统间的热量输送中起着重要作用，也是全球水循环的主要水汽源；它可以过滤大气变化中的快速部分，只保留下其缓慢变化信息，并以慢过程对大气施加影响；海洋可长久地“记忆”大气过程的异常，并把海洋过程的异常施加给大气过程，对气候起到调节作用；海洋和大气之间存在着各种气体和其它物质的交换。

海洋生物化学过程：生物圈循环的碳中，95%存在于海洋中。海洋中二氧化碳的存储量比大气中高 55 倍 海洋对二氧化碳的吸收、输送和释放是调控大气中二氧化碳含量的一个关键因素。海洋中的生物过程参与了对碳循环的调控，而在此过程中，大量的浮游植物可能起主要作用。

陆面过程和生态系统：陆面过程是指发生在陆地表面、控制地面和大气之间热量、动量、水分和其它物质的交换过程，他们影响气候和环境的变化。例如，大气、植被和土壤表面之间的热力过程；地面摩擦对陆面与大气之间动量交换的影响；大气降水、土壤表面水分的蒸发和植物的蒸腾、水汽的凝结、液态水的流动、冰雪的融化 and 冻结等构成的地面水文过程；地面与大气之间的物质交换等等。这些过程直接或间接受到气候的影响，也直接或间接影响着气候。由于人类活动改变了地表的特性，因而也改变着气候