



气候系统引论

王绍武 编著

现代大气科学技术丛书



气象出版社

气候系统引论

王绍武 编著

气象出版社

(京) 新登字 046 号

内 容 简 介

本书简明扼要地介绍了现代气候学研究的最新成果。对气候诊断、气候重建、气候模拟与气候预测研究的进展作了评述。重点讨论了月以上到几十年尺度气候变化的观测事实及形成原因。对气候系统内各成员间的相互作用及系统外部因子对气候变化影响的原理及证据进行了总结。

本书较全面系统地阐述了全球气候系统的核心问题,可供对气候有兴趣的科学工作者阅读,也可供大专院校学生、教师及研究人员参考。

本书是《现代大气科学技术丛书》之一。

气候系统引论

王绍武 编著

责任编辑: 杨长新 终审: 纪为晋

封面设计: 牛涛 责任技编: 陶国庆 责任校对: 张若军

* * *

气象出版社 出版

(北京海淀区白石桥路46号 邮政编码 100081)

北京昌平环球印刷厂印刷

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: 787×1092 1/32 印张: 8.125 字数: 175千字

1994年1月第一版 1994年1月第一次印刷

印数: 1—1200

ISBN 7-5029-1633-4/P·0657

定价: 7.10元

自序

作者从 1983 年在北京大学给研究生开设《全球气候》这门课，至今已有十几年了。每年讲授一次，一个学期约 45 学时。从 1985 年开始又同时在中国科学院研究生院讲这门课。以后为了适应气候学的发展，课程的名称改为《全球气候系统》。由于这是一门新课，所以没有适合的教材。好在研究生的课本来就应该强调新的信息，因此，作者每年总是印一些总结性文章发给研究生参考。有时在时间允许的情况下，也组织研究生看一些原始文献，并进行讨论。课程的内容也逐年作一些更新。因此，渐渐的积累了不少这方面的材料，准备写一本《全球气候系统》教科书。这时气象出版社组织出版一套“现代大气科学技术丛书”，讲述当代大气科学发展的前沿问题，希望作者能对气候这个目前发展十分迅速的学科的进展作个介绍。因此，我就答应先写一本《气候系统引论》，把《全球气候系统》的基本概念、基本知识和理论要点，深入浅出地介绍给读者。开始自己认为在两个学校讲授这门课已经有十几次了，写这样一本书不应该太困难。但是一动手之后却发现要从大量的研究工作中选出最核心的成果，并用较精练的文字去讲述是很花时间的。不少讲课时引用的材料要重新查阅，而新的成果又不断发表。所以，虽然 1991 年就开始动笔，但直到今年夏天才完全写出来。

气象出版社的杨长新同志与我同在一个《气象名词委员

会》，见面时总是鼓励与督促我早日把这本书完成，并承他
细心编辑，在此表示深切的谢意。

王绍武

1993年9月于北大

前 言

气候系统的概念取代了经典的气候概念是气候学的一次革命。但是，正如一个国家的建立，并不等于这个国家建设的完成一样，承认气候系统的概念，并不代表已经对气候系统有了成熟的研究。不过，正是这样才展现出无限广阔的活动场所与丰富多采的前景。所以，气候系统的研究不仅吸引了气候学家，也吸引了动力气象学家，乃至海洋学家，甚至也引起了农学家、经济学家及社会学家的广泛关注。

诚然，目前气候系统的研究还只能算刚刚起步。但是，正因为如此，科学家们就像才开始学步的孩子，为自己跨出的一小步而兴高采烈。这也预示着在他们茁壮成长时将迈出更为坚定有力的步伐。

因此，本书所能提出的问题远比能回答的多。叙述中的不确定性可能比肯定的结论多。特别本书是一本带有一定通俗性的专业问题的介绍。所以，本书的目的不是像教科书一样，讲述那些已经得到严密论证的定理。而是广泛介绍那些尚未解决，或只有部分解决的问题。如果读者能由此得到某些启示，著者就感到十分欣慰了。

本书第一章介绍气候系统的概念，第二章介绍气候（即气候系统）研究的几个分支。第三章到第五章讲述气候变化的观测事实及分析方法，其中第三章对地质时期到现代的气候变化作一个概述。第四章介绍大气环流变化的分析方法，及大气环流的气候变化。第五章讲 ENSO 系统，这是气候

年际变化的中心问题。第六章和第七章分别讨论海气相互作用与冰气相互作用。这是气候系统内部各成员之间相互作用的两个重要环节。第八章到第十章分别介绍影响气候系统的三个外部因子，即太阳活动，火山活动及温室效应。这样全书可分为两半，前五章讲气候系统的概况及气候变化的观测事实与诊断方法。后五章讲影响气候系统的内部因子及外部因子。气候模拟是现代气候学研究的重要分支，现在不但用气候模拟研究气候系统内部的相互作用及外部因子对气候系统的影响，也用来进行气候诊断。有关内容我们将在各章中分别介绍。

由于这本书涉及面较广，作者不可能对每一个环节都非常熟悉。因此，就有可能提出一些不恰当或甚至错误的见解。另外，由于这个课题进展十分迅速，一些基本数据，一、二年前还是最新的，很快就又不得不更正。如对大气中 CO_2 加倍可能造成的增温的估计就是这样。所以，当本书出版时，可能一些数据已经落后了，在这两方面作者真诚地请读者谅解，并请不吝赐教。由于这是一本有一定普及性的读物，所以各章仅附有主要参考文献。但本书所用图表，除了本书作者这次为本书绘制的以外，均已注明作者及发表年代，并在此向被引用的作者致谢。

作者 1993 年秋

目 录

第一章 气候系统.....	(1)
(一) 气候与气候系统	(1)
(二) 气候系统的成员	(4)
(三) 气候系统的变率	(8)
(四) 气候系统的热量平衡.....	(13)
(五) 气候系统变化的原因.....	(16)
第二章 气候系统的研究	(20)
(一) 气候监测.....	(20)
(二) 气候诊断.....	(23)
(三) 气候重建.....	(27)
(四) 气候模拟.....	(32)
(五) 气候预测.....	(35)
第三章 气候变化	(39)
(一) 气候变化的时间尺度.....	(39)
(二) 冰期与间冰期气候.....	(41)
(三) 全新世的气候.....	(44)
(四) 小冰期.....	(50)
(五) 20 世纪的变暖	(54)
第四章 大气环流的长期变化	(60)
(一) 大气活动中心.....	(60)
(二) 世界三大涛动.....	(64)
(三) 大气超长波.....	(74)

(四) 平流层环流与 QBO	(81)
(五) 大气环流振荡的分析	(86)
第五章 ENSO 系统	(90)
(一) 南方涛动	(90)
(二) 厄尔尼诺	(94)
(三) 沃克环流	(99)
(四) ENSO 的气候影响	(104)
(五) ENSO 的模拟与预测	(110)
第六章 海气相互作用	(116)
(一) 海洋在气候系统中的作用	(116)
(二) 海洋对气候影响的诊断研究	(121)
(三) 海洋影响的气候模拟	(126)
(四) 大尺度海气相互作用	(132)
(五) 气候系统中的韵律	(137)
第七章 地球冰雪圈	(143)
(一) 冰雪圈在气候系统中的重要性	(143)
(二) 冰雪覆盖的季节变化	(148)
(三) 冰雪覆盖的年际变化	(153)
(四) 冰雪覆盖对气候影响的诊断研究	(159)
(五) 冰雪覆盖影响的气候模拟	(164)
第八章 火山活动对气候的影响	(172)
(一) 火山活动与阳伞效应	(172)
(二) 火山活动指数	(178)
(三) 火山活动对气候的影响	(183)
(四) 火山活动影响的气候模拟	(188)
(五) 火山活动的长期变化	(195)
第九章 太阳活动对气候的影响	(200)

(一) 太阳活动	(200)
(二) 太阳黑子与 11 年周期.....	(204)
(三) 太阳活动对气候的影响	(209)
(四) 太阳活动的长期变化	(216)
(五) 太阳常数变化及其影响的气候模拟	(219)
第十章 温室效应与气候变化.....	(226)
(一) 大气温室效应	(226)
(二) 温室气体在大气中的积累	(229)
(三) CO ₂ 加倍影响的气候模拟	(235)
(四) 到 21 世纪温室效应的加剧.....	(240)
(五) 温室效应加剧的影响	(244)

参考文献

第一章 气候系统

(一) 气候与气候系统

什么叫气候？长期以来人们都把气候看作天气的平均。因此，月平均气温、月总降水量及月平均气压就构成了气候的三大要素。而且直到本世纪初还有人认为，假如有了 30 年的观测值，就可以得到一个稳定的平均值。所以，至今还把气候平均值称为标准值（normal）。但是，后来人们逐渐认识到，30 年平均值也不是一成不变的，承认气候也有变化。然而一提到气候，人们首先想到的还是温、湿、压三个要素。这就是经典的气候概念。然而，近 20 年的科学发展，使得气候系统的概念逐渐取代了经典气候的地位。因为，人们认识到要解释气候的形成，探讨气候变化的原因，尝试进行气候预测，就绝对不能仅限于研究地面气候这三个要素，甚至也不能仅限于研究大气本身，而是要研究包括大气、海洋、冰雪、陆面及生物圈的整个系统。因此，就形成了全球气候系统的概念。

具体讲大概有三个因素推动了从经典气候到全球气候系统概念的发展。

第一，从 20 世纪 50 年代末到 70 年代短期数值天气预报取得了巨大的进展。人们开始研究逐日天气预报向中期延伸的可能性，并试作 5 天、10 天乃至月平均环流长期数值预报。但是研究表明，为了提高预报水平，特别是为了延长

预报时效，必需考虑下边界：海洋、陆面（包括地形）及冰雪的影响。进一步也许还要考虑这些下垫面状况的变化，这就要求建立海气或地气耦合模式。显然，只用大气模式来研究气候是不适宜的。

第二，20 世纪 60 年代、70 年代以来，世界上陆续出现了许多气候异常现象，有的持续一、二十年，如西非干旱，有持续的一、二年，如 1982—1983 年的厄尔尼诺事件。这些气候异常对农业、经济乃至社会造成巨大影响。但是，这些气候异常现象又不是大气本身所能解释的。据信西非的干旱，与南、北大西洋的海温异常分布有关。当然，也可能还与局地环境变化有联系。而厄尔尼诺事件则本身就是海洋事件。但至今人们已公认它有广泛的气候影响。粗略估计 1982—1983 年的事件中世界范围损失达到 200 亿美元以上。这也是促使大家从全球气候系统来研究气候的重要原因。

第三，从 19 世纪至今，先是砍伐森林，后来更主要是燃烧矿物燃料：煤、石油、天然气，估计已使大气中 CO_2 的浓度增加了四分之一以上。再加上甲烷、一氧化二氮、氯氟烃等微量气体，很可能在下一个世纪中叶之前，就使大气中的 CO_2 浓度达到比工业化前增加一倍的程度。那样，即使有海洋的延缓作用，气温也可能上升 $1.3—2.3^\circ\text{C}$ 或更高。气候变暖对全球来讲可能加速水分循环，使降水量增加。但有些地区则可能变得更加干旱。变暖还可能使冰川融化，海水膨胀，因而造成海平面上升，威胁低地国家及各大洲的沿海城市。总之，人类活动对气候的影响已经达到了不可忽视的地步。显然，对这个问题的研究，也不可能只限于大气这一个成员，而必需扩展到整个气候系统。

从研究气候到研究气候系统转移的标志是全球大气研究计划（GARP）为世界气候计划（WCP）所取代。1979年在日内瓦召开了第一次世界气候大会（FWCC），建立了WCP。以后，又在各大洲相继召开了地区性的气候大会，进一步推动这个计划。亚洲及西太平洋气候会议于1980年在我国广州召开。现在世界上已有数十个国家制定了国家气候计划（NCP），开展气候研究。

WCP 下设四个子计划：

- （1）WCRP：世界气候研究计划；
- （2）WCAP：世界气候应用计划；
- （3）WCIP：世界气候影响研究计划；
- （4）WCDP：世界气候资料计划。

各子计划均制定了自己的实施计划，设立了科学顾问组，出版了一系列的报告、资料、文集、公报。其中WCRP最为重要，它指出当前世界气候研究主要有三个分支：

- （1）月、季尺度长期天气预报；
- （2）年际气候变率；
- （3）长期气候变化。

各分支均在积极开展活动，以第一个分支最为活跃。第二个分支的工作主要由热带海洋和全球大气计划（TOGA）组织，主要目的是增进对影响气候的季节及年际变化的热带海洋事件的了解。厄尔尼诺与南方涛动（ENSO）是一个中心研究课题。第三个分支的研究关系到深层海洋，因此与世界海洋环流实验（WOCE）计划有关。

现在国际上成立了政府间气候变化专业委员会

(IPCC)，下设三个工作组，科学评价组、影响评价组、及对策组。在 1990 年秋于日内瓦召开的第二次世界气候大会 (SWCC) 上，即由上述三个工作组提出报告。1992 年 4 月在巴西里约热内卢召开了《世界环境与发展大会》提出了《世界气候框架公约》。看来，由于气候变化问题与国家建设密切相关，气候变化问题也由纯科学问题，变成与政治、政策密切联系的问题。政府组织逐渐在代替纯科学家的组织，在领导与推动气候研究中发挥更大作用。

我国于 1987 年 2 月成立国家气候委员会，组织编写了国家气候蓝皮书，制定了国家气候计划。并于 1990 年 2 月成立国家气候变化协调小组，由国家科委及各部委负责人担任小组成员。下设三个与 IPCC 对应的小组，并设第四工作组：国际公约组。

无论如何，从气候到气候系统概念的转移已接近完成，但对气候系统的研究则只能认为处于初始阶段。不过也正是这样，气候系统的研究才显露出勃勃的生机。

(二) 气候系统的成员

气候系统包括以下五个成员：

1. 大气 这是气候系统的主体部分，大气环流是严冬、酷暑、干旱、洪涝等气候异常发生的直接原因。在经典气候学中，与太阳辐射、海陆分布并列为气候形成的三个因素。但是从能量学角度来看，大气是非常脆弱的。即使认为气候系统只包括表层 100 米深的海洋，大气所具有的热量也只占系统总热量的 3.4%。因此，大气的影晌多与其动力学有关。大气的动能是从有效位能转换而来。人们常把大气比做

一个热机。不过这个热机的效率是很低的。全球平均接收的太阳辐射能约 $241\text{W}/\text{m}^2$ ，但有效位能制造率仅 $2.4\text{W}/\text{m}^2$ 。大气的动能与系统的总能量相比，也几乎是微不足道的。所以，在气候形成与气候变化中，大气以外的其他成员，如海洋、冰雪、陆面等的物理状况有着决定性的作用。

当然，大气也绝不仅只被动地接受其他成员的影响，而是与它们产生复杂的动力与热力相互作用，形成各种各样的气候变化与气候异常。更重要的是由于自然或人为的原因，大气成分及其悬浮物能产生激烈的变化，改变气候系统的热量平衡，从而改变气候。在自然原因中主要是火山活动造成平流层气溶胶，散射太阳辐射，减少地面接收到的太阳能。这种作用称为“阳伞效应”。人为的因素主要是大气中 CO_2 等温室气体浓度增加，使“温室效应”加剧。特别后者，是当前气候研究中的最重要课题。

2. 海洋 海洋约占地球表面积的 70.8%，仅只考虑 100 米深的表层海水，即占整个气候系统总热量的 95.6%。因此，可以认为海洋是气候系统的热量储存库。穿过大气到达地球表面的太阳辐射，约有 80% 被海洋吸收，然后，通过长波辐射、潜热释放及感热输送的形式传输给大气。所以，很容易理解海洋在气候系统中占有多么重要的地位。

短期数值天气预报的经验表明，对 24 小时以上的预报，下垫面的加热已经有决定性的作用。作月平均环流的气候预报则需要考虑下垫面，特别是海洋状况的异常。经验长期预报也经常把海水温度当做主要预报因子。由于海洋热惯性大，海温异常不仅空间尺度大，持续时间也长，在中高纬一般均可持续数月之久，低纬则持续性更大，表征厄尔尼诺的赤道太平洋海温正或负距平经常可保持一年以上。对 CO_2

增加造成温室效应的估计，就与海洋对 CO_2 的溶解及向深海的输送有密切关系。因此，海洋对气候变化与气候异常的形成有重要意义。海洋在气候形成中也是一个重要因素。世界上著名的干燥区，除亚洲腹地以外，均出现在强大的冷洋流附近。这也突出说明了海洋在气候系统中的重要性。

3. 冰雪圈 指大陆冰盖、冰川、海冰、永冻土及季节性雪盖。目前全球陆地约有 10.6% 被冰覆盖。海冰的面积比陆冰要大，但由于世界海洋广阔，海冰仅占海洋面积的 6.7%。无论海冰还是陆冰对地表热平衡均有很大影响。主要有两方面的作用，即增加反照率，以及阻止地表与大气间的热量交换。反照率与辐射成正反馈。因此，在气候模式中考虑冰雪覆盖的变化，往往可以增加模式的敏感度。

对月、季尺度来讲，冰雪圈与大气则是相互作用的。经验资料与气候模拟都证明，高纬海冰增多如北大西洋的重冰年。春夏融冰季节的气候与轻冰年显著不同。但同时也有资料证明，冰雪的面积、持续时间与同期及前期的大气环流有密切关系。

在研究几十年到几百年的气候变化时，人们经常把冰川进退当成一个重要的指标。但由于惯性作用，冰川的变化常落后于气候变化。落后从几年到几十年，视冰川大小及具体环境而异。

4. 陆面 有时亦称岩石圈，当然，古代大陆漂移、造山运动这些岩石圈的巨大变化，对地质时期的气候变化影响巨大。但我们所关心的主要是月到几十年，最多几百年的气候变化。在这个时间尺度内除火山爆发外，其作用主要发生在陆地表面，所以我们未用岩石圈这个更广泛的名词，而采用了陆面。

陆面对大气的影晌主要有两个方面：即动力学的与热力学的。海陆分布与山脉大地形是大气环流形成的重要因素。虽然，在我们所感兴趣的时间尺度内，可以认为海陆分布与大地形都是不变的。但大气环流却是变化的，海上与陆上的冷热源分布也是变化的。因此，并不能认为海陆分布与大地形的影响是定常的，无论这种影响是动力学的，或者是热力学的。虽然一般认为陆面对大气的热力影响不及海洋，但近来观测事实及数值模拟均证明，土壤温度及干湿对大尺度及局地环流与气候均有相当的影响，因此，也是一个在气候研究中不可忽视的因素。

5. 生物圈 实际上影响较大的是世界范围的植被。植被的变化与人类活动有密切关系，主要是砍伐森林及过度放牧，开垦农田等。自然植被如森林反照率一般仅有土壤的二分之一，植被破坏减少对太阳辐射的吸收，同时还会影响水分循环。大范围的植被变化甚至可能影响全球的热量平衡及水分平衡。对局部地区更容易使气候恶化。西非萨赫勒近20年的持续干旱就可能与环境破坏的恶性循环有关。

植被的破坏，如砍伐森林，是上一个世纪大气中 CO_2 增加的主要原因。自然植被的含碳量为农业用地的20—100倍。破坏自然植被释放出大量的 CO_2 ，又减少了吸收 CO_2 的源，至今仍然是大气中 CO_2 增加的一个因素，虽然本世纪以来燃烧矿物燃料逐渐占据了压倒优势。

因此，生态系统的变化也是在研究气候系统时一个不可忽视的因素。当然，问题是很复杂的，绝不仅限于以上指出的这两个方面。