



方之芳 朱克云 范广洲 肖天贵 编著

气候物理过程研究

气象出版社

气候物理过程研究

方之芳 朱克云 范广洲 肖天贵 编著

气象出版社

内容提要

本书是作者们在长期从事气候学研究和教学经验的基础上,大量阅读国内外学者有关气候系统的研究成果,总结自身以往的长期科研成果,系统总结气候系统中各因子之间的内在联系和复杂的物理过程,从诊断和模拟两个角度予以讨论,并配合应用实例,在物理学的框架上撰写的一本气候学教材。

全书分为三篇,共12章。第一篇介绍气候系统中各因子之间的内在联系和可能的变化过程,包括气候系统的基本组成和性质、气候系统各因子联系的观测事实、海气的相互作用、人类活动和植被变化对气候变化的影响,总结和详细叙述了冰雪圈与大气和海洋圈之间联系的复杂物理过程。第二篇介绍研究气候要素场相互耦合的诊断分析方法,即典型相关分析、奇异值分解方法、复奇异值分解方法和波包传播诊断方法。第三篇介绍大气环流模式(GCM)、海气耦合模式、陆气相互作用及陆面过程模式和区域气候模式;并应用COLA-GCM模式模拟青藏高原冬季积雪异常与亚洲夏季风关系的联系,应用陆气相互作用及陆面过程模式,模拟植被生态系统与气候的相互作用以及对西北干旱区气候环境演变的研究。

本书各篇是一个完整结构下的有机部分,既有气候系统的物理陈述,也有诊断分析和数值模拟的探讨,还有应用该方法的研究成果实例;既有诊断分析方法,也有气候模式。可整体通读,也可局部查阅。可供气象研究机构和高等院校大气科学专业本科生、气象学和大气物理学与大气环境专业的研究生作为教材或参考书使用,也可供气候科研工作者和气候学教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候物理过程研究/方之芳等编著. 北京:气象出版社,2006.1

ISBN 7-5029-4106-1

I. 气… II. 方… III. 气候-物理过程-研究-高等学校-教材 IV. P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 003084 号

出版者:气象出版社

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcsb@263.net

责任编辑:俞卫平 袁信轩

封面设计:王 伟

责任校对:吴卫红

印刷者:北京市北中印刷厂

装订者:三河市海龙装订厂

发行者:气象出版社

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 20.75 字 数: 530 千字

版 次: 2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-5029-4106-1/P·1488

印 数: 1~2000 册

定 价: 50.00 元

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编: 100081

电 话: 总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

终 审: 纪乃晋

版式设计: 吴庭芳

本书出版得到以下项目的联合资助

《国家自然科学基金重点项目》用非线性优化方法研究厄尔尼诺和暴雨的可预报性(40233029)

《国家自然科学基金项目》青藏高原及中纬度环流系统对副热带高压活动的影响(40275029)

《四川省杰出青年学科带头人培养计划项目》青藏高原植被生态系统演变特征及其对区域气候变化的影响(05ZQ026-023)

《四川省教育厅科研项目》东亚季风波包传播的研究(2005C018)

成都信息工程学院研究生教育建设项目

前 言

《气候物理过程研究》是作者在总结多年的气候学科研成果和教学经验的基础上,阅读大量国内外学者有关气候系统的大量文献,广泛研究现代气候学的最新成果,系统总结气候系统中各因子之间的内在联系和复杂的物理过程,从诊断和模拟两个角度讨论气候系统中存在的物理过程,并配合应用实例予以讨论。

全书共分三篇,12章。

第一篇为气候系统中复杂的物理过程,介绍气候系统中各因子之间的内在联系和可能的变化过程,应用观测事实和诊断分析结果,陈述海-气-冰雪的相互作用以及人类活动和植被变化对气候变化的影响。

第一章是气候系统概述,内容包括气候系统的基本组成和性质、气候系统的物理过程和反馈机制等。第二章是海洋与大气的相互作用及其对气候的影响,介绍海洋中的表面洋流和温盐环流对全球气候的影响。第三章是冰-气的相互作用及其在气候变化中的敏感性,根据作者对气候系统中冰雪圈的长期研究,引用最新国内外的文献和研究成果,总结和详细叙述了海冰与大气和海洋之间联系的复杂物理过程;全球气候变化在冰雪圈中的反映;从能量角度出发,讨论海冰与环流联系的季节性的差异以及空间的特点。考虑我国青藏高原冰雪的特殊性,讨论高原雪盖异常与大气环流的可能联系。第四章是生物圈与大气的相互作用,讨论人类活动和陆面性质变化对大气的影响。

第二篇是介绍研究气候要素场相互耦合的诊断分析方法,介绍了典型相关分析(CCA)、奇异值分解方法(SVD)、复奇异值分解方法(CSVD)和波包传播(WPD)诊断方法,用于讨论气候变化研究中大量存在的两个气候要素场的相互联系问题。典型相关分析、奇异值分解和复奇异值分解都能够很好地诊断两个数量场的相互联系;CSVD则能诊断两个移动场的相互关系问题;WPD则讨论波能的传播,可应用于研究各种系统的发展变化。CSVD和WPD方法是较新的气候诊断方法,对上述方法,在叙述其理论的基础上,均提供实例予以阐述。

第三篇是介绍我国经常应用的气候模式及其应用实例。

第九章概述目前经常应用的四种气候模式,即大气环流模式(GCM)、海气

耦合模式、陆气相互作用及陆面过程模式以及区域气候模式,并应用 CCM3 模式模拟气候状态的一些结果;以陆气相互作用及陆面过程模式,模拟对土壤温度、湿度和植被生态系统的影响;以区域气候模式模拟华北地区夏季的温度场和降水场。在第十章中,应用全球大气环流模式(COLA-GCM)模拟青藏高原冬季积雪异常与亚洲夏季风的联系。在第十一章植被生态系统与气候相互作用的数值模拟中,模拟西北东部地区绿化与亚洲夏季风的关系以及对东亚-南亚区域气候的影响,区域气候变化对大气 CO_2 浓度变化与植被生理过程的影响作用,第十二章利用大气环流模式,模拟海陆分布、地形、陆面过程在西北干旱区形成中的作用。

本书各篇是一个完整结构下的有机部分,既有气候系统的理论叙述,也有研究方法的讨论,并以研究成果为实例,在第二篇和第三篇中,显示了方法与例证的相互配合。在内容上,既有诊断分析方法,也有气候模式介绍和应用。这些内容既可单独使用,也可重新组合以后使用。例如第一篇可作为《气候学基础》的课程内容,第二篇可以加深加强《气候统计分析和预报方法》课程,第三篇可以有助于学生初步了解气候模式,并初步掌握简单的模式应用过程。

本书可整体通读,也可局部查阅。可供气象研究机构 and 高等院校大气科学专业和气候专业的研究生和高年级本科生作为教材或参考书使用,也可供气候科研工作者和气候学教学人员参考。本书没有高深的数学公式,具有气象学和数学及物理学基础的读者,对研读本书是不困难的。

本书由方之芳、朱克云、范广州、肖天贵共同完成;朱克云负责担任总内容设计和协调,方之芳担任第一篇 1~3 章的编写,肖天贵担任第一篇 4 章和第二篇的编写,范广州担任第三篇的编写。在写作过程中,本书的有关内容已作为研究生教材,向我校 2004 级和 2005 级研究生讲授,得到同学们的积极评价,向他们表示感谢。同时还要感谢成都信息工程学院研究生教育建设项目的大力支持。

希望尽我们微薄之力,为气象事业做些实事。

本书的取材、编排和论述方式定有许多可商榷之处,内容不妥和疏漏之处亦可能存在,欢迎读者批评指正。

作 者

2005 年秋于蓉城

目 录

前言

第一篇 气候系统中复杂的物理过程

第一章 气候系统概述	(3)
1.1 引言	(3)
1.2 气候系统的组成部分	(4)
1.3 气候系统的物理过程和反馈机制	(6)
1.4 气候变化可能原因	(10)
1.5 气候的研究目标和方向	(14)
参考文献	(16)
第二章 海洋-大气的相互作用及其对气候的影响	(18)
2.1 海洋在气候变化中的重要性	(18)
2.2 海洋主要表面流	(26)
2.3 南方涛动和厄尔尼诺	(40)
2.4 海洋的底层水和温盐环流	(48)
参考文献	(57)
第三章 冰气的相互作用及其在气候变化中的敏感性	(60)
3.1 冰雪圈的一般特性	(60)
3.2 极地区域的能量收支	(65)
3.3 北极海冰资料和特征总述	(70)
3.4 北极海冰季节变化和分布特征	(76)
3.5 北极海冰的气候敏感性	(91)
3.6 北极海冰与大气环流的相互作用	(103)
3.7 青藏高原积雪和欧亚大陆冻土特征总述	(133)
3.8 青藏高原雪盖异常与大气环流的可能联系	(151)
参考文献	(164)
第四章 生物圈与大气的相互作用	(171)
4.1 人类活动对气候变化的影响	(171)
4.2 陆地表面性质和植被变化对大气的影响	(178)
4.3 气候变化的影响、适应性和脆弱性	(181)
参考文献	(195)

第二篇 气候要素场相互耦合的诊断方法

第五章 典型相关分析	(200)
5.1 典型相关分析	(200)
5.2 BP 典型相关分析	(204)
参考文献	(208)
第六章 奇异值分解方法 (SVD)	(209)
6.1 奇异值分解(SVD)的基本原理	(209)

6.2 SVD 方法的计算步骤	(211)
参考文献	(212)
第七章 复奇异值分解方法 (CSVD)	(213)
7.1 复奇异值分解的基本概念	(213)
7.2 复奇异值分解方法的基本思路	(214)
7.3 复奇异值分解的特性研究	(218)
7.4 CSVD 在海气要素场相互耦合关系中的应用	(220)
7.5 CSVD 在 500 hPa 高度场和降水量场相互关系中的应用	(231)
参考文献	(235)
第八章 波包传播诊断方法 (WPD)	(236)
8.1 波包传播诊断方法原理	(236)
8.2 波包传播诊断的计算步骤	(238)
8.3 波包传播诊断方法的理想试验	(239)
8.4 瞬变波波包传播的简单实例计算	(240)
参考文献	(243)
第三篇 气候模式及其应用	
第九章 气候模式概述	(247)
9.1 大气环流模式(GCM)	(247)
9.2 海气耦合模式	(254)
9.3 陆气相互作用及陆面过程模式	(258)
9.4 区域气候模式	(262)
参考文献	(269)
第十章 青藏高原冬季积雪异常与亚洲夏季风关系的数值模拟	(271)
10.1 问题的提出	(271)
10.2 COLA-GCM 简介	(272)
10.3 试验设计	(272)
10.4 结果分析	(273)
参考文献	(279)
第十一章 植被生态系统与气候相互作用的数值模拟	(281)
11.1 西北东部地区绿化对该区及东、南亚区域气候的影响(范广洲等,1998)	(282)
11.2 生物-地球化学反馈过程(范广洲,程国栋,2005)	(289)
参考文献	(296)
第十二章 西北干旱区成因的数值模拟	(297)
12.1 干旱区气候环境演变研究回顾	(297)
12.2 CCM3 简介	(303)
12.3 试验设计	(306)
12.4 Ocean 试验结果分析	(306)
12.5 高原隆升的影响(E05 和 E50 结果分析)	(314)
参考文献	(322)

第一篇

气候系统中复杂的物理过程

第一章 气候系统概述

1.1 引言

气候和气候变化是当代科学研究的热点。从历史记载中,人们知道了各个时间尺度的气候变化。在过去的 50 万年里,冰河期和间冰河期大约以 10 万年为周期相互交替。2 万年前,在最近的一次大冰河期中,冰雪覆盖加拿大、北欧和亚洲的大部分地区。海冰极大地延伸,海水水位比现在低 80 m(Untersteiner, 1983)。在过去的 1000 年里,最显著的气候特征是公元 1300 至公元 1800 年间的“小冰河期”,以后是全球的普遍增温,在北半球尤为显著(Tapio 和 Held, 2001)。

气候对于地球上的生物是如此重要,对人类活动 and 经济利益有很大影响,人类活动是与气候及气候的变化息息相关。目前我们对于形成现在这种气候的各种相互作用着的物理、化学和生物过程仍知之甚少,我们尚不知道在过去的气候变化中究竟是哪些机制在起主要作用。因此,目前我们很难确切预言未来可能发生的气候变化,我们已经知道人类活动能引发气候变化,但是难以估计它对气候变化的无意识的影响会大到什么程度。

为了了解地球上的气候及其变化机制,我们必须研究一个极复杂的物理系统,其中包括我们已比较了解的大气运动,还包括我们了解得很不够的海洋和冰的运动,以及在地球表面上发生的复杂的化学和生物反馈过程。这些过程的时空尺度是多种多样的,小者如每天在我们周围发生的小尺度过程,大者可达全球范围,其时间尺度可达数年至数十年以上;每一个过程与其他过程之间又有着复杂的相互作用。为了建立一个比较完善的气候理论,则必须应用数学和物理概念和方法,从这种复杂的相互作用中合理地寻求和理解其中的因果关系;在此基础上,建立气候的数值模式,才能从定量理解的角度,理解气候及其变化机制。

1974 年 7 月,根据全球大气研究计划(GARP)联合组织委员会的提议,世界气象组织(WMO)和国际科学联盟理事会(ICSU)在联合国环境规划署(UNEP)的赞助下,在斯德哥尔摩召开了“气候的物理基础及其模拟的国际学术讨论会”,会议提议制定有关气候和气候变化的国际性研究计划,即“世界气候计划”,它包括“世界气候资料计划”、“世界气候应用计划”、“世界气候科学研究计划(WCRP)”。世界气候科学研究计划有两个目的:确定气候的可以在多大程度上作出预测;人类活动能影响气候到什么程度。主要内容为:长期天气预报的物理基础;气候的年际变化;长期气候变化趋势(Houghton, 1984;金奎,1986)。

世界气候科学研究计划(WCRP)是与全球大气研究计划(GARP)有所差异。

全球大气研究计划(GARP)关心的大气层,而大气层是位于上下边界层之间,受上下边界层的影响。在上边界层,太阳辐射进入大气系统,部分太阳辐射则被反射返回宇宙,红外辐射也离开大气层顶;下边界层是陆地、海洋和冰。在全球大气研究计划模式中,下垫面状态被认为是固定不变的。而世界气候研究计划则涉及到更长的时间尺度,仅考虑大气是不够的,

需要研究大气科学以外的各个领域,因此提出“气候系统”的概念,提出建立“耦合气候系统模式”的必要性。这种模式应能描述气候的基本统计性质,考虑气候系统的各个组成部分之间的更多的物理过程,也应考虑化学和生物过程。就一个季节、一年、十年等各种时间尺度而言,模式应考虑海洋上层与海冰和大气的相互作用、洋流的作用、大气成分和气溶胶的变化、以及生物造成地面性质的改变等因素。就更长时间尺度而言(数百年至数千年),必须考虑海洋深层洋流和大陆冰原的变化(GARP Publication Series, No. 16, 1975; 曹鸿兴等,1982)。

至今,耦合气候系统模式的建立和发展已有近 30 年的历程。2003 年 9 月在汉堡召开“地球系统气候模式国际学术讨论会”上(International Conference on Earth System Modelling, 2003),回顾了耦合气候系统模式的发展和演变过程,指出目前存在的问题,面临的是挑战、奋斗、失败和成功。目前气候的季节预报能力已有所提高,会议提出了季节和更长时间尺度的定量预报问题。认为对气候系统各因子之间的反馈情况还需加强了解,需重视研究地球系统各圈之间反馈的不确定性问题,重视研究他们之间的相互作用和过程。例如温室气体浓度的增加对地球系统气候的强迫反应, CO_2 陆面的源和汇的全球的分布和强度以及变化趋势,人类活动是如何影响和改变 NO_2 、 CO_2 和水汽的浓度的分布和从大陆到海洋的输送量;其中特别强调人类活动与气候变化的关系。

1.2 气候系统的组成部分

在斯德哥尔摩的“气候的物理基础及其模拟的国际学术讨论会”中,全球大气研究计划丛书第 16 号“气候的物理基础及其模拟”首先提出气候系统的概念(曹鸿兴等,1982)。

一般而言,完全的气候系统包括五个物理组成部分,即大气、海洋、冰雪圈、陆地表面和生物量(图 1.1),或称为气候系统的五个主要分量。这五个相互作用和相互联系的分量是:大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈。

各部分简述如下:

大气圈:它是包围地球的气体,热容量很小,但是流动迅速。在气候系统中,它的变化最为频繁,时间尺度最短。下层大气对大气的下边界层有明显的热力响应,对所施加变化的响应时间大约为一个月左右。也就是说,大气将热量向垂直方向和水平方向输送,可以在一个月左右的时间内调整到一定的温度分布。

水圈:它由分布在地球上的所有液态水构成。包括海洋、湖泊、河流和地下水。对于气候研究,海洋是水圈中最重要,它覆盖了约三分之二的地球表面。海洋对太阳辐射的反射率与太阳高度角有关,当太阳高度角大于 30° 时,它的反射率小于 8%;从海洋冰体边缘到赤道地区的海面,平均反射率为 5%~14%(高国栋,陆渝蓉,1990),因此射到海洋表面的太阳辐射大部分都能被它吸收。由于海洋有大的质量和比热,成为地球系统的巨大能量储存库。海洋对能量的吸收引起的海表温度变化比陆地上的温度变化要小,海洋有大的热惯性,它对温度的变化起着缓冲器和调节器的作用。海洋的密度比大气大得多,它们有更大的惯性和更显著的层结。海洋的顶层部分是活动性最强的,它包含厚度达 100 m 量级的表面混合层。

海洋有比大气更缓慢的环流,构成大尺度的准水平环流圈,即洋流和缓慢的温盐翻转。海洋的热量调整的响应时间或张弛时间变化很大,在顶层的混合层内为数周到几个月,在几

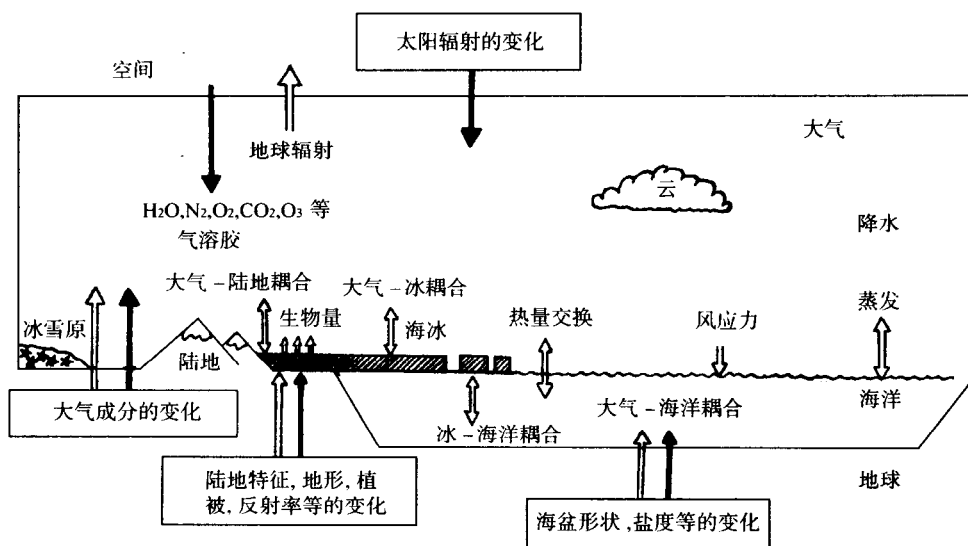


图 1.1 大气-海洋-冰-陆地表面-生物量耦合气候系统示意图

实线箭头是气候变化外部过程的例子, 空心箭头是气候变化内部过程的例子

(引自美国 GARP 委员会气候变化小组委员会报告, 1974)

百米深的斜温层响应时间达几个季度, 而在深海达到几个世纪到几百万年。在热带地区, 由于存在强的直接太阳辐射, 在海洋中形成了能量的盈余, 洋流能将存储的一部分热量从赤道地区向中高纬度和极地地区输送, 从而在全球能量平衡中起了很大作用。

大气和海洋有很强的耦合作用。通过海气交界面进行能量、质量和动量的交换, 海气相互作用发生在许多不同的时空尺度上。

海洋的上层在数月到数年的时间尺度上与海冰发生相互作用; 海洋还与大气交换二氧化碳, 因此对于气候系统的化学平衡也是有作用的。

冰雪圈: 它是由地球表面的大量的雪和冰组成, 其中包括格陵兰和南极地区范围很广的大陆冰原、北美和西伯利亚的冻土带、山脉的积雪和冰川、以及地面雪盖和海洋中的海冰。冰雪圈是地球上最大的淡水储存库。它在气候系统中的作用主要在于其对太阳辐射的高反射率和很低的热传导性。大陆雪盖和海冰有明显的季节性变化; 可以导致大陆地区和海洋表面混合层的能量收支有较大的年变化, 有时也造成较大的年际变化。除了季节变化以外, 冰雪圈较大的变化还可以在更长的时间尺度上发生。

由于冰和雪对太阳辐射具有高的反射率, 而海冰与不停搅拌的海水比较, 其热扩散性较低, 在高纬地区雪原和海冰均可以作为其下层的陆面和水面的热绝缘层, 阻止陆地和水体向大气散失热量。近地面大气的强冷却作用致使大气层结非常稳定, 阻止了对流的发生, 从而可形成更冷的局地性气候。

虽然冰川和大陆冰原的变化是缓慢的, 可达几个世纪至几万年, 不能影响季节或年际时间尺度的气候, 但在高达数万年的更长时间尺度的气候变化中, 例如发生在更新世的冰期和间冰期中, 它们起了主要作用。冰川作用曾使海平面明显下降, 强度可达 100 m 之多, 对大

陆的形状和边界有很大影响。由于冰原的质量和致密性很大,它们依自身动力学按很慢的速度移动。有时,海洋上的冰原破裂,形成冰山,随洋流移动,在重力作用下,高山冰川会慢慢下移,由局部的降雪积累和温度条件所决定,在几个世纪的进程中,可以扩展或消亡。

岩石圈:这里指的是大陆的陆块和海床,其中包括山脉、地表岩石、沉积物和土壤,以及地下水等。它们是气候系统中能在所有时间尺度上变化的部分。陆块位置和高度发生变化的时间尺度在气候系统的所有组成部分中是最长的,对“世界气候科学研究计划”所着重讨论的时间尺度而言,并不是很重要的,可以认为是在气候系统中几乎不变的因子。

岩石圈与大气的相互作用是通过大气的质量、角动量、感热的输送以及大气边界层的摩擦对动能的耗散来完成的。质量输送以水蒸汽、降水和降雪形式为主,其次还通过空中悬浮微粒和尘埃的形式输送。火山从岩石圈向大气喷射物质和能量,增加空气的混浊度。增加的颗粒物质及喷射出的可在平流层中凝结的含硫气体构成“气溶胶”。它们可以显著地影响大气的辐射平衡,从而对地球的气候起重要的作用(Mass 和 Portman, 1989),岩石圈和海洋之间也有大尺度的角动量输送,可能是通过海洋和大陆之间的力矩作用实现的。

作为大陆岩石圈的活动层,土壤湿度能改变土壤的蒸发率、反射率和热传导性,对地球表面的局地能量平衡有明显影响。

生物圈:生物圈由陆地上和海洋中的植物以及大气、海洋和大陆的动物群,也包括人类本身所构成。它们的共同特征是对气候变化很敏感,同时也会影响气候。植物可以随着温度、辐射和降水的变化而发生自然变化,改变地表粗糙度、地表反射率、蒸发、径流以及土壤状态。通过光合作用和呼吸作用,生物量对于大气和海洋的 CO_2 平衡、气溶胶的产生以及与其他气体成分和盐类有关的化学平衡都有很重要的作用。其变化的时间尺度为一个季节至数千年不等,人们通过过去气候变化在化石、树木年轮、花粉等所留下的信号来获取地球的古气候信息。由于动物需要得到适当的食物和栖息地,所以动物群体的变化也反应了气候的改变。

我们应该指出,人类通过农业、工业、都市化、污染等活动与气候系统发生相互作用。关于农业和畜牧业等人为因素所造成的气候变化情况,目前了解得还不够充分,但是这些因素至少会使水和土壤的使用方式发生改变,并从而使地面的性质也发生变化。

1.3 气候系统的物理过程和反馈机制

气候系统热量的最终来源是太阳辐射。由于辐射加热的不均匀性,大气和海洋产生风和洋流;风和洋流又将热量从过剩地区输送到热量不足地区。这些热量中有很大部分是由大气和海洋中的大尺度瞬变扰动输送的,大气环流中这些扰动的输送作用对于维持全球的动力、质量、能量和水分平衡是至关重要的。

与加热率相比,气候系统的热容量是非常大的,因此单个的大尺度天气系统在其存在的时间内(约1周左右)直接接受的外界加热影响是比较小的;但是如果时间尺度超过2~3周,外部加热对供给大气系统的有效位能则起主要的作用;因此研究气候系统时,必须注意大气系统所受的加热作用。这是应用动力模式对气候进行数值模拟的基本物理原理。

然而我们对于气候形成和气候变化的物理过程尚未完全了解。问题乃在于:维持气候系统的物理过程是十分错综复杂的,尤其在热量与水分联系中。例如,对大气的净加热率在很

大程度上需取决于大气的温度、湿度和各种气体浓度的分布,以及云形成过程中凝结潜热的释放;而左右气候系统的重要因子又在很大程度上受气态、液态或固态水的支配。又如,云对太阳辐射的反射和本身的长波辐射,使大气失去太阳总辐射的 50%;仅就短波辐射而言,云的反射率约为地球总反射率的 $2/3$ 。大气的最大热源之一是凝结潜热的释放;海面上的能量平衡受到蒸发过程的支配。冰和雪由于其具有较大的反射率和融解热,起着重要的热汇作用。

气候系统的年际变化和长期变化的物理过程是当前气候科学的研究重点,其间既有气候系统对于外部强迫作用反应的敏感性,也有气候系统内部的相互作用和自然振动。

对于气候系统而言,地球周围的气体、液体和冰圈称为气候的内部系统;地球周围的宇宙空间和地球陆地称为外部系统(或强迫系统)。因此,气候系统的边界条件是由地壳的外形、太阳状况以及地球-太阳轨道的几何位置等因素组成。当这些边界条件发生足够大的变化时,就会明显改变气候系统的状态。例如气候的季节变化,充分显示气候系统对于外部强迫作用(太阳辐射分布的有规律的年变化)反应的敏感性;又如火山的爆发和太阳光本身强度的变化也可能是气候变化的外部原因;再如人为因素的影响,人类使用地下燃料,造成大气中二氧化碳浓度的变化,从而影响气候。从长时间尺度来看,外部系统强迫系统可能是形成和影响气候的很重要的原因。

气候系统内部的相互作用和自然振动是影响气候的另一重要原因。与气候内部系统有关的气候变化过程是错综复杂的,包括大气、海洋、冰和生物圈的内部驱动机制在大范围分布上的变化,以及内部系统各变量之间存在的相互作用和反馈过程。这类过程可以对气候系统起到内部调节作用,其时间尺度从一个季节到数千年不等,表现为气候系统内部所固有的各种物理变量之间的相互耦合作用。

这类相互作用或反馈机制可能会使某些要素的交互作用更为增大,起放大作用,称为正反馈;或者对某些反馈过程是起阻尼作用,使其减小,称为负反馈。在大气和海洋内部以及气候系统的各部分之间都可能存在着大量反馈机制。

在这类反馈机制中,似乎以辐射平衡与地面温度之间的相互作用最为明显,太阳辐射的反射率是能量平衡的一个非常重要的因子。

列举一些可能的气候反馈机制。

1. 冰雪覆盖-反射率-气温之间的反馈

雪盖和冰盖对太阳辐射的高反射率使其成为气候反馈中的主要因子,全球冰雪分布范围的变化对于地球总反射率和大气的净加热率有很大的影响,它们之间的正反馈作用称为“冰雪面-反射反馈”,积雪和海冰对太阳辐射的反射率约为 70%~90% 和 40%,远远大于陆面的反射率(小于 30%),冰雪覆盖的地表几乎将半数以上的垂直辐射反射回大气。

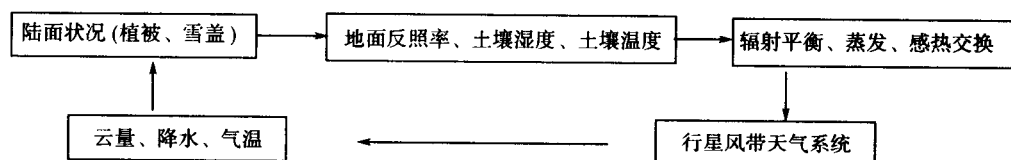
当冰雪的范围大时,对入射太阳辐射的反射比一般土壤表面为大,致使大部分太阳辐射反射回天空和太空,地球接受的太阳辐射减少,使大气的近地表温度下降,冰雪的范围主要依赖于大气的近地表温度,当大气的近地表温度低时,雪盖和冰盖的范围也随之扩大;由于冰雪对太阳辐射具有大的反射率,因此只余下更少的能量用于加热大气,致使大气-冰雪系统的温度进一步下降;结果是下垫面的冰雪范围增加,从而又加大地表的反射能力,致使大

气的近地表温度进一步下降。形成冰雪覆盖-反射率-气温之间的正反馈。

另一方面,假定冰雪部分消融,雪盖和冰盖的范围变小,地表对太阳辐射的反射率降低,因此,仅向大气反射更少的太阳辐射,即地球系统吸收更多的辐射;致使下垫面和大气的近地表温度增加,从而导致冰雪进一步消融,雪盖和冰盖的进一步减少。因此,在冰雪-反射率-温度之间形成正反馈机制。

植被的变化也可引起地面反射率的变化,但由于面积较小,可形成局地的正反馈机制。例如沙漠化的进程,就可以作为一个例证(Charney 等,1977)。

上述反馈也适用于陆地不同的植被状况,陆地的不同植被状况会影响地表反照率和土壤温度和湿度,而对大气环流和气候起不同的作用;大气环流和气候的变化则通过云、降水和气温的变化对植被状况起作用。它们之间的相互影响的示意图表达如下(李崇银,1995):



2. 水汽-温室之间的反馈

水汽的温室效应也是辐射平衡与地面温度之间相互作用正反馈机制的另一典型例子,地表温度的增加,可以导致地球表面蒸发,从而使大气中水汽量增加。由于水汽是长波辐射的强吸收器,它的增加,将使大气截留更多的地球长波辐射,并加热低层大气,从而导致低层大气和地表温度的进一步增加。反之,地表温度的降低,会使低层大气和地表温度也进一步降低。但是,另一方面,如果由于某些其他原因,例如冰雪-反射率-温度的反馈,温度会变得更低,低层大气的水汽量更少,温室效应将变得不那么有效。

还可以用另一种方法来说明上述的反馈机制。如果,低层大气的温度是在相对大的范围内变化,当某一特定高度上时间平均的相对湿度几乎保持不变时,但绝对湿度却随温度增高而迅速增加。因此,在相对湿度不变的条件下,温度的增高使大气中的水汽量增加,通过对长波辐射的影响,又导致温度的进一步增高。

3. 云量-地面温度之间的反馈

大气中的温度-长波辐射的耦合则是内部负反馈的一个例子。假若大气温度增高,大气将会发射更多的长波辐射,也将有更多的长波辐射到达太空,致使地球-大气系统失去能量,结果是系统的温度下降,初始扰动也衰减了。

云量与温度的相互作用是非常复杂的反馈系统。包含了许多不同的反馈过程。因为云能大量吸收长波辐射,是红外辐射极好的吸收器;云又反射太阳直接辐射,是太阳短波辐射有效的反射器。这两种相反的作用,使云在地球的辐射平衡中成为有效、但又十分复杂的调节因子。

放射到太空的红外长波辐射主要是取决于云顶温度;一般而言,云顶温度远远低于地球表面,也低于晴空大气,因此云顶发射的长波辐射量是小于晴空大气和地球表面的长波辐射

量。结果是由于云的存在,散逸到太空的净向外的长波辐射是降低了。由于一部分辐射被云截留,可以认为是增强了水汽的温室效应。

但对于不同的云高,云对短波辐射的反射作用则不相同。对中低云而言,云对太阳短波辐射的高反射作用是占支配地位;即云量增加,向太空反射的短波辐射也增大;因此,则形成冷却效应。然而对于高层卷云,因为向下的短波辐射比向上的长波辐射更易于穿透云层,因此,到达地球表面和近低层的短波辐射量增大,它能导致温室效应的增强。

由于云与温度的反馈作用是错综复杂的,它不仅依赖于云量的变化,还依赖于云状、云高、云的排列、云的液态水和冰晶的含量,以及云中微粒的尺寸等等变化,因此,各种可能的云反馈的最终效果是难以评估的(Ramanathan 等,1989;Cess 等,1989)。

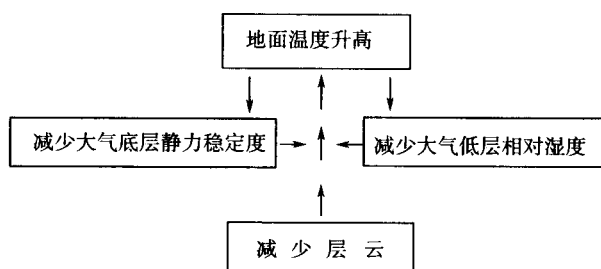
宇如聪等(Yu 等,2004)讨论我国高原东侧地面温度与大陆性层云的关系时,认为其中存在两种负反馈过程:

其一是地面温度的变化,导致大气低层稳定度的变化,影响层云。当地面温度升高,近地层的对流加强,大气低层的静力稳定度则降低,低层的层云量将会减少;反之亦然。即通过大气低层的静力稳定度,形成地面温度与低层层云的负反馈。

其二是地面温度与相对湿度的负反馈。当地面温度上升,大气的温度也相应上升,则会形成大气低层相对湿度的减小;虽然大气温度上升,也会增加近地面的水气蒸发,在贴近地面处可能形成饱和水汽,但是其数量是不足以抵消低层大气中相对湿度的减少;其结果是大气低层相对湿度是减小的,也减少层云的形成条件,导致层云云量的减少。

因此,我国高原东侧地面温度与大陆性层云的关系可综合为负反馈,即地面温度上升和低层层云量的减少(Yu 等,2004)。

他们绘制的地面温度与大陆性层云关系的框图如下:



4. 二氧化碳-海洋-大气之间的反馈

气候系统中有的反馈机制将物理系统和生物化学系统联系起来。由于燃烧矿物材料,导致大气中二氧化碳含量增加,也使低层大气温度上升,其过程与上述“水汽-温室反馈”相类似,也称为“二氧化碳-水汽-温室反馈”。低层大气的增温反过来又会导致海面水温增高,增加海水的垂直稳定度,从而降低海洋吸收大气中二氧化碳的能力,使得大气中二氧化碳的增加速率越来越高,也就是说,形成正反馈过程。同时由于海洋已吸收二氧化碳,而使海水的酸度增加。目前对这类特殊的反馈机制知之甚少,今后还需进行详细的研究。目前认为,它们在气候系统的各个不同部分之间,是起着连接作用的。