

•
▽
•
✱

𠂇 𠂈 𠂉 𠂊 𠂋 𠂌 𠂍 𠂎 𠂏 𠂐 𠂑 𠂒 𠂓 𠂔 𠂕 𠂖 𠂗 𠂘 𠂙 𠂚 𠂛 𠂜 𠂝 𠂞 𠂟 𠂠 𠂡 𠂢 𠂣 𠂤 𠂥 𠂦 𠂧 𠂨 𠂩 𠂪 𠂫 𠂬 𠂭 𠂮 𠂯 𠂰 𠂱 𠂲 𠂳 𠂴 𠂵 𠂶 𠂷 𠂸 𠂹 𠂺 𠂻 𠂼 𠂽 𠂾 𠂿 𠃀 𠃁 𠃂 𠃃 𠃄 𠃅 𠃆 𠃇 𠃈 𠃉 𠃊 𠃋 𠃌 𠃍 𠃎 𠃏 𠃐 𠃑 𠃒 𠃓 𠃔 𠃕 𠃖 𠃗 𠃘 𠃙 𠃚 𠃛 𠃜 𠃝 𠃞 𠃟 𠃠 𠃡 𠃢 𠃣 𠃤 𠃥 𠃦 𠃧 𠃨 𠃩 𠃪 𠃫 𠃬 𠃭 𠃮 𠃯 𠃰 𠃱 𠃲 𠃳 𠃴 𠃵 𠃶 𠃷 𠃸 𠃹 𠃺 𠃻 𠃼 𠃽 𠃾 𠃿 𠄀 𠄁 𠄂 𠄃 𠄄 𠄅 𠄆 𠄇 𠄈 𠄉 𠄊 𠄋 𠄌 𠄍 𠄎 𠄏 𠄐 𠄑 𠄒 𠄓 𠄔 𠄕 𠄖 𠄗 𠄘 𠄙 𠄚 𠄛 𠄜 𠄝 𠄞 𠄟 𠄠 𠄡 𠄢 𠄣 𠄤 𠄥 𠄦 𠄧 𠄨 𠄩 𠄪 𠄫 𠄬 𠄭 𠄮 𠄯 𠄰 𠄱 𠄲 𠄳 𠄴 𠄵 𠄶 𠄷 𠄸 𠄹 𠄺 𠄻 𠄼 𠄽 𠄾 𠄿 𠅀 𠅁 𠅂 𠅃 𠅄 𠅅 𠅆 𠅇 𠅈 𠅉 𠅊 𠅋 𠅌 𠅍 𠅎 𠅏 𠅐 𠅑 𠅒 𠅓 𠅔 𠅕 𠅖 𠅗 𠅘 𠅙 𠅚 𠅛 𠅜 𠅝 𠅞 𠅟 𠅠 𠅡 𠅢 𠅣 𠅤 𠅥 𠅦 𠅧 𠅨 𠅩 𠅪 𠅫 𠅬 𠅭 𠅮 𠅯 𠅰 𠅱 𠅲 𠅳 𠅴 𠅵 𠅶 𠅷 𠅸 𠅹 𠅺 𠅻 𠅼 𠅽 𠅾 𠅿 𠆀 𠆁 𠆂 𠆃 𠆄 𠆅 𠆆 𠆇 𠆈 𠆉 𠆊 𠆋 𠆌 𠆍 𠆎 𠆏 𠆐 𠆑 𠆒 𠆓 𠆔 𠆕 𠆖 𠆗 𠆘 𠆙 𠆚 𠆛 𠆜 𠆝 𠆞 𠆟 𠆠 𠆡 𠆢 𠆣 𠆤 𠆥 𠆦 𠆧 𠆨 𠆩 𠆪 𠆫 𠆬 𠆭 𠆮 𠆯 𠆰 𠆱 𠆲 𠆳 𠆴 𠆵 𠆶 𠆷 𠆸 𠆹 𠆺 𠆻 𠆼 𠆽 𠆾 𠆿 𠇀 𠇁 𠇂 𠇃 𠇄 𠇅 𠇆 𠇇 𠇈 𠇉 𠇊 𠇋 𠇌 𠇍 𠇎 𠇏 𠇐 𠇑 𠇒 𠇓 𠇔 𠇕 𠇖 𠇗 𠇘 𠇙 𠇚 𠇛 𠇜 𠇝 𠇞 𠇟 𠇠 𠇡 𠇢 𠇣 𠇤 𠇥 𠇦 𠇧 𠇨 𠇩 𠇪 𠇫 𠇬 𠇭 𠇮 𠇯 𠇰 𠇱 𠇲 𠇳 𠇴 𠇵 𠇶 𠇷 𠇸 𠇹 𠇺 𠇻 𠇼 𠇽 𠇾 𠇿 𠈀 𠈁 𠈂 𠈃 𠈄 𠈅 𠈆 𠈇 𠈈 𠈉 𠈊 𠈋 𠈌 𠈍 𠈎 𠈏 𠈐 𠈑 𠈒 𠈓 𠈔 𠈕 𠈖 𠈗 𠈘 𠈙 𠈚 𠈛 𠈜 𠈝 𠈞 𠈟 𠈠 𠈡 𠈢 𠈣 𠈤 𠈥 𠈦 𠈧 𠈨 𠈩 𠈪 𠈫 𠈬 𠈭 𠈮 𠈯 𠈰 𠈱 𠈲 𠈳 𠈴 𠈵 𠈶 𠈷 𠈸 𠈹 𠈺 𠈻 𠈼 𠈽 𠈾 𠈿 𠉀 𠉁 𠉂 𠉃 𠉄 𠉅 𠉆 𠉇 𠉈 𠉉 𠉊 𠉋 𠉌 𠉍 𠉎 𠉏 𠉐 𠉑 𠉒 𠉓 𠉔 𠉕 𠉖 𠉗 𠉘 𠉙 𠉚 𠉛 𠉜 𠉝 𠉞 𠉟 𠉠 𠉡 𠉢 𠉣 𠉤 𠉥 𠉦 𠉧 𠉨 𠉩 𠉪 𠉫 𠉬 𠉭 𠉮 𠉯 𠉰 𠉱 𠉲 𠉳 𠉴 𠉵 𠉶 𠉷 𠉸 𠉹 𠉺 𠉻 𠉼 𠉽 𠉾 𠉿 𠊀 𠊁 𠊂 𠊃 𠊄 𠊅 𠊆 𠊇 𠊈 𠊉 𠊊 𠊋 𠊌 𠊍 𠊎 𠊏 𠊐 𠊑 𠊒 𠊓 𠊔 𠊕 𠊖 𠊗 𠊘 𠊙 𠊚 𠊛 𠊜 𠊝 𠊞 𠊟 𠊠 𠊡 𠊢 𠊣 𠊤 𠊥 𠊦 𠊧 𠊨 𠊩 𠊪 𠊫 𠊬 𠊭 𠊮 𠊯 𠊰 𠊱 𠊲 𠊳 𠊴 𠊵 𠊶 𠊷 𠊸 𠊹 𠊺 𠊻 𠊼 𠊽 𠊾 𠊿 𠋀 𠋁 𠋂 𠋃 𠋄 𠋅 𠋆 𠋇 𠋈 𠋉 𠋊 𠋋 𠋌 𠋍 𠋎 𠋏 𠋐 𠋑 𠋒 𠋓 𠋔 𠋕 𠋖 𠋗 𠋘 𠋙 𠋚 𠋛 𠋜 𠋝 𠋞 𠋟 𠋠 𠋡 𠋢 𠋣 𠋤 𠋥 𠋦 𠋧 𠋨 𠋩 𠋪 𠋫 𠋬 𠋭 𠋮 𠋯 𠋰 𠋱 𠋲 𠋳 𠋴 𠋵 𠋶 𠋷 𠋸 𠋹 𠋺 𠋻 𠋼 𠋽 𠋾 𠋿 𠌀 𠌁 𠌂 𠌃 𠌄 𠌅 𠌆 𠌇 𠌈 𠌉 𠌊 𠌋 𠌌 𠌍 𠌎 𠌏 𠌐 𠌑 𠌒 𠌓 𠌔 𠌕 𠌖 𠌗 𠌘 𠌙 𠌚 𠌛 𠌜 𠌝 𠌞 𠌟 𠌠 𠌡 𠌢 𠌣 𠌤 𠌥 𠌦 𠌧 𠌨 𠌩 𠌪 𠌫 𠌬 𠌭 𠌮 𠌯 𠌰 𠌱 𠌲 𠌳 𠌴 𠌵 𠌶 𠌷 𠌸 𠌹 𠌺 𠌻 𠌼 𠌽 𠌾 𠌿 𠍀 𠍁 𠍂 𠍃 𠍄 𠍅 𠍆 𠍇 𠍈 𠍉 𠍊 𠍋 𠍌 𠍍 𠍎 𠍏 𠍐 𠍑 𠍒 𠍓 𠍔 𠍕 𠍖 𠍗 𠍘 𠍙 𠍚 𠍛 𠍜 𠍝 𠍞 𠍟 𠍠 𠍡 𠍢 𠍣 𠍤 𠍥 𠍦 𠍧 𠍨 𠍩 𠍪 𠍫 𠍬 𠍭 𠍮 𠍯 𠍰 𠍱 𠍲 𠍳 𠍴 𠍵 𠍶 𠍷 𠍸 𠍹 𠍺 𠍻 𠍼 𠍽 𠍾 𠍿 𠎀 𠎁 𠎂 𠎃 𠎄 𠎅 𠎆 𠎇 𠎈 𠎉 𠎊 𠎋 𠎌 𠎍 𠎎 𠎏 𠎐 𠎑 𠎒 𠎓 𠎔 𠎕 𠎖 𠎗 𠎘 𠎙 𠎚 𠎛 𠎜 𠎝 𠎞 𠎟 𠎠 𠎡 𠎢 𠎣 𠎤 𠎥 𠎦 𠎧 𠎨 𠎩 𠎪 𠎫 𠎬 𠎭 𠎮 𠎯 𠎰 𠎱 𠎲 𠎳 𠎴 𠎵 𠎶 𠎷 𠎸

[illegible]

动力气候学引论

林本达 黄建平 编著

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 简 介

本书以气候系统为主要线索,介绍了气候系统的概念及总体特性;分别阐述了发生在作为气候系统重要成员的大气、海洋、冰雪和陆面中各种物理过程和这些过程对气候的影响以及在气候模式中这些物理过程的描述和处理方法;讨论了气候系统的辐射强迫机制、气候系统的能量平衡以及气候系统的稳定性,偏重于讨论分析并结合介绍适合于这种研究的一些简单气候模式。详细论述了目前广泛应用于做气候研究的各种气候模式的功能原理以及用它们做气候模拟的结果,并对存在问题及发展前景作了评述。

本书可供气象研究机构、高等院校气象专业研究生和高年级本科生作为教材或参考书,也可供从事气候科研业务及教学人员参考。

动力气候学引论

林本达 黄建平 编著

责任编辑 李如彬 殷钰 终审 顾仁俭

封面设计 牛涛 责任技编 都平 责任校对 林雨晨

*

气象出版社出版

(北京市海淀区白石桥路 46 号)

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:850×1168 1/32 印张:12.5 字数 325 千字

1994 年 3 月第一版 1994 年 3 月第一次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5029-1470-6/P·0626(课)

定价:7.20 元

序 言

气候学是一门有古老历史的科学。但是,现代气候学却以崭新的面貌出现在我们面前。首先,全球气候系统取代了经典的、狭隘的气候概念,认为地面气温、降水量及气压所谓三要素就能代表气候的观点,已经远远不能满足现代科学发展的需要。事实证明,为了认识气候形成以及研究气候变化,甚至也不能只研究大气本身。因为世界海洋、陆面植被、海冰、大陆冰盖与积雪、乃至大气的化学成分,都在气候形成中起着重要作用。这些成员之间时刻都在进行着复杂的相互作用。因此,要深入研究气候,就需要研究整个气候系统。由于这个系统的成员都是行星尺度的,所以,称之为全球气候系统。这个新概念的建立,大大地推动了气候学的发展。

研究内容及范畴有了根本性的变化,自然研究方法也顺应这个变化而改变。统计学已不再是研究气候的唯一工具,而动力学却在气候研究中表现出强壮的生命力。当然,这里我们是从广义上来理解动力学的,它包括了热力学及能量学。动力学是气候模拟与气候预测的基础。甚至,根据传统以应用统计方法为主的气候诊断也开始应用动力学方法。当然,这里并不是、也没有否认在气候研究中仍然要应用统计方法,而是强调动力学方法的重要。特别因为这是一门新兴的科学,应该大力提倡,促使其茁壮成长。

因此,看到本书的出版,喜悦之情是可以想象的。这本书总结了十几年来作者们在北京大学讲授这门课程的经验,又在百忙之中编写成书,付出了辛勤的劳动,应该受到感谢。

王绍武

1992年9月21日

于北京大学

前 言

气候变化及异常及其对经济和社会发展的影响已成为当今世界各国政府及科学界十分关注的重大问题。近二十多年来全球范围的气候异常已给许多国家,尤其第三世界国家的粮食生产和人们的生存和生活带来了十分严重的影响,造成了很大的损失。

面对着气候灾害对人类的严重挑战,探索气候变化的规律,并从各种途径去分析气候变化及其异常的成因、机制,以便进一步去预测气候变化和气候异常,对气候趋势提出科学的估计,以减少气候灾害造成的损失是气象科学工作者所肩负的重大而艰巨的任务。这个问题也受到世界气象组织的高度重视,七十年代以来召开了一系列国际学术会议,讨论与气候变化有关的问题,并制订了“世界气候研究计划(WCRP)”,组织实施各有关的研究计划。我国气象部门科研机构及高等院校也十分重视这个问题,国家七五、八五计划,自然科学基金委员会也把气候变化(研究)作为重大的研究课题如“长江黄河流域旱涝异常的成因及预测、气候动力学研究等。

很久以来气候研究和预测的主要手段是气候统计方法。这种方法由于缺少对影响气候变化的物理过程和机制的深入分析,因而其效果受到很大的限制。随着气象科学和计算机技术的飞速发展,基于流体动力学和热力学的短期、中期天气预报原理和方法有了迅速的发展,与此同时,动力气候学原理和气候变化的数值模拟研究近十年来有了很快发展,并把它作为气候研究的主攻方向和目标。为了适应培养这方面研究人才的需要,迫切需要有动力气候学基本原理及方法的教材。本书即为适应这种需求而编写的。它以北京大学天气动力学专业研究生动力气候学的教材为基础,积

累了多年这方面教学的经验,并参考大量国内外有关文献和研究成果而写成的。本教材早期定名为《长期天气过程的物理基础》,着重长期天气变化的物理过程和机制的分析。随着在教学过程中不断补充了动力学理论及数值模拟的方法和内容,后改名为《动力气候学》。虽然它的有些理论原理还不如以短期天气预报的流体动力学方法为主要内容框架的动力气象学那么成熟和系统,但由于近年动力气候学原理方法研究的飞快发展,相信(在不久的将来)它也会很快发展成更加丰富、更加完整的系统。

本书以气候系统为主要线索,前两章着重介绍气候系统的概念及总体特性;第三章到第六章分别阐述发生在作为气候系统重要成员的大气、海洋、冰雪和陆面中各种物理过程和这些过程对气候的影响以及在气候模式中这些物理过程的描述和处理方法;第七章到第九章介绍气候系统的辐射强迫机制、气候系统的能量平衡以及气候系统的稳定性,偏重于讨论分析并结合介绍适合于这种研究的一些简单气候模式。第十章详细介绍目前广泛应用于做气候研究的各种气候模式的功能原理以及用它们做气候模拟的结果,并对存在问题及发展前景作了评述。

本书可供气象研究机构、高等院校气象专业研究生和高年级本科生作为教材或参考书,也可供从事气候科研业务及教学人员参考。

本书的出版得到了气候博士基金的部分资助。

目 录

序言

前言

第一章 气候和气候系统	(1)
§ 1.1 气候.....	(1)
§ 1.2 气候系统.....	(3)
§ 1.3 气候谱的时间特征.....	(8)
§ 1.4 气候过程的非绝热性.....	(11)
参考文献	(24)
第二章 影响气候的物理过程及因子	(26)
§ 2.1 影响气候及其变化的物理过程.....	(26)
§ 2.2 气候中的反馈机制.....	(30)
§ 2.3 气候的敏感性.....	(41)
§ 2.4 气候的稳定性.....	(51)
参考文献	(53)
第三章 云过程及其气候效应	(55)
§ 3.1 云影响气候的物理过程.....	(55)
§ 3.2 云的反馈调节作用与地气系统的长周期振荡.....	(62)
§ 3.3 气候模式中云的处理.....	(71)
参考文献.....	(101)
第四章 海洋过程及其对气候的影响.....	(104)
§ 4.1 海洋概述	(104)
§ 4.2 海洋环流模式	(110)
§ 4.3 大气对海洋的作用——风生洋流理论	(114)
§ 4.4 海洋对大气环流及气候的影响	(123)
参考文献.....	(144)

第五章 冰雪过程	(146)
§ 5.1 全球冰雪的分布及其变化特征	(147)
§ 5.2 冰雪影响气候的可能物理过程	(150)
§ 5.3 冰雪对气候变化的响应	(151)
§ 5.4 气候模式中冰雪过程的处理	(153)
§ 5.5 季节性雪盖对气候的影响	(155)
§ 5.6 海冰的形成和增长	(157)
§ 5.7 海冰模式	(160)
§ 5.8 海冰对气候的影响	(174)
参考文献.....	(176)
第六章 陆面过程	(180)
§ 6.1 陆面影响大气的主要物理过程	(180)
§ 6.2 气候模式中陆面过程的参数化	(182)
§ 6.3 陆面方程	(190)
§ 6.4 陆面过程对气候的影响	(203)
参考文献.....	(222)
第七章 气候系统的辐射强迫机制	(226)
§ 7.1 大气中辐射传输的基本特性	(226)
§ 7.2 辐射-对流模式	(232)
§ 7.3 气候对辐射强迫的敏感性	(238)
§ 7.4 辐射与化学过程的耦合相互作用	(244)
参考文献.....	(249)
第八章 能量平衡与能量平衡模式	(251)
§ 8.1 零维模式	(251)
§ 8.2 一维模式	(256)
§ 8.3 Sellers 的一维模式	(261)
§ 8.4 一维季变模式	(266)
§ 8.5 二维模式	(267)
§ 8.6 CO ₂ 加倍的敏感性试验	(274)

§ 8.7 水平二维上翻-扩散耦合模式	(278)
§ 8.8 耦合能量平衡模式存在的问题	(286)
参考文献	(286)
第九章 气候系统的稳定性	(289)
§ 9.1 零维系统的稳定性分析	(289)
§ 9.2 非线性一维模式	(293)
§ 9.3 一维系统的稳定性分析	(299)
§ 9.4 小冰盖不稳定	(305)
§ 9.5 气候突变	(306)
§ 9.6 非线性二维季变模式	(310)
§ 9.7 古气候模拟	(314)
参考文献	(320)
第十章 气候模拟和预测	(322)
§ 10.1 气候模式的分类	(322)
§ 10.2 纬向平均动力学模式	(324)
§ 10.3 地气耦合距平模式	(334)
§ 10.4 相似-动力季节预报模式	(357)
§ 10.5 三维气候模式	(368)
§ 10.6 存在的问题和展望	(382)
参考文献	(382)

第一章 气候和气候系统

§ 1.1 气候

在讨论气候形成及变化的原因及物理过程以及介绍模拟和预测气候变化的方法之前,有必要了解气候以及气候系统这些基本概念的确切含义,这样才能正确理解气候研究方法及发展的方向或趋势。

1.1.1 气候的定义

一般认为,气候是地球上某一地区多年间大气的一般状态,这既包含平均状态,也反映极端情况,是多年间各种天气过程造成的效果的综合表现。气候要素的各种统计量是表征气候的基本依据,然而这个直观的概念并不十分精确,在给出气候的定义时需要足够地精确,以便能作为气候理论的基础。

首先要明确气候理论在本质上是概率的,各种气候过程都是作为多元随机过程来处理的,而这些过程的统计特性则是气候研究的课题。例如,我们说某地区有一个平均的槽或脊,这并不意味着该地区天天都有槽或脊出现,只不过是经常出现罢了。

此外,要明确统计量是对多长时间进行的,时间长度不同,天气的统计特征也不同。因此,气候这个概念隐含着—个时间长度作为基础,即使对某一确定的时间长度,气候的稳定性也仅仅是相对于天气而言的。根据研究和地质学考证的结果,现在人们知道,不仅几十年或几百年的平均气候有显著的差异,而且几万年乃至上亿年的平均气候状态也存在着变化,这种气候变化的幅度甚至更

大。有的气象文献把1个月或1个季度的天气的统计特征也称为气候,这样一来,气候是逐年变化的。为了取得一致,在通用的意义上,气候是指通常在特定的30年期间取的各种天气要素的平均。为了更好地了解气候的定义,还需了解如下若干与气候有关的概念。

1.1.2 与气候有关的一些概念

气候状态 定义为在地-气系统的特定区域,大气、水圈和晶圈完整的变量组在特定时期的平均,这个时间间隔比个别天气系统的生命史(几天量级)长得多,也比大气行为可被局地预报的理论时间极限(几周量级)长。因此,我们可以说月、季、年或10年的气候状态。

气候变化 定义为同类的气候状态在如两个1月或两个20年之间的差异。因此我们可以说月、季、年或10年的气候变化。

气候异常 定义为一个特定的气候状态与同类气候状态的大量(或多年)平均的偏差。因此我们可以说特定的1月或特定的年所代表的气候异常。

气候变率 定义为大量同类气候状态之间的方差。因此我们可以说月、季、年或10年的气候变率,这个气候变率的定义包含个别气候状态变率的方差

气候噪音 气候状态本身除了受物理原因的影响而变化外,还受到统计原因的扰动,由于这些统计扰动发生自天气的逐日变化,因此它们在气候感兴趣的时间尺度上是不可预报的,因而这种统计原因的扰动被定义为气候噪音。这种噪音的振幅近似地随取平均的时间间隔的平方根而减小,但有些噪音在任何有限的时间尺度中都保留。

气候的可预报性 定义为潜在的可预报的物理原因造成的气候变化的大小与不可预报的气候噪音的大小之比值。

§ 1.2 气候系统

气候这个术语通常导致想象是天气的平均状态。然而,产生地球气候及其变化的机制是一个巨大而复杂的物理系统的一部分。这个系统不仅包含被相当好地知道的大气的特性,还包含尚不大知道的世界海洋和冰体的行为以及发生在地表面的变化。除了物理因子外,还有影响气候的复杂的化学和生物过程,它们对气候的影响也是重要的。

在气候学中系统理论和数学的应用,近年来已完全改变了气候研究的主题。系统理论和数学模式的使用使人们可以考察极为复杂的真实世界,并以有序和逻辑的方式做想象,随着这种系统方法的发展,气候学已由统计状态的简单描述,改变到研究形成气候环境的各种相互作用和交换。经典的气候学处理各种气候要素的列表平均和极值,很少涉及气候的成因,相反,近代气候学讨论气候形成的真正原因,也描述气候变化的机制。由于气候系统的概念和模式有很大的用处,因此,在介绍气候系统之前,有必要简单介绍一些有关系统的概念。

1.2.1 系统

1.2.1.1 系统的概念

所谓系统,即许多物体(成分)和属性(变量)组成的结构群,这些物体和属性之间通过一定的物理过程而相互联系(耦合),并按某种观测的型作为一个复杂的整体而起作用。系统的概念是人们理解复杂现象的十分有用的工具。

1.2.1.2 系统的分类

系统可以根据它们的作用,也可根据它们的内在复杂性加以分类。它一般可分成以下三类。

孤立系统 没有物质和能量的输入和输出(有阻止交换的边

界)的系统。这种系统虽然可以在实验室中出现,但在真实的自然界中很少见。在一个孤立系统中,有使系统中现存的差异均衡化并使现存的秩序逐渐破坏的趋势。

闭合系统 与周围没有物质交换,但有能量交换的系统。地球及其大气一起可以非常近似地看成一个闭合系统。

开放系统 与周围既有物质交换又有能量交换的系统。自然环境中观测到的系统大多数属于开放系统。开放系统为了维持,需要有能量的供给,它具有一个在孤立系统中不能发现的重要属性,即它可以达到稳定的平衡状态。这个系统中由于存在相互作用的变量,它们瞬时条件可能有振动,但在长的时间上基本保持常定。这种系统多呈串级(cascade)结构,它包含一系列的子系统,这些子系统都有自己的大小和地理位置,它们之间通过一定的物理过程被物质和能量的串级在动力学上联系起来,通过这种耦合联系,一个子系统的物质和能量的输出变成下一子系统的输入,这种输出和输入的分配则由一定物理属性、过程及规律形成的调节器(机制)加以控制。开放系统的变化可以分为三种形式,即衰减型、周期型和不规则振动型。

1.2.2 气候系统及其成员

1.2.2.1 气候系统的定义

所谓气候系统即对造成一定时间尺度的气候变化有影响的物理系统,也可以说气候系统是指大气圈、水圈、晶圈、岩石圈及生物圈等组成的相互作用的整体,其示意图如图 1.1 所示。

1.2.2.2 气候系统的组成

完整的气候系统由五个物理成分组成,即大气圈、水圈、晶圈、岩圈和生物圈,下面就论述这些成员的主要特征。

大气 是包围地球的气壳,它是气候系统的最可变部分。大气的质量约为 $5.3 \times 10^{15} \text{t}$,空气的比热为 $10^3 (\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C})$,它的整体热容量为 $5.32 \times 10^{15} \text{MJ/}^\circ\text{C}$ 。地球大气的成分以氮、氧和氩为主,

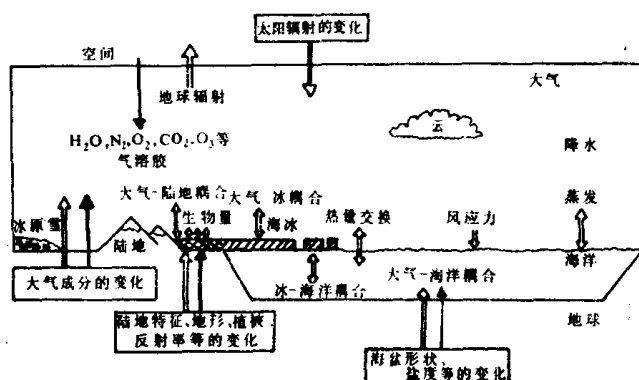


图 1.1 气候系统示意图

它们三者占大气总体积的 99.96%，其它气体含量甚微，有二氧化碳、氮、氩、氦、甲烷、臭氧和水汽等。大气中的水汽来自江河湖泊和海洋表面的蒸发，植物的蒸腾以及其它含水物质的蒸发等，在夏季湿热处（如高温的洋面或森林），大气中水汽含量的体积比可达 4%，而冬季干寒处（如极区），水汽含量则可低于 0.01%。水汽随着大气温度而发生相变，成云致雨，成为淡水的主要来源，水的相变和水文循环不仅把大气圈同水圈、岩圈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有重要的影响。大气中的二氧化碳含量受植物的光合作用、动物的呼吸作用、含碳物质的燃烧以及海水对二氧化碳的吸收作用等的影响，在工业发展，化石燃料（如煤、石油和天然气）燃量增加，森林覆盖面积减少的情况下，已观测到大气中二氧化碳的含量在不断增加。大气中本身没有或极少存在的如甲烷、一氧化二氮等气体，由于人类活动的影响，近年来它们的含量也在急剧增加。这些有温室效应的气体含量的变化对大气温度有何影响，将引起什么样的气候变化，已成为气候研究的一个前沿课题。大气热惯性较小，它对外界热量变化的特征响

应时间或热力适应时间估计为1个月。也就是说,大气依靠垂直和水平输送热量,可以在1个月左右的时间内调整到一定温度分布。

水圈 包含分布在地球表面的液态水,如海洋、湖泊和地下水,其中海洋对气候变化最为重要。海洋是由世界各大洋和邻近海区内的咸水组成,全世界海洋总面积约为3.6亿 km^2 ,约占地球表面的71%,相当于陆地面积的2.5倍,海洋每年约有50.5亿 km^3 的海水在太阳辐射作用下被蒸发,大气中水汽的87.5%来自海洋,每年从陆地上被蒸发的淡水只有7.2万 km^3 ,约占大气中水汽总量的12.5%。从海洋或陆地蒸发的水汽上升凝结后,又作为雨或雪降落到海洋和陆地上,陆地上每年约有4.7万 km^3 的水在重力作用下,或沿地面注入河流,或渗入土壤形成地下水,最终注入海洋,从而构成地球上周而复始的水文循环。由于海陆反射率的固有差异,海洋单位面积所吸收的太阳辐射能比陆地多25—50%。因此,全球海洋表层海水的年平均温度要比全球陆地上平均温度约高 10°C 。由于辐射随纬度的不均匀分布,赤道附近的水温显著地高于高纬度海区,因此,在海洋中导致暖洋流从赤道流向高纬,冷洋流从高纬流向赤道的大尺度循环,使得赤道和极区的气候不致于过分悬殊。海洋中温度有季节变化的平均厚度为240m的海洋上层,其质量为 $8.7\times 10^{10}\text{t}$,热容量为 $36.45\times 10^{16}\text{MJ}/^\circ\text{C}$;而陆地活动层的平均厚度只有10m,质量为 $3\times 10^{15}\text{t}$,其热容量只有 $2.38\times 10^{15}\text{MJ}/^\circ\text{C}$ 。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,可见,无论从力学和热力学效应来看,在气候系统的成员中海洋具有最大的惯性,是一个巨大的能量贮存库,海洋的上层在几个月到几年的时间尺度上与上面的大气相互作用,而较深海水的调整时间为几个世纪的量级。

冰圈(也叫冰雪圈) 由全世界的冰体和积雪组成,其中包括大陆冰原,高山冰川,海冰和地面雪盖等,可分为季节性和永久性冰雪覆盖两大类。陆地雪盖的变化主要有季节性特征,海冰显示季

节到几十年的变化,而冰原和冰川的响应要缓慢得多,只在几百到几百万年的周期上体积和范围才显示重大变化。冰雪覆盖在地球的热平衡中起着重要的作用,它们的变化可以通过冰雪体的体积、范围(面积)以及海平面高度的变化显示出来。

岩圈(也称陆面) 由陆块组成,包括山脉、海洋盆地、岩石、土壤及地表沉积物。这些特征在气候系统的所有分量中,显示变化的时间尺度最长,其中山脉形成的时间尺度为 10^5 — 10^8 年,大陆漂移的时间尺度为 10^6 — 10^9 年,而陆地位置 and 高度改变的时间尺度最长,可与地球的年龄相当(10^9 年)。陆面与大气之间的摩擦作用是大气动能的汇,地面反射率、土壤含水量和地面粗糙度是岩圈影响大气环流及气候的重要物理参数。

生物圈 由陆地、海洋中各种动植物和人类本身组成。这些生物要素对气候很敏感并且它们也会影响气候变化。地面植物的自然变化特征时间在几百年到几千年之间,与温度和降水的变化响应,同时也改变地面的反射率、粗糙度和蒸发及地上水文。生物圈在大气和海洋的 CO_2 收支中,在气溶胶的产生中以及在其他的气体 and 盐粒成分的有关化学平衡中都起着重要的作用。生物圈的过程同其它几个气候系统成员相比更加复杂,其机制的定量表征及数值模拟也更为困难。

可见,为了弄清地球气候产生及变化的机制,我们面临的是一个非常复杂的物理系统,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,甚至化学和生物过程同其他部分联系起来,共同决定某一地区的气候特征。

1.2.2.3 气候系统的属性

为了定量地表征和描述气候系统各成员的物理性质、状态及其变化,需要用一些物理量来表示气候系统的各种属性。气候系统的属性及描述这些属性的物理量大致可分成下面几类。

热属性 用空气、水、冰及陆地的温度来描述。

运动属性 用风速、洋流速度,垂直速度及冰体的漂移速度来

描述。

水属性 用空气的湿度、云量、云水量、地上水、湖面高度、雪、陆冰及海冰的含水量来描述。

静力属性 用大气和海水的压力、密度、空气的成分、海水的盐分、系统的几何边界及一些物理常数来描述。

§ 1.3 气候谱的时间特征

通常,依据时间特征的不同,对天气过程有“长、中、短”之分,对于气候变化也有“短期气候”、“历史气候”和地质气候之分。这表明,天气过程及气候变化都具有阶段性,每一阶段都有它自己的本质特征。本节简要介绍天气和气候谱的分段及依据。

1.3.1 天气过程的时间分段

天气过程可以根据不同能量的耗散时间加以分段^[1]。

1.3.1.1 大气动能的耗散特征时间

全球大气的总动能约为 $8 \times 10^{20} \text{J}$, 动能的生成率(平均来说等于耗散率)为 $2 \times 10^{15} \text{W}$, 因此, 动能耗散的特征时间 τ_m 为

$$\tau_m = \frac{8 \times 10^{20}}{2 \times 10^{15}} \approx 5(\text{天})$$

1.3.1.2 大气凝结潜能的耗散特征时间

全球平均的气柱水汽含量为 24g/cm^2 , 全球平均降水量为 780mm/a 或 2.14mm/d , 因此, 潜热耗散的特征时间 τ_l 为

$$\tau_l = \frac{24}{2.14} = 11(\text{天})$$

1.3.1.3 大气内能的耗散特征时间

全球大气的内能是 $C_v M_a \bar{T}_a$, 其中 M_a 为大气质量, $\bar{T}_a$ 为全球的平均温度。平均的逸出长波辐射应该与吸收的太阳短波辐射相等, 即有 $Q_a = \frac{S_0}{4} (1 - \alpha_s)$, 其中 S_0 为太阳常数, α_s 为地面反射率。