



Qihou Donglixue Yinlun  
**气候动力学引论**

(第三版)

李崇银◎编著

非外借

# 气候动力学引论

(第三版)

李崇银 编著

## 内 容 简 介

本书是基于作者的有关研究工作和国内外一些新的研究成果综合写成的,目的在于对气候变化,尤其是短期气候变化的理论和动力学进行较为系统的论述,希望对我国气候动力学的研究和发展有所裨益。本书第三版中,在原第二版的第4章增加了“MJO的数值模拟”一节(包括5个小节),主要阐述了作者在这方面取得且得到国际同行高度重视和肯定的重要研究成果;在原第二版的第7章增加了“中太平洋 El Nino 事件”一节(包括5个小节),主要论述近些年大家都很关注的另外一种 El Nino 事件的特征和演变,以及它的影响;在原第二版的第11章也增加了一些关于年代际气候变化的新内容。希望通过各章的分析和论述,使读者既可以看到气候变化的复杂性和重要影响,又可以从一个新的高度认识气候及其变化,从而得到新的知识和结论,可以更好地为科学研究、教学和实际业务工作提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气候动力学引论/李崇银编著. —3版. —北京:  
气象出版社, 2018.3

ISBN 978-7-5029-6723-9

I. ①气… II. ①李… III. ①气候学-动力学-研究  
IV. ①P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 011360 号

Qihou Donglixue Yinlun

气候动力学引论(第三版)

李崇银 编著

---

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

责任编辑: 王萃萃 张 斌 李太宇 郭彩丽

终 审: 吴晓鹏

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 三河市君旺印务有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 33.75

字 数: 864 千字

版 次: 2018 年 3 月第 3 版

印 次: 2018 年 3 月第 5 次印刷

定 价: 130.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

### 第三版前言

气候及其变化已成为重要的社会问题、经济问题和国际问题,近年来引起了全世界各国人民和政府的高度重视。分析研究气候变化特征和规律,探讨其物理和动力学机理,对气候变化进行数值模式的模拟试验和预测等,正在世界各国迅速开展。《气候动力学引论》第一版自1995年问世以来,之所以受到国内外读者的欢迎,正是大家关注气候变化的一种反映。该书(气象出版社1995年第一版,2000年第二版)2009年12月第二版已第四次印刷。本书第二版既保留了第一版的基本框架结构和主要内容,也增加了我们的一些新的研究成果,从而多年来一直受到大家的支持和欢迎。作为本书的编著者,非常感谢大家接受和喜欢这本书,同时也希望让它更为完善,包含更多新的科研成果、更具有使用和参考价值。因此,作者在原来第二版的基础上又增加了一些新内容,出版本书的第三版。

本书第三版中,在原第二版的第4章增加了“MJO的数值模拟”一节(包括5个小节)。此节内容是近些年国际上十分重视,我们在这方面取得、且得到国际同行高度肯定的重要研究成果。同时,在原第二版的第7章增加了“中太平洋El Nino事件”一节(包括5个小节),主要论述近些年大家都很关注的另外一种El Nino事件的特征和演变,以及它的影响。在原第二版的第11章也增加了关于年代际气候变化的新内容。到目前为止,《气候动力学引论》全书的大部分内容主要是作者及其学生的研究结果,不少属于国内外的新成果,可以更好地为科学研究、教学和实际业务工作提供参考。

需要特别指出的是,人类活动使温室气体含量增加(特别是 $\text{CO}_2$ 含量的增加)所导致的气候变化是近些年来国际社会普遍关注的重要问题。由于内容很多,且有不少专著和论文可供参阅,因此本书未对相关问题作更多的讨论和介绍。

虽已经过各种校验,本书难免还会有不当之处,敬请各位同仁和读者指正。

李崇银

2017年12月16日

## 第二版前言

《气候动力学引论》的出版受到国内外读者的欢迎,不少大学和研究所还把这本书作为博士生教材,对此作者深表感谢。因种种原因无法像一些海外华人学者所建议的那样将《气候动力学引论》译成英文,但进一步完善原书则是作者的心愿;而且最近几年气候动力学研究又有一些新的进展,包括作者和其学生们已取得的成果,需要介绍给读者并充实原书。因此,借再版之机,在保留原版主要结构的基础上,除修改了原书中个别印刷错误之外,更增加了一些新的内容。

本书第二版增加的内容包括:第1章中增加了有关国际气候变化及可预报性研究计划(CLIVAR)的内容;第4章增加了蒸发-风反馈以及基本气流影响大气季节内振荡的动力学分析;第5章增加了包络 Rossby 波孤立子理论;第7章增加了对 ENSO 的大气环流合成分析、冬季风异常激发 ENSO 的海气耦合模式(CGCM)的模拟结果、暖池次表层海温异常对激发产生 ENSO 的重要作用,以及大气季节内振荡激发 ENSO 的动力学;特别是在第二版新增加了第11章“十年及年代际气候变化”;并将原版的第11章和第12章分别改成新版的第12章和第13章。

虽经多次校改,难免还会有错误之处,敬请指正。

李崇银

2000年4月14日

## 第一版前言

气候变化及其影响已越来越成为世界各国政府和科学家们关注的重大问题。为了弄清气候及其变化的规律和原因,科学家们在进行观测资料的统计和诊断分析的同时,已逐渐开展了对气候变化机理的动力学研究,并在大尺度大气动力学的基础上发展产生了一个新的学科——气候动力学。这样,当代气候研究已进入了一个新的时期,其特点就是在观测资料分析的基础上进行大量动力学机制的研究和数值模拟试验。气候及其变化受到多种因素的影响,远非大气系统运动的长期平均所能反映,而是大气、海洋、陆地(包括冰雪)和生态系统相互作用的结果,还要包括外空(主要是太阳)的影响。因此,关于气候变化的理论和动力学机制必须在大气科学、海洋学、地球物理学和生物学等多种学科相互渗透和结合的情况下,才能得到较深刻的认识。

本书是基于作者的有关研究工作和国内外一些新的研究成果综合写成的,目的在于对气候变化,尤其是短期气候变化的理论和动力学进行较为系统的论述,希望对我国气候动力学的研究和发展有所裨益,特别是对年轻学者起到促思考、助学习和指门路的作用。国外自 20 世纪 80 年代末以来已出版过关于气候动力学的专门论著,但未能反映出气候动力学是诊断分析与动力学理论紧密结合的学科本质。本书力求使资料的统计和诊断分析与动力学理论和数值模拟相结合,尽量让读者不仅知其然,还能知其所以然。不过本书还只是气候动力学的引论,有些问题尚难以给出或难以圆满地给出解答,有待继续深入研究。可喜的是,有关气候动力学和气候预测理论的研究得到了国家的重视和支持,正在有组织地顺利进行。可以相信,有关研究计划的实施和完成,必将对我国气候动力学和气候预测理论的发展起到重要作用。

全书共分 12 章,对气候变化的理论和动力学的有关问题作了较系统的论述。第 1 章,绪论,概括介绍气候变化的特征、影响及当代气候研究;第 2 章,气候系统,分别对气候各分系统及其基本特征进行讨论;第 3 章,大气辐射过程,概括介绍大气辐射过程、辐射气候以及云-辐射相互作用等;第 4 章,大气季节内振荡的动力学,既介绍了作为月、季气候变化重要因素的大气季节内振荡的活动和结构特征,又系统地讨论了它们的种种动力学机制;大气环流持续异常是导致短期气候

异常的重要原因;在第 5 章和第 6 章,分别对造成大气环流持续异常的两个重要过程、阻塞形势和遥相关进行系统的动力学分析;第 7 章,海气相互作用,系统地对影响年际气候变化的 ENSO 循环进行理论和动力学分析;第 8 章,陆气相互作用,讨论土壤、植被对气候的影响以及陆气相互作用模式;第 9 章,系统讨论各种 GCM 以及对气候和气候变化的数值模拟;第 10 章,系统介绍各种简化的气候模式及其数值模拟结果;第 11 章,讨论气候的可预报性问题;第 12 章,人类活动与气候变化,概括讨论温室气体及其气候效应、“核冬天”和臭氧洞等问题。

总之,希望通过各章的分析和论述,使读者既可以看到气候变化的复杂性和重要影响,又可以从一个新的高度认识气候及其变化,从而得到新的知识和结论;当然也可以从中提出需要进一步研究的新问题。由于气候及其变化很复杂,涉及的学科面很广,本人学识有限,虽经一再努力,难免有不当或错误之处,恳请批评指正。

可以预料,未来 10~20 年有关气候变化及可预报性的研究将会取得突破性的进展,一些新的结果和新的问题必将同时提出,本书中提到的某些问题也会有更完善的结论。尤其是已在本书中初步论述的有关耦合气候系统的问题、不同时间尺度气候变化的相互作用和相互影响等定会得到系统的研究结果。因此,作为《气候动力学引论》,本书在进一步研究这些问题时仍不失其作用。

本书的出版得到以曾庆存院士为首席科学家的国家基础性重大项目“气候动力学和气候预测理论的研究”,以及中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室的资助,作者表示衷心的感谢。同时,作者也感谢对本书的出版给予关心、支持和帮助的所有师长、同仁和朋友。

李崇银

1995 年 2 月 2 日于北京

## 目 录

第三版前言

第二版前言

第一版前言

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 1 绪论 .....                     | (1)   |
| 1.1 气候变化 .....                 | (1)   |
| 1.2 古气候及其变化 .....              | (6)   |
| 1.3 气候与人类社会 .....              | (11)  |
| 1.4 当代气候研究 .....               | (17)  |
| 参考文献 .....                     | (23)  |
| 2 气候系统 .....                   | (25)  |
| 2.1 大气 .....                   | (26)  |
| 2.2 大气运动基本方程组 .....            | (31)  |
| 2.3 海洋 .....                   | (36)  |
| 2.4 陆地和冰雪圈 .....               | (41)  |
| 2.5 水分及其循环 .....               | (45)  |
| 2.6 太阳活动 .....                 | (50)  |
| 2.7 火山爆发 .....                 | (55)  |
| 2.8 生态系统 .....                 | (60)  |
| 参考文献 .....                     | (63)  |
| 3 大气辐射过程 .....                 | (66)  |
| 3.1 太阳短波辐射 .....               | (66)  |
| 3.2 大气对太阳短波辐射的吸收 .....         | (71)  |
| 3.3 地表辐射特性 .....               | (78)  |
| 3.4 晴空大气红外辐射传输 .....           | (85)  |
| 3.5 辐射气候 .....                 | (91)  |
| 3.6 云-辐射相互作用 .....             | (96)  |
| 参考文献 .....                     | (102) |
| 4 大气季节内振荡的动力学 .....            | (103) |
| 4.1 大气中的 30~60 d 低频振荡 .....    | (103) |
| 4.2 热带大气低频(30~60 d)振荡动力学 ..... | (113) |
| 4.3 大气基本态的不稳定激发 .....          | (131) |
| 4.4 大气的低频响应 .....              | (145) |
| 4.5 大气非线性过程 .....              | (152) |

|     |                                |       |
|-----|--------------------------------|-------|
| 4.6 | MJO 的数值模拟 .....                | (158) |
|     | 参考文献 .....                     | (175) |
| 5   | 大气环流持续异常(一)——阻塞形势的动力学机理 .....  | (179) |
| 5.1 | 多平衡态理论 .....                   | (179) |
| 5.2 | 共振理论 .....                     | (183) |
| 5.3 | 孤立波理论 .....                    | (189) |
| 5.4 | 天气尺度涡旋的激发 .....                | (192) |
| 5.5 | 偶极子理论 .....                    | (198) |
| 5.6 | 包络 Rossby 孤立子理论 .....          | (202) |
|     | 参考文献 .....                     | (205) |
| 6   | 大气环流持续异常(二)——遥相关的动力学机理 .....   | (206) |
| 6.1 | 大气环流的遥相关 .....                 | (206) |
| 6.2 | 大气对外源强迫的遥响应 .....              | (217) |
| 6.3 | 能量频散和大圆理论 .....                | (222) |
| 6.4 | 时间平均基本气流的不稳定 .....             | (227) |
| 6.5 | 行星波的能量通量——EP 通量 .....          | (232) |
|     | 参考文献 .....                     | (237) |
| 7   | 海气相互作用 .....                   | (239) |
| 7.1 | 大尺度海气相互作用的基本特征 .....           | (239) |
| 7.2 | ENSO .....                     | (245) |
| 7.3 | ENSO 对大气环流和气候的影响 .....         | (251) |
| 7.4 | 东亚冬季风异常与 ENSO .....            | (263) |
| 7.5 | ENSO 的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 ..... | (278) |
| 7.6 | El Nino 与热带大气季节内振荡 .....       | (291) |
| 7.7 | 海气耦合波动力学 .....                 | (301) |
| 7.8 | 中太平洋 El Nino 事件 .....          | (309) |
|     | 参考文献 .....                     | (331) |
| 8   | 陆气相互作用 .....                   | (335) |
| 8.1 | 生物-地球物理反馈 .....                | (335) |
| 8.2 | 土壤温度和湿度的反馈 .....               | (340) |
| 8.3 | 植被 .....                       | (347) |
| 8.4 | 陆气相互作用模式 .....                 | (352) |
|     | 参考文献 .....                     | (358) |
| 9   | 气候数值模拟(一)——大气环流模式(GCM) .....   | (359) |
| 9.1 | 模式基本结构 .....                   | (359) |
| 9.2 | 主要物理过程及其参数化 .....              | (367) |
| 9.3 | 气候状态的一些数值模拟结果 .....            | (374) |
| 9.4 | 海气耦合模式(CGCM) .....             | (383) |
| 9.5 | 月—季气候的数值预报试验 .....             | (394) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 参考文献                               | (399) |
| <b>10 气候数值模拟(二)——简化模式</b>          | (402) |
| 10.1 能量平衡模式(EBM)                   | (402) |
| 10.2 盒型模式                          | (405) |
| 10.3 辐射-对流模式(RCM)                  | (410) |
| 10.4 辐射-对流模式的发展                    | (416) |
| 10.5 二维统计动力模式(SDM)                 | (419) |
| 10.6 滤波模式                          | (428) |
| 参考文献                               | (433) |
| <b>11 十年及年代际气候变化</b>               | (435) |
| 11.1 科学背景                          | (435) |
| 11.2 十年及年代际气候变化的特征型                | (436) |
| 11.3 大气环流年代际变化特征及机制                | (446) |
| 11.4 大洋状况的年代际变化特征及机制               | (451) |
| 11.5 中国气候的十年及年代际变化                 | (458) |
| 11.6 尚需特别注意研究的几个问题                 | (463) |
| 参考文献                               | (463) |
| <b>12 气候的可预报性问题</b>                | (466) |
| 12.1 大气运动的可预报性                     | (466) |
| 12.2 气候的可预报性                       | (471) |
| 12.3 非线性动力系统与可预报性                  | (477) |
| 参考文献                               | (486) |
| <b>13 人类活动与气候变化</b>                | (488) |
| 13.1 温室气体和气溶胶                      | (488) |
| 13.2 大气中 CO <sub>2</sub> 浓度增加的气候效应 | (496) |
| 13.3 其他温室气体的气候效应                   | (505) |
| 13.4 “核冬天”                         | (508) |
| 13.5 大气中的臭氧及臭氧洞                    | (515) |
| 参考文献                               | (523) |
| 附录:本书部分英文缩写                        | (526) |

# 1 绪论

气候,尤其是气候变化,对经济和社会发展造成的影响已成为当前各国政府和科学界十分关注的问题,因为全球范围内的一些气候异常给粮食和能源都造成了严峻的形势。例如,持续多年的非洲干旱使许多国家出现严重的粮食危机,甚至上百万人处于饥荒之中;即使在经济最发达的美国,在气候异常面前也只能“听天由命”。1972年冬季的严寒加剧了当时的能源危机,给美国造成了巨大的经济损失;而1988年的干旱又造成了美国粮食减产37%。因此,如何对气候的异常变化作出预报和预测,已成为一个迫切需要解决的重大科学问题。

宇宙万物总处于不停的运动和变化之中,这是唯物论的基本观点,气候也一样。因此,在一定意义上我们可以把气候变化视为极其自然的事情。或者说,千万年来气候就在自然地变化着,时而温暖,时而寒冷,时而出现洪涝,时而发生干旱。可是,近些年来人们逐渐地发现和意识到,除了气候的自然变化之外,人类活动也有形无形地引起全球气候和生态环境的改变,特别是工业生产和人类生活造成的大气中微量(温室)气体含量的急剧增加所引起的全球增暖、森林的大量砍伐和土地的不合理开发利用所造成的环境恶化,已经对人类的生存和发展带来直接威胁。因此,如何对人类活动造成的环境(包括气候)恶化作出正确估计,是又一个迫切需要解决的重大问题。

为了使读者首先对气候及其变化有一个基本的认识,以及有利于读者更好地阅读本书后面的章节,在这一章中,我们将概括地讨论气候变化的一些基本特征,分析气候与人类社会的关系,介绍当代气候学及其研究的一些基本特色。

## 1.1 气候变化

气候变化问题近年来引起了人们的普遍关注,因为它既同每个人的生活有关,又影响着整个人类社会的发展。要预测气候的变化,首先就需要认识气候变化及其规律。

### 1.1.1 气候变化及其时间尺度

一般所讲的某个地方的气候如何,是指该地区气候要素(温度、降水量、风等)的统计平均值,即较长时间观测资料的平均值。气候变化按经典定义就是相对于平均值的偏差。在不同时期,这种偏差也是变化的,仅用标准离差并不能完全反映气候变化的特征。也就是说,气候及气候变化有明显的动态特征,一个地方的气候不只是变化的,而且有各种不同时间尺度的变化特征。

归纳已有的研究结果,我们可以粗略地把气候变化按时间尺度分为六类,即短期气候变

化,其时间尺度为月或季;中期气候变化,其时间尺度为几年(年际变化);长期气候变化,其时间尺度为几十年(年代际变化);超长期气候变化,其时间尺度为几百年(世纪际变化);历史时期气候变化,其时间尺度为千年;地质期气候变化,其时间尺度为万年或更长。由于有气候资料记载的时间不过几百年,对于气候变化的研究也就主要集中在前四个时间尺度,尤其是前三个时间尺度的变化。但是,为了深入认识气候的演变规律,探索气候变化的原因,历史时期和地质期的气候变化问题也是很值得研究的。当然,对于研究后三类时间尺度,特别是后两类时间尺度的气候变化,需要通过一些特殊的办法获得气候变化的信息。

本书后面各章中关于气候变化及其理论和动力学的分析主要是针对月、季和年际时间尺度(有时也统称为短期气候)的问题,也涉及部分长期趋势。为了对气候变化有较全面的了解,在本章中对超长期时间尺度的气候变化也作简略的讨论。

图 1.1.1 给出的是 1880 年以来北半球年平均温度变化的时间演变,它可以反映近百年来平均温度变化的时间演变。显然,北半球的年平均温度不仅有明显的年际变化,而且在某些年温度会持续偏高或持续偏低。例如,1920—1964 年期间北半球平均气温偏高,而在 1920 年之前北半球的平均温度明显偏低,非常清楚地反映了气候的年代际(几十年时间尺度)变化。另外,近百年来气温增加的趋势也很清楚。

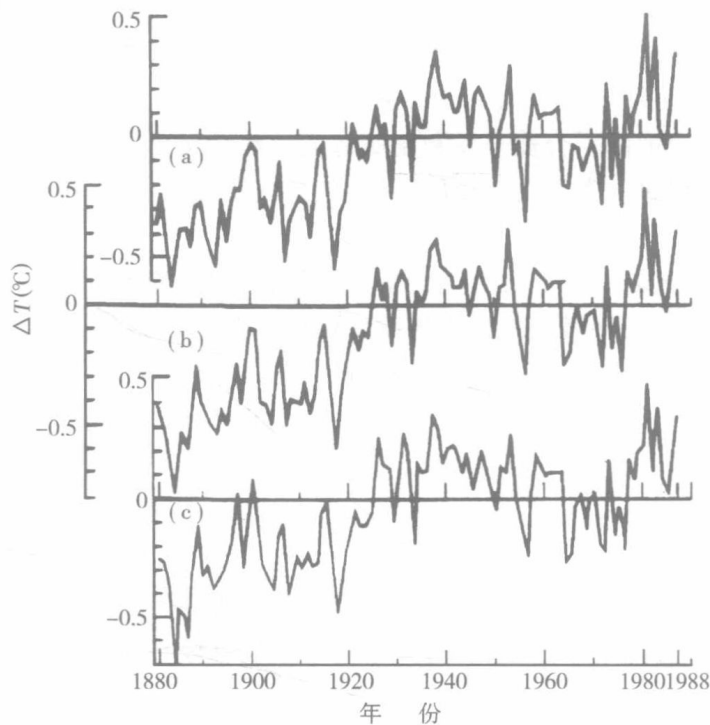


图 1.1.1 1880 年以来北半球年平均温度的变化( $\Delta T$ )(引自 MacCracken 等,1990)  
(a)、(b)和(c)分别表示不同作者的结果

图 1.1.2 是近 1 000 年以来有关欧洲东部地区冬季平均温度的估计量的时间变化,极为清楚的特征是在 1300—1800 年期间出现了“小冰期”。小冰期现象的出现,是超长期(百年时间尺度)气候变化的明显反映。在过去 50 万年以来冰期和间冰期的交替出现(间隔为 10 万年左右)则清楚地反映了地质期气候变化的特征。最近的一次冰期发生在距今 2 万年前,当时加拿大和大部分欧亚地区北部都为冰雪所覆盖。由于海冰面积的扩大,当时的海面高度差不多

比现在低 80 m,足见当时气候的恶劣程度。图 1.1.3 给出的是根据氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )测量推算的全球积冰的体积在过去 50 万年以来的时间演变,其中可清楚地看到冰期和间冰期的交替现象。

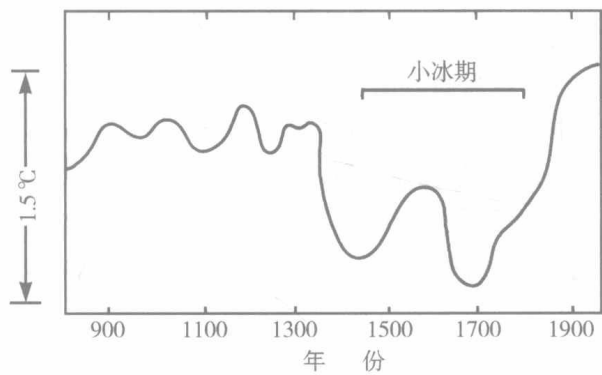


图 1.1.2 近 1 000 年来欧洲东部地区冬季平均温度的估计量的时间演变(引自 Lamb,1966)

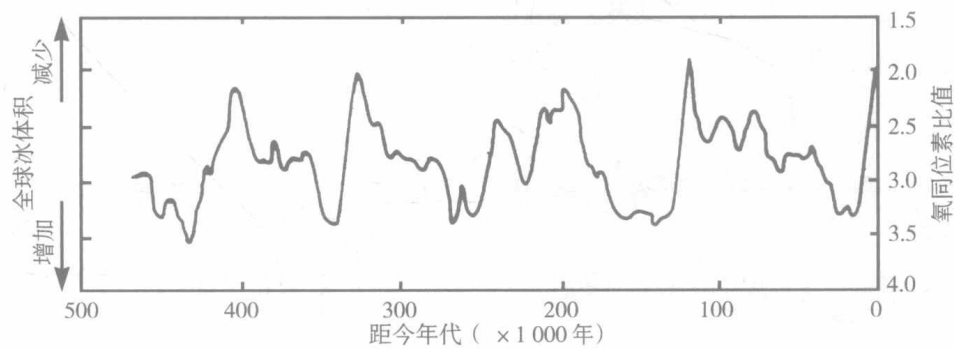


图 1.1.3 根据海洋浮游生物沉积物中氧同位素的比值所推算的 50 万年以来全球的冰体体积量的变化(引自 Hays 等,1976)

顺便指出,由于上千年时间以前不可能有气候记录资料供使用,而研究发现一些物质的同位素含量的多少可间接地反映当时的气候情况。因为许多研究已经证明,空气较冷时,降雨中重同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的含量较少。这样,当大陆上冰的数量增加时(冰期),从海洋中蒸发出来的水蒸气中的重同位素含量就减少,而残留在当时海水中的重同位素含量就增多。这样,重同位素反映温度的信息可保留在海洋底部的有孔虫方解石介壳中;而且,若有孔虫介壳沉淀时的温度降低,则方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  含量就增加。因此,海底沉积物中重同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的比值较高就指示出寒冷的气候;相反,温度升高(冰盖融化的间冰期)将同轻同位素含量增加( $\delta^{18}\text{O}$  的比值较低)相联系。目前,分析海底沉积物钻芯中的同位素  $\delta^{18}\text{O}$  的含量(比值)是推断古代地球气候状况及其变化的重要科学手段。

1.1.2 气候变化的阶段性

除了多时间尺度特征之外,阶段性是气候变化的又一特征。气候变化的阶段性同气候变化的时间尺度是紧密联系的,不同时间尺度的变化也就有不同的阶段性。1.1.1 节中我们曾

讨论了在过去 50 万年的时间里,冰期和间冰期有交替出现的现象,这是气候变化阶段性的明显特征。因为冰期的寒冷气候与间冰期较温暖的气候是两种差别较大的状况,也可以认为气候变化分别处于不同的阶段;在冰期阶段气温普遍偏低,而在间冰期阶段气温普遍偏高。同样,近千年来的气候变化也有其阶段性,在 1300—1800 年间的小冰期,气温长时间偏低,尽管其间气温还有相对较高或较低的时期,但整个时段的平均温度相当低。而在小冰期前后的一段相当长的时期里,平均温度却相当高,同小冰期相比无疑可视为另一个气候变化阶段。

图 1.1.4 是南北半球不同纬度带近百年来年平均地面气温变化的演变曲线。图 1.1.4a 所示的北半球三个纬度带的气温变化同图 1.1.1 给出的全球平均情况大致相似。尤其是在北半球的中高纬度地区,1925—1960 年期间气温明显偏高,而 1925 年之前的相当长时期里气温持续偏低。这同样清楚地反映了气候变化的阶段性,用数学语言讲,气候在这两个时期各处于不同的平衡态。

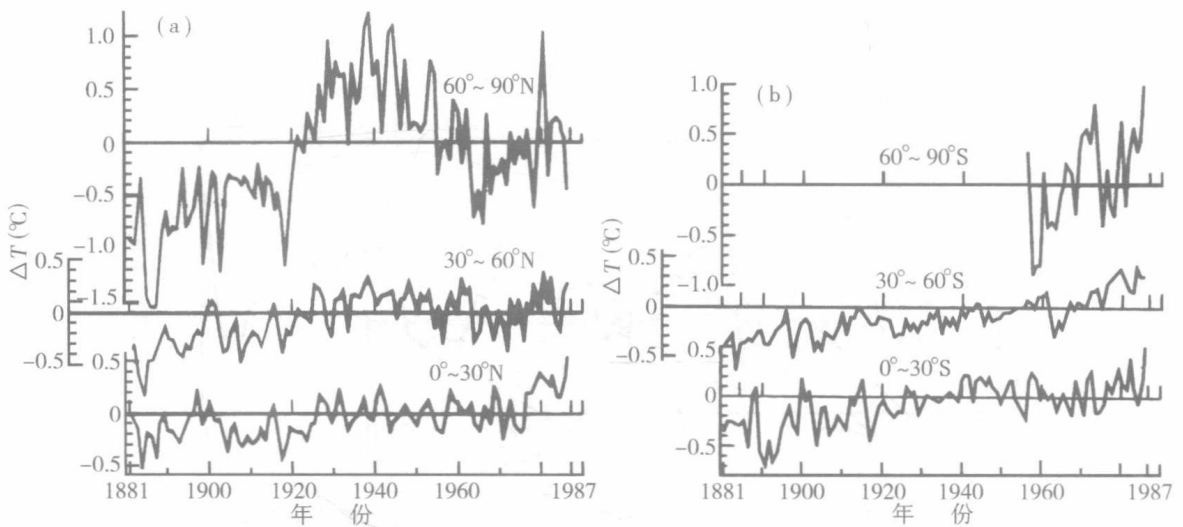


图 1.1.4 近 100 年来北半球(a)和南半球(b)三个纬度带平均地面气温变化( $\Delta T$ )的时间演变(引自 Vinnikov 等,1990)

从上面的讨论可以清楚地看到,全球尺度的气候变化具有阶段性特征。同样,局地区域的气候变化也同样有阶段性。另外,不仅气温的变化如此,其他气候因子的变化亦然。图 1.1.5 是中国华北地区 14 个测站的平均汛期(6—8 月)降水量距平的时间演变。显然,1953—1964 年是华北的多雨时段,而 1965—1975 年及 1980—1987 年均为华北的少雨时段。

气候变化的阶段性也是气候的振荡特征,但这种振荡并不像正弦曲线那样有固定的周期,而是因不同的时间尺度有变化的周期;它也不是总在某一平均值附近振荡,而是存在一定的趋势,并且对于某些气候因子(如气温),其趋势性尤为明显。在图 1.1.4 中,无论北半球还是南半球,各个纬度带的地面气温在近百年来均有极清楚的上升趋势。参照图 1.1.2,我们还可以认为自小冰期结束以来,全球气温有上升的趋势。对于这种全球增暖趋势,许多人认为是人类活动造成大气中  $\text{CO}_2$  含量增加的温室效应所引起的;也有一些人认为是气候超长期振荡的自然变化特征。这个问题的解答尚需进一步的深入研究,就已有的研究结果看,上述两种因素都有影响,温室效应可能加剧了气候自然变化的增温。



图 1.1.5 中国华北地区平均汛期(6—8月)降水量距平( $\Delta R$ )的变化(5年滑动平均结果)

### 1.1.3 气候突变特征

气候变化除多时间尺度特征和阶段性特征之外,突变也是其重要特征。尤其是从一个气候阶段变化到另一个气候阶段时,气候往往发生较为快速的剧烈变化,即突变。在图 1.1.3 中,冰期和间冰期之间的转换,尤其是由冰期向间冰期的变化有明显的突变特征。图 1.1.4 中  $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$  纬度带气温的变化更明显地表现了突变的特征,20 世纪 20 年代初,那里的温度急剧升高。

根据气候突变的情况,我们可以把气候突变归并为三种类型(图 1.1.6),即均值突变、变率突变和趋势突变。从一个气候基本状态(以某一平均值表示)向另一个气候基本状态的急剧变化,就是均值突变。这类突变相对较多,影响也较大。两个气候状态(阶段)的平均值并无明

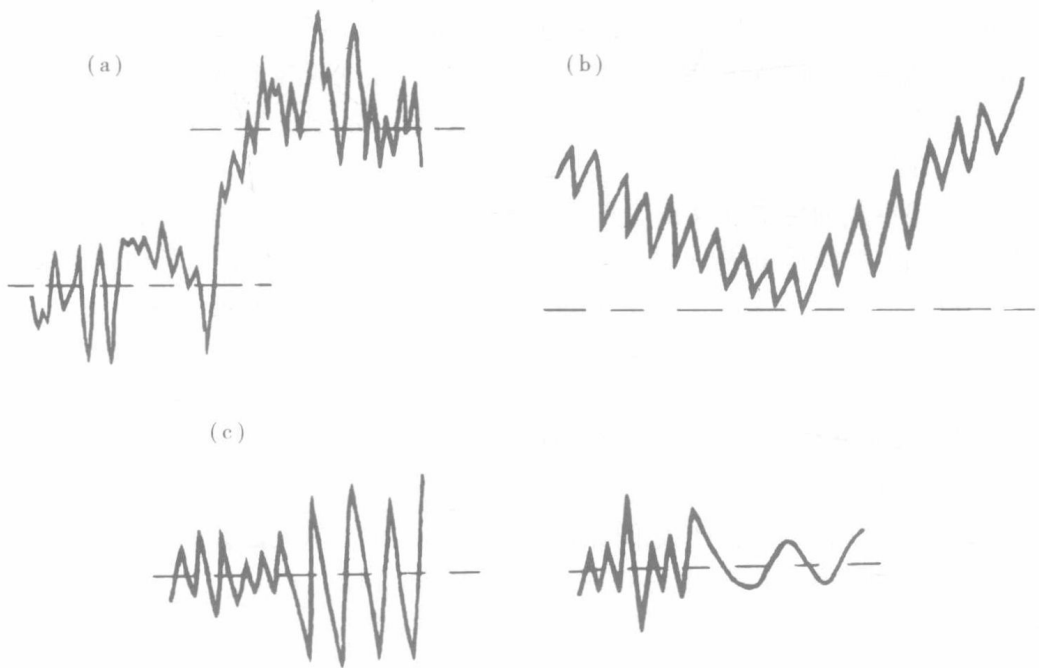


图 1.1.6 三类气候突变示意图

(a) 均值突变; (b) 趋势突变; (c) 变率突变

显差异,但其变率有极明显的不同,这样两类气候状态间的急剧变化,称为变率突变。变率突变包括两种情况,其一是振幅有明显差异的突变;其二是频率有明显差异的突变。两个气候阶段有完全相反的变化趋势,例如,某个气候阶段温度一致持续下降,其后一个气候阶段的温度一致持续上升,这样两个气候阶段的急剧转变,称为趋势突变。

气候变化是极其复杂的,气候突变也一样,这里我们归纳出的三种类型只是其最基本的特征。对实际资料的分析表明,气候变化往往会出现这三类突变现象,尤其是均值突变;但是,有时也可以看到几类突变同时综合发生的情况。

## 1.2 古气候及其变化

上一节在讨论气候变化的时间尺度时,我们已经指出气候变化有地质期时间尺度,表示万年的时间的气候振荡。它所涉及的是古气候状况,同地质时代有密切关系,也可以认为是地质代气候。

### 1.2.1 古气候的重建(现)

现在的气候状况及其变化可以通过气候观测的记录资料来表现,而古气候及其变化只有通过其他非记录手段间接地推断出来,这首先就有一个重现古气候状况及其变化的问题。在1.1节中已经简单介绍了根据海底沉积物的钻探,分析氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的比值,从而推算地球上冰期活动的结果,较好地反映了冰期活动的情况,也给出了古代冷暖气候变化的粗略图像。

古气候重建的另一种良好手段是花粉分析。我们知道,任何一类生物种群(动物或植物)的生存都对环境有一定的要求,那么某类生物种群的存在就意味着环境满足了该类生物种群的条件。如果我们有办法确定出古代的植物种群及其演变,也就可以间接地找到当时的环境条件(主要是气候条件)。

如何来重建古代的植物种群呢?分析植物花粉是很好的方法。因为花粉粒的外壁是由具有非凡抵抗力的有机物质组成的,在没有氧化作用的条件下它可以在沉积物中保存几百万年。这样,分析古代沉积物中的花粉,可以知道植物的种群及其演变,而植物种群及其变化又同气候及气候变化密切相关,最终也就可以重建古气候了。

当然,用现代植被同其生长的气候条件作为参照,从古代植物种群资料来得到古气候有这样几个假定条件:由花粉确定的古代植物种群同现代植物种群一样,对相应的气候条件充分适应;气候变化是造成花粉记录变化的主要原因;在一定时段,花粉型及其显示的气候状况是相对稳定的;气候变量同一组花粉型之间存在线性关系。上述条件在大多数情况下是可以得到满足的,从而使花粉分析方法在古气候研究中得到广泛应用。

作为一个例子,图1.2.1给出的是台湾中部( $23^{\circ}52'\text{N}$ ,  $120^{\circ}55'\text{E}$ )一个海拔745 m的湖泊钻芯中的花粉剖面,并绘出了重建的植被示意图。图中的年代是根据 $^{14}\text{C}$ 资料推断的,距今最长的时间超过5万年。因此,图1.2.1给出了最近一次冰期以来植被的变化和气候情况。可以看到,在花粉带的T时段,寒带植物成分明显偏大,暖温带植物成分少,且没有亚热带植物

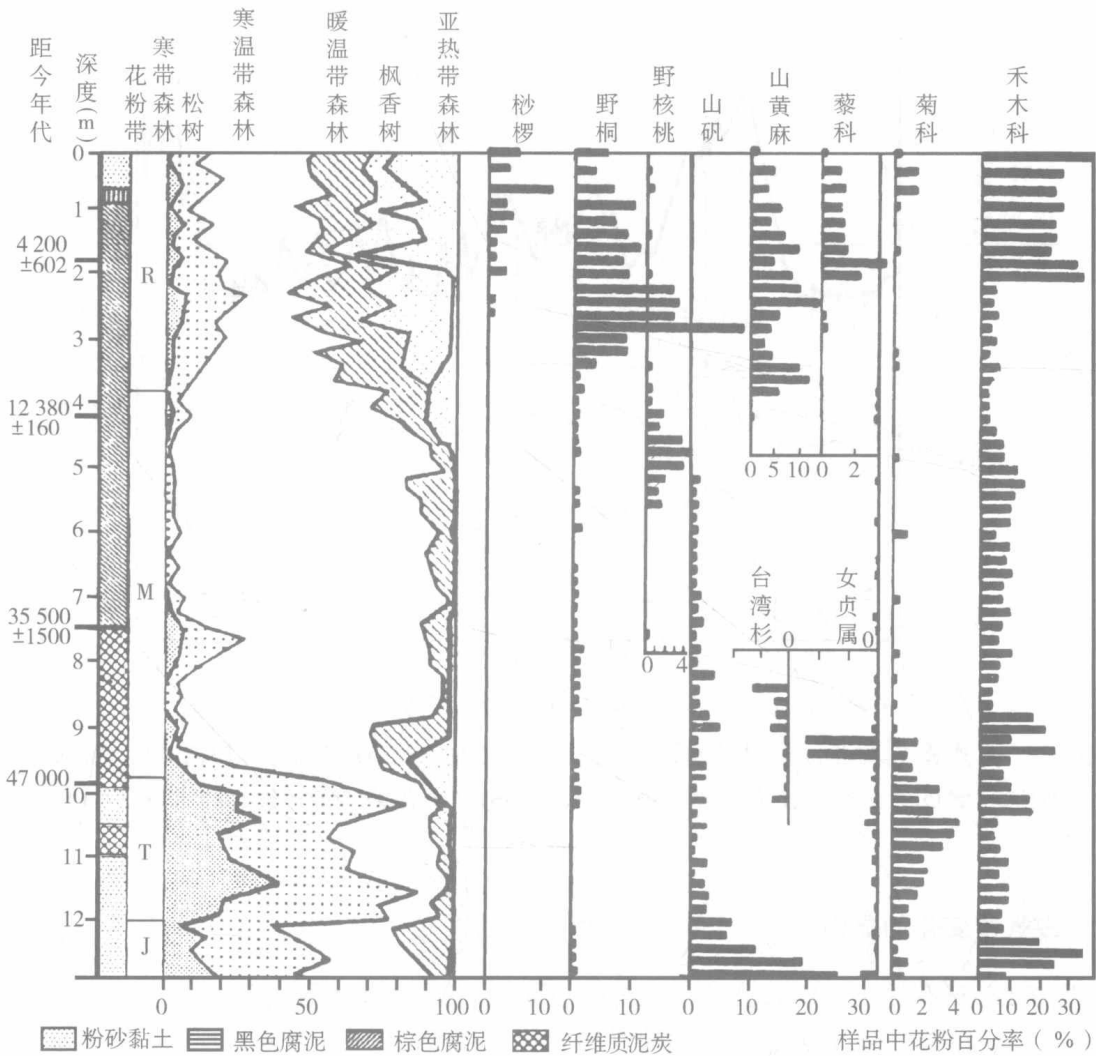


图 1.2.1 台湾中部日月潭湖泊钻芯花粉图(引自 Tsukada,1966)

成分,可见当时温度偏低;在花粉带的 M 时段,寒温带植物成分扩展明显,温度也偏低,而且在大约距今 35 000 年,寒带植物成分扩展,表明温度相当低;在 M 和 T 时段的交界期,不仅暖温带植物成分增多,还出现了亚热带植物成分,可见那时温带植物成分和亚热带植物成分增多,而且草本植物剧增,既反映了气候较温暖,也表明农业活动有所加强。

对古老的冰原进行取样,分析其冰芯样品中的放射性同位素氙的含量,同样可以得到古代大气温度的信息。图 1.2.2 分别给出了根据南极冰芯得到的过去 16 万年以来的大气温度变化、由太平洋深部沉积物钻芯(V<sub>19~30</sub>)得到的氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的比值以及根据新几内亚岛海岸线变动所反映的海平面高度的变化。可以看到,气温的升高(降低)同  $\delta^{18}\text{O}$  比值的减小(增加)以及海平面的上升(下降)有相当好的对应关系。

另外,分析岩石标本,尤其是分析化石标本,还可以推断出远古时代冰期活动的情况,时间可达几十万或几百万年前。甚至地质学家已初步确定出在前寒武纪存在四个大冰期,即大约 660 百万~680 百万年前的 Valangin 冰期、大约 750 百万年前的 Sturtion 冰期、大约 950 百万年前的 Gnejsa 冰期和大约 2 300 百万年前的 Huronian 冰期。