


$$\frac{DA}{Dt} + \nabla \cdot \mathcal{B} = S$$

气候动力学 引论 | 第2版

李崇银 编著

气象出版社

本书出版得到国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”的部分资助

气候动力学引论

(第二版)

李崇银 编著

1775

气象出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气候动力学引论/李崇银编著. - 2 版. - 北京: 气象出版社, 2000. 12
ISBN 7-5029-3008-6

I. 气… II. 李… III. ①气候学-研究 ②空气动力学-研究 IV. P46
中国版本图书馆数据核字 (2000) 第 58347 号

气象出版社出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码: 100081)

责任编辑: 郭彩丽 终审: 周诗健

封面设计: 王 伟 责任技编: 郝 平 责任校对: 张清芬

*

北京科技印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 34 字数: 824 千字

2000 年 12 月第 2 版 2000 年 12 月第 2 次印刷

印数: 1501-2500 定价: 68.00 元

再版前言

《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,包括作者和他的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

10-2-10

原版前言

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。国外自本世纪 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 章是绪论,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 章里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,难免有不妥或错误之处,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

前言

图表索引	(xv)
1 绪论	(1)
1.1 气候变化	(1)
1.1.1 气候变化及其时间尺度	
1.1.2 气候变化的阶段性	
1.1.3 气候突变特征	
1.2 古气候及其变化	(6)
1.2.1 古气候的重建(现)	
1.2.2 古气候变化的原因	
1.3 气候与人类社会	(11)
1.3.1 粮食生产与气候	
1.3.2 水资源与气候	
1.3.3 能源与气候	
1.4 当代气候研究	(18)
1.4.1 当代气候学研究的基本特点	
1.4.2 三个时间尺度的气候变化问题	
1.4.3 气候变化及可预报性研究(CLIVAR)	
1.4.4 观测要求	
参考文献	(24)
2 气候系统	(26)
2.1 大气	(27)
2.1.1 大气环流	
2.1.2 大气成分	
2.1.3 大气与外界的相互作用	
2.2 大气运动基本方程组	(32)
2.2.1 基本方程组及其滤波	
2.2.2 角动量和能量平衡方程	
2.2.3 时间平均和纬向平均的气候方程	
2.2.4 全球平均气候方程	
2.3 海洋	(37)
2.3.1 海洋的基本特性及影响	
2.3.2 海气耦合相互作用	
2.3.3 “海洋气候”	
2.4 陆地和冰雪圈	(42)
2.4.1 冰雪的作用	
2.4.2 植被的作用	

2.5	水分及其循环	(46)
2.5.1	蒸发	
2.5.2	径流	
2.5.3	人类活动对水循环的影响	
2.6	太阳活动	(52)
2.7	火山爆发	(57)
2.8	生态系统	(62)
	参考文献	(65)
3	大气辐射过程	(68)
3.1	太阳短波辐射	(68)
3.1.1	太阳常数	
3.1.2	太阳短波辐射的变化	
3.2	大气对太阳短波辐射的吸收	(73)
3.2.1	大气的吸收和发射概念	
3.2.2	臭氧的吸收	
3.2.3	水汽的吸收	
3.2.4	太阳短波辐射加热率	
3.3	地表辐射特性	(80)
3.3.1	地表反照率	
3.3.2	云的反照率	
3.3.3	地表的比辐射率和净辐射量	
3.4	晴空大气红外辐射传输	(88)
3.4.1	大气红外辐射特性	
3.4.2	谱带吸收模式	
3.4.3	辐射传输方程	
3.4.4	红外辐射冷却率	
3.5	辐射气候	(94)
3.5.1	地气系统的反照率	
3.5.2	地气系统的射出长波辐射(OLR)	
3.5.3	地气系统的辐射收支	
3.6	云-辐射相互作用	(100)
3.6.1	观测分析	
3.6.2	理论研究结果	
	参考文献	(105)
4	大气季节内振荡的动力学	(106)
4.1	大气中的 30~60 d 低频振荡	(106)
4.1.1	热带大气的 30~60 d 振荡	
4.1.2	中高纬度大气的 30~60 d 振荡	
4.1.3	30~60 d 大气振荡的全球特征	
4.2	热带大气低频(30~60 d)振荡动力学	(117)
4.2.1	南亚季风槽脊 30~60 d 振荡的动力学	

4.2.2	CISK-Kelvin 波理论	
4.2.3	CISK-Rossby 波理论	
4.2.4	蒸发-风反馈机制	
4.3	大气基本态的不稳定激发	(136)
4.3.1	三维基本气流的不稳定	
4.3.2	地形强迫 Rossby 波的不稳定	
4.3.3	基本气候态的影响	
4.4	大气的低频响应	(149)
4.5	大气非线性过程	(157)
	参考文献	(163)
5	大气环流持续异常(一)——阻塞形势的动力学机理	(166)
5.1	多平衡态理论	(166)
5.2	共振理论	(171)
5.2.1	外源强迫下的线性共振	
5.2.2	非线性共振	
5.3	孤立波理论	(178)
5.4	天气尺度涡旋的激发	(182)
5.5	偶极子理论	(188)
5.6	包络 Rossby 孤立子理论	(193)
	参考文献	(196)
6	大气环流持续异常(二)——遥相关的动力学机理	(197)
6.1	大气环流的遥相关	(197)
6.1.1	地面气压场的遥相关	
6.1.2	对流层大气环流的遥相关	
6.1.3	遥相关指数	
6.1.4	夏半年大气环流的遥相关	
6.1.5	南半球大气环流的遥相关	
6.2	大气对外源强迫的遥响应	(208)
6.2.1	ENSO 与 PNA 型遥相关	
6.2.2	地形和定常热源的强迫响应	
6.2.3	气候基本态的重要性	
6.3	能量频散和大圆理论	(213)
6.3.1	长波能量频散概念	
6.3.2	大圆理论	
6.4	时间平均基本气流的不稳定	(219)
6.5	行星波的能量通量——EP 通量	(225)
6.5.1	正压大气情况	
6.5.2	斜压大气情况	
6.5.3	三维球面大气情况	
	参考文献	(231)

7 海气相互作用	(233)
7.1 大尺度海气相互作用的基本特征	(233)
7.1.1 海洋对大气的热力作用	
7.1.2 风应力强迫	
7.1.3 海洋混合层	
7.2 ENSO	(240)
7.2.1 厄尔尼诺	
7.2.2 南方涛动	
7.2.3 ENSO 循环的动力学机制	
7.3 ENSO 对大气环流和气候的影响	(246)
7.3.1 ENSO 与大气环流异常	
7.3.2 ENSO 与全球大范围气候异常	
7.3.3 ENSO 对中国夏季气候异常的影响	
7.4 东亚冬季风异常与 ENSO	(259)
7.4.1 ENSO 对东亚冬季风的影响	
7.4.2 东亚冬季风异常与 El Nino 的发生	
7.4.3 东亚大槽的能量频散	
7.4.4 El Nino(La Nina)的合成分析	
7.4.5 强异常东亚冬季风激发 El Nino 的 CGCM 模拟	
7.5 ENSO 的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常	(274)
7.5.1 1997~1998 年 ENSO	
7.5.2 历次 ENSO 的分析	
7.5.3 海气耦合模式的模拟结果	
7.5.4 赤道西风异常与暖池次表层海温距平的东传	
7.6 El Nino 与热带大气季节内振荡	(287)
7.6.1 El Nino 对热带大气季节内振荡的影响	
7.6.2 热带大气季节内振荡异常对 El Nino 事件的可能激发	
7.6.3 热带大气季节内振荡激发 El Nino 的机制	
7.7 海气耦合波动力学	(298)
7.7.1 耦合 Kelvin 波	
7.7.2 耦合 Rossby 波	
7.7.3 平流波和涌升波	
参考文献	(308)
8 陆气相互作用	(311)
8.1 生物-地球物理反馈	(311)
8.2 土壤温度和湿度的反馈	(318)
8.2.1 土壤温度的影响	
8.2.2 土壤湿度的影响	
8.3 植被	(324)
8.3.1 植被反照率	
8.3.2 植被蒸腾	

8.3.3 砍伐热带森林对气候的影响	
8.4 陆气相互作用模式	(330)
8.4.1 生物圈-大气传输方案(BATS)	
8.4.2 简单生物圈模式(SiB)	
参考文献	(336)
9 气候数值模拟(一)——大气环流模式(GCM)	(338)
9.1 模式基本结构	(338)
9.1.1 模式方程组	
9.1.2 垂直分层	
9.1.3 水平离散化——格点模式	
9.1.4 谱模式	
9.2 主要物理过程及其参数化	(348)
9.2.1 辐射强迫及反馈	
9.2.2 次网格尺度过程及其参数化	
9.3 气候状态的一些数值模拟结果	(355)
9.3.1 海平面气压场	
9.3.2 风场	
9.3.3 温度场	
9.3.4 降水量	
9.3.5 季节转换	
9.4 海气耦合模式(CGCM)	(365)
9.4.1 大洋环流模式简介	
9.4.2 海气耦合问题	
9.5 月—季气候的数值预报试验	(377)
9.5.1 月预报试验	
9.5.2 IAP-CGCM 的跨季度气候距平数值预测试验	
参考文献	(382)
10 气候数值模拟(二)——简化模式	(386)
10.1 能量平衡模式(EBM)	(386)
10.1.1 零维能量平衡模式	
10.1.2 一维能量平衡模式	
10.1.3 气候系统的参数化	
10.2 盒型模式	(390)
10.2.1 海洋-大气盒型模式	
10.2.2 耦合的大气-陆地-海洋盒型模式	
10.3 辐射-对流模式(RCM)	(395)
10.3.1 辐射-对流模式的概念和基本结构	
10.3.2 辐射过程	
10.3.3 对流调整	
10.3.4 模式敏感性问题	
10.4 辐射-对流模式的发展	(401)

10.4.1	云量和云高的预报	
10.4.2	水汽输送	
10.5	二维统计动力模式(SDM)	(404)
10.5.1	二维统计动力模式的基本方程	
10.5.2	二维统计动力模式的基本物理过程	
10.5.3	二维统计动力模式的应用	
10.6	滤波模式	(414)
10.6.1	基本方程	
10.6.2	预报试验	
	参考文献	(419)
11	十年及年代际气候变化	(421)
11.1	科学背景	(421)
11.2	十年及年代际气候变化的特征型	(422)
11.2.1	大气中的十年及年代际尺度气候型	
11.2.2	气候系统耦合型	
11.3	大气环流年代际变化特征及机制	(430)
11.3.1	大气环流的年代际变化	
11.3.2	大气环流十年及年代际变化的机制	
11.4	大洋状况的年代际变化特征及机制	(434)
11.4.1	海洋在年代际气候变化中的作用	
11.4.2	海洋年代际时间尺度变化	
11.4.3	海洋十年及年代际时间尺度变化的机制	
11.5	中国气候的十年及年代际变化	(441)
11.5.1	中国气候突变	
11.5.2	温度和降水的十年及年代际变化	
11.6	尚需特别注意研究的几个问题	(446)
	参考文献	(447)
12	气候的可预报性问题	(449)
12.1	大气运动的可预报性	(449)
12.1.1	可预报性与运动的周期性	
12.1.2	可预报性与空间尺度	
12.1.3	可预报性的若干提法	
12.2	气候的可预报性	(454)
12.2.1	第一类气候可预报性	
12.2.2	第二类气候可预报性	
12.3	非线性动力系统与可预报性	(460)
12.3.1	非线性动力系统的基本性质	
12.3.2	气候变化的非线性特征	
12.3.3	ENSO的可预报性探索	
	参考文献	(471)

13 人类活动与气候变化.....	(473)
13.1 温室气体和气溶胶.....	(473)
13.1.1 大气中的 CO_2	
13.1.2 大气中的 CH_4	
13.1.3 大气中的卤烃	
13.1.4 大气中的 N_2O	
13.1.5 气溶胶	
13.2 大气中 CO_2 浓度增加的气候效应	(482)
13.2.1 辐射强迫	
13.2.2 地气系统的温度变化	
13.2.3 CO_2 温室效应的影响	
13.3 其他温室气体的气候效应.....	(491)
13.4 “核冬天”.....	(494)
13.5 大气中的臭氧及臭氧洞.....	(502)
13.5.1 大气臭氧及其分布	
13.5.2 臭氧量的变化	
13.5.3 臭氧洞	
参考文献.....	(510)
附录:本书部分英文缩写	(514)

图表索引

- 图 1.1.1 1880 年以来北半球年平均温度的变化, 2
- 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, 3
- 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积量的变化, 3
- 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的时间演变, 4
- 图 1.1.5 中国华北地区平均汛期(6~8 月)降水量距平的变化(5 年滑动平均结果), 5
- 图 1.1.6 三类气候突变示意图((a)均值突变;(b)变率突变;(c)趋势突变), 6
- 图 1.2.1 台湾中部日月潭湖泊钻芯花粉图, 7
- 图 1.2.2 距今 16 万年以来,由南极冰芯推断的大气温度变化(a)、由太平洋深部沉积物推估的氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)含量的比值(b)与新几内亚岛海岸的海平面高度(c)的比较, 8
- 表 1.2.1 计算日射能量的轨道参数, 9
- 图 1.2.3 轨道参数的不同所引起的入射太阳辐射同现在的偏差的时间-纬度剖面, 9
- 图 1.2.4 数值模拟得到的 12.5 万年前与 11.5 万年前之间 1 月(a)及 7 月(b)地面气温之差的全球分布, 10
- 图 1.2.5 根据南极东方站[俄]冰核分析得到的 16 万年以来大气中 CO_2 浓度及气温变化的时间演变, 11
- 图 1.3.1 美国密苏里州平均玉米产量的时间演变, 12
- 图 1.3.2 美国五个主要产麦州的夏季平均雨量(a)和夏季平均温度(b)的时间变化, 13
- 图 1.3.3 太湖平原水稻年景(a)同 6~9 月雨量(b)、7 月气温(c)以及 1 月亚欧大陆与澳洲北部的气压差(d)之间的演变关系, 13
- 图 1.3.4 日本东北地区水稻产量与 7~8 月气温的关系, 14
- 图 1.3.5 平均年降水量的全球分布, 15
- 图 1.3.6 年降水量变率的全球分布, 15
- 图 1.3.7 美国几个地区的水平衡((a)西雅图;(b)马斯基根;(c)埃尔帕索), 16
- 图 1.3.8 雨季和旱季地下水水位变化的示意图((a)雨季情况;(b)旱季情况), 17
- 图 1.3.9 美国各州所需的平均年加热量“ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ”, 17
- 图 2.1.1 气候系统示意图, 26
- 图 2.1.2 年平均大气系统的能量收入 E_0 和向北能量输送 E_t 的纬度分布, 27
- 图 2.1.3 由 ECMWF 资料计算的月平均纬向平均温度的分布, 28
- 图 2.1.4 1 月(a)和 7 月(b)纬向平均的纬向风分布, 29
- 图 2.1.5 平均经圈环流示意图, 29
- 图 2.3.1 坎顿岛地区气温、海温和降水量的时间演变, 39
- 图 2.3.2 潜热通量和风应力的全球分布((a)1 月份潜热通量;(b)7 月份潜热通量;(c)1 月份风应力;(d)7 月份风应力), 40
- 图 2.3.3 赤道太平洋增暖期(1972 年 El Nino)和冷水期(1973 年 La Nina)的海表水温距平, 41
- 图 2.3.4 O-A 模式和 S-A 模式试验得到的纬向平均大气温差的纬度-高度分布, 42
- 图 2.4.1 陆面状况与大气环流(气候)变化间相互作用示意图, 43
- 图 2.4.2 大气-海冰-海洋相互影响示意图, 43
- 图 2.4.3 7 个月滑动平均的北半球地面气温下降和冰雪覆盖面积变化间的关系, 44
- 图 2.4.4 模拟的 7 月份全球平均纬向动能和涡旋动能, 45
- 图 2.4.5 1997 年(多雪年之后)与 1978 年(少雪年之后)的 7 月份欧亚大陆上空 500 hPa 和 1 000 hPa 之间厚度差的分布, 45
- 图 2.4.6 呼伦贝尔草原开垦地和未开垦地之间近

- 地面大气和地表面状况的比较, 46
- 图 2.5.1 气候系统中水循环示意图, 47
- 表 2.5.1 降水资料的世界记录, 47
- 图 2.5.2 平均年蒸发量的全球分布, 49
- 图 2.5.3 纬向平均的湿度通量分布, 50
- 图 2.5.4 在亚砂土上渗透率随时间的变化, 51
- 图 2.6.1 1610~1979 年间的年平均太阳黑子数的变化, 52
- 图 2.6.2 由放射性同位素 ^{14}C 推算出的过去近千年的太阳黑子指数, 53
- 图 2.6.3 太阳黑子全影与半影比率同北半球地面气温异常的关系, 54
- 图 2.6.4 英国的大气闪电次数与太阳黑子数的关系, 54
- 图 2.6.5 Nimbus-4 号卫星测量的南半球中纬度地区 2 hPa 上春季 O_3 的混合比及太阳辐射加热的经度变化, 55
- 图 2.6.6 每年的 10.7 cm 波长的太阳辐射通量与三个北美站的 QBO 西风年 1~2 月的海平面气压的关系((a)得梅因;(b)帕斯;(c)雷索卢特), 56
- 图 2.6.7 在 QBO 西风年的 1~2 月, 10.7 cm 波长的太阳辐射通量与(70°N, 100°W)和(20°N, 60°W)两地的气压差以及查尔斯顿的地面气温间的关系, 56
- 图 2.7.1 1982 年在加米施-帕滕基兴[德]观测到的埃尔奇冲火山爆发形成的气溶胶层, 57
- 表 2.7.1 圣海伦火山爆发(1980)喷射物的组成, 58
- 表 2.7.2 平流层气溶胶的光学特性, 58
- 图 2.7.2 埃尔奇冲火山爆发后的平流层气溶胶消光系数廓线, 59
- 图 2.7.3 北半球气温异常与火山爆发的关系, 59
- 图 2.7.4 热带平流层大气温度距平的时间变化, 60
- 图 2.7.5 控制试验和“火山”试验中半球平均地面温度的时间变化, 61
- 图 2.7.6 控制试验和“火山”试验得到的纬向平均地面温度的时间变化, 61
- 图 2.7.7 能量平衡计算得到的埃尔奇冲火山爆发后地面温度的变化情况, 61
- 图 2.8.1 陆上生态系统示意图, 62
- 图 2.8.2 联系陆上生态系统的几种主要过程, 63
- 图 2.8.3 植被种群分布与年平均降水量和年平均温度的关系, 63
- 图 2.8.4 植被对土壤湿度的影响, 64
- 图 2.8.5 生态系统中氧循环示意图, 65
- 表 3.1.1 太阳常数, 69
- 表 3.1.2 太阳辐射照度随波长的变化, 70
- 图 3.1.1 Wolf 相对太阳黑子数与太阳常数的关系, 71
- 图 3.1.2 太阳天顶角、太阳倾角与地理纬度、时角之间的关系, 72
- 图 3.1.3 大气顶日射的纬度分布及年变化, 72
- 图 3.2.1 大气的吸收光谱特性, 74
- 图 3.2.2 太阳短波辐射通量被臭氧吸收的百分比与臭氧含量的关系, 76
- 图 3.2.3 气压订正对晴空大气加热率的影响, 77
- 表 3.2.1 水汽和 CO_2 吸收带的经验常数, 79
- 图 3.2.4 太阳短波辐射通量示意图, 79
- 图 3.2.5 太阳辐射加热率廓线((a) $\alpha_s = 0.15$, $\mu_0 = \cos\theta = 1.0$;(b)热带晴空大气), 80
- 图 3.3.1 不同太阳高度角(r)时不同自然下垫面的光谱反照率, 81
- 表 3.3.1 不同植被的反照率, 82
- 表 3.3.2 土壤反照率, 82
- 表 3.3.3 北极海冰反照率, 82
- 表 3.3.4 在北极第 4、6、7 漂浮站测得的雪面反照率, 83
- 表 3.3.5 在晴空条件下, 不同纬度处月平均水面反照率的年变化, 83
- 图 3.3.2 若干种地表的反照率与太阳高度角的关系, 84
- 表 3.3.6 由卫星资料得到的地表反照率, 84
- 表 3.3.7 各种下垫面情况下低云的反照率, 85
- 表 3.3.8 层云和层积云的反照率与太阳高度角、云的含水量及云厚的关系, 85
- 表 3.3.9 各类云(云盖面超过 80%)的平均反照率, 86
- 表 3.3.10 不同物质表面在大气窗区的比辐射率, 86
- 表 3.4.1 大气中的主要红外吸收气体及其吸收带, 88
- 表 3.4.2 红外区域的一些谱带参数, 91
- 图 3.4.1 晴空热带大气红外加热(冷却)率, 94

- 图 3.5.1 年平均行星反照率的全球分布, 95
- 表 3.5.1 地气系统反照率的气球测量结果, 95
- 图 3.5.2 地气系统射出长波辐射的纬度分布, 96
- 图 3.5.3 地气系统射出长波辐射的全球分布, 96
- 表 3.5.2 地气系统射出长波辐射, 97
- 图 3.5.4 地气系统平均行星反照率、吸收太阳辐射和射出长波辐射的经向分布, 98
- 表 3.5.3 不同纬带地气系统辐射收支及其分量的年平均值, 98
- 图 3.5.5 地气系统年平均辐射收支的全球分布, 99
- 图 3.5.6 地气系统辐射收支在春季、夏季、秋季和冬季的平均经向分布, 99
- 图 3.6.1 1974~1977 年间各年夏季射出长波辐射量的距平分布, 101
- 图 3.6.2 气候-云相互作用示意图, 102
- 图 3.6.3 不同地区夏季的加热廓线((a)沙特阿拉伯地区;(b)阿拉伯海地区;(c)孟加拉湾地区), 102
- 图 3.6.4 云层对太阳短波辐射加热率的影响, 103
- 图 3.6.5 低云、高云和中云云量对地面平衡温度的影响, 104
- 图 3.6.6 云层对 CO_2 含量加倍引起的增温的影响, 104
- 图 3.6.7 纬向平均的云-辐射强迫, 105
- 图 4.1.1 1981 年 1 月(a)以及 1983 年 1 月(b)和 7 月(c)平均的 500 hPa 上热带大气 30~60 d 振荡的扰动动能的经度分布, 107
- 图 4.1.2 30~40 d 大气振荡的波谱振幅分布, 108
- 图 4.1.3 200 hPa 上 $5^\circ\text{S}\sim 5^\circ\text{N}$ 纬带平均的 30~60 d 带通滤波的纬向风在 3 个不同振荡位相的经度分布, 108
- 图 4.1.4 赤道地区 30~60 d 大气振荡的纬向风、温度和垂直速度的高度-经度剖面, 109
- 图 4.1.5 200 hPa 上 45 d 带通滤波纬向风的 1 波扰动的振荡阶段-经度剖面, 110
- 图 4.1.6 200 hPa 上 30~60 d 带通滤波纬向风在不同振荡位相沿 5°S 的经度分布, 110
- 图 4.1.7 30~60 d 带通滤波的 500 hPa 纬向风 8 个不同振荡位相的沿 80°E 的纬度分布, 111
- 图 4.1.8 同图 4.1.7, 但为沿 130°E 的情况, 111
- 图 4.1.9 北半球冬半年中高纬度地区 30~60 d 带通滤波的位势高度在某振荡位相时刻的经度分布, 112
- 图 4.1.10 同图 4.1.9, 但为夏半年的情况, 112
- 图 4.1.11 $55^\circ\sim 65^\circ\text{N}$ 的 30~60 d 振荡位势高度场扰动的纬度分布及演变(冬半年)情况, 113
- 图 4.1.12 冬半年 200 hPa 和 850 hPa 上 30~60 d 振荡的纬向风沿 50°N 的经度分布及演变, 113
- 图 4.1.13 200 hPa 上 30~60 d 带通滤波的纬向风平方的时间演变((a)($30^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{E}\sim 180^\circ$)地区;(b)($10^\circ\text{S}\sim 10^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E}\sim 180^\circ$)地区), 114
- 图 4.1.14 1 月份和 7 月份 500 hPa 纬向平均扰动动能的分布, 114
- 图 4.1.15 全球主要低频遥相关型(波列)(计算相关系数参考点是(a)(140°E , 20°N);(b)(160°W , 5°N);(c)(70°W , 45°N)), 115
- 图 4.1.16 500 hPa 上 30~60 d 振荡的位势高度场的点相关系数分布((a)参考点在(115°E , 45°N)的 3 d 滞后相关;(b)参考点在(115°E , 45°N)的 6 d 滞后相关;(c)参考点在(150°W , 40°N)的 3 d 滞后相关;(d)参考点在(150°W , 40°N)的 6 d 滞后相关), 116
- 图 4.2.1 CISK 振荡型不稳定波的温度和风场的垂直结构特征, 117
- 图 4.2.2 两层模式分层, 121
- 图 4.2.3 3 层模式得到的 CISK-Kelvin 波的位相速度的实部 C_r 和虚部 C_i , 122
- 图 4.2.4 有垂直模相互作用时 CISK-Kelvin 波与加热廓线的关系((a) $\xi_{200} = 0$ 时 CISK-Kelvin 波的 C_r ;(b) $\xi_{200} = 0$ 时 CISK-Kelvin 波的 C_i ;(c) $\xi_{200} = 1$ 时 CISK-Kelvin 波的 C_r), 123
- 图 4.2.5 CISK-Kelvin 波的垂直环流剖面及自由 Kelvin 波的垂直环流剖面((a)快速 CISK 模;(b)慢速 CISK 模;(c)静止 CISK 模;(d)自由 Kelvin 波), 124
- 图 4.2.6 沿赤道 300 hPa 纬向风的时间-经度剖面((a)无 CISK 型内部加热情况;(b)有

- CISK 型内部加热情况;(c)同(b),但 SST 有纬向 1 波分布), 125
- 图 4.2.7** 不同对流凝结加热强度下, CISK-Rossby 波纬向移速与其经向尺度的关系, 128
- 图 4.2.8** CISK-Rossby 波的东西向移速随加热强度和纬度的变化((a)经向尺度为 4 000 km;(b)经向尺度为 8 000 km;(c)经向尺度为 20 000 km), 128
- 图 4.2.9** 赤道附近地区 CISK-Kelvin 波($m=0$)和 CISK-Rossby 波($m=1$)的经向结构, 131
- 图 4.3.1** 1979 年 1 月份平均全球 300 hPa 纬向风分布, 139
- 图 4.3.2** 同图 4.3.1, 但为 700 hPa 纬向风, 139
- 图 4.3.3** 1979 年 1 月份平均全球 700 hPa 饱和比湿分布, 140
- 图 4.3.4** 对应于阻塞形势的扰动特征模的平均流函数的北半球分布, 140
- 图 4.3.5** 对应于季节内振荡的扰动特征模的平均流函数的全球分布, 141
- 图 4.3.6** 对应于季节内振荡的扰动特征模的速度势的全球分布, 141
- 表 4.3.1** 地形强迫 Rossby 波的周期随纬度和波数的变化, 144
- 图 4.3.7** 在 60°N 处不同纬向波数的地形 Rossby 波的周期随基本气流的变化, 144
- 图 4.3.8** 冬季黑潮海温异常的遥响应试验中两个初始场的 500 hPa 高度差, 146
- 图 4.3.9** 在不同初始场情况下, 冬季黑潮海温异常所激发的热带大气(6°S~6°N)400 hPa 纬向风遥响应的 30~60 d 带通滤波值的时间-经度剖面, 146
- 图 4.3.10** 34°~65°N 基本西风廓线的 4 种分布, 148
- 图 4.3.11** 4 种不同基本西风分布情况下的不稳定模(扰动)的频谱分布, 149
- 图 4.4.1** 赤道东太平洋高海温期间对流层中上部位势高度异常的全球分布示意图, 150
- 图 4.4.2** 异常海温强迫场的分布, 150
- 图 4.4.3** 400 hPa 上在 6°S~6°N 纬带的大气响应纬向风的时间-经度剖面((a)未滤波的情况;(b)30~60 d 带通滤波后的结果), 152
- 图 4.4.4** 500 hPa 位势高度场响应沿 66°N 纬圈的时间-经度剖面((a)未滤波的情况;(b)30~60 d 带通滤波后的结果), 153
- 图 4.4.5** 30~60 d 带通滤波的 1 月份 500 hPa 位势高度和海平面气压响应场沿 6°S 的经度分布, 154
- 图 4.4.6** 同图 4.4.5, 但为沿 42°S 的经度分布, 154
- 图 4.4.7** 热带大气对东亚寒潮异常的纬向风响应的时-纬度剖面((a)140°~160°E;(b)0°~20°E), 155
- 图 4.4.8** 东亚寒潮异常在澳大利亚北部地区所引起的气象要素的变化((a)(10°~26°S, 125°~155°E)地区的降水距平;(b)(10°~14°S, 135°~145°E)地区的纬向风), 155
- 图 4.4.9** 东亚寒潮异常所激发的 500 hPa 位势高度响应在第 1 候的平均形势, 156
- 图 4.4.10** 黑潮地区冬季 SST 异常所引起的西太平洋地区 850 hPa 响应场扰动动能的时间演变((a)(30°N, 125°~130°E)地区平均;(b)(18°~22°N, 125°~130°E)地区平均;(c)(2°N, 135°~140°E)地区平均), 157
- 图 4.5.1** 北半球冬季由于瞬变涡旋的水平热量和动量通量施加于 300~700 hPa 时间平均气流的无辐散强迫流函数及北半球冬季 300~700 hPa 时间平均气流的流函数, 161
- 图 4.5.2** 在外强迫源 $f = f_A \cos \Omega t$, $f_A = 0.08$, $\Omega = 0.4$ (相当于 18 d 周期)情况下, 波动振幅 A 和 B 随时间的演变, 以及在 (Z, Z) 平面上的相轨迹, 162
- 图 5.1.1** 有强迫耗散及地形作用情况下, 一个 3 波准地转系统中的多平衡态, 168
- 图 5.1.2** 对应于图 5.1.1 中 Z 平衡态的流型及 R 平衡态的流型, 168
- 图 5.1.3** 在不同耗散参数 α 的情况下, 定常解与其位能 E 和 Rossby 参数 Ro 的关系((a) $\alpha^{-1} = 1.1$ d;(b) $\alpha^{-1} = 3.3$ d;(c) $\alpha^{-1} = 5.0$ d;(d) $\alpha^{-1} = 6.7$ d), 170