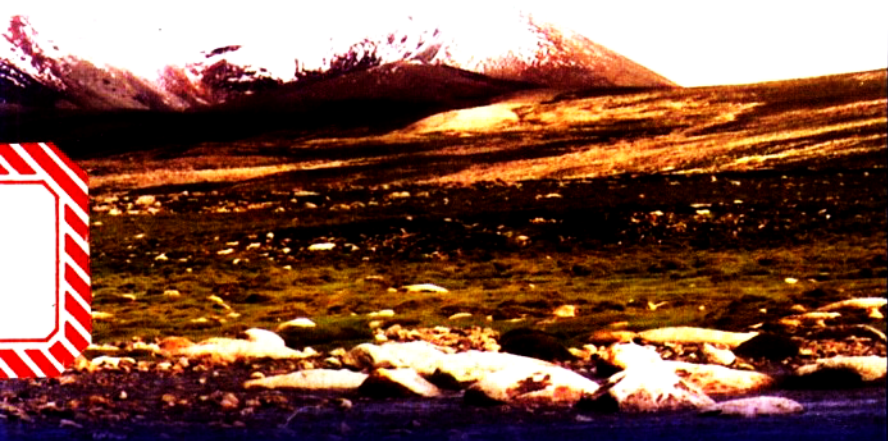


DYNAMIC METEOROLOGY OF THE TIBETAN PLATEAU

青藏高原 动力气象学

李国平 编著



气象出版社

青藏高原动力气象学

李国平 编著

气象出版社

内容简介

本书简明、系统地总结了青藏高原动力气象学(大气动力学以及与动力学有关的大气热力学)研究的基本问题以及国内外学者对于这些问题的最新研究成果,着重介绍青藏高原大气动力学研究的方法及进展。全书共分八章,内容包括青藏高原的气候特征、青藏高原主要的天气系统、青藏高原大气动力学基础、青藏高原的热力作用、青藏高原的动力作用、青藏高原大气运动的适应理论、青藏高原大气运动的波动理论等。

本书可作为大气科学专业研究生课程和大学高年级学生选修课的教科书或参考书,也可供气象或其它相关专业的科研、教学和业务人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原动力气象学/李国平编著. —北京:气象出版社, 2002.4

ISBN 7-5029-3331-X

I. 青… II. 李… III. 青藏高原—理论气象学 IV. P43

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第014386号

青藏高原动力气象学

李国平 编著

责任编辑:李太宇 终审:周诗健

封面设计:张建永 责任校对:李平

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街46号 邮编100081)

北京市兴怀印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/32 印张:8.625 字数:200千字

2002年4月第一版 2002年4月第一次印刷

ISBN 7-5029-3331-X/P·1172

印数:1~800 定价:16.00元

本书出版得到以下项目的联合资助

- 《国家重点基础研究发展规划》我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究（G1998040900）项目

四川省杰出青年学科带头人培养基金

成都信息工程学院研究生教育建设项目

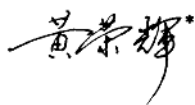
序

青藏高原占我国陆地面积的 $1/4$ ，平均海拔在 4000 m 以上，是全球面积最大、海拔最高、地形最为复杂的高原，号称地球“世界屋脊”或“地球第三极”。作为地球上一块隆起的高地，青藏高原地表面位于大气对流层中部，它以感热、潜热和辐射加热的形式成为一个高耸入对流层中部大气的热源，对全球大气运动有着重要的影响。因此，高原下边界的物理性质，如近地层大气层结稳定度、地面植被、高原积雪以及土壤温度、湿度的变化都直接影响着高原地气系统间的热量和水汽交换，从而对亚洲气候和季风的变化与异常起着十分重要的作用；并且，高原作为一个对流层中部大气的动力和热力扰动源，对东亚季内大气环流的变化、长江流域的梅雨、日本的“Baiu”和朝鲜半岛的“Changma”的异常也有很重要的作用。因此，青藏高原地气系统物理过程对全球气候、东亚大气环流以及我国灾害性气候和天气的发生都有重大影响。

早在 20 世纪 50 年代，我国老一辈气象学家就开始对青藏高原的动力和热力作用进行研究，对青藏高原气象学的提出作出了卓越贡献。1979 年开展了第一次青藏高原气象科学试验(QXPMEEX)。随后，在 1998 年又开展了第二次青藏高原大气科学试验(TIPEX)和多次国际合作的高原观测试验，积累了丰富的高原实测资料。在此基础上，我国气象工作者从多方面对高原天气、气候问题进行了全面而系统的研究，揭示出高原地区许多重要的大气动力和热力过程。近几年，国家科技部实施的《国家重点基础研究发展规划》首批

启动项目“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论研究”的计划中，也把青藏高原对我国天气、气候灾害发生的动力、热力作用以及对亚洲季风年际异常的影响作为研究重点之一，并取得了一系列新的研究成果和进展。

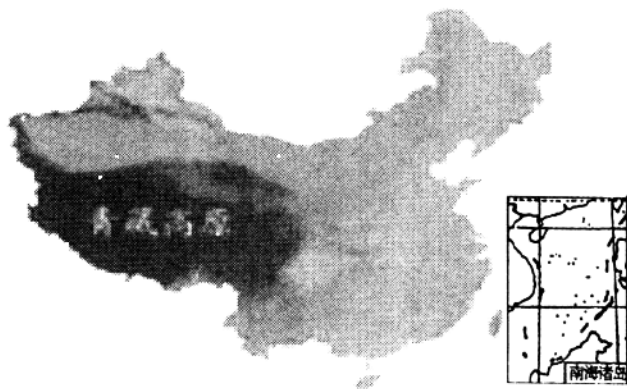
本书是成都信息工程学院(原成都气象学院)青年学者李国平教授在参加多项青藏高原大气科学试验和《国家重点基础研究发展规划》项目有关课题研究的基础上，简明而系统地总结了他和有关学者多年来对青藏高原大气的动力和热力过程的研究成果，特别是较详细地回顾了青藏高原大气动力学的研究进展；并且，书中还综述和总结了国内外学者关于青藏高原天气和气候变化问题的最新研究成果。由于目前国内外对青藏高原气象学的研究很需要一本能较系统地论述青藏高原大气、动力学问题的书，因此，本书的出版将有助于对青藏高原天气气候变化机理研究的深入。相信这本书的出版对于从事青藏高原科学试验、理论研究以及业务实践的科技工作者都会有一定帮助。



2001年12月

* 黄荣辉，中国科学院院士，原中国科学院大气物理研究所副所长。

前言



青藏高原是世界上面积最大、海拔最高、地形最复杂的大高原，其平均海拔在 4000 m 以上、伸展至对流层大气中部，人们称其为“世界屋脊”，许多地理学家、气象学家和探险家也把它与南极、北极相提并论，称为地球的“第三极”。从地图上看，青藏高原像一只矫健的鸵鸟雄踞祖国的西南边陲。帕米尔高原是“头”，昆仑山、阿尔金山、祁连山是“背”，喜马拉雅山是“胸脯”，横断山是“腿”，它好像正迈开脚步，向前奔跑。

青藏高原的隆升对于我国西北内陆干旱化的形成和发展有重要的影响；青藏高原与亚洲季风气候的关系也很密切。夏季，高原就像一个深入到大气层的火炉，使得高原上的空气受热上升，同时拉动印度洋的暖湿气流前来补充，由此带

来充沛的季风降雨，冬季的情形正好相反：青藏高原的地气物理过程对全球气候与东亚大气环流以及我国灾害性天气和气候具有关键性的重大影响。1979年5~8月，我国进行了有史以来规模最大的一次大气科学试验，即第一次青藏高原气象科学试验（QXPMEX），获得了丰富的实测资料。在此基础上我国气象工作者对有关高原气象问题进行了大量研究，取得了一系列成果，使人们对高原地区一些重要的大气过程有了系统性的认识。例如地面辐射平衡和热量平衡的时空分布、高原的加热作用、高原对行星尺度环流季节变化的作用、高原上夏季天气系统的发生、发展及结构等，并开展了高原对大气影响的数值模拟和流体力学模拟等。20世纪80年代中期以来，随着气候变化受到人们日益关注以及气候变化研究的兴起，青藏高原对于全球气候和我国区域性气候变化的影响再次成为当代大气科学甚至地球科学研究领域的一个热点问题。1994~2000年，我国开展了第二次青藏高原大气科学试验（TIPEX），其中1998年5~8月为加强观测期（IOP）。在此次试验的前后，根据中国国家科委（后称科技部）和日本科技厅签订的中日亚洲季风合作研究计划，在西藏4个站点（1997年9月后增至6个）进行了长达近7年的高原地面热量平衡和水分平衡的自动观测试验（1993年7月~1999年3月），其中1998年5~8月的观测也作为TIPEX的组成部分。现在由中国科技部和日本文部省批准实施的中日青藏高原陆面过程合作试验（GAME-Tibet）正在进行中。除了上述几次大规模综合性高原试验之外，我国还在20世纪80年代初期独自进行、80年代中期与美国、90年代与挪威、韩国、德国等国的科学家在青藏高原不同区域进行了多次地面热源观测、大气边界层物理过程的合作观测

和研究。因此 20 世纪 90 年代以后,气象科技工作者开始获得时段更长、间隔更短、要素更多、观测手段更先进的、前所未有的高原观测资料,为进一步揭开青藏高原大气的神秘面纱创造了重要的条件。目前,气象工作者已利用或正在利用这些资料,在诸如高原地气物理过程的研究以及对亚洲季风、气候变化(包括 ENSO)、区域性灾害天气及气候的影响等多个方面进行广泛、深入的研究,并已取得了一批有价值的新发现、新成果。例如 TIPEX 的观测和理论的综合研究发现,高原腹地中部的中尺度积云云系及其有组织的发展、东移与 1998 年长江流域暴雨、洪水有密切关系。因此,深入研究高原大气科学试验获取的丰富而宝贵的资料以及进一步获取高原上的特种气象观测资料,从而深化人们对青藏高原影响的认识,仍是我国大气科学界在 21 世纪重点开展的工作之一。

由于我国在青藏高原气象研究领域具有得天独厚的地理优势和雄厚的科研力量,在国际大气科学界占有该研究领域的优势地位,具有重要的学术影响,因而有不少青藏高原气象专著、研究文集或教科书面世,从 20 世纪 60 年代初杨鉴初、陶诗言、叶笃正等先生著的《西藏高原气象学》,到 70 年代末叶笃正、高由禧先生等著的《青藏高原气象学》。但由于当时观测资料和研究方法所限,这些著作主要论述的是青藏高原的气象要素、天气现象、天气系统、气候变化及高原的影响,对青藏高原大气的动力学问题涉及的不多,特别是对青藏高原大气动力学研究的进展缺乏系统性总结,至今仍无这方面的学术专著问世。有鉴于此,作者萌发了编写一本书重点论述青藏高原大气动力学问题的想法,在本院院长段廷扬教授及卢敬华教授的热情鼓励下,作者冒才疏学浅之

惟，以诚惶诚恐的心情在计算机上用了近一年的时间坚持写就此书。本书的顺利出版也得益于本院副院长杨家仕教授以及研究生教育建设办公室李燕凌主任的大力支持。

本书向读者介绍了青藏高原大气动力学以及与动力学有关的大气热力学研究的基本问题以及国内外学者对于这些问题的最新研究成果，内容以动力学研究的方法及进展为主，其中也包括作者近 10 年来参加有关高原试验和研究课题的研究成果，以及在成都信息工程学院地球环境科学系（原成都气象学院气象系）讲授《动力气象》等课程时的一些教学体会。希望本书能抛砖引玉，对从事高原试验和理论研究及业务实践的科技工作者有所帮助。同时作者也衷心希望有更多、更好的高原大气动力学方面的著作问世。由于作者水平有限，书中缺点、错误在所难免，诚望读者批评指正。

作 者

2001 年深秋于蓉城

目 录

序

前言

第一章 青藏高原的气候特征	1
1.1 平均环流和高原季风	1
1.1.1 冬季环流	1
1.1.2 夏季环流	2
1.1.3 高原季风	3
1.2 平均气压场、温度场和湿度场	4
1.2.1 平均气压场	4
1.2.2 平均温度场	4
1.2.3 平均湿度场	4
1.3 平均辐射及分布	5
1.3.1 太阳总辐射	5
1.3.2 地表反射率	8
1.3.3 地面辐射平衡	9
1.4 大气边界层与地气系统物理过程	10
1.4.1 大气边界层	10
1.4.2 地-气系统物理过程	12
1.5 对流活动、云和降水	13
1.5.1 云状和云量	15
1.5.2 降水	16
1.5.3 特殊天气现象	17
第二章 青藏高原主要的天气系统	19

2.1 500 hPa 低涡	19
2.1.1 高原低涡的天气、气候特征	19
2.1.2 高原低涡的温度场和流场结构	21
2.1.3 高原低涡发生、发展的条件	22
2.2 西南低涡	23
2.2.1 西南低涡的天气、气候特征	23
2.2.2 西南低涡的结构	24
2.2.3 西南低涡的形成	25
2.2.4 西南低涡的发展和移动	26
2.3 500 hPa 切变线	27
2.3.1 高原切变线的天气、气候特征	27
2.3.2 高原切变线的结构特征	27
2.3.3 高原对切变线的作用	28
2.4 南亚高压 (青藏高原)	29
2.4.1 南亚高压的气候特征	29
2.4.2 南亚高压的平均结构	29
2.4.3 南亚高压的形成和维持	30
2.4.4 南亚高压的振荡	31
第三章 青藏高原大气动力学基础	32
3.1 坐标系和基本方程组	32
3.1.1 局地直角坐标系	32
3.1.2 气压坐标系	34
3.1.3 对数压力坐标系	36
3.1.4 柱坐标系	37
3.1.5 球坐标系	38
3.2 尺度分析和方程组简化	39
3.2.1 z 坐标系大气运动的简化方程组	40

3.2.2 p 坐标系大气运动的简化方程组	40
3.3 动力学诊断分析方法及进展	41
3.3.1 Q 矢量	41
3.3.2 E-P 通量和无加速原理	42
3.3.3 动能平衡方程	44
3.3.4 湿位涡方程和位势散度方程	45
3.3.5 全型垂直涡度方程和倾斜涡度发展	47
3.3.6 条件对称不稳定的分析计算	49
3.3.7 Ekman 抽吸和旋转减弱	51
3.3.8 球面上罗斯贝波的经向频散——大圆理论	53
3.3.9 非线性波动分析的级数展开法	61
3.4 数值试验与模拟	71
第四章 青藏高原的热力作用	78
4.1 地面感热	78
4.2 地面蒸发潜热	85
4.3 辐射加热	86
4.4 地面热量平衡和地面热源	87
4.4.1 地面热量平衡方程与地面热源的定義	87
4.4.2 地面热通量的日变化和季节变化	89
4.4.3 地面热源	100
4.4.4 高原积雪异常对地面热通量和地面加热的 影响	103
4.5 大气热源	109
4.6 高原西部低涡的超干绝热生成机制	110
4.7 西南低涡初期发展的超干绝热机制	112
第五章 青藏高原的动力作用	117
5.1 绕流、爬流和阻挡作用	117

5.1.1 阻挡	117
5.1.2 爬流和绕流	118
5.1.3 摩擦	120
5.1.4 地形尺度与地形作用的关系	120
5.2 大地形的动力作用	121
5.3 对西风槽移动的影响	124
5.3.1 大地形和加热作用的相对重要性	124
5.3.2 不同区域地形和不同基流下的地形作用	125
5.4 西南低涡的倾斜涡度发展机制	126
5.5 Taylor 柱与西南低涡的形成	128
5.6 高原低涡的能量诊断分析	131
第六章 青藏高原大气运动的适应理论	135
6.1 地转适应	135
6.2 热成风适应与热力适应	138
6.3 地形适应	139
6.4 西南低涡的热成风适应理论	140
第七章 青藏高原大气运动的波动理论	149
7.1 大地形背风波	149
7.2 大气非线性波动的概念	152
7.2.1 孤立波与孤立子	152
7.2.2 大气中的孤立波和孤立子	155
7.3 地形作用下的线性和非线性 Rossby 波	156
7.3.1 地形强迫下的非线性 Rossby 波	156
7.3.2 大地形与正压 Rossby 孤立波	160
7.3.3 青藏高原大地形作用下的二维 Rossby 波	162
7.4 高原低涡的非线性波动理论	168
7.4.1 常定热源强迫下的非线性惯性重力内波	169

7.4.2 奇异孤立波解与青藏高原低涡的联系	178
7.4.3 高原低涡特征的非线性波动理论	179
7.5 热力强迫对低涡非线性波解的影响	184
7.5.1 常定热源强迫	185
7.5.2 对流凝结潜热	190
7.5.3 区别考虑感热和对流凝结加热	191
7.6 高原低涡与热带气旋类低涡	193
7.6.1 高原低涡的物理模型及分析方法	194
7.6.2 非绝热加热对高原低涡流场结构及发展的 作用	198
7.7 波流相互作用	210
7.7.1 瞬变波与纬向平均流的相互作用	210
7.7.2 与地形有关的波流相互作用	211
7.8 低频振荡	212
第八章 回顾与展望	215
8.1 研究的科学意义	215
8.2 研究历史回顾	217
8.3 问题与展望	220
符号表	225
缩略词索引	233
主要参考文献	236
作者主要研究成果概览	246

Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau

CONTENTS

Preface

Foreword

Chapter 1 Climatic characteristics of the Tibetan Plateau

.....	1
1.1 Mean circulation and plateau monsoon	1
1.1.1 Winter circulation	1
1.1.2 Summer circulation	2
1.1.3 Plateau monsoon	3
1.2 Mean fields of pressure, temperature and humidity	4
1.2.1 Mean field of pressure	4
1.2.2 Mean field of temperature	4
1.2.3 Mean field of humidity	4
1.3 Mean radiation and its distribution	5
1.3.1 Global solar radiation	5
1.3.2 Surface albedo	8
1.3.3 Surface radiation balance	9
1.4 Atmospheric boundary layer and physical processes between air and land	10
1.4.1 Atmospheric boundary layer	10
1.4.2 Physical processes between air and land	12
1.5 Convection activity, cloud and precipitation	13
1.5.1 Cloud form and cloud cover	15

1.5.2	Precipitation	16
1.5.3	Special weather phenomena	17
Chapter 2 Main weather systems over the Tibetan Plateau		
	Plateau	19
2.1	Vortex over the Tibetan Plateau on 500 hPa surface	19
2.1.1	Synoptic-climatic feature	19
2.1.2	Structure of temperature field and flow field ...	21
2.1.3	Genesis and development	22
2.2	Southwest vortex	23
2.2.1	Synoptic-climatic feature	23
2.2.2	Structure	24
2.2.3	Genesis	25
2.2.4	Development and translation	26
2.3	Shear line of the Tibetan Plateau on 500hPa surface	27
2.3.1	Synoptic-climatic feature	27
2.3.2	Structure	27
2.3.3	Influence of the Tibetan Plateau on the shear line	28
2.4	South Asia high (Tibetan high)	29
2.4.1	Climatic feature	29
2.4.2	Mean structure	29
2.4.3	Genesis and maintenance	30
2.4.4	Oscillation	31
Chapter 3 Basis for atmospheric dynamics of the Tibetan		