

国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB418300)

国家自然科学基金项目 (40375023) 资助

成都信息工程学院重点学科建设项目 (20040101)

# 青藏高原动力气象学

(第二版)

李国平 编著

China Meteorological Press

气象出版社

Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau

# 青藏高原动力气象学

(第二版)

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(大气动力学和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。全书共分九章,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教科书或大学高年级学生专业选修课的参考书,也可供气象或其他相关专业的科研、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. —2版. —北京:  
气象出版社, 2007. 2

ISBN 978-7-5029-4284-7

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(2007)第 022775 号

出版者: 气象出版社 地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn> 邮 编: 100081

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

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

责任编辑: 李太宇 袁信轩 终 审: 纪乃晋

封面设计: 张建永

印刷者: 北京中新伟业印刷有限公司

发行者: 气象出版社发行 全国各地新华书店经销

开 本: 850×1168 1/32 印 张: 9 字 数: 230 千字

版 次: 2007 年 2 月第二版 2007 年 2 月第一次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 22.00 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。



## 作者简介

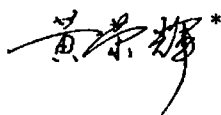
李国平, 现任成都信息工程学院大气科学系教授、系主任, 研究生导师, 四川省重点建设学科带头人, 四川省品牌建设专业、四川省高校重点实验室和四川省精品课程负责人。教育部大气科学类专业教学指导分委员会委员, 日本筑波大学访问教授, 四川省高校专业技术职务评审学科组成员, 四川省气象学会副理事长。主要从事大气动力学教学和地—气系统物理过程、灾害性天气系统动力学和GPS气象学的研究。已主持、主研科研项目30余项, 在《Journal of the Meteorological Society of Japan》、《Chinese Science Bulletin》、《Advances in Atmospheric Sciences》、《地球物理学报》、《水科学进展》、《气象学报》和《大气科学》等国内外期刊及国际、国内学术会议上发表论文80余篇。获中国气象局科技进步三等奖、中国科学院自然科学三等奖、四川省科技进步二等奖和四川省教学成果三等奖各一项。被评为全国职工职业道德十佳标兵、全国五一劳动奖章获得者、全国优秀青年气象科技工作者、四川省具有突出贡献的优秀专家、四川省杰出青年学科带头人、四川省学术和技术带头人后备人选、四川省优秀青年教师标兵、四川省高校十佳青年教师、成都信息工程学院杰出贡献奖获得者。

## 序

青藏高原占我国陆地面积的四分之一,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“第三极”。作为地球上一块隆起的高地,青藏高原地表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,对东亚季风大气环流的变化、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(QXPMECH),随后,在 1998 年又开展的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三个气象类《国家重点基础研究发展规划》(973 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)李国平教授在参加多项青藏高原大气科学试验和两个《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气象科学试验、理论研究以及业务实践的科技工作者都会有一定帮助。

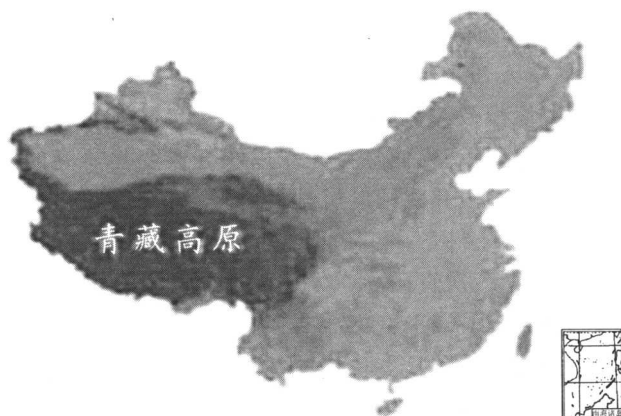


2006 年 12 月

---

\* 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、伸展至对流层大气的中部，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，称其为地球的“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—气系统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(QXPMEEX),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,根据国家科委(现为科技部)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7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),其在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,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弥足珍贵的条件。目前,气象工作者已利用或正在利用这些资料,在诸如高原地一气系统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,如,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还不多。时隔 20 年后,随着对青藏高原大气观测和研究的日益深入,国内对青藏高原大气动力学问题的研究也随之增多,但目前对青藏高原大气动力学研究的成果及进展尚缺乏系统性总结,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重点论述青藏高原大气动力学问题的书的想法,在本院段廷扬等教授的热情鼓励下,作者冒才疏学浅之惟,以诚惶诚恐的心情坚持写就此书。本书第一版的顺利出版也得益于本院段廷扬教授、杨家仕教授以及研究生教育处李燕凌处长的大力支持。特别是中国科学院大气物理研究所研究员黄荣辉院士欣然为本书的第二版作序,作者在此表示衷心感谢。本书第一版出版后,得到了学界的广泛关注和读者的热情肯定,同时我们也感到原书中尚有很多不足,加之近年来高原气象学的研究又有不少新的进展,有必要对本书

第一版进行修订。在此特别感谢我的两位研究生刘晓冉和黄楚惠,刘晓冉参与了本书修订版的统稿以及第四章、第七章、第八章和参考文献部分内容的扩充和改写,黄楚惠对本书的修订做了细致的校对。此外,还要感谢气象出版社第一编辑室李太宇主任对本书第一版、第二版顺利出书所给予的大力支持。

本书向读者介绍了青藏高原大气动力学和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,内容以大气动力学研究的方法及进展为主,其中也包括作者十多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大气科学系(原成都气象学院气象系)讲授本科生课程《大气流体力学》、《动力气象学》以及研究生课程《高等大气动力学》时的一些教学体会。希望本书能抛砖引玉,对从事高原大气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,进一步推动青藏高原气象学的发展。由于作者水平有限,书中有不足之处在所难免,恳望读者批评指正。

作 者

2001年深秋初作于蓉城新气象小区

2006年初冬修订于蓉城莱茵河畔

# 目 录

## 序

## 前 言

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>第一章 青藏高原的气候特征</b> .....   | (1)   |
| 1.1 平均环流和高原季风 .....          | (1)   |
| 1.2 平均气压场、温度场和湿度场 .....      | (3)   |
| 1.3 平均辐射及分布 .....            | (5)   |
| 1.4 大气边界层与地—气系统物理过程 .....    | (11)  |
| 1.5 对流活动、云和降水 .....          | (14)  |
| <b>第二章 青藏高原主要的天气系统</b> ..... | (19)  |
| 2.1 500 hPa 低涡 .....         | (19)  |
| 2.2 西南低涡 .....               | (23)  |
| 2.3 500 hPa 切变线 .....        | (26)  |
| 2.4 南亚高压(青藏高压) .....         | (28)  |
| <b>第三章 青藏高原大气动力学基础</b> ..... | (31)  |
| 3.1 坐标系和基本方程组 .....          | (31)  |
| 3.2 尺度分析和方程组简化 .....         | (37)  |
| 3.3 动力学诊断分析方法及进展 .....       | (38)  |
| 3.4 数值试验与模拟 .....            | (63)  |
| <b>第四章 青藏高原的热力作用</b> .....   | (69)  |
| 4.1 地面感热 .....               | (69)  |
| 4.2 地面蒸发潜热 .....             | (74)  |
| 4.3 辐射加热 .....               | (75)  |
| 4.4 热量平衡和地面热源 .....          | (76)  |
| 4.5 大气热源 .....               | (101) |

|            |                             |              |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 4.6        | 高原西部低涡的超干绝热生成机制 .....       | (101)        |
| 4.7        | 西南低涡初期发展的超干绝热机制 .....       | (103)        |
| <b>第五章</b> | <b>青藏高原的动力作用 .....</b>      | <b>(107)</b> |
| 5.1        | 绕流、爬流和阻挡作用 .....            | (107)        |
| 5.2        | 大地形的动力作用 .....              | (110)        |
| 5.3        | 大地形和加热作用的相对重要性 .....        | (113)        |
| 5.4        | 西南低涡的倾斜涡度发展机制 .....         | (114)        |
| 5.5        | Taylor 柱与西南低涡的形成 .....      | (117)        |
| 5.6        | 高原低涡的能量诊断分析 .....           | (119)        |
| <b>第六章</b> | <b>青藏高原大气运动的适应理论 .....</b>  | <b>(123)</b> |
| 6.1        | 地转适应 .....                  | (123)        |
| 6.2        | 热成风适应 .....                 | (125)        |
| 6.3        | 青藏高原纯动力作用下的地形适应 .....       | (126)        |
| 6.4        | 西南低涡的热成风适应理论 .....          | (128)        |
| <b>第七章</b> | <b>青藏高原大气运动的波动理论 .....</b>  | <b>(135)</b> |
| 7.1        | 大地形背风波 .....                | (135)        |
| 7.2        | 大气非线性波动的概念 .....            | (137)        |
| 7.3        | 地形作用下的线性和非线性 Rossby 波 ..... | (141)        |
| 7.4        | 高原低涡的非线性波动理论 .....          | (153)        |
| 7.5        | 热力强迫对低涡非线性波解的影响 .....       | (169)        |
| 7.6        | 波流的相互作用 .....               | (177)        |
| 7.7        | 低频振荡 .....                  | (179)        |
| <b>第八章</b> | <b>高原低涡与热带气旋类低涡 .....</b>   | <b>(182)</b> |
| 8.1        | 物理模型及分析方法 .....             | (182)        |
| 8.2        | 非绝热加热对高原低涡流场结构及发展的作用 .....  | (187)        |
| 8.3        | 边界层动力“抽吸泵”对高原低涡的作用 .....    | (197)        |
| 8.4        | 热源强迫的边界层内高原低涡 .....         | (202)        |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 8.5 高原低涡的研究进展 .....         | (214) |
| <b>第九章 回顾与展望</b> .....      | (226) |
| 9.1 研究的科学意义 .....           | (226) |
| 9.2 研究历史回顾 .....            | (228) |
| 9.3 近年来青藏高原气象学研究的主要课题 ..... | (231) |
| 9.4 存在的问题与展望 .....          | (235) |
| <b>符号索引</b> .....           | (239) |
| <b>缩略词索引</b> .....          | (246) |
| <b>主要参考文献</b> .....         | (249) |
| <b>编著者主要研究成果概览</b> .....    | (266) |

# CONTENTS

## Preface

## Foreword

### Chapter 1 Climatic characteristics of the Tibetan

|                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Plateau</b> .....                                                                | (1)  |
| 1.1 Mean circulation and plateau monsoon .....                                      | (1)  |
| 1.2 Mean field of pressure, temperature and humidity<br>.....                       | (3)  |
| 1.3 Mean radiation and its distribution .....                                       | (5)  |
| 1.4 Atmospheric boundary layer and physical processes<br>between air and land ..... | (11) |
| 1.5 Convection activity, cloud and precipitation .....                              | (14) |

### Chapter 2 Main weather systems over the Tibetan

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Plateau</b> .....                                              | (19) |
| 2.1 Vortex over the Tibetan Plateau on 500 hPa surface<br>.....   | (19) |
| 2.2 South-west vortex .....                                       | (23) |
| 2.3 Shear line of the Tibetan Plateau on 500 hPa surface<br>..... | (26) |
| 2.4 South Asia high (Tibetan high) .....                          | (28) |

### Chapter 3 Basis of atmospheric dynamics of the

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| <b>Tibetan Plateau</b> .....                          | (31) |
| 3.1 Coordinates and the basic equations .....         | (31) |
| 3.2 Scale analysis and approximation of the equations |      |

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| .....                                                   | (37) |
| 3.3 Methods of dynamical diagnosis and results .....    | (38) |
| 3.4 Numerical experiment and numerical simulation ..... | (63) |

## **Chapter 4 Heating effects of the Tibetan Plateau**

|                                                                                                                              |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| .....                                                                                                                        | (69)  |
| 4.1 Surface sensible heating .....                                                                                           | (69)  |
| 4.2 Surface latent heating .....                                                                                             | (74)  |
| 4.3 Surface radiation heating .....                                                                                          | (75)  |
| 4.4 Surface heat source and surface heat balance .....                                                                       | (76)  |
| 4.5 Heat source in the atmosphere .....                                                                                      | (101) |
| 4.6 Mechanism of larger than dry adiabatic lapse rate for<br>development of vortex over the western Tibetan<br>Plateau ..... | (101) |
| 4.7 Mechanism of larger than dry adiabatic lapse rate for<br>development of nascent south-west vortex .....                  | (103) |

## **Chapter 5 Dynamical effects of the Tibetan Plateau**

|                                                                                 |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| .....                                                                           | (107) |
| 5.1 Flow by past and past mountain barrier, and topographic<br>inhibition ..... | (107) |
| 5.2 Dynamical effects of large-scale topography .....                           | (110) |
| 5.3 Topographic effect on the movement of westerly<br>trough .....              | (113) |
| 5.4 Mechanism of slantwise vorticity development for<br>south-west vortex ..... | (114) |
| 5.5 Taylor column and formation of south-west vortex<br>.....                   | (117) |
| 5.6 Energy diagnostic analysis of vortex over the Tibetan                       |       |

|                                                               |       |
|---------------------------------------------------------------|-------|
| Plateau .....                                                 | (119) |
| <b>Chapter 6 Adjustment theory of the Tibetan Plateau</b>     |       |
| .....                                                         | (123) |
| 6.1 Geostrophic adjustment .....                              | (123) |
| 6.2 Thermal wind adjustment and thermal adjustment            |       |
| .....                                                         | (125) |
| 6.3 Topographic adjustment .....                              | (126) |
| 6.4 Thermal wind adjustment theory of south-west vortex       |       |
| .....                                                         | (128) |
| <b>Chapter 7 Atmospheric wave theory of the Tibetan</b>       |       |
| <b>Plateau</b> .....                                          | (135) |
| 7.1 Lee wave of large—scale topography .....                  | (135) |
| 7.2 A concept of nonlinear waves in the atmosphere            |       |
| .....                                                         | (137) |
| 7.3 Linear and nonlinear Rossby waves influenced by           |       |
| topography .....                                              | (141) |
| 7.4 Nonlinear wave theory of the vortex over the              |       |
| Tibetan Plateau .....                                         | (153) |
| 7.5 Influence of thermal forcing on the nonlinear wave        |       |
| solution of the Tibetan Plateau .....                         | (169) |
| 7.6 Wave-meanflow interactions .....                          | (177) |
| 7.7 Low-frequency oscillation .....                           | (179) |
| <b>Chapter 8 Vortex of the Tibetan Plateau and tropical</b>   |       |
| <b>cyclone—like vortex</b> .....                              | (182) |
| 8.1 Physical model and analysis method .....                  | (182) |
| 8.2 Effects of diabatic heating on the structure and develop- |       |
| ment of vortex over the Tibetan Plateau .....                 | (187) |
| 8.3 Effects of dynamic pumping in the boundary layer on       |       |

|                                                                                           |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| vortex over the Tibetan Plateau .....                                                     | (197)        |
| 8.4 The thermal forcing vortex in the boundary layer<br>.....                             | (202)        |
| 8.5 The research progresses of the Tibetan plateau vortex<br>.....                        | (214)        |
| <b>Chapter 9 Review and prospect .....</b>                                                | <b>(226)</b> |
| 9.1 Scientific importance of study on dynamic meteorology<br>of the Tibetan Plateau ..... | (226)        |
| 9.2 Review of study on dynamic meteorology of the Tibetan<br>Plateau .....                | (228)        |
| 9.3 Main projects of study on meteorology of the Tibetan<br>Plateau in recent years ..... | (231)        |
| 9.4 Problems and prospect .....                                                           | (235)        |
| <b>List of symbols .....</b>                                                              | <b>(239)</b> |
| <b>Index of abbreviation of technical terms .....</b>                                     | <b>(246)</b> |
| <b>Bibliography .....</b>                                                                 | <b>(249)</b> |
| <b>Titles of main academic works of Prof. Guoping Li<br/>        .....</b>                | <b>(266)</b> |