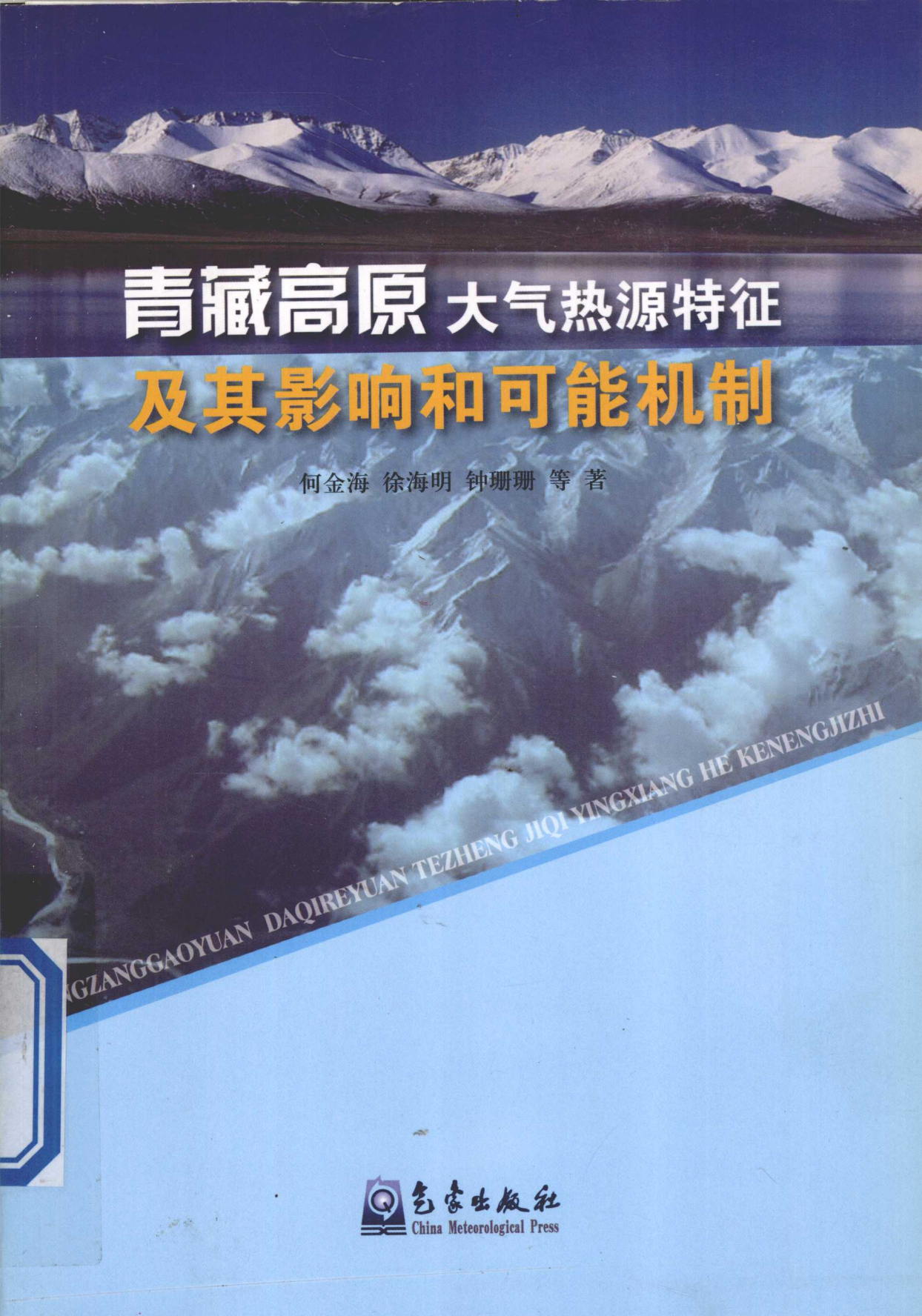




青藏高原 大气热源特征 及其影响和可能机制

何金海 徐海明 钟珊珊 等 著

QINGZANGGAOYUAN DAQIREYUAN TEZHENG JIQI YINGXIANG HE KENENGJIZHI



气象出版社
China Meteorological Press

国家自然科学基金重点项目“青藏高原热源结构和振荡特征及其传播和影响机制”(No. 40633018)、国家 973 计划项目“亚洲区域海陆气相互作用机理及其在全球变化中的作用”(No. 2010CB950400)和江苏高校优势学科建设工程资助项目联合资助

青藏高原大气热源特征及其 影响和可能机制

何金海 徐海明 钟珊珊 等著
巩远发 李丽平 张 博



气象出版社
China Meteorological Press

内容提要

本书利用各种再分析资料和日本 GAME 等资料计算了青藏高原上空及其周边地区大气视热源并就其合理性和可信性进行了深入比较,特别是应用近年来有关高原实验的实测资料(尤其是垂直探空资料以及卫星遥感资料)对高原视热源加热率垂直廓线的合理性进行了客观的检验和判断。在此基础上,进一步讨论了青藏高原上空大气热源的时空分布和振荡特征及其对东亚乃至全球天气气候的影响方式和可能机制,同时讨论了不同垂直加热廓线的加热对我国天气气候的不同影响。

本书着力于以获得较为准确的青藏高原上空大气热源强度的时空分布特征为基点,以探究其对东亚乃至全球天气气候的影响和可能机制为目标,进而为天气预报和气候预测工作者提供重要科学依据。本书可供大气科学研究工作者、气象业务工作者及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原大气热源特征及其影响和可能机制/何金海等著.

北京:气象出版社,2011.6

ISBN 978-7-5029-5232-7

I. ①青… II. ①何… III. ①青藏高原-大气热状态-研究

IV. ①P431

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 106186 号

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:张 斌

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:310 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

定 价:60.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:16

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

序

青藏高原平均海拔高度在 4000 米以上,是全球面积最大、海拔最高、地形最复杂、自然景观最独特的高原,被称为“世界屋脊”或地球第三极。它的隆起改变了亚洲气候的格局,它通过地形复杂的动力作用和热力作用影响东亚地区乃至全球的天气和气候的变化,是全球气候变化的敏感区,是我国东部灾害性天气的“上游关键区”,对中亚干旱和东亚季风起“放大器”的作用。以青藏高原为端点的亚洲中低纬“大三角”区(与亚印太交汇区相交集)又是影响我国长江中下游暴雨的水汽输送关键区。

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与其周围的大气发生强烈的水汽和能量交换,成为一个高耸入对流层中部的大气热源/热汇。早在 1950 年,叶笃正先生等就发现,青藏高原冬季是大气的冷源,夏季是大气的热源,并进而奠定了青藏高原气象学的基础。半个世纪以来,国内外学者就青藏高原的热力作用和动力作用对天气气候的影响进行了不断深入的研究。1979 年和 1998 年我国先后开展了第一次青藏高原气象科学实验(QXPMEEX)和第二次青藏高原科学实验(TIPEX),在高原上开展了加密气象观测和地面物理过程试验观测。2006—2009 年中日科学家联合实施了 JICA 一期项目“青藏高原及周边新一代综合气象观测计划”,构建了新一代综合气象观测系统,为相关研究提供了重要观测资料支持。国家有关部门特别是国家自然科学基金委员会也先后立项支持了一系列关于高原天气、气候效应的研究,取得的成果进一步证明青藏高原的存在不仅影响局地的环流,还影响了全球的大气环流和季风的多尺度变化。

近年来,Ertel(厄特尔)位涡理论被引进青藏高原的动力气象学和动力气候学研究中,并由此提出了“青藏高原感热驱动气泵”的概念,利用热力适应理论阐明了夏季青藏高原加热在局地环流型形成中的作用,强调海、陆分布对夏季副热带加热分布型进而对环流型的影响,指出高原的存在是加强了东亚季风而不是产生了东亚季风,它瞄住了亚洲季风爆发地,其表面感热加热气泵对驱动亚—澳季风起着重要作用。上述进展对于我们深入研究青藏高原热力作用对亚澳季风的影响具有重要的指导意义。

2006 年,何金海等关于“青藏高原热源结构和振荡特征及其传播和影响机制”重点项目获得国家自然科学基金委员会的立项资助。本书内容即是他们相关成果的汇报

和总结。为了搞清青藏高原热源及其影响和可能机制,他们首先比较了利用各种资料如 NCEP(I 和 II),ECMWF(ERA)和日本 GAME 等资料,计算视热源所得结果的合理性和可信性,特别是应用近年来有关高原实验的实测资料,尤其是垂直探空资料以及卫星遥感资料对高原视热源加热率垂直廓线的合理性进行了客观的检验和判断,从而使他们的相关研究结果建立在较可靠的热源资料基础上。他们的主要成果是:

(1)在 3 千米以上的高原大部分地区以干对流为主,最大加热高度位于对流层中层的近地面,感热加热的贡献大于潜热加热。在最大加热层上,东亚地区强度最大、范围最广的加热率中心位于青藏高原上空,而以潜热为主的整层积分的最大加热率中心位于孟加拉湾地区北部至高原南侧上空,这在一定意义上回答了多年来东亚地区最大加热中心究竟是位于孟加拉湾上空还是高原上空的争论。

(2)在高原范围,采用 ERA 和 NCEP/NCAR 计算的加热廓线及其季节变化基本合理,月平均最大加热率高度基本位于 500~600 hPa 之间,但单站加热廓线的逐日变化却显示高原大气不仅存在低层加热还存在较高层加热。这两种不同的高原大气加热廓线对我国华南地区的降水和环流影响却有显著不同。数值试验表明,高原东南部低层加热比中层加热更有利于华南降水。这表明,在研究高原热源对我国东部天气气候的影响时,考虑高原加热的垂直廓线是必要的。

(3)高原对流层中上层存在三个明显的大气总水汽含量高值中心,分别位于高原西南部、东南部和高原南侧,它们与进入高原的三条水汽通道相关联。上述水汽含量高值区被称之为“高原湿地”。它们的相变所释放的潜热和产生的降水对高原热源的变化产生影响,并使青藏高原成为亚洲重要的河流发源地之一。

(4)夏季高原大气热源主要有两种周期振荡:即 10~20 天的准双周振荡(BWO)和 30~60 天的低频振荡(LFO)。前者主要向东传播,而后者主要呈驻波振荡,有时也向外(主要向西)传播。高原中南部较强的 $\langle Q_1 \rangle$ 低频热源(热汇)可导致其后江淮流域降水偏多(少)。数值模拟结果表明,青藏高原低频热源强度增强(减弱)会使华南地区低频温度升高(降低),低频降水增加(减少)。然而冬季在季节内尺度上,高原热源不再是大气环流的强迫源。它可能受到其上游大气环流异常的影响,一条异常气旋—反气旋—气旋结构的 Rossby 波列自欧洲传播至东亚,在高原地区辐合,进而影响高原热源的季节内变化。

(5)利用区域气候模式(IPRC-RegCM)进行的数值试验发现,青藏高原大地形和行星尺度的海陆热力差异共同影响了我国东部 3—4 月的“江南春雨”或副热带雨带。当模式中去除青藏高原大地形后,高原东南侧的西南气流显著减弱,但西太平洋副热带高压西北侧的西南气流依然存在,副热带雨带强度虽然减少一半,但依然存在。当保留高原大地形,人为地将海陆差异减少,或将海陆差异季节转换推迟,模拟的副热

带季风雨带也明显减弱。这表明,高原大地形和海陆热力差异这两种强迫共同影响了“江南春雨”或副热带雨带。

(6)受高原大气热源垂直结构的影响,高原东北侧存在一个依附于高原主体强(弱)上升运动的次级环流圈,我国西北东部地区位于次级环流的上升(下沉)运动中,从而导致我国西北东部地区降水的增多(减少)。发现春季热汇偏强(弱),西北东部降水偏少(多);夏季热源偏强(弱),西北东部降水偏多(少)。

青藏高原热源究竟有多强,范围有多广,影响有多大,可能的影响机制是什么,这是一个非常复杂而且意义非常重大的科学问题,也是一个颇有争议的问题。他们的创新成果有助于对上述问题的回答,对于即将开展的第三次青藏高原科学试验也提供了不少启发和借鉴,我相信广大读者也一定会从中受益。无疑,作为对客观事物的认识不可能一次完成,他们的成果尚需在实践中进一步深化、完善和提高。



前 言

青藏高原被称为“世界屋脊”或地球第三极,可谓地形复杂,气象万千,风光无限,奥妙无穷。它是全球气候变化的“敏感区”,是我国东部灾害性天气的“上游关键区”,是中亚干旱和东亚季风的“放大器”,又是影响我国长江中下游暴雨的水汽输送的亚洲中低纬“大三角”区的端点。因此有关青藏高原影响东亚乃至全球天气、气候的各种科学问题,长期以来一直是各国科学家关注的热点。

早在 1950 年,叶笃正先生等就发现青藏高原冬季是大气的冷源,夏季是大气的热源,并进而奠定了青藏高原气象学的基础。半个世纪以来,国内外学者就青藏高原的热力和动力作用对天气气候的影响进行了不断深入的研究。在叶笃正、陶诗言、高由禧等老一辈气象学家的发起和推动下,1979 年章基嘉院士等组织实施了第一次青藏高原气象科学试验(QXPMEEX);1998 年在首席科学家陶诗言院士、陈联寿院士的带领下,徐祥德、吴国雄等协助实施了第二次青藏高原科学试验(TIPEX),在高原上开展了加密气象观测和地面物理过程试验观测,其间中日季风合作项目也在高原地区设置了加密观测。2006—2009 年徐祥德和张人禾等中方科学家与日方科学家联合实施了 JICA 一期项目青藏高原及周边新一代综合气象观测计划,构建了新一代综合气象观测系统,为相关研究提供了重要观测资料支持。在上述科学试验的推动下,一批创新成果相继涌现。国家有关部门特别是国家自然科学基金委员会也先后立项支持了一系列关于高原天气、气候效应的研究,取得的成果进一步证明青藏高原的存在不仅影响局地的环流,还影响了全球的大气环流和季风的多尺度变化。以周秀骥院士为代表的我国科学家,发现了青藏高原上空“臭氧低谷”的存在,并推测青藏高原是夏季对流层低层物质向平流层输送的一个重要渠道。以吴国雄院士为代表的我国科学家将 Ertel(厄特尔)位涡理论引进青藏高原的动力气象学和动力气候学的研究中,并由此提出了“青藏高原感热驱动气泵”的概念,深化了人们对青藏高原表面感热加热气泵驱动亚—澳季风的认识,对我们深入研究高原的热力作用对于亚澳季风的影响有重要指导意义。

2006 年,我们有幸获得国家自然科学基金委员会对重点项目“青藏高原热源结构和振荡特征及其传播和影响机制”(No. 40633018)的立项资助,在项目进入最后阶段时,我们又得到了 973 项目“亚洲区域海陆气相互作用机理及其在全球变化中的作

用”(No. 2010CB950400)的联合资助和理论推动。在项目执行的四年中,我们尽可能地利用了现有的各种再分析资料以及有关高原科学试验的实测资料、垂直探空资料和卫星遥感资料,对高原上空大气视热源的水平和垂直分布(加热率和垂直廓线)进行了客观的检验和判断,在此基础上,采用诊断分析和数值模拟的方法,围绕“青藏高原热源究竟有多强,范围有多广,影响有多大,相关的海陆气相互作用机制是什么”等科学问题展开了深入研究,取得了若干有意义的结果。然而上述科学问题既复杂又颇具争议,因此我们的成果还是初步的,甚至还有不少错误,尚需今后进一步深化、完善和提高。

我们的重点项目在立项过程中得到丑纪范院士、巢纪平院士、伍荣生院士和吴国雄院士以及国家自然科学基金委员会评委和地学部领导的大力支持,在项目立项和执行过程中得到丁一汇院士和陈隆勋先生的具体指导,在项目成果应用与实际业务的探索中得到李泽椿院士、陈联寿院士和许健民院士的鼓励和启示,在项目成果的总结中得到伍荣生院士和钱永甫教授等前辈和同仁的鼎力相助。吴国雄院士在百忙之中还为本专著写了序言。在项目成果即将以专著出版之际,我们谨向所有帮助过我们的前辈和同仁表示衷心的感谢!

本书内容安排和统一定稿由何金海负责,全书修改事宜由钟珊珊完成,陈隆勋先生进行了指导。

为便于读者在今后的工作中与各位作者联系,兹将本书各章节作者列表如下:

第一章:绪论(何金海、胡亮、温敏)

第二章:大气热源的计算方法及比较(张博、钟珊珊、陈隆勋、温敏)

第三章:高原大气热源分析方法的研究和应用(李丽平、王盘兴)

第四章:高原大气热源结构特征(钟珊珊、巩远发、何金海)

第五章:高原大气热源的低频振荡与东亚大气环流的关系(祁莉、巩远发、朱素行、彭玉萍)

第六章:高原不同加热廓线对华南夏季降水的影响(朱素行、徐海明、何金海)

第七章:青藏高原对副热带雨季的影响分析(李超、徐海明、何金海)

第八章:高原热源对西北降水的影响(巩远发、魏娜、何金海)

南京信息工程大学

气象灾害省部共建教育部重点实验室

何金海

2011年5月

目 录

序 前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 青藏高原热源的研究概况	(2)
1.2 高原近地层感热加热对季风建立和降水的影响	(4)
1.3 青藏高原热源(整层)对副高和相应雨带位置的调制	(6)
1.4 高原热源(整层)影响亚洲季风甚至北半球环流和海温异常的研究	(7)
1.5 高原热源对周边水汽通道及源汇的遥相关特征	(8)
1.6 高原热源影响大气物质输送及其臭氧异常特征	(9)
1.7 高原热源与环流系统低频振荡的研究	(10)
第 2 章 多种再分析资料计算夏季大气热源结果对比	(18)
2.1 资料及方法	(20)
2.2 多种大气热源计算方法的比较及其夏季气候分布特征	(21)
2.3 500 hPa 以上大气热源分布对比	(33)
2.4 加热廓线与卫星资料的比较	(35)
2.5 加热廓线与单站资料的比较	(40)
2.6 本章小结	(42)
第 3 章 高原大气热源分析方法的研究和应用	(45)
3.1 南亚高压、印度低压环流指数	(45)
3.2 Lanczos 滤波器	(57)
3.3 Morlet 小波分析	(70)
3.4 气候资料站网均匀化订正	(78)
3.5 地学要素场透视方位投影图	(87)
第 4 章 青藏高原大气热源结构特征	(94)
4.1 青藏高原大气视热源水平分布特征	(96)

4.2	青藏高原大气热源垂直分布特征	(103)
4.3	青藏高原最大加热层及其加热率分析	(115)
4.4	高原“湿池”及其水汽输送特征	(117)
4.5	总结	(124)
第5章	高原大气热源的低频振荡特征及其与东亚大气环流的关系	(129)
5.1	1981—2000年夏季青藏高原大气热源低频振荡特征及其影响	(130)
5.2	在季节内尺度上青藏高原大气热源与大气环流的关系	(141)
5.3	低频热源对降水的影响	(152)
5.4	青藏高原热源低频振荡对中国华南降水的影响	(168)
5.5	总结	(179)
第6章	青藏高原热源不同垂直加热分布对华南夏季降水的影响	(186)
6.1	资料	(187)
6.2	潜热加热观测分析	(187)
6.3	模式及试验设计	(190)
6.4	结果分析	(190)
6.5	结论	(196)
第7章	青藏高原对副热带雨季的影响	(199)
7.1	模式简介和数值试验方案设计	(200)
7.2	试验结果分析	(204)
7.3	结论	(210)
第8章	高原热源对西北降水的影响	(214)
8.1	中国西北地区47年降水的区域分布特征	(216)
8.2	西北地区47年降水和气温的时间变化特征	(218)
8.3	青藏高原大气热源结构对西北东部地区降水的影响	(223)
8.4	青藏高原西部大气热源结构对西北地区西部降水的影响	(234)
8.5	小结和讨论	(239)

第1章 绪 论

(作者:何金海 胡亮 温敏)

青藏高原占我国陆地面积的四分之一,平均海拔高度在 4000 m 以上,是世界上面积最大、海拔最高、地形最复杂的高原,号称“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进入对流层中部大气的热源,对全球大气环流有着重要的影响。

青藏高原的隆起改变了亚洲气候的格局,对其上空及其周围地区的环流有重要影响(Ding,1992),而青藏高原的气候变化又经常超前于中国其他地区的气候变化(吴池胜和王安宇,1995;孙鸿烈和郑度,1998;Feng 等,1998;Cheng 等,1999;张跃存和钱永甫,1999),这表明中国以至亚洲气候变化与青藏高原气候和环境变化是分不开的。几十年来的气象业务工作和科学实践都表明,青藏高原对我国、亚洲甚至北半球、南半球的大气环流演变都有极其重要的影响。它具有独特的环流和天气气候特征,是我国一些天气系统产生的源地,如春夏季,高原上的对流云泡在合适的条件下能汇集成云团,形成对流天气系统,东移影响我国东部地区降水(叶笃正和高由禧,1979)。同时,青藏高原不仅是产生天气系统的源地,而且还是外来天气系统有效的改造场所,如它对西风带槽脊的影响(叶笃正和高由禧,1979)。因此,研究青藏高原对预测天气及气候的变化是极其有必要的。

新中国成立以来,国内外气象学家、地质地理和环境学家一直对青藏高原及其上空的物理过程以及他们对中国和全球的影响等都进行了不懈的研究,并于 1979 年 5—8 月在青藏高原进行了第一次大气科学实验(QXPMEX),1998 年 5—8 月又实施了第二次大气科学实验(TIPEX)。利用这些实验获取的宝贵数据,分析了高原大气边界层和对流层结构以及云辐射过程,研究了地气相互作用的物理过程,发现了一些不为人知的天气事实,并揭示了高原动力和热力作用对大气环流、季风、气候变化和灾害性天气形成和发展的影响。目前我国科学家正在酝酿开展第三次青藏高原大气科学实验,进一步加强对青藏高原地区天气气候的观测、分析和研究。

青藏高原气候和环境变化作为地球科学的重要问题,首要研究的应是青藏高原热力和动力过程及其对全球气候的影响。其中,青藏高原地面、对流层和平流层的大

气热源形成及其变化机理又是研究课题的关键。大气热源是各种物理过程中构成热力过程的总体表现,它是感热传输、潜热传输、大气辐射以及其他热力过程的总的集合。有了高原上空大气热源的水平和垂直结构,可进一步研究青藏高原水汽输送及其变化,高原对流层和平流层物质交换及其对全球气候变化的影响。

青藏高原热力作用不仅对亚洲季风和降水变率有重要影响,而且还通过激发类似亚洲—太平洋涛动的大尺度波列,影响着北美和欧洲以及南印度洋的大气环流和气候(周秀骥等,2009)。青藏高原气候不仅是被动地受热带太平洋海温影响,还可以通过北太平洋大气环流调制太平洋热带和中纬度海—气相互作用(周秀骥等,2009)。春、夏季青藏高原加热异常通过影响北太平洋副热带高压、哈德莱(Hadley)环流和赤道辐合带(ITCZ),影响中低纬海—气相互作用,调制着热带厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)发展,因此研究用青藏高原气候异常来预测 ENSO 的发展是必要的,这体现了北半球海—陆—气相互作用的本质(周秀骥等,2009)。但是关于青藏高原热力作用的认识目前还存在不同的观点,最近,美国气象学家 William 和 Kuang (2010)认为,青藏高原并不是南亚夏季风的主要推动力,高原南侧附近山脉的阻挡作用才是主要影响因素。可见,目前国内外气象学者对青藏高原作用的认识还存在诸多差异,需要我们深入研究来加强完善学界对青藏高原热力作用的认识。

1.1 青藏高原热源的研究概况

由于角度不同,热源有两种不同的概念:地面冷热源和大气冷热源。第一种从下垫面出发:如果某地区有热量从地面输送给大气,则该下垫面称为热源;反之,有热量从大气传给地面则该下垫面称为冷源。这种热量不一定都能用于本地区的大气,有一部分或大部分可以输送给本区以外的大气。第二种定义为:在某个月或某一时段内,某个地区的大气柱内有净能量的收入(通过运动从侧边界流出的能量不计内),则在这个月这个地区的大气称为热源;有净能量支出,称为冷源。第一种定义的冷热源称为地面冷热源,第二种称为大气冷热源(叶笃正和高由禧,1979)。冷热源的计算方法很多,大致可归纳为直接算法(也称正算法)和间接算法(通常也称倒算法)。

热量源汇(热源、冷源)的直接算法需分别计算大气加热场的各个分量,包括长、短波辐射,水汽相变以及湍流热交换作用。其中,地面湍流交换系数 C_H 和动量总体输送系数 C_D 是采用正算法计算热源的关键参数,选取合理的 C_H 和 C_D 值对于准确估计青藏高原热源十分重要。由于青藏高原气候、环境的特殊原因,其观测资料相当少。叶笃正和高由禧(1979)做过一些高原地区 C_H 和 C_D 值的估算。1993—1999年,《中日亚洲季风机制研究计划》对青藏高原热量和水分平衡观测进行研究时,在高原上设置了6个自动气象站,进行了近6年的连续观测,得到了一批质量比较可靠、

时间分辨率和连续性也比较好的近地面梯度观测资料(巩远发等,1997)。李国平等(2000)利用上述资料,采用廓线—通量法计算了青藏高原地区总体输送系数 C_H 和 C_D 的逐日、逐月、逐年气候值,分析了 C_H 和 C_D 值的日变化、季节变化以及不同年份之间的差异。这些研究为进一步更准确地估算和分析青藏高原的热状况特征提供了重要参考。

由于实际观测资料缺乏,在目前的情况下,直接计算大气热源的三维分布显然是很困难的。用降水、地面温度、风场资料和卫星观测的资料仅能估算各分量在大气中的总(垂直积分)加热或冷却。因此,应用直接方法计算热源,虽然各分量物理意义明确,但具体计算仍存在不少问题,值得进一步讨论。

大气热源的倒算法是利用大尺度观测的物理量(温度、湿度和风场),在等压坐标或等熵坐标下,代入热力学方程间接计算出大气各高度层热量源汇及总热量源汇。这种方法可给出热源的三维结构,但计算结果的可靠性依赖于观测资料。

巢纪平(1956)利用倒算法首次计算了东亚地区的冷热源分布,指出非绝热加热和冷却对东亚大气环流具有重要作用。叶笃正等(1957)最早对青藏高原大气热源进行了研究,他们首次计算了青藏高原对流层的大气视热源(以下简称为 Q_1),得出青藏高原在夏季是热源而冬季是冷源的重要结果。随着资料的增多,陈隆勋等(1965)利用正算法计算了青藏高原整个对流层的 Q_1 ,证实高原上空对流层夏季为热源而冬季为冷源。此后,叶笃正和高由禧(1979)根据陈隆勋等的计算结果,估算了青藏高原上空各月 Q_1 ,指出就全年平均而言,青藏高原大气是个热源,其中3—9月高原大气有净输入的热量,这些热量一部分用于高原大气本身的加热,一部分向外输出。青藏高原大气4、5月所得到的热量出现骤增,该骤增主要来自地面湍流对感热的输送。晚秋和冬季高原是个冷源。青藏高原东西部相比,冬季冷源强度相似,但春、夏季西部大气热源强于东部。这些研究成果的发现奠定了青藏高原气象学的基础(叶笃正和高由禧,1979)。

到了20世纪80年代,陈隆勋和李维亮(1981,1982)首先提出亚洲地区夏季最强 Q_1 不在高原上空,而是位于孟加拉湾北部和南海—西太平洋,孟加拉湾热源中心的加热率比青藏高原约大1倍。1992年,Yanai等结合1979年夏季国际季风科学实验(MONEX)及我国独立进行的QXPMEX观测资料,计算了该年的 Q_1 分布,所得结果与陈隆勋和李维亮的结论完全一致。然而,夏季最强的 Q_1 发生在孟加拉湾并不能说明青藏高原热源不重要。Kuo和Qian(1982)指出,孟加拉湾大气热源是在青藏高原动力和热力作用影响下形成的。虽然孟加拉湾整层大气热源平均强度高于高原地区将近1倍,但在高原同高度及其以上对流层和平流层,高原和孟加拉湾 Q_1 强度可能大致相似,因此夏季青藏高原大气热源作为抬高了的热源(即中高层热源),仍可以对高原地区本身以及周围大气起到重要作用。另一方面,加热随高度的垂直变化

在全型涡度方程中是起重要作用的大项,直接影响涡度的发展(吴国雄和张永生, 1999),因此对高原周边天气具有重要作用。但到目前为止,气象学家还未估算出高原和周围地区大气同高度以上的大气热源分布,这主要是因为用以计算大气热源垂直分布的资料难以获得,计算方法也有待改进。

德国气象学家 Flohn(1968)将高原东南角比作一部带有大烟囱的热机,其高原热力作用比喻为“烟囱效应”,将大量热量输送给大气。叶笃正和高由禧(1979)根据长时间的地面观测资料,计算了青藏高原的感热输送与潜热输送,结果表明,从5月到7月高原西部存在一个很大的感热输送通量,而6—8月在高原的东部存在一个很大的潜热输送,即高原西部以感热为主,东部以潜热为主,整个高原平均以感热为主。Luo 和 Yanai(1984)通过计算青藏高原上的 Q_1 和视水汽汇 Q_2 ,指出高原西部以感热为主,而东部潜热和感热同等重要。根据他们的计算结果,高原上空的水汽对高原的热源影响很大,干燥期最大加热率只有 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,而在湿润期可增加到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。因此,高原上空的水汽变化可直接引起高原热源的异常。Zhao 和 Chen(2001)利用1979年 QXPMEX 资料重新计算了青藏高原热源强度,结果表明高原表面感热输送的贡献很大,在雨季到来之后,凝结潜热的作用也增强,尤其是高原东部地区。1998年 TIPEX 观测资料也表明,干季整个高原的潜热通量都很小,地面向大气边界层提供的湍流能量以感热为主;进入湿季,潜热通量显著增加,感热通量相应减少,这时高原中、东部地面向大气边界层湍流热量输送以潜热为主,而西部以感热输送为主。干湿季的分界时间东部为5月下旬,而西部为6月下旬(周明煜等,2000)。赵平和陈隆勋(2001)利用1961—1995年青藏高原及其邻近地区148个地面站的月平均资料,计算了35年的青藏高原大气热量源汇,得出青藏高原大气热源最强在6月($78\text{ W}/\text{m}^2$),冷源最强在12月($-72\text{ W}/\text{m}^2$)。2、3月地面感热在高原西南部明显增加,造成高原西南部热源增加最明显,且3月份在喜马拉雅山北坡形成热源中心。此后该中心继续加强,并分别在4月和6月出现两次明显西移。东部大气变为热源的时间以及热源最强出现的时间都要比西南部晚1个月。进入夏季后,凝结潜热成为和感热同样重要的加热因子,也是夏季高原东部热源继续增强的主要因子。同时,他们的研究还表明,在年代际变化尺度上,1977年前后高原大气热量源汇具有明显的突变特征,之后大气热量源汇显著增加。

1.2 高原近地层感热加热对季风建立和降水的影响

近地层感热是青藏高原影响其上空及周围地区大气环流的重要途径,对东亚夏季风的建立及我国东部降水的年际变化都有很大影响。Yanai 等(1992)最早提出春末由于青藏高原近地层大气加热,使得对流层中层为一个暖中心,该暖中心向东扩

展,其温度平流可以影响南海夏季风爆发。张艳和钱永甫(2002)提出青藏高原感热加热是南海夏季风爆发的触发机制,高原不同地区感热加热分布使高原和南方的温度梯度反转时间不同,从而导致亚洲各区域夏季风建立的时间存在差异。Wu和Zhang(1998)也认为青藏高原的抬升加热是南海季风爆发时期对流层上层增温的主要原因,其结果使得高层行星尺度大气环流的季节变化带有明显的局地性特征,是导致亚洲季风建立呈阶段性和区域性变化的重要因子之一。然而他们同时又指出,青藏高原的表面感热加热是决定亚洲季风爆发地点的一个决定性因素,但这一加热较为恒定,从4月到6月,以每天 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率加热上空大气,变幅很小,因此不可能是控制季风爆发、暂寂或增强减弱的决定性因素。吴国雄和李伟平(1997)的研究表明,青藏高原“感热气泵”的有效工作,导致了高原地区由冬到夏大气环流的突变及南亚高压的突然北跳,并维持着亚洲季风期。青藏高原上空对流层高层的辐散气流和负涡度源,通过Rossby波向上下游频散,影响着北半球各地的气候。青藏高原的热力和机械强迫作用使亚洲季风首先在孟加拉湾地区出现,孟加拉湾季风环流又提供了有利的背景条件使南海季风接着爆发。最后随着亚洲热带流型的西移,印度季风爆发。青藏高原的表面感热加热是决定亚洲季风爆发地点的一个决定性因素,这种观点把亚洲季风爆发与青藏高原的作用紧密联系在一起。

以上有关高原近地层感热加热引发南海或孟加拉湾不同地区夏季风爆发的结果,对亚洲夏季风爆发是自南海开始再向西传播,还是自孟加拉湾开始向东传播尚有争议,但对青藏高原春末地面感热加热作用是夏季风爆发机制之一的看法是一致的,而高原感热加热如何影响夏季风爆发的机理尚不清楚。

高原下垫面冬季热力状况分布具有复杂和多样性,整个高原除具有一致性外,还具有南北反相关及东西反相关等异常的热力对比分布型,不同的下垫面热力分布型对大气环流产生不同的影响,而且冬春高原下垫面的异常状况具有较强的持续性,与后期大气环流存在密切的关系。当青藏高原前冬下垫面热力状况为南侧偏暖(冷)北侧偏冷(暖)分布时,对应长江中下游地区夏季易偏旱(涝)(葛旭阳和朱永褪,2001)。陈丽娟和吕世华(1996)通过数值试验指出,高原地区3月份积雪增多引起感热异常会导致亚洲地区6、7月夏季风环流明显减弱,高原东侧我国大陆地区降水明显减少。柏晶瑜等(2003)通过统计分析与数值模拟试验都表明,春季高原下垫面感热呈南北非均匀异常分布,这对长江中下游地区夏季降水具有显著影响,即春季高原下垫面感热非均匀异常分布特征可能是长江中下游地区夏季旱涝的“强信号”之一。段安民等(2003)、段安民和吴国雄(2003)分析了4—6月高原感热加热的演变特征,结果表明,当5月高原主体部分感热加热偏强时,7月高原及高原南侧、东南侧、四川盆地、云贵高原及江淮地区降水明显偏多,高原北侧、东北侧和高原西侧降水明显偏少,而且降水场与流场、水汽通量场具有良好的配置关系。上述相关关系可用热力适应理论和

大尺度准定常正压涡度方程予以解释,因此4—6月高原感热加热可以作为东亚地区、尤其是中国江淮等地区7月降水形势的预报因子。

1.3 青藏高原热源(整层)对副高和相应雨带位置的调制

高原近地层感热加热对高原及周边地区具有重要作用,但这种作用能否影响到远离高原的地区是存在疑问的,为此许多学者用直到平流层的整层大气热源来讨论青藏高原的热力作用。

赵平和陈隆勋(2001)计算了1956—1999年逐年夏季青藏高原 Q_1 ,发现其与长江中下游降水之间有很强的正相关。Chen等(2003)通过对1998年夏季高原逐日大气热源的计算,发现高原热源与9d以后我国东部降水有强相关,并且和副高南北位置也有强相关,可以调制副高北移到同一纬度。同时,Chen等(2003)还用数值模拟证明了1998年在高原大气热源强迫下,可以在6月和7月出现二次副热带高压北进,这和1998年6月和7月出现的二次暴雨期是一致的。林建和何金海(2000)研究了青藏高原地区的净辐射,得到高原冬春季净辐射多寡可以显著影响高原地区大气环流季节转换进程和后期高原对流活动。净辐射偏多,初夏高原同低纬度之间温度梯度反转时间提前,高原对流活跃。夏季高原主体对流异常,可以通过辐散环流造成西太平洋异常的下沉运动,从而影响副高的强度、南北位置和西伸程度,最终导致夏季降水的异常分布。此外,孙颖和丁一汇(2002)以1999年青藏高原的热源异常为出发点,讨论了其对东亚夏季风异常活动的影响,结果表明,1999年青藏高原大气热源建立的时间明显偏晚,春夏季热源强度异常偏弱,这使得进入高原低层的气流明显偏弱,垂直上升运动减弱,则高原的辐合减少,季风经圈环流变弱,高原南侧、东南侧的西南夏季风减弱,引起了夏季风爆发偏晚,且在中国东部的北进偏弱。段安民和吴国雄(2003)等的研究表明高原5月感热加热的第一旋转主成分与7月东亚地区降水场存在显著滞后相关,当前期高原主体部分感热加热偏强时,7月高原及高原南侧、东南侧四川盆地、云贵高原及江淮地区降水明显偏多,高原北侧、东北侧和高原西侧降水明显偏少,而且降水场与流场、水汽通量场有很好的配置关系。赵声蓉等(2003)也用青藏高原大气热源异常解释了中国东部夏季降水异常。

然而青藏高原整层大气热源变化是否可以解释我国东部夏季降水的年际变化?关于这方面,简茂球等(2004)用倒算法计算了1951—2000年高原东部 Q_1 ,证明青藏高原热源与长江中下游夏季降水有很好的正相关。但是,高原夏季逐日 Q_1 能否如1998年那样解释各年夏季逐日或季内的降水变化尚不清楚,还需在计算各年逐日热源的基础上进一步分析和进行数值模拟。

1.4 高原热源(整层)影响亚洲季风甚至北半球环流和海温异常的研究

冬季,青藏高原上空异常强冷源可以激发出绕高原的低空异常反气旋环流。青藏高原冬季冷源异常强(弱)时激发的低空异常反气旋(气旋)形成了东亚沿海强(弱)冬季风,进而影响低纬对流异常,导致亚澳季风区向南的经向分量强(弱)。高原为强冷源时,向南异常经向冬季风到达赤道后转向为异常强赤道西风,向东传播到东太平洋赤道后引起海温变暖即 El Niño。高原冬季热源强度和4个月后西太平洋暖池海温有强的负相关,此负相关中心逐渐向东南方向移到赤道东太平洋,10个月后赤道东太平洋海温出现强负相关中心,证实了上述高原强冷源可以引起 El Niño 的过程链条。诊断分析和数值试验都证实了这个过程,因而高原冬季热源可以影响到全球大气环流和海洋环流(Zhao 和 Chen, 2000, 2001; Chen 等, 2001)。但对于夏季,高原大气热源能否如冬季冷源那样通过对环流异常的激发影响海洋?迄今该过程尚不清楚,需要进一步研究。

夏季,青藏高原热力对大气环流最直接的影响是对南亚高压的形成和维持具有重要作用。许多分析工作已证实,高原夏季异常强热源可以激发异常强大的高空南亚反气旋(Flohn, 1960, 1968; Krishnamurti 等, 1973),该系统是夏季对流层上部最强大的环流系统,直接和间接地影响亚洲夏季风环流,并对我国乃至全球天气气候产生重要影响。Flohn(1960)分析了南亚高压的演变特征之后,提出南亚高压的形成是由于高原热力作用的结果造成的。叶笃正和张捷迁(1974)通过转盘模拟实验也证明了南亚高压的形成和维持是由于高原的加热作用造成的。

Flohn(1957)用观测资料提出,青藏高原热源和 35°N 以南对应的南北温度和气压梯度的反向,可诱发东亚地区大尺度环流系统变化和印度次大陆的季风爆发。李维亮等(1982)的研究发现,高原热源强度和季风强弱有关系,印度季风强时,青藏高原上空是一个热汇,反之,则是一个热源。后来的研究(Yanai 等, 1992; Zhao 和 Chen, 2001; 孙颖和丁一汇, 2002)陆续指出春夏高原热源加强,经向温度梯度逆转,使得高原上产生上升运动,低层气流向高原辐合,引起亚洲季风爆发,这些工作对青藏高原热力作用影响亚洲夏季风爆发的时间和地点进行了深入的研究。由此可见,青藏高原上空大气热源对夏季风环流的形成和维持也有重大作用,Kuo 和 Qian(1982)和钱永甫等(1988)用数值模拟也证实了青藏高原的这一作用。

刘新等(2002)的研究发现,高原加热能够激发 Rossby 波列向外频散,使高原加热的影响并不局限于局地环流,而是能够影响北半球乃至全球的大气环流;高原加热还导致西太平洋副热带高压南移,在江淮地区形成南北气流的交汇,导致中国天气气