

西太平洋副热带高压研究 的新进展及其应用

何金海 祁莉 张韧 等著



气象出版社

China Meteorological Press

公益性(气象)科研专项 GYHY200706005

国家自然科学基金项目 No. 40475021

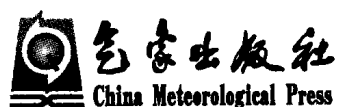
国家重点基础研究发展计划(973 计划)

2006CB403607 及 2004CB418303

资助

西太平洋副热带高压研究的新进展及其应用

何金海 祁 莉 张 韧 刘屹岷 陆日宇 等著



内 容 提 要

本书利用最新资料和模式试验,揭示了亚洲季风爆发阶段副热带高压(副高)演变特征,特别是在孟加拉湾东部至中南半岛西部(BOB)季风爆发后的副高演变及东撤机理;定义了西太平洋副高东西向偏移指数,阐述其年际和季节内变化规律;提出了副热带高压双脊线的新概念,揭示了副高双脊线的动力学和热力学特征及其形成过程和影响因子,讨论了双脊线过程对天气气候的影响及其可能机制;最后针对副高数值预报误差修正和副高动力—统计优化问题,提出了支持向量机、卡尔曼滤波和遗传算法交叉互补的副高预报方法和技术途径,以及从观测资料时间序列中反演副高动力预报模型的新思路。

本书以副高研究成果的应用为目标,着眼于副高与季风的联系及其对天气气候的影响,可供气象业务工作者、高等院校师生和大气科学研究工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

西太平洋副热带高压研究的新进展及其应用/何金海,祁莉,张韧等著. —北京:气象出版社,2010.6

ISBN 978-7-5029-4688-3

I. ①西… II. ①何…②祁…③张… III. ①太平洋-副热带高压-研究 IV. ①P424.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 098358 号

西太平洋副热带高压研究的新进展及其应用

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:总编室 010-68407112,发行部 010-68409198

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑:郭彩丽 张 斌

终 审:章澄昌

封面设计:王 伟

责任技编:吴庭芳

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:13

字 数:238 千字

版 次:2010 年 6 月第 1 版

印 次:2010 年 6 月第 1 次印刷

定 价:48.00 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

序 言

西太平洋副热带高压是影响中国天气和气候的关键环流和天气系统之一,也是东亚季风系统的一个主要成员。长期以来,中国气象学家对副热带高压进行了大量的研究,获得了具有重要的理论和实用价值的研究成果,大大推进了中国天气和气候预测业务的发展。陶诗言和黄士松先生是我国最早比较系统研究副热带高压天气动力学和气候学的前辈气象学家,他们的成果为后来的研究和业务预报发展奠定了坚实的基础,还有一大批富有实践经验和理论水平的专家也为副热带高压的研究作出了重要贡献。长期以来,副热带高压活动规律和变化是我国广大预报员在预报东亚季风季节演变、雨带分布和旱涝事件的发生与持续所依据的一个最重要的指标。另一方面,不少天气气候事件预报失败的个例在很大程度上也是由于对副热带高压活动认识不足。基于此,国家自然科学基金会曾多次立项支持副热带高压的研究,在吴国雄院士和丑纪范院士的主持下,取得了多方面重要的成果,尤其在副热带高压动力学方面。这些成果使我国副热带高压的研究大大深入了一步。

何金海教授等著的这本专著具有两个重要的特点。一是把过去取得的成果进一步推广应用；二是本书提出了副热带高压双脊线的新概念及其天气与气候影响。根据他们的研究，西太平洋副热带高压双脊线确实是存在的。它发生在整个副热带高压系统和 ITCZ 以及夏季风向北推进的时期，因而也是与中高纬度系统发生强烈相互作用的时期，所造成的大范围天气与气候异常是十分明显的，因而这个问题的研究进一步丰富了对西太平洋副热带高压结构、特征及其不同尺度变化的认识。这也是本书奉献给读者最重要的新成果。

我相信，读者一定会从中受益。

丁一汇

于中国气象局

2010 年 5 月 25 日

前 言

在南北半球副热带地区,平均而言,存在一条气压场或位势高度场的相对高值带,即所谓的“副热带高压带”或简称“副高带”,其向极地一侧为西风带,向赤道一侧为东风带。海陆热力差异、山脉的存在、海气相互作用、陆面过程及至海冰、冰川及积雪等外部强迫过程改变了大气的能量状态和热力差异,造成了副热带高压带断裂为若干个区域高压中心,西太平洋副热带高压即是其中最显著的高压单体。

西太平洋副热带高压是影响我国天气和气候的关键环流和天气系统之一,也是东亚季风系统的一个主要成员,它的位置和强度直接影响我国的天气气候,对副高活动的准确刻画和预报是成功预报天气气候的关键环节之一。长期以来,以陶诗言和黄土松先生为代表的我国老一辈气象学家最早系统地研究了副热带高压的天气动力学和气候学问题,其成果为后来的副热带高压研究和业务预报工作奠定了坚实的基础,许多具有实践经验和理论水平的专家也为副热带高压的研究作出了重要贡献。国家自然科学基金会曾多次立项支持副热带高压的研究,在吴国雄院士和丑纪范院士的支持和带领下,近年来又取得了许多创新性成果,尤其是在副热带高压动力学方面,进而使副热带高压的研究迈上了新的台阶。

一般来说,在由冬至夏的季节进程中,西太平洋副热带高压(简称西太副高)存在着连续东撤和两次北跳的过程,它们分别与东亚热带夏季风特别是南海夏季风的爆发、江淮梅雨和华北—东北雨季的建立直接相关。因此,长期以来,西太副高的变化规律及其异常是我国气象工作者预报/预测东亚季风及其雨带的季节演变、雨带分布和旱涝的发生与持续等天气气候事件

最重要的依据和指标。然而,迄今为止,副高的预报/预测目前还是一个尚未解决的世界性难题,由此造成不少天气气候事件预报/预测的失败。因此,对东亚地区副热带高压变化规律的认识尚有待深化,对现有研究成果的应用也需进一步加强。本书旨在刻画副高的活动特征,揭示副高的变异机理以及改进、提高副高的预报/预测方法和技术途径,致力于副高研究成果的应用。

西太副高在季节北进过程中还存在东撤西进和南北摆动等季节内和中短期变化过程,特别是在整个副热带高压系统和 ITCZ 以及夏季风向北推进的时期,副高还具有双脊线的现象,这种双脊线会造成相应的双雨带,造成大范围的天气气候异常。副高双脊线的生成和消失又会导致副高脊线的不连续南北进退,进而造成雨带的不连续进退以致雨带预报的失败。本书提出的双脊线新概念和对双脊线形成过程及其机理的研究就是力图为副高的预报/预测提供可能的新思路 and 科学依据。

几十年来的研究积累,使我们对副热带高压的结构和活动规律已经有了广泛的认识。因此,本书第一章回顾了已经取得的重要成果和进展,在此基础上,进一步阐述副热带高压的最新研究成果——副热带高压双脊线的新概念以及双脊线过程的天气气候学意义。

为了使本书体现副热带高压的最新研究成果和更具完整性,我们荣幸特邀国家自然科学基金会杰出青年基金获得者和在副热带高压研究方面颇有造诣的刘屹岷研究员和陆日宇研究员等专家分别撰写了第二章和第三章。第二章阐述了亚洲季风爆发的三个阶段,揭示了孟加拉湾季风爆发和随后的南海季风爆发阶段,亚洲南部副高带断裂和西太平洋副热带高压连续东撤的演变特征及其导致南海夏季风爆发的机理。第三章采用夏季区域(125° — 150° E, 15° — 27.5° N)平均的 850 hPa 相对涡度异常作为描述西太副高东西向偏移的指数,该指数可以有效避免全球变暖等现象引起的等压面抬升而导致的西太副高虚假的变化趋势,进而合理地揭示了副高的年际和季节内变化规律。

第四章至第八章是在祁莉博士论文的基础上进一步充实、凝练、加工而成。主要阐述了西太平洋副高存在双脊线的新概念,揭示了副高双脊线的动力学和热力学特征及其形成过程和影响机制,讨论了双脊线生消过程对副高南北进退特别是其不连续进退进而对天气气候异常的影响及其可能机制。双脊线概念的最早酝酿和提出是与李建平研究员和占瑞芬博士共同完成的,在其研究思想的形成过程中得到吴国雄院士的大力支持和指点。随

后,国家自然科学基金会立项支持,在其立项和研究过程中得到了一汇院士和陈隆勋先生大力支持和深入指导,还有管兆勇教授作为祁莉导师之一也给予了关心和支持。在此我们一并表示衷心感谢。

本书第九章着眼于副热带高压形态的变化和进退活动的预报/预测。针对副高数值预报误差修正和副高动力—统计预报优化问题,分别引入最小二乘支持向量机、卡尔曼滤波、遗传算法、EOF 分析等方法及其交叉互补的技术途径,开展了副高特征指数和副高位势场的数值预报误差修正和预报优化研究,特别是提出了利用观测资料时间序列反演副高动力预报模型的新思路和建模途径,并在个例检验与预报试验中取得了显著成效,为改进、提高副高的预报效率作了积极的探索。

本书内容安排和统一定稿由何金海负责,全书修改由祁莉博士完成。

为便于读者与本书作者联系、反馈指导意见,将本书各章作者列表如下:

第一章 何金海、祁莉、张韧、占瑞芬

第二章 刘屹岷、陈仲良、吴国雄

第三章 陆日宇、叶红

第四章 祁莉、何金海、占瑞芬

第五章 祁莉、何金海

第六章 祁莉、何金海

第七章 祁莉、何金海

第八章 祁莉、何金海、张韧

第九章 张韧、何金海、祁莉

最后,我们要感谢南京信息工程大学领导以及各级职能部门、大气科学学院和气象灾害省部共建教育部重点实验室的领导和各位同仁,是他们的支持和关心为本书的撰写提供了平台和氛围。感谢气象出版社陈云峰、郭彩丽、张斌为本书付出的关心和辛勤劳动。总之,我们要感谢支持本书写作的所有朋友和专家。本书由公益性(气象)科研专项 GYHY200706005、国家自然科学基金项目 No. 40475021 和国家重点基础研究发展计划(973 计划) 2006CB403607 及 2004CB418303 共同资助完成,在此一并感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,缺点错误在所难免,恳请广大读者不吝赐教,不胜感谢!

何金海

2010 年 6 月

目 录

序言

前言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 西太平洋副热带高压的形成与变动影响因子	(2)
1.2 西太平洋副热带高压的结构	(9)
1.3 西太平洋副热带高压的季节性北跳机制和进退分析	(15)
1.4 西太平洋副热带高压与我国天气的关系	(19)
1.5 西太平洋副热带高压双脊线现象的发现	(27)
第 2 章 季风爆发期间西太平洋副热带高压演变	(32)
2.1 资料和模式介绍	(34)
2.2 南海季风爆发前后的诊断研究	(34)
2.3 亚洲季风爆发的数值模拟	(42)
2.4 敏感性数值试验	(44)
2.5 结论和讨论	(52)
第 3 章 西太平洋副热带高压的年际和季节内变化	(54)
3.1 引言	(54)
3.2 西太平洋副热带高压东—西向偏移指数的定义	(55)
3.3 全球变暖引起的西太平洋副热带高压虚假变化趋势	(58)

3.4	西太平洋副热带高压东—西向偏移的年际变化	(59)
3.5	西太平洋副热带高压的季节内变化	(64)
3.6	需要进一步研究的内容	(65)

第4章 西太平洋副热带高压双脊线的概念及其天气气候学

	意义	(69)
4.1	副热带高压双脊线的概念	(69)
4.2	双脊线现象的普遍性	(72)
4.3	双脊线的天气气候学意义	(74)

第5章 气候平均场中的西太平洋副热带高压双脊线过程

	与季风槽准 10 天振荡	(81)
5.1	引言	(81)
5.2	资料与方法	(83)
5.3	气候平均场中的双脊线过程	(84)
5.4	季风槽的准 10 天振荡	(88)
5.5	季风槽准 10 天振荡机制讨论	(90)
5.6	结果和讨论	(95)

第6章 西太平洋副热带高压双脊线结构特征及其建立

	过程	(97)
6.1	引言	(97)
6.2	西太平洋副热带高压双脊线过程的气候统计特征	(97)
6.3	历年西太平洋副热带高压双脊线建立过程归类	(99)
6.4	东亚季风与西太平洋副热带高压双脊线形成	(103)
6.5	结果和讨论	(105)

第7章 南海夏季风低频振荡的年际变化特征及其对西太平洋

	副高双脊线形成的影响	(107)
7.1	引言	(107)
7.2	资料和方法	(110)
7.3	3/6 模态南海夏季风低频振荡特征及其对西太平洋副高 双脊线过程形成的影响	(111)
7.4	1/2 模态南海夏季风低频振荡特征及其对西太平洋副高 双脊线过程形成的影响	(115)

7.5	双模态南海夏季风低频振荡特征及其对西太平洋副高 双脊线过程形成的影响	(119)
7.6	结果和讨论	(124)
第8章	一类西太平洋副热带高压双脊线过程的可能机制	(127)
8.1	引言	(127)
8.2	资料与方法	(128)
8.3	“南生南存型”西太平洋副高双脊线过程环流演变特征	(130)
8.4	东风波与西太平洋副高的相互作用	(134)
8.5	结果和讨论	(138)
第9章	副热带高压的数值预报误差修正与预报优化	(139)
9.1	引言	(139)
9.2	基于最小二乘支持向量机的副高数值预报误差修正	(140)
9.3	支持向量机与卡尔曼滤波集合的副高数值预报优化	(149)
9.4	EOF 分解与卡尔曼滤波结合的副高数值预报误差修正	(154)
9.5	基于遗传优化与动力模型反演的副高中长期预报	(160)
参考文献		(177)

第1章 绪 论

地处热带和温带之间的副热带地区存在着一条暖性高压带,即副热带高压带。热带与温带之间过渡地区的暖性高气压带,受海陆分布的影响,常断裂成为若干个孤立的暖性高压,这些孤立的高压,统称为副热带高压,简称副高。北半球西北太平洋高压通常分为东、西两个单体,西北太平洋副高的主体位于海上,其西部脊在夏季会深入我国大陆,也称为西太平洋副高。副高变化多端,使气候异常频发,因此,研究副高特别是西太平洋副高的活动规律,用于我国极端天气和气候事件的预测,一直是我国气象学家孜孜不倦的研究课题。

我国气象学家陶诗言等(1957)、黄士松等(1962a,1962b)首先就西太平洋副高对我国天气的影响进行了一系列的研究,其成果已经成为我们天气预报和短期气候预测的指南。他们的研究表明,西太平洋副高常年存在,是一个稳定而少动的暖性系统,其冬夏强度和范围差异很大。夏季,西太平洋副高特别强大,几乎占北半球面积的五分之一至四分之一;冬季其强度减弱,范围也小得多。黄士松等(1962a)从高压脊位置、温湿场分布、风场、涡度场、散度场、垂直运动及经圈环流等诸多方面对西太平洋副高作了比较详细的研究,指出,副高的结构远非一般高压那样简单,而是非常复杂,不但各个单体之间有不同,一个高压单体内部亦不同,并特别指出,副高并非一个纯粹动力性质的系统,尤其是移近大陆或者位于大陆上的高压。由冬到夏,副高多数年份存在两次北跳,与我国夏季雨带的位置密切相关(陶诗言等 1963)。有的年份只有一次北跳,长江流域出现空梅;有的年份北跳不明显,而是逐渐北移,则长江流域梅雨比较明显(叶笃正等 1958a,1958b)。

纵观大气科学家特别是我国学者对副热带高压的研究,总体上可分为两大

类:一类是研究副高自身的结构、活动规律及其对天气气候的作用,这类工作以观测为主,如我国气象学家陶诗言、黄士松、余志豪等的卓越工作。另一类是对影响副高活动因子的研究,概括起来可分为如下几个方面:环流因子、高原作用、动力和热力的非线性作用、东亚季风、海温、海冰、太阳辐射、地球自转速度等。

几十年来的研究积累,使我们对副高的结构和活动规律已经有了广泛的认识。在本章,我们将回顾已经取得的重要成果,并在此基础上,进一步阐述副热带高压的最新研究成果——副热带高压双脊线的概念和建立机制,以及双脊线过程的天气气候学意义。

1.1 西太平洋副热带高压的形成与变动影响因子

关于副热带高压形成的原因,流传最广的是 Bjerknes 等(1933)提出的信风环流圈假说。近年来,随着研究的深入,人们发现经典的哈得来(Hadley)环流下沉支形成副高的理论有很大的局限性。我国对副热带高压的研究大致开始于 20 世纪 50 年代初,在杰出的大气科学家叶笃正、陶诗言、黄士松等极富开创性工作的基础上,许多科研工作者对副热带高压进行了广泛深入的研究,取得了丰硕的成果。

纵观研究副热带高压形成的历史,我们可以大致将其分为四个阶段:

第一阶段,大约在 20 世纪 60 年代以前。这一阶段的工作主要是通过一些个例的分析来探讨副热带高压形成的原因,并由此产生了各种各样的解释。如 Muggle (1927)认为副热带高压的形成完全是由于平流层的辐射冷却,空气加重下压,然后产生高压。但是人们一般都不同意这种说法。Brunt (1944)则认为副热带高压由南方的气流北上形成,尤其是 8 km 以上的空气柱北移引起高压形成的可能性很大。Bergeron 等(1949)指出暖高压形成发生在西风环流减弱的时候。罗四维(1955)也根据 1949 年的资料得出了西风环流减弱时,先有高层冷平流的侵入,然后形成高压的过程。这种情况,黄士松等(1962b)认为只是个别事件在太平洋东部才有那么强。在这一阶段的工作中,流传最广的是 Bjerknes 等(1933)提出的信风环流圈假说,这个假说认为暖空气在赤道带上升,到了高空就分别向南向北流去,于是在南北半球的副热带上空空气就堆积起来,堆积的空气下降形成了副热带高压带。显然,Brunt (1944)认为南方的气流北上形成高压与这个北半球信风环流圈的高层支相协调。但现在我们知道,这个假说把副热带高压的形成过于简单化了。由此不难看出,这一阶段副热带高压研究的主要特点就是,由于资料稀少,对副热带高压的结构难以进行细致

的剖析,大部分的工作具有一定的片面性。

第二阶段,大约在20世纪60年代初至70年代末。这段时期的主要特点是以天气气候学研究为主要手段。这一阶段,由于观测资料的逐渐增多和一些科学实验的开展,人们对副热带高压的认识也逐渐深刻。这段时期的研究以黄士松、陶诗言等的卓越成果为代表。20世纪70年代末,黄士松(1978,1979)对这个时期近20多年的工作做了总结。现在,这些工作大部分已经写入了教科书(朱乾根等1979,喻世华等1986,梁必骐1995),成为人们认识副热带高压的主要教材。

这一阶段的研究工作发现,尽管副热带高压是位于副热带地区的高压系统,但它在对流层高层和低层、海洋和陆地上、平均图和逐日天气图上的表现各有特点。黄士松等(1962a)全面研究了副热带高压的结构,他们不仅指出了以往研究中的片面性,而且对今后的研究方向进行了评述,因此可以认为是副热带高压研究进入第二个阶段的标志。

这一阶段的研究工作表明,青藏高原、墨西哥高压与出现在大洋上空对流层低层的太平洋高压、大西洋高压,无论是在结构和性质上,还是在形成和维持机制上都有很大不同,其中热力因子对前者的形成和维持非常重要,而后者则以动力因子为主,热力因子也起一定作用。除此之外,副高单体间也有相互作用。瞿章等(1963)的分析结果表明,在500 hPa副高显著变动的区域,相伴出现的变高强度比对流层高层的要小,在低层出现西太平洋副高脊的北跳,而在高层则出现青藏高原的东移或向南扩展。陶诗言等(1964)分析了亚洲100 hPa环流特征,指出当80°E附近有槽发展时,青藏高原偏离高原上空,这时500 hPa副高西伸北进;当100 hPa 80°E附近的槽消失时,青藏高原中心位于高原上空,这时500 hPa西太平洋副高东退。副热带高压的变化大致可以分为三类:季节性的、中短期的和长周期的。季节性变化不但与太阳辐射强度有关,还与海陆和地形分布有关;中短期变化则包括10~15,4~8,2~3 d等周期变动(陶诗言等1963,汪国媛1964);而长周期变动大致有3~4,6~7,11,13~14,20,35 a以及更长的周期(王绍武1962),它对我国旱涝以及气候变异有很大影响,这些变化可能与太阳黑子活动(11 a周期)、地球自转速度变异(3~4 a周期)、地极移动(6~7 a周期)有联系。

这一时期的研究还初步讨论了海温异常与副高活动的关系。

第三阶段,20世纪80年代初至90年代。20世纪70年代末,国际上非线性研究蓬勃开展,到了80年代初,许多学者亦将平衡态和突变等理论运用到副热带高压的季节性北跳这一具体的大气突变现象之中。后来,含有强迫、耗散的非线性理论在副热带高压形成的研究中也得到了应用。另外,随着季风研究

的深入和季风环流系统的提出,副热带高压研究的另一趋势就是把它尤其是西太平洋副热带高压作为季风系统中的—个子系统而加以研究和论述,这样副热带高压就不再是像以前那样作为—的系统而是与全球天气气候相衔接的子系统。喻世华等(1989a)对—次入梅前后西太平洋副高进退过程中海上副高主体和大陆副高脊的环流结构进行了对比分析,发现海上副高主体和经典模式—致,由费雷尔(Ferrel)和哈得来环流的下沉支所维持;而大陆副高则有很大不同,它由江淮雨带凝结加热支持的副热带季风环流圈在副高重心处的下沉支维持,而哈得来环流主要在对流层下半部作用于副高。喻世华等(1989b)用12次西太平洋副高进退过程的合成资料做出了西太平洋副高西进和东退时期的三维环流结构,发现西进时期副热带季风环流圈、哈得来环流、费雷尔环流和热带季风环流圈的下沉气流对西太平洋副高有作用。副高东退期,海上作用于副高主体的几支气流变化不大,但大陆上的环流却发生了变化,这种变化表现为费雷尔环流和副热带季风环流圈分开。大陆上的副热带季风环流圈不仅强度减弱,而且其下沉支南移到 25°N 以南地区,它将导致副高减弱南退。此外,计算机技术和数值模拟的开展,也逐渐构成了—阶段副热带高压研究的—特点。总之,—阶段研究手段的主要特点是动力学分析、诊断分析和数值模式相互渗透、相辅相成。

第四阶段,从1996年至今。以吴国雄为首的一大批气象学家开展了全面、系统的副热带高压形成、变异的动力学研究,取得了许多重要成果,完成了一部全面阐述副热带高压动力学的新著作,给出了大量有价值的观测事实和理论观点,包括副热带高压的分类、水平流型和垂直结构、季节变化与季风的关系、年际变化与旱涝天气的联系、副热带高压对各种外强迫(如海温)的响应等。更重要的是,提出了若干创新性的动力学理论,如热力适应理论、大气中的过流、全型垂直涡度方程、涡度变化的内强迫(倾斜涡度发展)、涡度变化的外强迫(非均匀空间加热效应),以及东西风界面的时间变化方程及该界面在保持气候系统角动量守恒中的重要性等。这些新理论在解释副热带高压形成、变异的机制,阐述夏季陆面加热和季风降水对副热带高压形成的重要作用等方面都会产生深远的影响。这阶段的研究成果总结如下:

(1) 副高脊面的动力学研究

总体看来,中高纬度地区盛行西风,低纬度盛行东风,在东西风风带之间存在—个东西风交界面(westerly-easterly-boundary, WEB),张培群(1997)证明这个交界面就是副高脊面。其所在位置的余纬(θ_s)是经度(λ)、高度(ζ)和时间(t)的函数:

$$\theta_s(\lambda, \zeta, t) = \varphi(\lambda, \zeta, t).$$

该研究第一次把大气中东、西风盛行区的背景流场和WEB两者之间的耦合关

系转化成两种动力学问题的解的制约关系,已获得 14 个未知量及相应的 14 个方程,提出了在数学上封闭的求解问题。发展了最简化模型,对低纬东风区采用 β -平面半地转定常近似,对中高纬西风区采用准地转近似进行简化,由此建立了决定副高脊面变化的“过滤”模型。

(2) 南亚高压双模态的提出

利用 40 年的月平均气候资料,张琼(1999)揭示出,夏季南亚高压的年际变化特征具有双模态,即南亚高压分别稳定维持于青藏高原和伊朗高原上空,呈现为青藏高原模态和伊朗高压模态。他们的研究表明,南亚高压两类平衡态的环流结构和热力结构均存在显著的差异,青藏高原属于热力性高压,而伊朗高压主要以动力性为主。分析两种平衡态之间相互转换的周期,结果表明,青藏高原和伊朗高压之间的平均转换周期为 2~4 候。当青藏高原地区的非绝热加热作用较强时,高压中心位于高原上空,当高原地区的非绝热加热较弱,而高原以西地区的动力输送项较强时,高压中心偏西。7—8 月间高原地区自身的热力变化造成了大气环流的演变,在高层表现为南亚高压的两类平衡态之间的转变。这种转变在性质上不同于以往的青藏高原的东西振荡,它既不是高原和东部平原加热场对比造成的“自身振荡”,也不同于环流调整引起的“强迫振荡”,而是青藏高原自身加热场的消长所产生的“振荡”。它与地形热力作用密切相关。

(3) 副热带高压形成和变异的动力学研究

① 热力适应与过流

通过对埃尔特尔(Ertel)位势涡度(后文简称位涡)的分析可以得到一个基本关系,即单位面积上以质量为权重的位涡积分等于以 θ 为权重的绝对涡度的积分。由此可以揭示出大气环流向非绝热加热调整,从而在涡度制造、摩擦耗散及位涡向源区外散逸之间建立平衡的热力适应过程。

过流是热力适应中的伴随现象。在加热层顶以上的高度上,尽管非绝热加热已消失,但由于热力适应,仍然存在上升辐散运动及反气旋式流场,并伴有冷中心。过流的存在使低近地层的加热能够影响高层的环流,并加速气柱中位涡平衡的建立。

在热力适应的准平衡态,加热中心以下的低层大气中加热所制造的正位涡除了被表面摩擦所耗散外,还被侧边界上负位涡的输入所稀释;其余部分通过上边界输向上层大气中。而加热中心的高层大气中加热所制造的负位涡除了小部分被下边界上传的正位涡所抵消外,主要通过侧边界向外散逸(或传播);其余部分通过对流传入更高层的大气中。从整个气柱来看,摩擦通过底边界施加给大气柱的负涡度除了补偿气柱中非绝热加热的正涡度制造外,还通过侧边

界的辐散气流及上边界的上冲气流向四周及高层大气释放,成为大气中的负涡度源。

②全型垂直涡度方程

副热带高压以负涡度分布为特征,其变化规律可以用涡度方程加以描述。传统的涡度方程是通过动量方程求旋度再点乘垂直矢量得到的,具有明显的平面特征和动力特征。大量的天气实践表明,稳定度的变化、斜压性的改变,以及与风的垂直切变相关的高、低空急流的发生、发展常与涡度变化相联系。但这些热力项并不直接出现在该涡度方程中,使应用涡度方程进行涡度分析受到局限。为克服这一缺陷,吴国雄等(1999a)从位涡方程出发,导得全型垂直涡度倾向方程:

$$\frac{D\zeta_z}{Dt} + \beta v + (f + \zeta_z) \nabla \cdot \mathbf{V} = -\frac{1}{\alpha \theta_z} \left[(P - \xi_s \theta_s) \frac{D\theta_z}{Dt} + \xi_s \theta_z \frac{D\theta_s}{Dt} + \theta_z \theta_s \frac{D\xi_s}{Dt} \right] + \frac{1}{\theta_z} \nabla \theta \cdot \mathbf{F}_\zeta + \frac{1}{\theta_z} \zeta_\alpha \nabla Q, \quad \theta_z \neq 0,$$

它不仅包括动力项(左端),还包含静力稳定度的变化 $\frac{D\theta_z}{Dt}$, 斜压性的变化 $\frac{D\theta_s}{Dt}$, 以及风垂直切变的发展 $\frac{D\xi_s}{Dt}$ 等热力因子对垂直涡度发展的贡献;还包含摩擦耗散 F_ζ 和非绝热加热 Q 对涡度发展的贡献。

a) 涡度变化的内强迫——倾斜涡度发展(slantwise vorticity development, SVD)

当位涡守恒时, θ_n 的改变并不会引起垂直涡度的变化,因为它的变化必须是由 ξ_n 的变化补偿($\theta_n \xi_n = \text{常数}$),因此当满足 $C_D = \frac{\xi_s \theta_s}{\theta_z} < 0$ 时,沿等熵面下滑的质块其垂直涡度将发展,此即为“倾斜涡度发展”。中纬度地区,对流层中低层的等熵面呈倾斜分布,中低纬度环流的相互作用可以通过倾斜涡度发展这一涡度内强迫机制去影响副高带的变异。数值模拟表明,当等熵面非常陡立时, SVD 发展可以非常剧烈,比辐合项引起的涡度发展大一个量级以上。SVD 是天气形势急剧发展的一种重要机制。

b) 涡度变化的外强迫——非均匀空间加热

在垂直涡度方程中暂不考虑大气热力结构所致的涡度内部强迫及表明摩擦的外强迫,仅考虑外热源作用的情形,则方程简化为

$$\frac{\partial \zeta_z}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta_z + \beta v = -(f + \zeta_z) \nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{1}{\theta_z} \zeta_\alpha \nabla Q, \quad \theta_z \neq 0.$$

吴国雄等(1999b)通过简单的空间尺度分析指出, Q 的垂直非均匀分布比其水平非均匀分布对副热带高压断裂成闭合中心的影响更大。在它们的影响下,低空副热带高压出现在表面感热加热的西侧、深对流凝结加热的东侧;而高