

国家自然科学基金项目 (No.41075045) 资助

西太平洋副热带高压季节内 活动与变异研究

张 韧 余丹丹 洪 梅 著



气象出版社
China Meteorological Press

国家自然科学基金项目(No. 41075045)资助

西太平洋副热带高压季节内 活动与变异研究

张 韧 余丹丹 洪 梅 著

内容简介

西太平洋副热带高压是东亚夏季风系统的重要成员,也是影响、制约夏季东亚地区天气气候和导致该地区洪涝、干旱灾害的重要系统。西太平洋副热带高压与东亚夏季风系统,包括南、北半球和高、低层等诸多环流与天气要素之间相互影响、制约,共处于一个复杂的非线性系统之中。副热带高压活动、变异与东亚夏季风系统环流背景和热力作用以及其他成员活动关系密切。弄清它们相互影响制约的基本事实、现象特征和动力学机理,有助于改进、提高夏季东亚地区旱涝等灾害性天气预测,具有重要的科学意义和应用价值。本书围绕西太平洋副热带高压的活动、变异及其与东亚夏季风系统相互影响、关联的基本事实、天气特征和物理机理等科学问题,开展了系统深入的研究探索。本书可供气象及其他领域的科研、业务工作者以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西太平洋副热带高压季节内活动与变异研究/张韧,
余丹丹,洪梅著. —北京:气象出版社,2013. 11
ISBN 978-7-5029-5849-7

I. ①西… II. ①张… ②余… ③洪… 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(2013)第 279021 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:马 可 张 斌

封面设计:安玉柱

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:441 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

定 价:60.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68406961

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:17.25

印 次:2013 年 11 月第 1 次印刷

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

西太平洋副热带高压是东亚夏季风系统的重要成员,是连接热带和中高纬大气环流的主要纽带。它的强度和进退对我国夏季雨带位置有重要影响,副高异常活动往往会导致我国夏季降水异常,特别是引起江淮流域出现洪涝或干旱灾害。由于副高对大气环流和我国天气气候有重要影响,对副高活动规律及其机理的研究也就成为我国大气科学家永恒的研究课题之一。陶诗言、黄士松等老一辈气象学家在上世纪五十年代开创了对副高时空结构、活动规律、形成机理以及在天气气候预报中的应用的研究。近年来气象学家应用新理论、新资料和新方法,进一步把副高研究推向了新的更高阶段。

由于副高影响因子的多元性、动力机理的非线性和活动变化的非平稳性,副高研究难度很大,副高异常活动和形态变异的本质至今尚未彻底弄清,进而在很大程度上影响、制约了对副高活动的预测。

本书作者张韧教授长期致力于西太平洋副高研究,在国家自然科学基金项目资助下,针对副高的时空结构、季节内活动规律、变异机理及其与东亚夏季风系统之间的相互作用等科学问题,开展了系统深入的研究,取得了一系列创新性研究成果。特别是围绕副高活动表现出的跳跃突变、异常进退和稳定少动等特征以及副高强度和形态的变异现象,开展了特征诊断和机理研究;在副高动力学特性分析的基础上,进一步研究了副高与东亚夏季风系统相互影响、相互制约的观测事实和物理过程,揭示出了一些新的事实特征、提出了一些新的观点和见解。研究工作表现出创新的研究视野、活跃的学术思想和多学科交叉特色,是对当前副高研究的积极推进和有益拓展。

2013年夏季,我国出现了大范围持续高温干旱天气,许多地区的气温刷新了历史纪录。副高作为主要的控制系统和环流背景,其异常强盛和稳定维持是此次极端高温天气的重要原因,并再次引起人们对副高的关注。作为对副高的长期探索积累和成果总结,相信本书的出版能够为副高研究和副高预测提供有益帮助和参考借鉴。



2013年8月

注:孙照渤,南京信息工程大学大气科学学院教授。

前 言

西太平洋副热带高压(以下简称副高)是连接热带和中高纬大气环流的重要纽带,其强度变化和位置移动直接影响、制约热带和中高纬地区的大气环流和天气系统演变。我国雨带的季节性移动与副高的季节性跳动关系密切,副高强度和进退活动的异常往往导致该地区出现洪涝和干旱灾害。由于副高对热带和中高纬大气环流以及我国天气气候具有极为重要的影响,副高活动的特征诊断和机理研究已成为我国夏季汛期天气预报和气候趋势预测的关键环节。

由于副高系统的非线性、副高变化的非平稳性、副高影响因子的多元性和动力机理的复杂性,副高研究难度很大,副高异常活动和形态变异的物理本质至今尚未彻底弄清,进而在很大程度上影响制约了对副高活动的预测。西太平洋副高作为东亚夏季风系统的重要成员,它的活动和变化不是孤立的,而是与夏季风系统背景及其成员(包括南半球系统成员)之间存在着有机联系和密切关联,它们相互影响制约、互为反馈。许多研究工作均揭示了副高与夏季风系统相互影响的现象和事实,强调了副高与东亚夏季风系统成员作为有机整体共存与相互制约的客观性和重要性。副高活动的异常与东亚夏季风环流及热力因子的异常密切相关,这一观点已得到广泛的认同和共识,但它们的内在机理和作用过程并未完全揭示清楚。近年来副高的一些异常活动和形态变异(如1998年盛夏季节的副高异常南落所带来的长江流域特大洪涝灾害;2006年夏季副高持续稳定西伸导致的川、渝地区的持续高温干旱;2008年初我国南方持续雨雪冰冻灾害期间副高的异常西伸维持)既有副高活动的一般形态规律,但也显著地表现出了副高有别往常的变异特征。

自2000年以来,在国家自然科学基金项目的资助下(No.41075045;49975012),作者围绕副高的季节内活动与变异及其与东亚夏季风系统之间的相互作用、相互制约等科学问题,开展了系统深入研究,特别是在最近承担的国家自然科学基金项目(No.41075045)中,致力于副高活动所表现出的跳跃突变、持续西伸和稳定少动等异常活动以及强度和形态变异等现象的特征揭示和机理分析,研究揭示了副高内在的动力学特性及其与东亚夏季风系统相互影响、制约的天气事实和物理机理,揭示出一些新的现象特征、提出了一些新的观点和见解。

本书除第1章绪论外按研究方法和途径分为三编。第一编(第2章—第

8 章)的主要内容 of 副高活动与变异的特征诊断研究,由余丹丹、张韧撰写;第二编(第 9 章—第 12 章)主要是从正问题角度研究副高活动与变异的动力学机理,由张韧撰写;第三编(第 13 章—第 16 章)则从反问题途径探索了一些典型或特殊年份副高异常活动与变异的动力学机理,由洪梅、张韧撰写;全书由张韧统稿。

副高异常活动及其与东亚夏季风系统的相互作用是一个非常复杂的课题,有许多问题至今尚未彻底弄清,许多方面仍有待进一步深入研究。本书仅是对其中一些问题作了有限的探索,希望能对副高研究和副高预测有一定的参考和帮助。

感谢国家自然科学基金提供的课题资助,没有基金项目的资助,这些工作成果是难以取得的;感谢我的博士后合作导师,南京信息工程大学孙照渤教授为本书作序,对本书工作予以的支持与鼓励。感谢参与其中部分研究工作的董兆俊博士和我的一些研究生。感谢解放军理工大学气象海洋学院对研究工作和本书出版予以的关心支持。

张韧

2013 年 7 月于南京

目 录

序

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 副热带高压的国内外研究现状	(1)
1.2 有待进一步研究的问题	(12)
1.3 本书结构	(13)

第一编 副高活动与变异的特征诊断研究

第 2 章 副高与亚洲夏季风系统的相关特征分析	(17)
2.1 资料与方法	(17)
2.2 副高与夏季风系统要素场的时滞相关	(18)
2.3 副高与夏季风系统的时滞相关分析	(31)
2.4 副高异常活动年份的时延相关特征	(36)
2.5 本章小结	(43)
第 3 章 副高与东亚夏季风系统的时频特征分析	(46)
3.1 资料说明	(46)
3.2 基本理论与方法	(46)
3.3 2006 年夏季副高活动的基本事实	(50)
3.4 副高西伸、北跳与季风系统成员的关联分析	(52)
3.5 本章小结	(61)
第 4 章 亚洲季风与副高活动的小波包能量诊断	(64)
4.1 小波包分解重构思想	(64)
4.2 印度夏季风扰动与副高南北进退活动	(66)
4.3 南海—西太平洋夏季风扰动与副高西伸	(77)
4.4 本章小结	(89)
第 5 章 副高与夏季风系统季节内振荡模态与传播特征	(91)
5.1 资料与方法	(91)
5.2 副高系统的时空特征分析	(92)
5.3 夏季风环流系统的时空变化特征	(96)

5.4	高度场和风场季节内振荡的纬向传播特征	(103)
5.5	1995 年夏季低频位势波对副高的影响	(105)
5.6	本章小结	(109)
第 6 章	副高东西活动异常与东亚夏季风环流的关联性	(111)
6.1	资料和方法	(111)
6.2	副高东西位置异常时季风区高低空环流特征	(113)
6.3	副高东西位置异常时季风区对流活动特征	(118)
6.4	本章小结	(121)
第 7 章	东亚夏季风系统与副高东西进退的合成分析	(123)
7.1	资料说明	(123)
7.2	副高西伸过程的合成方法	(123)
7.3	副高西伸过程中对流活动特征的合成分析	(125)
7.4	副高西伸过程中高低空流场配置的合成分析	(128)
7.5	副高西伸过程中垂直环流特征的合成分析	(134)
7.6	副高西伸与南亚高压东移的关系	(137)
7.7	本章小结	(140)
第 8 章	赤道中太平洋对流活动与副高西伸的时延相关	(142)
8.1	资料和方法	(142)
8.2	夏季西太平洋副高的东西变动特征	(142)
8.3	赤道中太平洋地区对流活动的空间分布和时频特征	(144)
8.4	经向热力差异对副高西伸的影响	(146)
8.5	本章小结	(150)

第二编 副高活动与变异的动力学机理的正问题研究

第 9 章	影响副高活动的热力强迫—动力学解析模型	(153)
9.1	多目标规划算法	(153)
9.2	动力学模式	(154)
9.3	结果分析	(154)
9.4	本章小结	(156)
第 10 章	凝结潜热和环流结构与副高的非线性稳定性	(157)
10.1	三维强迫耗散动力学模式	(158)
10.2	总扰动能量的变分问题——能量判据	(159)
10.3	能量判据及其影响因子的分析和讨论	(164)
10.4	扰动位涡拟能的平衡方程	(164)
10.5	位涡拟能判据及其相应的衰减估计	(165)
10.6	系统稳定性分析和讨论	(169)
10.7	能量判据的模式大气计算和诊断	(170)
10.8	本章小结	(174)

第 11 章 局地热源强迫——副高单体生成的一种可能机制	(175)
11.1 模式方程	(175)
11.2 孤立子与准孤立子	(175)
11.3 风场、位势场对准孤立子型局地热源强迫的响应	(176)
11.4 本章小结	(177)
第 12 章 东、西太平洋副高活动的遥相关机理	(179)
12.1 低频位势波活动与东、西太平洋副高的关联特征	(181)
12.2 东、西太平洋副高活动的遥相关机理	(186)
12.3 孤立波的传播与东、西太平洋副高活动的遥相关	(190)
12.4 本章小结	(194)
 第三编 副高活动与变异的动力学机理的反问题研究	
第 13 章 副高形态指数的动力模型反演与机理讨论	(199)
13.1 研究资料	(200)
13.2 动力系统重构原理	(200)
13.3 遗传算法运算流程	(201)
13.4 副高一季风指数的非线性动力模型反演	(203)
13.5 1998 年夏季的大气环流特征与天气事实	(209)
13.6 模型动力特性讨论与副高异常机理	(213)
13.7 副高南北向非连续进退的机理讨论	(215)
13.8 本章小结	(222)
第 14 章 副高位势场动力模型重构与变异特性分析	(223)
14.1 资料处理	(223)
14.2 副高动力模型重构	(224)
14.3 副高动力模型的定性分析	(225)
14.4 副高活动与变异的动力学机理分析	(227)
14.5 本章小结	(232)
第 15 章 涡度方程的时空客观分解以及副高突变与分岔	(234)
15.1 偏微分涡度方程	(234)
15.2 空间基函数反演	(235)
15.3 热力强迫作用下副高的动力学行为讨论	(238)
15.4 本章小结	(244)
第 16 章 空间基函数客观拟合以及副高突变与多态机理	(246)
16.1 大气涡度方程	(246)
16.2 空间基函数反演	(247)
16.3 副高的平衡态与分岔、突变	(250)
16.4 本章小结	(254)
参考文献	(255)

第1章 绪论

近年来,在全球气候变化背景下,我国的极端天气气候事件,尤其是暴雨、高温、干旱等,发生频次和强度呈现出增长趋势,与此对应的是西太平洋副热带高压(以下简称副高)的异常活动也愈加频繁。如1998年盛夏,副高北抬后的异常南落导致了长江流域出现特大洪涝灾害;2003年夏季,副高脊线第二次季节性北跳异常偏晚、副高偏强和持续偏西,导致长江以南出现高温干旱天气,而副高西北侧的淮河流域出现了严重的洪涝灾害;2006年夏季,副高的持续西伸和稳定维持导致川、渝地区出现了持续的高温干旱天气;2007年7月,副热带高压的偏南、偏西维持,导致华南出现大范围持续高温天气;2007年9月下旬—10月初,副高异常强盛北挺在 30°N 左右,长江中下游地区出现了罕见的秋季高温天气;2008年1月,副高异常西伸形成利于南方雨雪冰冻灾害维持的水汽输送坝,成为该雨雪冰冻灾害的关键致灾因素;2009年9月,副高在东退过程中再次西伸,导致重庆地区9月出现近50年来同期的最高气温,9月7日多个站点气温突破 40°C ,其中綦江站的午后气温达到 41.5°C 。这些异常或极端天气事件既为副高研究提出了新问题、新挑战、新目标,同时也提供了很好的研究对象和典型案例。迫切需要针对副高案例的这些特点开展深入细致的特征诊断和机理揭示,进而为副高异常活动的理解和预测提供理论依据和科学基础。

副高作为东亚夏季风系统的重要成员,它的季节变化对东亚夏季风系统活动起着调节作用。我国雨带的季节性移动和副高的季节性跳动密切相关,副高强度和进退的异常往往导致该地区出现洪涝和干旱灾害。因此,弄清副高的结构特征、演变规律和活动机理,是进一步深入认识大气环流和天气气候演变的关键环节,具有重要的科学意义、应用价值和社会效益。

1.1 副热带高压的国内外研究现状

西太平洋副高是影响我国及东亚地区环流形式和天气气候的主要系统。副高结构和活动规律的研究一直受到气象学家的的高度重视,叶笃正、陶诗言、黄士松和吴国雄等知名学者进行了开创性的研究。近年来,许多气象学家也围绕着副高问题开展了卓有成效的工作,他们揭示的事实、提出的见解和观点,为理解和弄清副高活动规律与变异机理提供了重要工作基础。副高研究主要侧重于以下四个方面:一是副高自身变化规律和结构特征的现象揭示;二是副高进退活动的影响因子诊断;三是副高变异的动力机理分析与数值模拟;四是副高活动演变的预测方法研究。

1.1.1 副高的结构特征和变化规律

1.1.1.1 副高的三维结构特征

早在20世纪60—70年代,我国气象学家陶诗言(1963,1964)、黄士松(1961,1962,1963)

等人对西太平洋副高和青藏高原的结构及其变化的研究成果已成为我国天气预报和短期气候预测的指南。近年来,随着研究的深入,人们发现副高研究存在某些局限性,为了更好地理解副高自身的活动规律,对副高的结构特征仍需进行深入、细致的工作(刘屹岷等,2000)。刘平等(2000)利用经向偏差方法,分析出纬向平均的副高带相对于赤道对称,脊轴全年随高度向赤道倾斜的三维结构。同时,副高脊线的季节变化和年际变化具有对流层整层的同时移动的特征。戴新刚,丑纪范(2002)利用东西风交界面来表征副高的脊面位置,运用动力模型结合资料分析研究了副高脊面的气候变异特征,发现南半球副热带高压具有纬向对称的垂直结构特征,北半球副热带高压的垂直结构则比较复杂,尤其是西太平洋副高表现出在全球副热带高压系统中的独特性。为此,毛江玉、吴国雄(2002)重点研究了亚、非季风区在4—6月季节转换过程中副高脊面的特征,提出了“季节转换轴”的新概念。他们将垂直于地面的副高脊轴作为冬夏季交替的“季节转换轴”,以副高脊面附近经向温度梯度作为表征亚洲夏季风爆发的指标,从而揭示出副高带断裂与季节转换和季风爆发存在着密切联系。这些研究为进一步认识、理解副高的形成和变化规律提供了新的理论和见解。

1.1.1.2 副高的双脊线特征

一般的研究大多关注副高的单一脊线特征,占瑞芬等(2004,2005)首次提出副高双脊线概念,并揭示了1998年夏季副高双脊线的基本演变特征、环流场和温湿场结构及其可能的形成机制以及对该年夏季长江流域“二度梅”的影响。进一步研究发现,副高的双脊线现象并非1998年独有的特征,而是北半球副高的一种普遍现象,其发生具有明显的“季节锁相”特征和地域性:7月中旬—9月中旬频繁出现在北印度洋中东部到北太平洋中部一带,尤其是西太平洋副热带地区(Zhan Ruifen *et al*, 2005)。而且副高双脊线事件也有明显的年际变化,并在20世纪70年代中期发生了明显的突变。在此研究基础之上,祁莉、何金海等(2006, 2008a, 2008b, 2008c)也做了大量研究工作。他们首先提出确定副高双脊线过程的定量指标、合成分析最典型的“南生、南存型”双脊线过程,指出该类型双脊线的形成、维持和消失与副高南侧外围东风波系统自东南向西北的传播发展密切相关;随后他们比较了1962年与1998年的双脊线过程的异同,指出亚洲季风槽的发展东移是副高双脊线形成的重要影响因子;通过进一步的诊断分析发现,双脊线过程中南侧脊线的生成与季风槽8~10天周期的“间歇性增强东伸”密切相关,也正是这一准10天振荡在7月下旬—9月下旬的突然增强造就了双脊线的“季节锁相”特征。他们的研究还发现季风槽8~10天的“间歇性增强东伸”与两支分别来自西太平洋的西传准10天振荡和来自赤道的北传准10天振荡有关。最后,他们从动力学上分析了西太平洋热带大气准10天振荡向西北传播与季风槽东伸西撤之间的相互作用过程,探讨了在气候平均场上西太平洋副高双脊线可能的形成机制。

1.1.1.3 副高特征指数的定义

天气分析中一般用500 hPa等压面上588 dagpm等高线的变化描述副高活动状况。在预报实践中也总结出一些指标来表征500 hPa上副高的特征(如面积指数、脊线位置、北界指数及西伸脊点等)。许多学者(李江南等,2003;舒廷飞等,2003)对中国气象局所定义的指标进行了修改,但只是选取区域不同,结果大同小异。由于副高指数的计算受资料格式及人为因素(如等高线读数)影响,故用588 dagpm等高线有时难以客观、准确地描述副高活动。

为此,有人对副高指数定义进行了有益的改进:副高脊线位置可定义为热带东风带和中纬

度西风带的分界线,即纬向风速为零的等值线位置(吴国雄等,2002a)。但纬向风速为零的纬度并不全为副高脊线(如低涡轴线等)。因此,取中纬度西风最大值(西风急流)到赤道之间的第一个 $u=0$ 的纬度,基本可代表副高的脊线位置(温敏,2000)。副高西伸指数可定义为副高脊线西部前缘主要活动区范围内 $[100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}]$ 各格点的位势高度的距平之和(温敏,2002)。利用 850 hPa 夏季平均位势高度场计算副高纬向和经向位移的参数指数,用以描述夏季西太副高季节性移动特征(Lu Riyu *et al.*, 2002)。用副高西部变动频繁地区 $[115^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}, 22.5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}]$ 的涡度距平来界定副高是否偏东或是偏西(Yang Hui *et al.*, 2003)。随着卫星遥感资料的广泛应用,OLR 和 T_{BB} 资料也被用于勾画副高位置,揭示副高异常特征(何金海等,1996a;江吉喜等,1999;蒋尚城等,1998;王亚非等,2000)。许晨海等(2001)用 OLR 场中的 $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 特征等值线来勾画副高范围;不同季节可用不同的 T_{BB} 值来描述副高,夏季可视 $T_{\text{BB}} > 275 \text{ K}$ 的区域为副高活动区,副高脊点为 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围内各月份 T_{BB} 特征值最西位置处的经度(姚秀萍等,2005)。最近,有人用瞬变波波包传播方法来研究副高的中短期活动,瞬变波波包大值区的向北发展和向南发展可以描述副高脊线的南北摆动,波包小值区的向西传播和向东传播可以表示副高脊线的西进和东退现象(李湘等,2010)。

1.1.1.4 副高的活动规律

由于各种内、外部因子的影响,副高强度、脊线的南北位置和西脊点的东西位置表现出明显的年际和年代际变化特征,概括起来大致表现出 3~4 年、11 年左右、10~13 年、20 年、40 年及更长周期(龚道溢等,2002a;慕巧珍等,2001,2002;舒廷飞等,2003)。另外,副高活动最为显著的变化特征是季节性的南北进退。陶诗言等(2001b)指出夏季副高季节内活动有两种模态,即存在 20~30 天的周期振荡和 5~10 天的短周期活动。江淮流域梅雨锋的活跃、中断和结束与副高 20~30 天的季节内振荡有关,副高的 5~10 天短期活动则受 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 西风带活动的影响。毕慕莹(1989)还发现副高的周期振荡具有明显的传播方向,15~20 天振荡一般是从东向西传播,而 10 天以下的短周期振荡则一般是从西向东传播。张韧等(2002a, b)研究发现,夏季北太平洋副高的活动和西伸主要表现为 8~16 天和 16~32 天周期的低频位势波活动,表现为东、西太平洋副高的遥相关关系,且这种遥相关可能是通过低频位势波的传播来加以联系和实现的。在全球变化背景下,夏季副高强度也呈现出增大的趋势,其中 20 世纪 60 年代中期和 20 世纪末增强最明显,并呈现出准 20 年的年代际周期变化特征(钱代丽,2009)。

1.1.2 副高活动与变异的影响因子

1.1.2.1 中高纬大气环流

北半球中高纬环流是影响副高异常变化的重要因子之一,其中讨论最多的是 200 hPa 东亚副热带西风急流和 500 hPa 高度上的西风槽脊。龚道溢等(2002a)认为东亚副热带西风急流和对流层中低层的副高是影响东亚夏季风降水的最重要的大尺度环流系统;李崇银等(2004)指出高空急流位置的北跳为热带环流和系统的北进提供了条件。黄士松(1978)进一步明确了西风急流北跳与副高北跳的时间关系,指出西风急流北跳要超前于副高脊北跳 1~2 候。此外,廖清海(2004)利用数值模式开展了相关研究。另有学者定义了描述东亚西风急流的多种指数(Lin Zhongda *et al.*, 2005;庄世宇等,2005),并对副热带西风急流位置的年际变化特征、影响及其可能机制进行了探讨(杨莲梅等,2006);研究揭示了夏季季节内东亚西风急流

南北位置变化与南亚高压、副高及雨带分布的关系(况雪源等,2006);金荣花等(2006)则从动力学理论分析的角度上说明了副热带西风急流动力强迫作用对副高中短期活动的影响。

此外,中纬度的西风带短波槽脊活动,对副高的短期变化的影响也很显著。副高预报经验表明,当500 hPa西风带有一个高压脊移近我国沿海海岸时,副高通常会伴随一次加强过程。陶诗言等(2006)的研究进一步证实了欧亚大陆上空的静止 Rossby 波列对副高西伸、北跳的作用。阻塞高压与低涡本质上都是西风带长波槽脊的体现,它们的活动异常会影响西风急流的变化与副高的南北进退(张先恭等,1990;廖荃荪等,1990;杨义文,2001;陈希等,2002)。关于中高纬环流究竟通过怎样的动力和热力过程影响副高的短期变化问题,任荣彩、刘屹岷等(2004)从个例诊断、基本理论和数值试验三方面研究发现,强冷(暖)空气活动所造成的纬向温度梯度,通过影响副高边缘的南北风发展而直接与副高的短期变异相联系,进而提出了中高纬冷暖空气活动影响副高短期变异机制的见解。李峰等(2006)着眼于中短期西风带系统影响副高的活动过程,指出阻塞高压与前部低涡通过西风带基本气流及长波系统的螺旋结构的变化,激发 Rossby 波的经向传播来影响副高的南北进退。

1.1.2.2 热带大气环流

副高的活动和变异与热带大气环流关系密切,如热带气旋活动对副高强度和移向有显著的影响。张庆云和陶诗言(1999)指出,副高脊线的二次北跳现象与赤道对流向北推移密切相关。徐海明等(2001b)通过诊断分析和模式模拟,发现热带辐合带(ITCZ)和孟加拉湾北部对流的异常活跃可能对副高的增强、北跳、西伸产生影响。罗哲贤(2001)从大尺度涡旋能量频散的角度,讨论了热带气旋对副高影响的动力学问题,提出了热带气旋影响副高经向度和脊线走向的短期时间尺度变化的可能机制。刘还珠等(2006)也发现,在较强的赤道辐合带北侧有利于负涡度的发展,对副高的维持和加强起到了不可忽视的作用。近年来,低纬热带地区对副高短期东西向移动的影响引起了学者的关注。姚秀萍等(2007,2008)从个例分析中指出,副高东西向运动与热带对流层上空东风带扰动有着密切的联系,副高与其南侧的东风带扰动存在同时西进的过程。张琴、姚秀萍等(2011)通过合成分析,证实了前人论点,并揭示了东风带扰动所对应的正涡度减弱以及对流层高层北风加强发展对副高短期东退的指示意义。

大气经圈环流的调整也是影响副高南北进退活动的重要因素之一。叶笃正等(1979)很早就研究了青藏高原的加热效应激发的纬圈环流对副高形成的重要作用。袁恩国等(1981)发现副高的中短期进退过程与大气的垂直环流演变有着紧密的联系,并提出了经圈环流调整的几种不同方式。廖移山等(2002)分别从副高北跳、副高稳定、副高南退三个阶段与 115°E 的经圈环流调整关系进行分析,发现低纬度深厚上升运动的发展不利于副高维持在较低纬度,而中纬度反环流的突然向南调整是造成副高突然北跳的原因。

1.1.2.3 南半球环流

南半球大气环流是全球大气环流的重要组成部分,也是影响气候变化和亚洲季风系统的一个重要因素。随着南半球大气资料的丰富以及南极涛动现象的发现,认识南半球中高纬环流的年际变化规律及其与东亚环流和气候的关系成为可能。南半球的中低纬大气环流是亚洲季风系统的重要成员之一,它对副高的影响也为人们所关注。

位于南半球的澳大利亚高压和马斯克林高压(简称“澳高”和“马高”)是亚洲季风系统的两个重要成员。一般认为前者属于东亚季风系统,后者属于印度季风系统。但也有人认为后者

亦是东亚季风系统成员。早年黄士松等(1988)指出马高的频散能量可使澳高增强,并揭示了马高变动与西北太平洋副高变动的遥相关特性。杨修群等(1989)的数值模拟研究表明,南半球马高和澳高的发展加强,使越赤道气流加强,进而增强菲律宾周围的对流活动,最终使局地哈得来(Hadley)环流发展,从而导致副高的增强。何金海等(1989)的数值模拟进一步证实了澳大利亚冷空气活动对东亚夏季风有重要作用,季风槽的移动相应地引起副高移动。因此,副高脊线的活动也间接地受南半球系统的影响。此外,中国气象学家早就注意到上述南半球两个高压系统对东亚夏季风降水的影响(施能等,1995;张爱华等,1997)。然而,以上研究大多是从个别年份、某个时段来开展的,研究区域多限于长江中下游及华南地区,至于其他地方的夏季降水是否也受到这两个系统的影响尚不清楚。近年来,有关南半球气候变率以及南半球环流异常对我国夏季旱涝分布影响的研究,受到了气象学家越来越多的关注。其中,高辉(2003,2006)、薛峰(2003,2005)等工作较有特色和代表性:他们用数值试验研究了南半球环流对东亚夏季风环流和东亚夏季降水的影响并进行了机理分析,证实了前人关于马高在东亚夏季风系统中作用的论断,指出马高和澳高的年际变化与南极涛动和 ENSO 有关;研究还发现马高的低频振荡可引起澳高及越赤道气流的振荡,并通过平流过程进一步影响到副高的季节内东西振荡。此外,其他学者分别从 ENSO(崔锦等,2005)和亚澳季风环流系统(何金海等,2000;滕代高等,2005)角度进行了有益的探讨。

与南半球两大高压对应的索马里急流和南海越赤道气流也是热带大气环流的重要组成部分,在南北半球物理量交换中扮演着重要角色,因而同样引起气象学家的广泛关注。相关研究大多集中在越赤道气流的气候学特征(施宁等,2001;李晓峰等,2006)、对南海季风爆发的影响(李崇银等,2002;高辉等,2006)以及对我国天气气候的影响(王会军等,2003;李向红等,2004)等方面。然而关于越赤道气流与副高联系的研究工作尚不多见,仅有部分研究工作讨论了索马里越赤道气流的强弱与副高西伸北抬的关系(黄士松等,1982;张元箴等,1999;许金镜等,2006)。

南极涛动(AAO),又称为南半球环流模(SAM),是近年来得到确认的南半球中高纬大气环流主要的气候变率模态。近年来,我国气象学家主要关注研究南极涛动与华北、长江中下游夏季降水的关系(Nan S L *et al*,2003;Wang H J *et al*,2005;高辉等,2003)。新近的研究(南素兰等,2005;吴志伟等,2006;鲍学俊等,2006)也证实了前期 AAO 的变化对夏季西北太平洋副高的异常变化的重要影响,主要是使副高位置和强度发生变化,从而引起长江流域降水的年际变化。范可等(2006a,2006b,2006c,2007)为此开展大量的研究工作,并在南半球大气环流与东亚气候的总结和展望中,强调南半球的大气环流变动对全球大气环流和区域气候的重大影响,指出南极涛动可能还与印度季风系统、南亚高压系统的变动存在密切关系。

1.1.2.4 南亚高压

除了环流因子的影响之外,南亚高压也是影响副高活动的重要因子。相关的研究主要围绕着南亚高压的双模态分布、南亚高压的年际和年代际变化特征(张琼等,2000;尤卫红等,2006)、南亚高压的热力作用对亚洲夏季风爆发、大气环流演变的影响以及与华北、长江流域的夏季降水的关系(黄燕燕等,2004;张琼等,2001;赵平等,2001)展开。也有研究表明(郑庆林等,1999;林建等,2000;简茂球等,2004;巩远发等,2006;梁潇云等,2006),高原的热力作用对副高的强度、南北位置和西伸程度也有重要影响。

关于南亚高压与副高的进退关系,陶诗言和朱福康早在 20 世纪 60 年代(1964)就已指出二者之间存在“相向而进、相背而退”的趋势。赵改英等(2000)在此基础上,通过功率谱和交叉谱分析,得出在多数情况下,南亚高压的东进比副高西伸加强提前 1~2 天的见解。Zhang Qiong 等(2002)进一步拓宽了该对应关系,指出对应于南亚高压的双模态分布,西太平洋副高和伊朗副高的东西分布都存在差异,这是导致整个亚澳季风区出现大范围气候异常的原因。其他人(宋敏红 等,2002;谭晶 等,2005)也从个例分析和双模态角度,证实了陶诗言的观点。

以上研究所得到的结论仅是诊断分析和数值模拟的结果,而对南亚高压影响西太副高的变异机制研究主要还限于对个例的分析。任荣彩等(2003,2004,2007)基于一系列针对 1998 年夏季副高短期演变特点的研究,指出副高短期变异的动力和热力机制与南亚高压的异常活动和中高纬度环流系统的异常有着密切的联系。他们先从动力学理论出发,以准地转涡度平衡方程为基础,指出在 500 hPa 高度层副高的西部,高低空风场的分布决定了该区域必然存在较多的上升运动;高空强的负涡度平流的存在是副高内出现下沉运动的主要强迫机制。在此基础上,他们又研究了 1998 年南亚高压和副高之间的作用机制问题,发现南亚高压通过两种作用机制影响中层副高的短期变异。有关副高短期变异的动力和热力机制理论,也成功应用于 2003 年淮河流域暴雨期间的副高异常活动分析之中(赵兵科 等,2005),并得到南亚高压东移诱发西太平洋副高加强西移和淮河流域暴雨的动力热力作用机理示意图。

1.1.2.5 东亚夏季风雨带

20 世纪 50 年代以来,人们一直注重对夏季副高及其相伴雨带的研究。一方面,副高对我国降水的影响一直是气象学家研究的热点,如副高的年代际变化特征及其对我国东部降水的影响(龚道溢,2002a,2002b;谭桂容 等,2004;张庆云 等,2003a);利用长期序列的副高特征量资料和降水资料统计分析副高指数与汛期降水的关系(沙万英 等,1998;姚愚 等,2004);副高强度和位置的变化对于长江中下游地区汛期旱涝的影响和指示意义(闵锦忠 等,2005)以及副高季节移动与东亚夏季风雨带的耦合(黄晓东 等,2004)等等。近年来,也有研究工作涉及江淮流域特殊旱涝年副高活动的突发性异常对雨带的影响(冷春香 等,2003)。

另一方面,副高也受季风降雨的显著影响。Hoskins B J 等(1995)提出夏季北非副热带高压的维持与加强是其东部陆地上季风潜热释放与西风带共同作用造成强下沉运动的结果,首次强调了亚洲季风对北非副高的作用。喻世华、张韧等(1992,1995)研究指出,副高与东亚季风雨带之间存在彼此相互作用与制约的关系,提出了副高与东亚夏季风系统的“自我调节机制”。据吴国雄等(2002a)的估计,降水产生的涡度制造率足可诱发 500 hPa 西太平洋副高显著西伸和导致 200 hPa 南亚高压显著东伸。刘还珠等(2000)还模拟了中短期过程中降水引起的垂直方向非均匀、非绝热加热对副高的影响过程。以上研究表明,即使在天气尺度上,副高与其西侧的降水也存在相互作用,而非简单的控制与被控制关系。

1.1.2.6 海温

海温作为重要的海气相互作用要素,与副高活动有密切关联。早期研究(黄荣辉 等,1988,1994;蒋国荣 等,1992;蒲书箴 等,1993;龚道溢 等,1998)表明:冬、夏季副高对同期及前期不同海域(特别是赤道东、西太平洋和印度洋海域)海温存在显著的响应。20 世纪初,孙淑清等(2001)比较了副高强、弱年的外逸长波辐射、垂直环流和海温异常的差异,发现与副高异常有关的垂直环流由热带东太平洋海温异常导致的大气环流变化引起,并以 1998 年江淮流域

洪涝过程为例探讨了当年海温状况对副高活动的影响。艾琬秀等(2000)也发现夏季副高异常对同期和滞后 1~2 个月的西太平洋海温有一定的反馈作用,并建立了海温与夏季副高的物理关联模型。就副高各个特征指数而言,海温变化主要影响副高的面积指数或强度指数,而对西伸脊点的影响次之;对脊线位置的影响比对北界位置的影响显著(姚愚,2004)。近年来,一些观测和数值模拟研究(Sui C H *et al*, 2007; Wu B *et al*, 2008)指出,副高在 20 世纪 80 年代准 3~5 年周期振荡突出,而在 90 年代准 2~3 年周期振荡突出,且分别与热带西太平洋和赤道中东太平洋海表温度异常有关。在年代际尺度上,曾刚、孙照渤等(2010)利用 NCAR Cam3 全球大气环流模式,分析了全球热带海区和热带印度洋—太平洋海区海表温度变化对副高的影响。研究发现,在这些海区的海表温度变化影响下,副高在 20 世纪的 70 年代中后期发生了较显著的年代际变化,表现出副高强度增强、位置偏西、偏南的趋势。

人们在研究 ENSO 现象与大气环流相互作用时,注意到 ENSO 对副高强度和位置有很大影响(符淙斌等,1988;彭加毅等,1999,2000,2001;应明等,2000;陈月娟等,2002;蔡学湛等,2003;王成林等,2004)。黄荣辉等(1988,1994)指出当热带西太平洋暖池增温时,从菲律宾周围经南海到中印半岛上空的对流活动将增强,西太平洋副高位置偏北,从东南亚经东亚到北美西海岸上空的大气环流将出现异常,并呈现出东亚—太平洋遥相关型(EAP)。张韧等(2000a)通过动力学分析和数值计算,发现持续的海温热力强迫可以很快激发出稳定的大气平衡态响应,La Nina(El Nino)期间的大气位势响应分别利于夏季西太平洋副高增强(减弱)和位置偏北(偏南)。李熠和杨修群等(2010)系统分析了副高异常与 ENSO 之间的相互作用问题,给出了北太平洋副热带高压年际变异与 ENSO 循环之间的选择性相互作用示意图,揭示了在年际时间尺度上超前于 ENSO 事件的海平面副高异常特征及其对 ENSO 事件建立的触发作用以及 ENSO 事件对 500 hPa 副高和海平面副高的滞后影响。

关于印度洋海温的作用,也有不少相关的研究。Wu G X 等(1992)通过数值试验和资料分析,证明了同期印度洋正海温异常有利于西太副高增强。吴国雄等(2000)利用热力适应理论和数值试验,证明了印度洋海温异常可通过“两级热力适应”来影响副高活动与形态异常。李崇银等(2001)指出赤道印度洋海温偶极子与亚洲南部流场、青藏高压和副高都有相关特征。唐卫亚和孙照渤(2005)的研究也发现,印度洋海温偶极振荡异常,将引起大气环流的异常,影响季风强度和雨带分布。最近,Zhou T 等(2009)提出了热带印度洋—西太平洋海表温度增暖引起副高西伸的年代际变化的可能机制:热带印度洋—西太平洋海表温度的增暖将引起其上空的对流增强,强迫出的 ENSO/Gill 型响应在西北太平洋将产生反气旋异常,这是影响副高西伸的主要强迫作用;其次,季风区降水的非绝热加热机制是影响副高西伸的次强迫作用。

1.1.3 副高形成和变异的动力学研究

1.1.3.1 全型垂直涡度方程与副高形成及变异机制

在副热带地区,Burger 数接近 1,平流过程和绝热过程在热量平衡中都很重要。这使得副热带大气的动力学特性变得非常复杂。因此副高的动力学研究无论在天气意义上还是在气候意义上都是非常重要和富有挑战性的课题(刘屹岷等,2000)。随着研究资料的日益丰富和计算能力的显著提高,出现了许多针对副高活动和形成机制的理论研究和数值试验,其中以吴国雄和刘屹岷等关于副高形成和变异机理方面的一系列研究成果最具代表性。

气象学家们传统地认为副热带高压带是 Hadley 环流的下沉支形成的。鉴于冬(夏)季节 Hadley 环流最强(弱)时,副高反而最弱(强)的天气事实,Hoskins 等(1995)对上述经典理论提出了质疑。刘屹岷等(2000)也认为下沉运动本身只引起正涡度发展,只有位温增加才能导致负涡度的发展,简单地用下沉运动去解释涡度的发展和副高的形成具有一定的片面性。吴国雄、刘屹岷等(2002b,2004)认为 Hadley 环流和副高的形成是两个不同的动力学问题,不能简单地把下沉运动看成是副热带高压形成的原因。他们在位涡理论的基础上,导出了全型垂直涡度方程,相应的分析表明,副高的形成主要是沿副热带地区非均匀的非绝热加热(包括感热加热、潜热释放和辐射冷却)使对称的副热带高压带断裂成闭合单体的结果,即副高是由加热的垂直非均匀性造成的(吴国雄等,1999a,1999b;刘屹岷等,1999)。他们的研究从非均匀性非绝热的角度阐明了外强迫在副热带高压带断裂中的重要作用,取得了新的理论进展,为副高动力学研究奠定了基础。近年来,为进一步研究季风潜热与夏季副热带环流之间的关系,他们又运用定常线性准地转模型,研究了由季风降水产生的潜热加热所激发的副热带定常波的结构特征,研究表明基本流对热强迫的定常波的结构有重要的影响(张亚妮等,2009)。

近年来,不少学者根据全型垂直涡度倾向方程研究了一些特殊年份的副高的异常活动机理。如温敏等(2000,2002,2006)研究发现,1998 年夏季西太平洋副高的准定常结构和瞬变结构有着显著的不同,不同位置的凝结潜热加热对副高的作用是不同的,空间非均匀加热起着调节副高移动速率及改变副高强度的作用,特别是对副高的异常活动有重要影响。王黎娟等(2005a,2005b,2009)不仅通过诊断分析得出凝结潜热加热是决定副高位置和强度的重要因素,还通过动力和热力学理论探讨了江淮梅雨期和华南前汛期大范围持续性强降水期间非绝热加热影响副高的物理机制。林建等(2005)的研究进一步发现,副高东西侧与南北侧的加热对副高的西伸和北进作用是相互影响的。陈璇等(2011)采用区域气候模式 RegCM3 模拟了强降水期间江淮、华南及孟加拉湾的热源异常分布对副高短期位置的东进退与南北变动的影响,模拟验证了副高位置的短期变异与大气加热场及其配置有着密切的联系,不同地理位置分布的加热场的差异可对副高短期活动及位置的变异产生不同的影响。

以上的理论研究和数值模拟表明,无论在季节尺度还是天气尺度上,副高的异常状况均可通过对非绝热加热的分析来予以解释,这是对过去认为副高区即是经向环流下沉区的传统观点的有益修正和重要补充。

1.1.3.2 副高活动与变异的机理研究

随着北半球自冬向夏太阳辐射的增强和季节增暖,西太平洋副高开始逐渐向东亚大陆西伸和北抬。副高除了上述规则的渐变外,一般情况下还有两次显著的季节性北跳,副高的这种季节性南北移动对我国雨带位置的变动有着直接的影响。黄士松等(1962,1978)早在 20 世纪 60 年代就指出,副高的南北变动具有缓变和跳跃两种活动特征。副高季节性跳动的物理成因,被认为是太阳辐射在地球上的不均匀分布、海陆热力差异和大气环流形势等所致。余志豪、葛孝贞(1983,1984)通过数值试验发现,副高脊线位置的季节性变动不仅是西太平洋地区,而且是全球所有副高具有的共同规律,它与太阳辐射加热密切相关,副高脊线位置的南北距平是其北侧降雨带旱涝反馈作用的结果。叶笃正等(1958)指出副高 6 月中旬的北跳与大气环流由冬季型向夏季型转换过程中所出现的“六月突变”关系密切。苏同华、薛峰(2010)的研究表明,夏季东亚地区在 6 月中旬和 7 月下旬存在两次明显的次季节突变,主要表现为副高的两次