

近年来国外气候动力学过程若干问题 数值模拟研究进展

杨 修 群

(南京大学大气科学系)

近年来,利用数值模式对大气环流或短期气候动力学过程进行模拟研究已经取得不少进展。无论是简单的理论模式还是复杂的GCM 甚至是海气耦合模式均被广泛地应用于气候模拟、预报以及各类敏感性数值试验研究之中。目前的大气数值模式尤其是象GCM 这类模式具有很强的模拟能力,一方面,它不仅能成功地模拟气候平均状态,而且能成功地用于天气预报,即准确地描述个别天气系统的逐日演变以及新扰动的发展;而另一方面,也是特别重要的,还能模拟大气低频变化特性,如年际变化特性、季节内尺度振荡、遥相关以及持续性异常等等。气候动力学尤其低频大气动力学过程是近年来热门的也是人们集中力量加以研究的课题,在这个领域人们进行了广泛的研究,取得了大量成果。鉴于篇幅限制,本文主要就近年来国外气候动力学过程若干问题数值模拟,如海温异常和冰雪异常对大气的影响过程、遥相关动力学、低频振荡以及持续性异常等方面的成果进行回顾总结。

1. 赤道海温异常对大气影响的模拟现状

与ENSO相联系的赤道太平洋海温异常引起的大气异常仍是近年来人们注重研究的。模式对赤道中东太平洋海温升高的响应的模拟结果基本上较好地与实际观测相一致,并且至今为止,世界上几乎所有著名的模式都模拟了这一问题。例如Julian和Cherwin(1978)^[1]使用NCAR的GCM, Kesha-

vamurty(1982)^[2]使用GFDL的GCM, Blackmon(1983)^[3]使用NCAR的CCM, Shukla和Wallace(1983)^[4]使用NASA/GLAS的GCM, Geisler等(1985)^[5]使用NCAR的CCM, Tokioka等(1985 a)^[6]使用日本MRI的GCM, Palmer和Mansfield(1986 a, b)^[7,8]使用英国UKMO的GCM以及Mechoso(1987)^[9]使用UCLA的GCM等等,得到的模拟结果具有一些共同的特征,如:赤道海温的升高均在热带地区导致降雨量的增加以及热源西侧Walker环流减弱、东侧Walker环流增强;在温带地区均模拟出类似于PNA型的遥相关波列响应。特别是Geisler等(1985)^[5]研究了温带大气对一系列El Niño型SST异常的响应,并指出当SSTA位于赤道不同经度时,温带响应地理位置无明显变化,仅是振幅有所变化,且SSTA位置越偏西则PNA型响应振幅越大,从而提出了中纬度大气对赤道热源经度位置响应的不敏感性问题;Palmer(1986 a)^[7]GCM研究结果表明:温带大气对热带SSTA的响应对于模式的基本态十分敏感;Palmer(1986 b)^[8]研究还表明:SSTA位于赤道西太平洋时,温带响应振幅最大,从而提出了赤道西太平洋是引起大气异常的关键海区。利用大气环流模式确实成功地模拟了大气对赤道海温异常的响应,但是正如Boer(1989)^[10]指出的:这些模拟仅仅是表明了GCM有能力再现这种动力学现象,还不能足以解释其动力学机制。例如:为什么模式大气对SSTA的响应对于模式大气基本态很敏感?为什么温带大气对

赤道 SSTA 位置不敏感? 为什么当热源偏向于夏半球一侧时, 模式的热带响应仍然几乎以赤道为对称, 且冬半球仍发生较大振幅的响应? 这些问题的提出表明有必要建立新的理论来解释 GCM 模拟中出现的而其本身难以回答的问题, 这将在第三部分讨论。

2. 冰雪覆盖异常对大气影响的模拟研究

在人们十分关注热带海温异常对短期气候影响的同时, 低温层如极冰、雪盖等异常近年来也受到人们一定的重视。从根本上说, 大气环流是由于赤道和极地之间的不均匀加热所启动, 因此, 热带热源异常仅是影响大气环流异常的一个方面。近年来的许多研究已经表明: 热带 SST 异常并不能解释温带大气所有异常现象。事实上, 长期天气过程除受到热带海洋作用外, 还受到极冰覆盖、雪盖、土壤湿度以及植被等诸因子的作用, 而极冰、雪盖分别是冰气、地气相互作用系统中的活跃成员。从热力学性质而言, 冰雪覆盖有下列特点: 1) 增大了表面反照率, 减少了表面对太阳辐射的吸收; 2) 由于冰雪是不良导体, 从而减少了海气或地气间的热量交换; 3) 冰雪融化吸收大量空气中的热量从而影响季节温度循环; 4) 海冰可以改变海水盐度分布, 从而影响海洋密度层结; 5) 积雪融化成水渗入土壤, 增加了土壤湿度, 增强了蒸发。

关于极冰的气候效应研究, Schell (1939)^[11]和 Walsh(1983)^[12]曾分别进行了综合评述, 仅就数值模拟而言, Fletcher (1968)^[13]研究了模式大气中移去北极冰大气产生的响应, 指出无冰的北极将引起北半球弱的温度梯度和弱的纬向环流, 而且北极地区由低压代替了原来的高压, 同时由于北极洋面的蒸发的增加, 从而导致中高纬降雪的增多。Williams 等(1974)^[14]用一月和七月 NCAR GCM 模拟了两万年前的冰期和当今气候的差别, 指出冰期条件未能引起纬

向风强度有统计意义的变化, 但阿留申和冰岛低压以及中纬度气旋路径有明显的南移。之后, Fletcher 等(1971)^[15]以及 Warshaw 和 Rapp(1973)^[16]GCM 试验证实了海冰在高纬气候中的重要性, 但没有给出极冰对半球甚至是全球气候的影响。比较恰当的工作是 Herman 和 Johnson (1978, 1979)^[17, 18]用 GLAS 的 GCM 模拟了北极海冰边界范围的变化对月平均气候的影响, 结果表明极冰的异常完全可能改变中高纬某些地区的局地气候, 同时也指出了高纬度和副热带地区存在的相互作用。关于南半球极冰的影响, Simmonds(1981, 1986)^[19, 20]进行了 GCM 试验, 得出与北半球较为类似的结果。因此极冰在气候变化中的作用, 正如 Walsh (1983)^[12]指出的其效应表现为空间尺度从局地、区域(或天气)、半球到全球尺度, 而相应的时间尺度可以从局地或区域尺度的数日(或数周)到全球尺度的数百年(或更长)。在局地尺度内极冰效应是改变局地空气温度, 在区域或天气尺度内极冰的异常则与风暴路径和频数相联系, 半球尺度往往和大气年际变化相联系, 尤其和大气遥相关相关, 而全球尺度的效应则较为复杂, 需包含海冰动力学过程等的完善的海-冰-气耦合模式才能进一步研究。

关于雪盖的气候效应, 人们集中研究了欧亚雪盖、北美雪盖等对局地气温、全球海平面气压、降雨量以及亚洲夏季风环流的影响(如, Hahn 和 Shukla, 1976;^[21] Dey 等, 1982, 1983^[22, 23]; Dickson, 1984^[24]; Namias, 1962, 1985^[25, 26]; Walsh, 1985^[27]等)。近年来也开展了不少数值模拟及试验研究, Roads(1981)^[28]模式研究表明北美大陆东侧雪盖异常通过雪盖-反照率反馈机制可以激发产生 Namias(1962, 1985)^[25, 26]提出的表面气压异常分布; Yeh、Wetherald 和 Manabe(1983)^[29]模拟研究表明: 雪盖的消失可以以多种方式影响模式大气, 即改变表面反照率, 增强地面吸收太阳辐射, 特别重要。

的是雪的融化影响土壤湿度和蒸发,在他们的线性化模式中,上述效应对大气从表面到对流层上层的温度场均有明显的影响。Barnett(1989)^[30]利用ECMWF T21的较为完善的谱模式细致地研究了欧亚雪盖的年际异常对区域和全球气候变化的效应,证实了一个世纪以来观测分析提出的积雪异常和亚洲夏季风的关系,指出积雪可以引起气压系统的遥相关关系,并提出欧亚雪盖增多引起亚洲夏季风减弱,从而可以触发 ENSO产生的可能机制。

上述研究表明:冰雪覆盖不仅可以影响局地气候,而且可以影响全球大气环流,也是影响各种时间尺度气候变化的重要因子。

3. 遥相关动力学理论的模拟研究

自从Wallace和Gutzler(1981)^[31]全面地提出了北半球冬季五种遥相关型以及Hoskins和Karoly(1981)^[32]提出慢变介质中二维Rossby波频散理论以后,以此为基础的遥相关动力学得到人们普遍地接受^[33]。但是近年来该理论受到一些挑战,特别是在解释热带和温带相互作用的遥相关动力学方面面临不少问题。例如:无论是观测分析还是GCM模拟均表明热带西太平洋是敏感性区域,它对温带环流异常具有直接作用,但是按Rossby波频散理论,该地区一方面位于赤道附近,Rossby波源项很小,另一方面由于上层是东风十分不利于Rossby波经向传播;再例如:按照二维Rossby波传播理论波的传播会受到临界线的阻挡,但GCM模拟结果表明,即使热源偏向于夏半球,也会在高层产生以赤道为对称的一对反气旋响应,且冬半球响应振幅较大;还如:温带响应波列对赤道热源位置不敏感性等。上述问题的存在表明Hoskins的二维Rossby波频散理论在解释遥相关动力学方面还很不完善。

针对上述问题人们也提出了新理论加以解释。如:Simmons等(1983)^[34]提出了纬

向不均匀基本态存在一种不稳定的正交模态理论;Webster和Holton(1982)^[35]利用浅水模式研究指出赤道东太平洋有限范围内西风区域的存在可导致波的越赤道传播;Schneider等(1987)^[36]利用类似的模式但不考虑基本态的纬向变化而考虑纬向平均的经向运动,也得到了波越赤道传播解;Branstator(1983)^[37]利用对包含经向和纬向变化的基本态线性化的无辐散正压涡度方程模式研究了各种强迫解。但是必须指出,浅水模式由于它描述的是一个单个垂直模的水平结构,用它来讨论热带地区由斜压模(内模)而中纬度由相当正压模(外模)支配的慢变流的遥相关问题是十分困难的。

近年来又有一些新的理论提出,这里重点介绍Sardeshmukh和Hoskins(1988)^[38]以及Webster和Chang(1988)^[39]的工作。由于热带对流加热和大尺度绝热冷却上升相平衡,加热区上层风的辐散驱动了对流层上层的旋转风场,因而人们一般以线性化的无辐散正压涡度方程并包含“-fD”的简单外强迫源项来研究强迫Rossby波特征。Sardeshmukh等(1988)^[38]对此进行了修正,并提出了旋转流产生的新理论,即对强迫项进行修正,考虑强迫项为 $S = -v_x \cdot \nabla \zeta - \xi D$,它由两部分组成:一是由经典的局地辐散引起的强迫 $-\xi D (\simeq -fD)$,另一是由辐散风引起的涡度平流,这两项构成了“有效”Rossby波源。研究表明:即使热源位于赤道东风内,而有效Rossby波源却位于副热带西风气流边缘,这对于Rossby波频散极其有利;有效Rossby波源对赤道加热经度位置不敏感;以赤道为非对称的加热场可以导致以赤道为对称的有效Rossby波源;尽管辐散流占总的水平流很小比例,但它引起的涡度平流对于理解热带-温带相互作用及其遥相关动力学具有重要理论意义。该理论不仅可以解释上文提到的GCM模拟中存在的问题,而且也提示我们与热带加热场相联系的辐散场模拟准确性的重要性,虚假的散度场可以引

起两半球温带错误的响应,这也为中长期数值预报误差来源分析提供一定的动力学基础。

Webster 和 Chang(1988)^[39]提出的是关于赤道某些区域存在能量积累和发射的理论。该文通过推论和利用一个自由面的正压模式进行验证提出在热带和温带大气相互作用中存在两类遥相关系统。一类是在热带大气中通过赤道辐散拦截模把波能传播到能量积累区域,沿着赤道纬向风 \bar{u} 的收缩区,即 $\left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} < 0 \right|_{\max}$ 区为波能积累区, \bar{u} 的拉伸区,即 $\left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} > 0 \right|_{\max}$ 区为波能的耗散区,从而构成了赤道遥相关系统,该系统把热带远距离区域同赤道瞬变模联系起来;另一类是从赤道能量积累区向高纬发射能量,从而构成热带-温带波列的遥相关系统。数值结果表明:赤道积累区正是赤道对高纬瞬变影响的发射区。热带发射区的概念是对热带-温带遥相关理论有意义的修正,这种赤道和修正的热带-温带遥相关理论可以解释很多模拟和观测分析中难以回答的问题,具有重要的动力学意义。

4. 低频振荡的数值模拟研究

30—60天振荡是季节内尺度一种最强信号的大气低频振荡。近年来人们用许多模式模拟了这种振荡的结构和传播特征。例如 Lau等(1986)^[40]、Pitcher和Geisler(1987)^[47]以及 Swinbank 等(1988)^[42]分别使用 GCM 对低频振荡进行了较为真实的再现。对低频振荡研究的重要方面是对其产生的动力学机制的研究,该方面突出的是 Lau(1987,1989)等^[43,44]的工作。关于热带大气低频振荡产生的源, Lau 等(1987)^[43]指出了 30—60 天振荡是一种所谓的 Wave-CISK 机制维持的热带振荡的本征模,其时间尺度取决于异常环流绕赤道一圈所用的时间,而 Kelvin 波被认为对这种振荡的结构和传播作重要贡献(C-

hang 和 Lim, 1988^[45]), Wave-CISK 机制对于产生热带大气低频振荡的重要性被简化的 GCM 模拟所支持(Hayashi 和 Sumi, 1986^[46])。近年,Chao(1987)^[47]提出低频振荡也包含东传的 Rossby 波分量,其传播加大了进入对流区的湿辐合。另外, Emanuel (1987)^[48]提出了一个表面风扰动和蒸发之间的反馈机制,成为低频波东传的另一可能原因;Neeling等(1987)^[49]利用 GFDL GCM 进行一系列试验提出蒸发-风反馈在加大季节内尺度信号方面十分重要。上述研究表明:热带大气季节内尺度变化性主要是其内部动力学问题。

目前对季节内尺度振荡研究存在的主要问题是:无论是用 GCM 还是用简单模式,几乎所有的模拟给出的低频波东传速度要比观测值至少快 30~50%,造成模拟大气低频振荡快传的原因还不很清楚。Sui 和 Lau (1989)^[44]认为:对于移动性的 Wave-CISK 机制,波速依赖于加热廓线的垂直结构和基态稳定度。为此他们改变了对流加热的处理,并引进了下垫面强迫的调制作用,模拟结果表明:低频振荡的周期是 20—50 天,基本上依赖于加热廓线的垂直分布,20 天周期的“快波”被深对流激发,最大加热位于 500hPa 甚至以上,而 50 天周期的“慢波”由对流层低层(500—700 hPa)加热激发。由于海洋东部 SST 偏冷,深对流被抑制,从而对“快波”产生抑制。这意味着对流层低层的加热有可能减慢 Wave-CISK 模。

关于中高纬度低频振荡的数值模拟工作还很不够,但也有一些模式积分资料的诊断分析工作,例如 Lau 等(1986)^[40]工作表明:季节内尺度振荡具有全球特征;其结构和 ENSO 环流异常型存在许多相似性。因此,在没有非季节性外强迫条件下模式也能模拟出中高纬低频振荡现象,说明这种振荡是大气本身内部固有的特征。对其产生的机制有待进一步研究。

5. 持续性异常的模拟研究

持续性异常是近年来气象学家感兴趣的一个研究方面,对它的研究不仅可以加深我们对大气低频变化性质的了解,而且也为我们时间尺度超过一周的天气预报提供线索。持续性异常定义一般包括两方面,一是振幅必须超过一特定值,二是持续某一特定时间。事实上,持续性异常的概念是对经典的阻塞(blocking)概念(Rex, 1950)^[50]的推广,而阻塞问题成为近年来持续性异常研究的一个重要组成部分。对大气持续性异常研究主要集中在以下两方面:1) 地理分布和时间平均结构,2) 时间发展及其产生和维持的机制。Dole(1983, 1986 a)^[51,52]以及 Dole 和 Gordon(1983)^[53]先后研究了北半球冬季环流持续性异常的地理分布和时间平均结构特征,结果发现在北半球出现超过 10 天的持续性异常主要位于三个关键区域:即阿留申南部的北太平洋(PAC)、格陵兰南部的北大西洋(ATL)以及苏联北部到北冰洋地区(NSU)。类似的研究还有 Gutzler 和 Mo(1983)^[54]、Horel(1985 a)^[55]、Trenberth 等(1981)^[56]、Shukla 和 Mo(1983)^[57]等的工作。Trenberth(1985)^[58]、Mo(1986)^[59]、Trenberth 和 Mo(1985)^[60]先后研究了南半球的持续性异常环流以及阻塞等问题。Dole(1986 b)^[61]以及 Dole(1989, 1990)^[62,63]先后研究了北太平洋、北大西洋和苏联北部地区持续性异常的时间发展及产生和维持的机制,结果指出:大气内部动力学过程是其产生和维持的重要原因。近年来的许多研究表明这些内部动力学过程包括:1) 纬向不均匀的大尺度时间平均流的不稳定,如正压不稳定(Simmons等, 1983^[34]、Wallace 和 Lau, 1985^[64]、Nakamura 等, 1987^[65])、斜压不稳定(Fredrikssen, 1982, 1983, 1986^[66,67,68]、Schubert, 1986^[69]); 2) 天气尺度和行星尺度波动之间的非线性相互作用(Egger, 1978^[70]、Kalnay-Rivas 和 Merkiné, 1981^[71]、Shutts,

1983^[72]、MacVean, 1985^[73]、Young 和 Villere, 1985^[74]); 3) 异常的热力和地形强迫(Hoskins 和 Karoly, 1981^[32]); 4) 平均流的变化(Held, 1983^[75]、Dasilva 和 Lindzen 1987^[76]) 等等。上述每一动力学过程均可产生异常强迫波,对持续性异常作出贡献。同时,观测、模拟和理论研究还表明:天气尺度扰动是触发大尺度流型异常增长的重要因子^[62]。

在 GCM 模拟研究方面, Blackmon 等(1986)^[77]利用 NCAR 一月 CCM 的 1200 天积分资料进行了持续性异常的分析,并和实测的 20 个冬季资料分析的结果进行了比较,结果表明:除苏联北部地区外,两者在北太平洋、北大西洋地区持续性异常特征十分一致,同时也分别给出了一个阻塞、以及高低频涡旋相互作用对阻塞影响的例子。上述结果表明模式内部动力学和物理学本身就足以产生冬季北大西洋和北太平洋地区相当真实的阻塞现象。之后, Barker 和 Horel(1988)^[78]利用 NCAR CCM、Horel 和 Mechoso(1988)^[79]利用 UCLA GCM 以及 Kitoh(1989)^[80]利用日本 MRI GCM 的长期数值积分结果进行了类似的分析。总的说来,不同的模式在模拟持续性异常发生的地理位置、持续的时间方面均有不同的特点,与实测分析结果相比尚存在不少差异。例如,模拟的高度场标准差普遍地小于观测分析场。一般认为造成这种差异的原因是模式的不完善所致。例如:一般模式里均忽略了下垫面年际变化效应,而这种效应对持续性异常也有显著影响。

对阻塞过程特别是阻塞高压形成和维持机制动力学研究是持续性异常研究领域内的一个突出方面,近年来这方面研究可以划分为两个主要方面理论。第一类是多平衡态和流型体系理论。Charney 和 DeVore(1979)^[81]首先引入了大尺度流的多平衡态概念,利用一个高截断的正压模式研究了外强迫驱动的纬向流和由地形或经向热力差异

强迫的 Rossby 波之间的非线性相互作用,得到两个平衡态,一是超共振的高指数态,另一是次共振的低指数态,由于低指数态十分接近于共振点,且类似于大气中的阻塞流型,因此阻塞被认为是一种近共振的低指数稳定的平衡态解,并假定平衡态之间的转换是由小尺度扰动造成的。但是平衡态理论存在以下问题:1)无法解释阻塞形成的局地特点,2)无法解释平衡态之间的转换(因为小尺度扰动在低阶谱模式里不能分辨),3)大气中有无出现共振的可能,4)系统性质对波谱截断的敏感性等。Reinhold 和 Pierrehumber(1982, 1985)^[82,83]利用一个包含斜压不稳定波分量的截断的两层模式研究指出大气运行中存在一些经常出现的准定常特征,同时提出了两个不同的时间平均态,称之为天气体系(Weather regimes),大尺度流就是在两个天气体系之间的非线性振荡,而天气体系并不需要接近于平衡态。“天气体系”的概念似乎过于主观,因此直接应用于动力学系统或真实大气仍是值得怀疑的。近年来,Legras 和 Ghil(1985)^[84]利用高截断的球面正压模式提出了行星流型体系(Planetary flow regimes)的概念, Mukougawa(1988)^[85]模式研究提出了大尺度大气运行中的准定常态的概念(Quasi-stationary states)等。这些研究都是强调了全球性的地形和外强迫等过程对局地特征形成的作用。第二类是瞬变强迫作用理论。Green(1977)^[86]首先提出瞬变强迫对阻塞形成的重要性,近年来这方面研究已十分丰富。例如,人们探索用孤立波或涡旋(eddies)动力学来模拟大气阻塞问题。自从 Stern(1975)^[87]研究了海洋持续性涡旋(eddy)并提出了偶极子涡旋(modons)概念后, McWilliams(1980)^[88]首先把这种具有强烈非线性特征的偶极子涡旋引入对大气阻塞问题的研究, Flierl 等(1980)^[89]把这种研究扩展到一个极其简单的斜压模式里。但是上述研究存在以下问题:1)缺乏一个合适的机制维持偶极子涡旋结构以克服耗散效应,2)需要一

个特殊的纬向流条件,它使得 Modons 不能和定常 Rossby 波共存,3)最简单的斜压模式里难以给出 blocking-like 解(Flierl 等, 1980)^[89]。针对上述问题, Shutts(1983)^[72]利用一个 $1\frac{1}{2}$ 层准地转模式,虽然没有直接联系 Modons 解,但结果表明:瞬变涡旋位涡输送在西风急流分流区增强,它是维持阻塞以克服耗散效应的重要机制。Pierrehumbert 和 Malguzzi(1984)^[90]研究局地非线性共振过程指出: modons 可以通过强迫和耗散的平衡而维持,而瞬变涡旋传输是一主要强迫机制。Haines 和 Marshall(1987)^[91]把涡旋强迫和非线性共振两种机制结合起来研究表明:涡旋强迫场可以直接通过非线性共振机制激发 modons 的产生;当涡旋不是一个无限持续的精确的定态解时,不需要严格的纬向流条件就可得到解析的 modons 解;在偶极子强迫(dipolar forcing)条件下, modons 可以作为一种瞬变态存在于纬向流中以支持定常 Rossby 波。Haines(1989)^[92]把上述研究扩展到一个完全的斜压模式中,利用一个两层准地转 β -通道模式研究指出:具有准定常、相当正压结构特征的偶极子涡旋完全可以合理地激发于包含垂直切变的真实的西风气流里,这些涡旋的持续时间和大气中阻塞持续时间相当。同时该研究也提出了由于涡旋和定常 Rossby 波相互作用而造成涡旋不能无限持续的衰减机制。阻塞形成和维持的瞬变强迫作用理论正得到人们越来越多的支持。

6. 结 束 语

综合上述可知,近年来国外在海气、冰气、陆气相互作用动力学过程以及遥相关、季节内尺度振荡和持续性异常等动力学过程方面已经进行了大量丰富的研究,这些研究成果构成了气候动力学(Climate Dynamics),特别是低频大气动力学过程十分丰富的内容。通过这些动力学过程的研究,揭示了

大气环流或短期气候变异的机理、为长期天气或短期气候预报提供了动力学基础。许多研究已经表明气候异常是外强迫和大气内部动力学相互作用的结果。其中大气内部动力学过程十分复杂,包括的内容又十分广泛,这方面尚存在许多问题如:与温带-热带大气相互作用联系的全球大气三维遥相关动力学结构及其产生和维持机制,中高纬低频振荡产生的机制,三维涡旋动力学、定常波和基本态及其相互作用等等动力学过程仍需进行更加深入的研究,可望在不长的时间内这些问题能有所突破。

最后必须指出本文涉及的仅是作者认为比较重要的气候动力学理论的一部分内容,ENSO动力学是当前国外气象界已经或正在进行的一个十分重要的研究方面。限于篇幅本文没有讨论。

参 考 文 献

- [1] Julian, P. R. and R. M. Chervin, 1978, A study of the Southern Oscillation and Walker Circulation phenomenon, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1433—1451.
- [2] Keshavamurty, R.N., 1982, Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the equatorial Pacific and the teleconnections of the Southern Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 39, 1241—1259.
- [3] Blackmon, M. L., J. E. Geisler and E. J. Pitcher, 1983, A general circulation study of January climate anomaly patterns associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperatures, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1410—1425.
- [4] Shukla, J., and J. M. Wallace, 1983, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1613—1630.
- [5] Geisler, J. E., M. L. Blackmon, G. T. Bates and S. Muñoz, 1985, Sensitivity of January climate response to the magnitude and position of equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1037—1049.
- [6] Tokioka, T., K. Yamazaki and M. Chiba, 1985a, Atmospheric response to the sea surface temperature anomalies observed in early summer of 1983: A numerical experiment, *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 565—588.
- [7] Palmer, T. N., and D. A. Mansfield, 1986a, A study of winter time circulation anomalies during past El Niño events, using a high-resolution general circulation model I: Influence of model climatology, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 613—638.
- [8] Palmer, T. N., and D. A. Mansfield, 1986b, A study of wintertime circulation anomalies during past El Niño events, using high-resolution general circulation model II: Variability of the seasonal mean response, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 639—660.
- [9] Mechoso, C. R., et al, 1987, Numerical simulations of the atmospheric response to a sea surface temperature anomaly over the equatorial eastern Pacific Ocean, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2936—2956.
- [10] Boer, G., 1989, Concerning the response of the atmosphere to a tropical sea surface temperature anomaly, *J. Atmos. Sci.*, 46, 1898—1921.
- [11] Schell, I. I., 1939, Polar ice as a factor in seasonal weather. In: Reports on critical studies of methods of Long-range weather forecasting, *Mon. Wea. Rev. Suppl. No. 39*, pp27—51.
- [12] Walsh, J.E., 1983, The role of sea ice in climatic variability: Theories and Evidence, *Atmosphere-Ocean*, 21, 229—242.
- [13] Fletcher, J. O., 1968, The influence of Arctic pack ice on climate, *Meteor. Monogr.*, No. 30, 93—99.
- [14] Williams, J. et al, 1974, Simulation of the atmosphere using the NCAR global circulation model with ice age boundary conditions, *J. Appl. Meteor.*, 13, 305—317.
- [15] Fletcher, J.O. et al, 1971, Numerical simulation of the influence of Arctic sea ice on climate, WMO Tech. Note No. 129, Proc. IAMAP/IAPSO/WMO, Symp. Energy fluxes over polar surfaces Moscow.
- [16] Warshaw, M., and R.R. Rapp, 1973, An experiment on the sensitivity of a global circulation model, *J. Appl. Meteor.*, 12, 43—49.
- [17] Herman, G.F., and W.T. Johnson, 1978, The sensitivity of the general circulation to Arctic sea ice boundaries: A numerical experiment, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1649—1664.
- [18] Herman, G.F., and W.T. Johnson, 1979, The effect of extreme sea ice variations on the climatology of the Goddard general circulation model, *Sea Ice Processes and Models: Proc. ICSI/AIDJEX Symp.*, University of Washington Press.
- [19] Simmonds, I., The effect of sea-ice on a general circulation model of the Southern Hemisphere, In: *Sea Level, Ice and Climatic Change*, I. Allison (Ed.), IAHS Publ. No. 131, Int. Assoc. Hydrol. Sci., pp191—206, 1981.
- [20] Simmonds, I., et al, The circulation changes induced by the removal of Antarctic sea ice in a July general circulation model, Proceedings of the second international conference on Southern Hemisphere Meteorology, Wellington, Newzealand, December, 1—5, 1986, American

- Meteor. Soc., pp107—110.
- [21] Hahn, D. J., and J. Shukla, 1976, An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall, *J. Atmos. Sci.*, 33, 2461—2462.
- [22] Dey, B., et al, 1982, An apparent relationship between Eurasian snow cover and the advanced period of the Indian summer monsoon, *J. Appl. Meteor.*, 21, 1929—1932.
- [23] Dey, B. et al, 1983, Himalayan winter snow cover area and summer monsoon rainfall over India, *J. Geophys. Res.*, 38, 5471—5474.
- [24] Dickson, R. R., 1984, Eurasian snow cover versus Indian monsoon rainfall—An extension of the Hahn-Shukla results, *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 171—173.
- [25] Namias, J., 1962, Influences above normal surface heat sources and sink on atmospheric behavior, *Proc. of the Int. Symp. of Numerical Weather Prediction*, 615—629. Meteorological Society of Japan, Tokyo.
- [26] Namias, J., 1985, Some empirical evidence for the influence of snow cover on temperature and precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 1542—1553.
- [27] Walsh, J. E., et al, 1985, Influences of snow cover and soil moisture on monthly air temperature, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 756—768.
- [28] Roads, J. O., 1981, Linear and nonlinear aspects of snow albedo feedbacks in atmospheric models, *J. Geophys. Res.*, 86, 7411—7424.
- [29] Yeh, T.-C., R Wetherald and S. Manabe, 1983, A model study of the short term climatic and hydrological effects of sub-snow cover removal, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1013—1024.
- [30] Barnett, T. P., et al, 1989, The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations, *J. Atmos. Sci.*, 46, 661—685.
- [31] Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784—812.
- [32] Hoskins, B. J., and D. Karoly, 1981, The steady, Linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1179—1196.
- [33] Palmer, T. N., 1988, Large-scale tropical, extratropical interactions on time-scales of a few days to a season, *Aust. Met. Mag.*, 36, 107—125.
- [34] Simmons, A. J., J. M. Wallace, and G. W. Branstator, 1983, Barotropic wave propagation and instability and atmospheric teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1363—1392.
- [35] Webster, P. T., and J. R. Holton, 1982, Cross-equatorial response to mid-latitude forcing in a zonally varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, 39, 722—733.
- [36] Schneider, E. K., 1987, A Simplified model of the modified Hadley circulation, *J. Atmos. Sci.*, 44, 3311—3328.
- [37] Branstator, G., 1983, Horizontal energy propagation in a barotropic atmosphere with meridional and zonal structure, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1689—1708.
- [38] Sardeshmukh, P. D., and B. J. Hoskins, 1988, The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence, *J. Atmos. Sci.*, 45, 1228—1251.
- [39] Webster, P. J., and H. R. Chang, 1988, Energy accumulation and emanation regions at low latitudes: Impacts of a zonally varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, 45, 803—829.
- [40] Lau, N.-C., and K.-M. Lau, 1986, Structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL GCM, *J. Atmos. Sci.*, 43, 2023—2047.
- [41] Pitcher, E. J., and J. E. Geisler, 1987, The 40—50 day oscillation in a perpetual January simulation with a general circulation model.
- [42] Swinbank, R., T. N. Palmer and M. K. Davey, 1987, Numerical simulations of the Madden and Julian oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 45, 774—788.
- [43] Lau, K.-M., and L. Peng, 1987, Origin of low frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: The basic theory, *J. Atmos. Sci.*, 44, 950—972.
- [44] Sui, C., and K.-M., Lau, 1989, Origin of low frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere Part II: Structure and propagation of mobile Wave-CISK modes and their modification by lower boundary forcings, *J. Atmos. Sci.*, 46, 37—56.
- [45] Chang, C.-P., and H. Lim, 1988, Kelvin Wave-CISK: A possible mechanism for the 30—50 day oscillations, *Proc. of the Int. Symposium on Monsoon and Meteorology*, Taipei.
- [46] Hayashi Y.-Y., and A. Sumi, 1986, The 30—40 day oscillations simulated in an “aqua planet” model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 64, 451—467.
- [47] Chao, W. C., 1987, On the origin of the tropical intraseasonal oscillations, *J. Atmos. Sci.*, 44, 1940—1949.
- [48] Emanuel, K. A., 1987, An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2324—2340.
- [49] Neelin, J. D., et al, 1987, Evaporation-wind feedback and low frequency variability in the tropical atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 44, 2341—2348.
- [50] Rex, D. P., 1950, Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate II. The climatology of blocking action, *Tellus*, 2, 275—301.
- [51] Dole, R. M., 1983, Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere, B. J. Hoskins and R. P. Pearce, Eds., Academic Press, pp95—109.

- [52] Dole, R.M., 1986a, Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Structure. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 178—207.
- [53] Dole, R.M., and N.D. Gordon, 1983, Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1567—1586.
- [54] Gutzler, D. S, and K.C. Mo, 1983, Autocorrelation of Northern Hemisphere geopotential heights, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 155—164.
- [55] Horel, J. D., 1985a, Persistence of the 500mb height field during Northern Hemisphere Winter. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 2030—2042.
- [56] Treidl, R.A., et al, 1981, Blocking action in the Northern Hemisphere: A climatological study. *Atmos. Ocean*, 19, 1—23.
- [57] Shukla, J. and K.C. Mo, 1983, Seasonal and geographical variation of blocking, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 388—402.
- [58] Trenberth, K. E., 1985, Persistence of daily geopotential heights over the Southern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 38—53.
- [59] Mo, K. C., 1986, Quasi-stationary states in the Southern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.* 114, 808—823.
- [60] Trenberth, K.E., and K.C. Mo, 1985, Blocking in the Southern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 3—21.
- [61] Dole, R.M., 1986b, The life cycles of persistent anomalies and blocking over the North Pacific. *Adv. Geophys.*, 29, 31—69.
- [62] Dole, R.M., 1989, Life cycles of persistent anomalies. Part I: Evolution of 500mb height anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 177—211.
- [63] Dole, R.M., et al, 1990, Life cycles of persistent anomalies. Part II: The development of persistent negative height anomalies over the North Pacific Ocean, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 824—846.
- [64] Wallace, J.M., and N.-C. Lau, 1985, On the role of barotropic energy conversion in the general circulation, *Advances in Geophysics*, Vol. 28, *Climate Dynamics*, Ed. by S. Manabe, pp 33—74.
- [65] Nakamura, H., et al, 1987, Horizontal structure and energetics of Northern Hemisphere wintertime teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, 44, 3373—3391.
- [66] Frederiksen, J.S., 1982, A unified three-dimensional instability theory of the onset of blocking and cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 39, 967—987.
- [67] Frederiksen, J.S., 1983, A unified three-dimensional instability theory of the onset of blocking and cyclogenesis. II. Teleconnection Patterns, *J. Atmos. Sci.*, 40, 2593—2609.
- [68] Frederiksen, J. S., 1986, Instability theory and nonlinear evolution of blocks and mature anomalies, *Adv. Geophys.*, 29, 277—303.
- [69] Schubert, S. D., 1986, The structure, energetics and evolution of the dominant frequency-dependent three-dimensional atmosphere modes, *J. Atmos. Sci.*, 43, 1210—1237.
- [70] Egger, J., 1978, Dynamics of blocking highs, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1788—1801.
- [71] Kalnay-Rivas, E., and L. Merkin, 1981, A simple mechanism for blocking, *J. Atmos. Sci.*, 38, 2077—2091.
- [72] Shutts, G.J., 1983, The propagation of eddies in diffluent jetstreams: eddy vorticity forcing of blocking flow fields, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109, 737—761.
- [73] MacVean, M.K., 1985, Long-wave growth by baroclinic processes, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1089—1101.
- [74] Young, R.E., and G.L. Villere, 1985, Nonlinear forcing of planetary scale waves by amplifying unstable baroclinic eddies generated in the troposphere, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1991—2006.
- [75] Held, I.M., 1983, Stationary and quasi-stationary eddies in the extratropical troposphere: theory. *Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere*, B. J. Hoskins and R. P. Pearce, Eds., Academic Press, pp127—168.
- [76] DaSilva, A., and R.S. Lindzen, 1987, A mechanism for excitation of ultra-long Rossby waves, *J. Atmos. Sci.*, 44, 3625—3639.
- [77] Blackmon, M. L., et al, 1986, *The climatology of blocking events in a perpetual January simulation of a Spectral General Circulation Model*, *J. Atmos. Sci.*, 43, 1379—1405.
- [78] Barker, T.W., and J.D. Horel, 1988, Quasi-stationary regimes in the Northern Hemisphere of the NCAR Community Climate Model, *J. Climate*, 1, 406—417.
- [79] Horel, J.D., and C.R. Mechoso, 1988, Observed and simulated intraseasonal variability of the wintertime planetary circulation, *J. Climate*, 1, 582—599.
- [80] Kitoh, A., 1989, Observed and simulated persistence of the 500mb height anomalies, *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 1001—1013.
- [81] Charney, J.G., and J.G. Devore, 1979, Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking, *J. Atmos. Sci.*, 36, 1205—1216.
- [82] Reinhold, B.B., and R.T. Pierrehumbert, 1982, Dynamics of weather regimes: Quasi-stationary waves and blocking, *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1105—1145.
- [83] Reinhold, B.B., and R.T. Pierrehumbert, 1985, Corrigendum to "Dynamics of weather regimes: Quasi-stationary waves and blocking", *Mon. Wea. Rev.*, 113, 2055—2056.
- [84] Legras, B. and M. Ghil, 1985, Persistent anomalies, blocking and variations in atmospheric predictability, *J. Atmos. Sci.*, 42, 433—471.
- [85] Mukougawa H., 1988, A dynamical Model of

- "quasi-stationary" states in large-scale atmospheric motions, *J. Atmos. Sci.*, 45, 2868—2888
- [86] Green, J.S.A., 1977, The weather during July 1976, Some dynamical considerations of the drought, *Weather*, 32, 120—125.
- [87] Stern, M., 1975, Minimal properties of planetary eddies, *J. Mar. Res.*, 33, 1—13.
- [88] McWilliams, J.C., 1980, An application of equivalent modons to atmospheric blocking, *Dyn. Atmos. Oceans*, 5, 43—66.
- [89] Flierl, G.R., et al, 1980, The dynamics of baroclinic and barotropic solitary eddies, *Dyn. Atmos. Oceans*, 5, 1—41.
- [90] Pierrehumbert, R.T., and P. Malyuzzi, 1984, Forced coherent structure and local multiple equilibria in a barotropic atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 41, 246—257.
- [91] Haines, K, and J.C. Marshall, 1987, Eddy-forced coherent structures as a prototype of atmospheric blocking, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*, 113, 681—704.
- [92] Haines, K., 1989, Baroclinic modons as prototypes for atmospheric blocking. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3202—3218.