

大洋温盐环流的稳定性及变率模拟研究进展*

周天军 王绍武

(北京大学地球物理系 北京 100871)

张学洪

(中国科学院大气物理研究所 北京 100080)

摘要 围绕大洋温盐环流的稳定性和变率,以三维原始方程大洋环流模式(OGCM)和海气耦合模式为重点,兼顾理想概念模式,总结了近年来模拟研究的主要成果。概括了几个主要前沿方向——大洋温盐环流的多平衡态现象、数十年/年代际变率以及百年到千年尺度的变率特性等的研究成果,探讨了其内部机制。

关键词 温盐环流 多平衡态 变率

分类号 P733

1 大洋温盐环流数值模拟研究的内容和历史

过去有关海气相互作用的研究主要集中在表层海温,比较典型的工作是关于 ENSO 的研究。近年来,有关历史及当前气候变化的研究,使得人们直接关注到大洋温盐环流的作用。大洋温盐环流的稳定性、变率以及与之相联系的极向热输送,将对局地和全球气候产生显著影响,是气候系统的重要调节器。气候系统的年代际及百年尺度的变率可能与温盐环流的变化相联系。一般认为年代际变率是海洋内部自持续的振荡,由于它和观测到的、一般认为是由温室效应引起的气候变率的时间尺度相同,因而倍受关注。1996 年公布的《气候变率与可预报性研究》(CLIVAR)科学报告,明确地将年代际到百年尺度气候变率与可预报性研究单独作为一个子计划提出(CLIVAR - DecCen),强调开展与年代际及更长期变率有关的海洋过程研究,探索长期特别是年代际尺度的气候变率的成因。

从 60 年代初 Stommel(1961)的工作到现在,大洋温盐环流的稳定性和变率的模拟研究可以分为两个阶段:

(1) 利用概念模式进行理论性研究阶段(60 年代至 80 年代)。这一时期,受计算机发展水平的限制,人们应用一些高度简化的理论上的概念模式,包括最简单的理想的箱模式^[1-4]和二维纬向平均模式^[8-11],研究了温盐环流的稳定性、多平衡态现象以及存在的自

* 国家自然科学基金项目“20 世纪中国与全球气候变率研究”(项目编号:49635190)资助。

第一作者简介:周天军,男,1969 年 1 月出生,博士研究生,主要从事海洋与气候变率研究。

收稿日期:1997-08-14;修改稿:1997-09-29

维持的内部振荡。概念模式由于是高度简化的,因而存在很大的局限性,不过由于其考虑的物理过程比较简单,有助于理解复杂的三维模式的结果。

利用箱模式得到的最为重要的结果有二:发现了大洋温盐环流的多平衡态现象;发现温盐环流存在自维持的内部振荡。箱模式的优点是比较简单,物理内涵清楚,允许对热、盐表面强迫在驱动大洋温盐环流中的作用进行定量分析。其局限性在于:温盐环流完全由净经向的表面密度梯度驱动,难以描述东西向压力梯度、地转适应等在驱动温盐环流中的作用;大多缺少风生环流;平流过程描述较差;利用的都是线性化的状态方程,而实际的状态方程是非线性的;难以正确地模拟温盐环流的细节。

利用纬向平均模式得到的结果主要有二:温盐环流的稳定性对于高纬度海表盐度的变化极为敏感;温盐环流有多于一种的平衡态存在,这些平衡态之间的相互转换,可以通过真实的有限振幅的淡水扰动来触发。纬向平均模式的优点在于:计算花费不大,便于进行长期气候模拟;模式比较简单,便于进行各种必要的参数敏感性研究(这些研究利用非线性三维模式很难进行);能够进行模式敏感性的解析分析;较之箱模式能够提供温盐环流的更为复杂的特征,增进对热量、淡水通量强迫作用的理解。其缺点在于:未考虑水平风生涡旋,缺乏基本平流过程,难以解释模拟中发现的海洋气候变率;速度场完全是诊断场;引起学术界极大兴趣的年代际内部变率,由于完全是一种三维现象,不可能在纬向平均模式中得到合理反映。

(2) 利用三维非耦合大洋环流模式(OGCM)和海气耦合模式进行模拟研究(80年代以来)。目前世界各国已先后建立起三维原始方程大洋环流模式(包括理想海洋形状的箱OGCM和海陆分布、海底地形接近真实的全球OGCM),在此基础上,发展了原始方程的海气耦合模式(将大气环流模式与大洋环流模式相耦合)。

目前应用较广的全球OGCM主要有:Bryan-Cox-Semtner原始方程OGCM^[12~15],它是目前应用最为广泛的完全预报OGCM;二是Maier-Reimer模式^[16,17],该模式的水平速度场是诊断场(通过地转方程确定)。张学洪等也发展了大洋环流模式IAP/OGCM^[18]。对于定量评估和预测潜在气候变化、研究海洋在气候变率中的作用来说,耦合模式是目前最为理想的工具。

目前,利用OGCM得到的结果主要有:比较成功地模拟出当前的海洋气候,特别是当代全球大洋温盐环流;研究了温盐环流的多平衡态现象,发现温盐环流的稳定性对于高纬度海表淡水通量的变化是极为敏感的,淡水通量的变化能够引起海表盐度改变,从而触发温盐环流不同平衡态之间的转换;研究了温盐环流的内部变率(包括年代际变率、百年时间尺度和千年尺度的变率),探讨了引起年代际变率的物理机制。利用海气耦合模式,也进一步验证了温盐环流的多平衡态现象和年代际变率的存在。

三维的大洋环流模式和海气耦合模式代表着今后发展的主流方向。但是现阶段,这一类模式仍存在诸多缺陷,主要有应用粗分辨率正交网格来表示底部地形和大陆边界所固有的缺陷,不可分辨的次网格尺度过程(具体地说,包括中尺度涡旋、内波中断、双扩散等)的参数化问题等。此外,OGCM还存在以下缺点:在确定海表温度和表面淡水通量时未考虑海洋状态,未反映海洋热输送对海表温度的反馈;未考虑海表温度对水循环的反馈作用,因为暖的海表温度距平应引起蒸发增强,通过大气水汽输送而改变淡水通量分布;海底地形对温盐环流的稳定性和变率的影响尚未被很好处理,用于变率研究的许多箱OGCM用的

是平底地形; 模式中许多未考虑涡旋和海冰分量。对于耦合模式, 虽然热力强迫和风应力强迫来自大气模式, 但对盐度场大多仍采用气候场来强迫(而不是利用海气之间的淡水通量 $E-P$), 同时气候漂移问题尚未最终得到解决, 因此离严格地、真正意义上的海气耦合模式尚有一定距离。

应强调指出的是, 在非耦合 OGCM 中, 温盐环流完全是由海表温度场和盐度场驱动的, 具体地表现为 OGCM 的海表温、盐边界条件, 因此不同的处理方案代表着不同的强迫, 对模拟结果也有着不同的影响。在进行多平衡态和变率研究时, 从箱 OGCM 到全球 OGCM 利用的大都是所谓的“混合边界条件”, 而大量研究表明, 这类边界条件存在一些潜在问题, 温度表面边界条件假设大气的热容量无限大, 不管 SST 如何变化, 大气能够适应这种变化而同时又不改变自身温度, 这显然有一定的局限性。张盛等^[19]假设大气的热容量为零, 结果发现温盐环流要稳定得多。

2 当今海洋气候的模拟研究

自开展全球大洋环流数值模拟研究以来, 取得了重要进展。这方面的研究集中在利用 OGCM 正确模拟出观测到的大洋深水的形成以及海表以下的水团特征。England^[20]第一次在 OGCM 中真实再现全球大洋水团, 它成功地模拟出大尺度温盐环流以及典型的南极底水(AABW)、北大西洋深水(NADW)、南极中水(AAIW)和北太平洋中水(NPIW)。

张学洪等^[18]利用季节变化的表面气候强迫模式, 不但成功地模拟出实际的 SST、海冰分布、海表盐度、海面起伏、表层和一些次表层的流场以及相联系的垂直速度, 而且能够较好地模拟出温盐环流的结构, 尤其是对其两个主要成员 NADW 和 AABW 的模拟。NADW 和 AABW 的溢流在经圈流函数和深层、底层流场上表现得很清楚。此外, Maier-Reimer 等^[17]、Weaver 等^[21]也分别模拟出极为真实的大洋水团。

对当今海洋气候的模拟, 也存在不足之处, 具体因模式而不同, 例如 Bryan-Cox-Semtner 模式的问题是斜温层太深太分散、极向热输送太弱、西边界流太弱太宽、深海太暖、太淡、太均匀; IAP/OGCM 模式的主要问题是北大西洋深水溢流偏弱, 在印度洋和大西洋不能清楚地看到南极底水的溢流、底水太淡、模拟不出南极中层水、斜温层太厚且梯度太弱等。

3 大洋温盐环流多平衡态的模拟研究

所谓多平衡态, 即大洋环流的不同状态, 它之所以引起人们重视, 是因为不同的环流型下, 与温盐环流相联系的热输送将改变方向, 从而对全球气候产生重要影响。温盐环流的多平衡态现象最早是在 Stommel^[1]理想箱模式中发现的, 随后许多学者利用一系列繁简不一的箱模式对其进行了进一步的验证, 例如 Welander^[3]在其箱模式中得到了 9 种平衡态, 其中 4 种是稳定的; Marotzke^[4]在其双海盆箱模式中得到 16 种稳定平衡态。

关于多平衡态之间的相互转换, Marotzke^[4]发现通过在盐度上加一有限振幅的扰动, 可以引起系统中四种平衡态间的波型转换; Nakamura^[5]利用一箱模式发现淡水通量的变化是引起不稳定反馈的主要因素。Birchfield^[6,7]利用太阳常数和外部水循环强迫一单半球三箱模式, 发现水汽输送是触发平衡态转换的重要因素, 当从低纬向高纬的淡水输送量改变时, 温盐环流型将发生极大变化。

纬向平均模式的发展, 进一步增进了人们对温盐环流多平衡态的认识。Marotzke 等^[8]

利用纬向平均模式研究了多平衡态之间的转换,发现在高纬海表盐度场加上一正距平扰动,双核环流将向非对称的一核环流缓慢演变,而如果在高纬海表盐度场加上一负距平扰动,快速对流反馈开始,引起经向环流突变,双核环流形势突然转向一核环流。

Stocker^[9]和Wright^[10]利用纬向平均模式,研究了最后一次冰川消退对全球温盐环流输送带稳定性的影响。结果发现,淡水通量距平的叠加,能够使得稳定的输送带型平衡态(当前海洋的状态)向另一种平衡态反弹,在该平衡态中深水沉降仅发生在南大洋。该结果具有极为重要的气候上的启示,它意味着在目前的强迫下,大洋温盐环流有多于一种的平衡态存在,而且这些平衡态之间的过渡与转换,可以通过真实的、有限振幅的淡水扰动来触发。

Fichefet^[11]等利用二维模式验证了大西洋40°N温盐环流对北大西洋40°S以北或南大洋以南盐度变化的敏感性。结果表明大西洋翻转环流的强度是由深对流发生海域之间的密度差异决定的。在北部盐度减少0.4psu(1psu=1g/kg)或南部增加同等量的盐度,将引起温盐环流明显减弱,南极底水(AABW)向北部楔入的更远;在北部盐度增加0.4psu或南部减少同量的盐度将使得翻转环流加强。

温盐环流的多平衡态现象,最早由于仅在高度简化的理想概念模式中发现,因而并未引起学术界的高度重视,这种情况一直延续到三维OGCM中发现多平衡态现象。Bryan^[22]利用箱OGCM,通过分别在南半球加上1psu负盐度距平、2psu正盐度距平,得到两种非常不同的平衡态,第一次证明在双半球三维OGCM中温盐环流存在多平衡态。其结果表明,对于海表盐份收支,小的有限振幅的扰动能够引起对地球气候具有重要启示的平衡态转换。因为温盐环流对于经向热、盐输送极为重要,从一种平衡态向另一种平衡态转换,将引起极向热输送的极大变化,这些热量最终将释放到海洋上面的大气中。海洋向大气热释放量的巨大变化,将对全球气候产生重要影响。

Marotzke等^[23]发现在关于赤道对称的表面强迫作用下,其双半球箱OGCM中存在四种平衡态:北部沉降型,在北大西洋和北太平洋都有深水形成;南部沉降型,仅在南大洋有深水形成;输送带型,深水仅在北大西洋形成,在北太平洋有涌升;反输送带型中,深水仅在北太平洋形成,在北大西洋有涌升发生。Hughes等^[24]在箱OGCM中增加一海底山脊,以允许有非对称的海盆、非对称的强迫,结果发现多平衡态现象,北大西洋深水(NADW)总是位于南极底水(AADW)之上,此外还发现没有NADW沉降的平衡态和南部沉降平衡态的多种形式,但北太平洋深水(NPDW)沉降从未发生过。

在全球范围的、采用真实海陆轮廓和海底地形的全球OGCM中,尽管NADW的形成要比箱OGCM中稳定,但前面提到的多平衡态现象也都出现了。研究还发现北大西洋淡水通量的变化能够引起温盐环流强度发生变化,例如Maier-Reimer等^[16]发现在其非耦合的全球OGCM中,流入大西洋的净淡水量的—较小扰动,使得那里的温盐环流彻底崩溃。Cai^[27]发现在北大西洋高纬海域加上一淡水扰动将对温盐环流的强度产生明显影响,NADW消失了,若将全球水循环增强30%,则NADW的强度降低一半。

利用海气耦合模式,人们进一步增进了对温盐环流多平衡态现象的认识。一般认为最后一次冰期结束时在北大西洋发现的快速气候振荡是由温盐环流的启动或关闭引起的,但是根据近期的地球化学资料,温盐环流是在暖、深型和冷、浅型平衡态之间转换的。Rahmstorf^[28]将GFDL的OGCM与EBM耦合,成功地模拟出这种机制,它是由淡水扰动触发北大西洋的对流发生调整引起的,使北大西洋SST在不到10年内就降低,在冷期NADW的

形成率和暖期是一样的,但是 NADW 只下沉至中层,而 AABW 则一直向北延伸充满整个深层大西洋;温盐环流在快速减弱之后很快复原,得到一有浅对流和冷的表层水的平衡态。由于海气耦合系统的高度非线性特征,输入北大西洋的淡水量的适度变化,将使得北大西洋温盐环流的平衡态发生转换,引起区域气候发生剧烈变化。由于局地淡水通量的变化能够触发对流不稳定,所以当前水循环的很小的扰动就可能使全球温度在数年间变化若干度。

完全耦合的大气—海洋模式有助于提高我们对温盐环流的稳定性和变率性质以及作为一个整体对气候系统影响的理解。Manabe 等利用完全耦合的大气—海洋—海冰模式,发现在气—海—冰气候系统中,温盐环流存在多平衡态:传送带型和南部沉降型。传送带型平衡态在北大西洋有深水形成,NADW 位于 AABW 上面,北大西洋北部海表是暖而咸的;南部沉降型平衡态中没有 NADW 形成,高纬海表是冷而淡的,存在一强盐跃层。格陵兰冰心中的温度记录表明,在冰期和后冰期,北大西洋气候常发生大的突然的变化,一个明显的例子即新仙女木冷期,据推测这是由于大陆冰盖融化向大西洋大量排放淡水使得那里的温盐环流发生快速变化引起的,因此,Manabe 等^[50]认为海洋的南部沉降型平衡态和新仙女木期的海洋状态非常相似。

Manabe 等^[51]积分其海气耦合模式 1000 年达到平衡后,连续 10 年在大西洋 50~70°N 的纬带范围内均匀地加上 1Sv ($1\text{Sv} = 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$) 的表面淡水通量(据估计新仙女木冷期前的淡水排放峰值大约为 0.44Sv ,但总量要大于 1Sv),后继续积分 300 年,发现北大西洋温盐环流经历了突然变弱、再加强、减弱、逐渐恢复四个阶段,该过程在海表盐度、温度及温盐环流强度的时间序列上表现得都非常清楚,该响应和冰心及深海岩心中记录的海气系统的突变非常相似。古海洋资料表明在新仙女木冷期,不仅深水形成显著减少,而且上层海洋向下的通风率也减少,因此弱而浅的温盐环流和正常温盐环流之间的转换,可能较之南部沉降型平衡态更能反映新仙女木冷期温盐环流的变化。

4 关于大洋环流内部变率的模拟研究

研究发现,大洋温盐环流不是静止的,它在进行着自然的、时间尺度从数十年到上千年的内部变率。千年尺度的变率可能与海洋内部的扩散过程相联系,表现为“极地盐跃突变”现象(即近极地海域盐跃层强度突然增强并扩展的现象)和“冲刷”现象(即海洋层结发生强烈翻转、在短时间内释放出大量热量的现象);百年尺度的变率与温盐环流强度的变化相联系;年代际变率是海洋内部自持续的振荡。

4.1 百年到千年时间尺度的内部变率

Welander^[2]利用其垂直双箱模式,最早揭示了大洋内部变率的存在,在一定参数系下,其系统有一振荡解,即著名的“Welander 热盐振子”。随后,内部变率的存在进一步在纬向平均模式中得到验证。Mysak 等^[52]发现在自由强迫下(在淡水通量上加上一小振幅的随机扰动),单海盆二维模式中,有百年尺度的振荡(周期介于 200~300 年间)叠加在一基本的一核环流形势(南部沉降型或北部沉降型)上面,其机制为大尺度的 SSS 距平平流造成的。他们还发现平衡态间存在千年尺度的振荡。

比较适合于研究内部变率问题的模式是 OGCM。Marotzke^[23]首先在没有风应力的单半球箱 OGCM 中发现极地盐跃突变现象和冲刷现象,但是如果考虑了风强迫,则不存在冲刷。而 Weaver 等^[53]发现即使包含了风强迫,冲刷也能够发生。在双半球试验中,冲刷现象

也存在,但强度要弱一些。对此,Weaver 指出冲刷的存在是和淡水通量相对于热量强迫的相对重要性、风强迫较之高纬度淡化的相对强度相联系的。

Power 等^[34,35]证实在具有真实地形的全球 OGCM 中,也能够发生极地盐跃突变现象,但具体依赖于与大气热力耦合的强度,比较热力耦合很强与相对较弱时的结果,发现后者温盐环流要更稳定一些。

Mikolajewicz 等^[36]首先在全球 OGCM 中发现了主导性周期为 320 年的内部变率。该变率是由大西洋大尺度 SSS 平流输送造成的,具体表现为盐度距平沿着大西洋涡旋运动。Weaver 等^[37]采用热力控制方案,即海表淡水通量强迫场很弱,在驱动温盐环流中仅发挥较小的作用,发现在随机强迫下温盐环流变率具有百年时间尺度。

4.2 年代际变率的模拟研究

实际观测发现北大西洋存在着明显的年代际变率,一般认为该变率是和大尺度的经向翻转环流的变化相联系的。Weaver^[38,39]等首先在 OGCM 中发现了年代际内部变率,它使得温盐环流以十年时间尺度加强或削弱,发生振荡期间极向热输送变化非常大。如果在真实海洋中,这种内部变率的确存在,那么无疑它将对全球气候产生深远影响。

海表强迫不是定常的,除了季节循环,海气之间以较小的时空尺度持续地相互作用,Weaver 等^[37]把其考虑为背景强迫场的随机扰动,结果发现当在淡水强迫场上加上随机扰动时,内部的年代际变率依然存在。

海洋内部的年代际变率不局限在单半球的箱 OGCM 中。Weaver 等^[38]指出,在有关于赤道对称的强迫作用的双半球海洋,年代际变率可以发生在任一半球,而不依赖于另一半球。Hughes^[24]等在其双海盆试验中,或是在北大西洋、或是在南大洋都发现了年代际变率,具体地依赖于所采用的淡水通量强迫场情况。

以上研究所用箱 OGCM 的海盆形状都是高度理想化的。Weaver 等^[40]在一海盆形状相对真实的北大西洋模式中发现,当没有淡水直接流入拉布拉多海时,整个积分过程中,内部自持续的 22 年周期的变率始终存在,变率主要位于北大西洋西部,特别是拉布拉多海。该振荡可用来解释在格陵兰冰心资料中发现的周期为 20 年的变率。Moore 等^[41]利用海陆分布和海底地形高度真实的 OGCM 发现,海表强迫的变化,使得温盐环流的强度发生较大变化,但两种平衡态之间的转换非常平稳,没有激发出明显的振荡;如果模式采用平板地形,则北大西洋能够激发出年代际振荡。Weisse 等^[42]在其三维全球 OGCM 中,发现北大西洋的拉布拉多海也存在着 10~40 年周期的变率。

真实海洋中的变率,各种时间尺度可能是同时存在的,温盐环流在相对较强和较弱的状态之间发生转换,期间年代际变率叠加在上面。这意味着年代际到百年尺度的气候变率的源,可能在于海洋温盐环流所固有的动力特性。

关于引起年代际变率的机制,Weaver 等^[39]指出年代际变率是和中纬到高纬海域存在净蒸发区相联系的(即蒸发大于降水,淡水通量 $E-P$ 为正值),淡水通量强迫场的经向梯度必须足够强,这样系统才能处于盐份控制型,从而发生年代际变率。年代际振荡的存在依赖于三个条件:一是所用的 $E-P$ (蒸发减去降水)场在北大西洋中部必须有净蒸发区域存在;二是该净蒸发海域北部必须进一步变淡;三是系统必须是处于盐份控制型^[43]。

Chen 等^[43]发现若北大西洋在高纬有净蒸发存在,则有百年到年代际振荡发生;高纬有净蒸发的盐通量,和使高纬有净冷却的热通量在效果上是一样的,它们都使得模式出现年代

际振荡;而如果高纬有净降水,则出现百年、数十年/年代际振荡。年代际变率发生在高纬,其机制是北部高纬海域表层水密度的变化;数十年/年代际变率主要发生在中纬,是由盐度强迫对热力强迫的强烈制动效应使得深水变暖造成的。分析表明,北部高纬海域净密度增加导致的是单纯的年代际变率(周期为 20~50 年),而 Weaver 的盐份控制型和高纬海域强烈变淡的情形一致,引起的是数十年/年代际变率(优势周期稍大于 10 年),在完全海气耦合模式中可能只存在前一种变率。这两种变率可以解释在全球平均表面空气温度中出现的 25~27 年周期的变率、在英国中部发现的 14~16 年周期的气候变率。

年代际变率在海气耦合模式中得到进一步验证。Delworth 等^[44]利用 GFDL 的耦合大气—冰—海洋模式,研究了北大西洋温盐环流(以及高纬海—气—冰系统)的年代际变率问题,发现在洋流下沉区(大约 52°~72°N)海水密度距平的驱动下,温盐环流强度在年代际尺度上变化很大,有 50~60 年左右的周期。模式 SST 的空间分布随温盐环流强度扰动而发生的变化,和观测 SST 的年代际变化分布情况极为相似。这表明如果没有象温室气体变化这样的外强迫,耦合的海洋—大气系统自身也存在年代际变率,所以要从人类活动引起的气候变率中区分出自然变率是很困难的,因为其时间尺度相同。

此外,Stouffer 等^[45]研究了海气耦合系统中海表空气温度的时间序列,未能模拟出自上个世纪以来观测到的 0.5 / 110a 的可能是由人为温室气体排放引起的全球增暖趋势,但发现了和实际极为相似的、从年际到年代际时间尺度的气候变率。Manabe 等^[46]分析了其海气耦合模式中的海表空气温度和海表温度的低频变率,发现耦合系统分别有 15~20 年、40~60 年、400 年周期的变率。

5 结 语

综上所述,对于大洋温盐环流的稳定性和变率,我们已经具有了较为深入的认识和理解。现代温盐环流是以北大西洋深水为主要特征的,在形态上是热力成因的环流(热力型),即高纬下沉、低纬上升,很象大气中的 Hadley 环流。温盐环流的热力强迫主要发生在高纬(特别是冬季),因此冷却(而不是加热)是驱动现代温盐环流的主要因子。环流形态是热力型,并不等于说完全由海表热力强迫决定现代温盐环流,关于其成因迄今仍是一富有争议的问题,现代温盐环流本身可能就是它得以存在和维持的重要原因,而温盐环流多平衡态之间的转换,象模拟中所发现的那样,可能是通过气候突变方式实现的。

在非耦合 OGCM 中,存在多平衡态和年代际到千年尺度的温盐环流内部变率存在。该系统最为重要的分量是淡水通量强迫相对于热强迫的强度,即较强的高纬淡水通量变化引起海表盐度变化,从而改变层结的稳定性以及相应的对流活动。由于海水的状态方程是高度非线性的,在温度较低时盐度对密度的贡献率变大,因此高纬海洋对淡水的冲击更为敏感。如果淡水通量强迫较弱,则没有内部变率存在。相反,如果热力强迫减弱,淡水强迫相对增强,则海洋温盐环流更容易发生内部变率。如果常定的热通量使得高纬存在净冷却,则其在效果上和盐通量使得高纬有净蒸发是一样的。

温盐环流的多平衡态现象及年代际变率,在非耦合 OGCM(包括箱 OGCM、全球 OGCM)、完全海气耦合模式中都可以模拟出来,但由于非耦合 OGCM 与海气耦合模式中对海洋的热、盐驱动机制不同,所以产生多平衡态和年代际变率的机制可能也有所不同。探讨真实大洋中触发年代际变率的内部机制,是一具有挑战性的问题,也是未来研究的主攻方向

之一。

箱 OGCM、全球 OGCM、完全海气耦合模式中的温盐环流对淡水通量都较为敏感这一事实,对于解释或模拟古气候、现代气候和气候变化有着重要的启示,因为海气之间淡水交换的一个相对较小的距平,就可能引起温盐环流的急剧变化,从而对全球气候产生影响。如果象预测的那样,温室效应使得高纬地区变暖,海表气温的经向梯度(从赤道到极地)减少,热力作用减弱,则温盐环流对淡水通量将更加敏感;温室效应通过使全球水循环加强,降雨增多,海冰融化,高纬度淡水通量加强,最终导致温盐环流的内部变率加强。不过,诚如本文开始所指出的那样,大洋环流模式的发展还很不完善,远不如大气模式成熟,因而其结果都有待进一步验证,因此,大洋温盐环流的模拟研究可谓任重道远。

主要参考文献

- 1 Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus*, 1961, 13, 224 ~ 230.
- 2 Welander P. A simple heat - salt oscillator. *Dyn of Atmos and Oceans*, 1982, 6: 233 ~ 242.
- 3 Welander P. Thermohaline effects in the ocean circulation and related simple models. In: Willebrand J., Anderson D L T., eds. *Large - Scale Transport Processes in Oceans and Atmosphere*. D Reidel Publishing, 1986. 163 ~ 200.
- 4 Marotzke J, Willebrand J. Multiple equilibria of the global thermohaline circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21: 1 372 ~ 1 385.
- 5 Nakamura M, Stone P H, Marotzke J. Destabilization of the thermohaline circulation by atmospheric eddy transports. *J Climate*, 1994, 7: 1 870 ~ 1 882.
- 6 Birchfield G E. A coupled ocean - atmosphere climate model: temperature versus salinity effects on the thermohaline circulation. *Clim Dyn*, 1989, 4, : 57 ~ 71.
- 7 Birchfield G E, Wang H, Wyant W. A bimodal climate response controlled by water transport in a coupled ocean - atmosphere box model. *Paleoceanogr*, 1990, 5: 383 ~ 395.
- 8 Marotzke J, Welander P, Willebrand J. Instability and multiple steady states in a meridional - plane model of the thermohaline circulation. *Tellus*, 1988, 40A: 162 ~ 172.
- 9 Stocker T F, Wright D G. Rapid transition of the ocean's deep circulation induced by changes in surface water flux. *Nature*, 1991, 351: 729 ~ 732.
- 10 Wright D G, Stocker T F. Sensitivities of a zonally averaged global ocean circulation model. *J Geophys Res*, 1992, 97: 12 707 ~ 12 730.
- 11 Fichfet T, Hovine S, Duplessy J C. A model study of the Atlantic circulation during the last glacial maximum. *Nature*, 1994, 372: 252 ~ 255.
- 12 Bryan K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *Journal of Computational Physics*, 1969, 4: 347 ~ 376.
- 13 Bryan K. Climate and the ocean circulation: III. The ocean model. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(11): 806 ~ 827.
- 14 Cox M D. An idealized model of the world ocean. Part I: The global - scale water masses, *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19: 1 730 ~ 1 753.
- 15 Killworth P D, Stainforth D, Webb D J, *et al*. The development of a free - surface Bryan - Cox - Semtner ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21: 1 333 ~ 1 348.
- 16 Maier - Reimer E, Mikolajewicz U. Experiments with an OGCM on the cause of the Younger Dryas. *Oceanography*, UN-AM press, 1989. 87 ~ 100.
- 17 Maier - Reimer E, Mikolajewicz U, Hasselmann K. Mean circulation of the Hamburg LSG OGCM and its sensitivity to the thermohaline surface forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 731 ~ 757.
- 18 Zhang X H, Chen K M, Jin X Z, *et al*. Simulation of the thermohaline circulation with a twenty - layer oceanic general cir-

- ulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 55(1~4): 65~87.
- 19 Zhang S, Greatbatch R J, Lin C A. A reexamination of the polar halocline catastrophe and implications for coupled ocean - atmosphere modeling. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 287~299.
- 20 England M H. Representing the global scale water masses in Ocean Circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 1 523~1 552.
- 21 Weaver A J, Hughes T M C. On the incompatibility of ocean and atmosphere models and the need for flux adjustments. *Climate Dynamics*, 1996, 12: 141~170.
- 22 Bryan F. High - latitude salinity effects and interhemispheric thermohaline circulation. *Nature*, 1986, 323(25): 301~304.
- 23 Marotzke J, Willebrand J. Multiple equilibria of the global thermohaline circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21: 1 372~1 385.
- 24 Hughes T M C, Weaver A J. Multiple equilibria of an asymmetric two - basin ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 24: 619~637.
- 25 Power S B, R Kleeman. Multiple equilibria in a global ocean general circulation model. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 1 670~1 681.
- 26 Tziperman E, Toggweiler J R, Felix Y. Instability of the thermohaline circulation with respect to mixed boundary conditions: Is it really a problem for realistic models. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24: 217~232.
- 27 Cai W. Global present-day ocean climate and its stability under various surface thermohaline forcing conditions derived from Levitus climatology. *Progress in Oceanography*, 1995, 36: 219~247.
- 28 Rahmstorf S. Rapid climate transition in a coupled ocean - atmosphere model. *Nature*, 1994, 372: 82~85.
- 29 Rahmstorf S. Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature*, 1995, 378: 145~149.
- 30 Manabe S, Stouffer R J. Two stable equilibria of a coupled Ocean-Atmosphere model. *Journal of Climate*, 1988, 1: 841~866.
- 31 Manabe S, Stouffer R J. Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 1995, 378: 165~167.
- 32 Mysak L A, Stocker T F, Huang F. Century-scale variability in a randomly forced two dimensional thermohaline ocean circulation model. *Climate Dynamics*, 1993, 8: 103~116.
- 33 Weaver A J, Marotzke J, Cummins P F. Stability and Variability of the Thermohaline Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 39~60.
- 34 Power S B, Kleeman R. Surface heat flux parameterization and the response of ocean general circulation models to high - latitude freshing. *Tellus*, 1994, 46A: 86~95.
- 35 Power S B, Moore A, Post D A. Stability of NADW formation in a global ocean general circulation model. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24: 904~916.
- 36 Mikolajewicz U, Maier - Reimer E. Internal secular variability in an ocean general circulation model. *Climate Dynamics*, 1990, 4: 145~156.
- 37 Weaver A J, Marotzke J, Cummins P F, *et al.* Stability and Variability of the Thermohaline Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 39~60.
- 38 Weaver A J, Sarachik E S. Evidence for decadal variability in an ocean general circulation model: An advective mechanism. *Atmosphere - Ocean*, 1991, 29: 197~231.
- 39 Weaver A J, Sarachik E S, Marotzke J. Freshwater flux forcing of decadal and interdecadal oceanic variability. *Nature*, 1991, 353. 31: 836~838.
- 40 Weaver A J, Aura S M, Myers P G. Interdecadal variability in a coarse resolution North Atlantic model. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 12 423~12 441.
- 41 Moore A M, Reason C J C. The response of a global ocean general circulation model to climatological surface boundary conditions for temperature and salinity. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 300~328.
- 42 Weisse R, Mikolajewicz U, Maier - Reimer E. Decadal variability of the North Atlantic in an ocean general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 12 411~12 421.

- 43 Chen F Ghil M. Interdecadal variability of the thermohaline circulation and high - latitude surface fluxes. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25:2 547 ~ 2 568.
- 44 Delworth T, Manabe S, Stouffer R J. Interdecadal Variations of the Thermohaline Circulation in a Coupled Ocean - Atmosphere Model. *Journal of Climate*, 1993, 6(11):1 993 ~ 2 011.
- 45 Stouffer R J, Manabe S, Vinniko K Y. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, 1994, 367:634 ~ 636.
- 46 Manabe S, Stouffer R J. Low-frequency variability of surface air temperature in a 1000 - year integration of a coupled atmosphere - ocean - land surface model. *Journal of Climate*, 1996, 9:376 ~ 393.

PROCEEDING OF MODELLING STUDIES ON THE STABILITY AND VARIABILITY OF THE THERMOHALINE CIRCULATION

ZHOU Tian-jun WANG Shao-wu

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

ZHANG Xue-hong

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract In this paper, some recent contributions of both primitive equation ocean circulation models (OGCM) and idealized conceptual models to the understanding of the stability and variability properties of the ocean thermohaline circulation are reviewed. The typical results of a hierarchy of models have been represented in brevity. Emphasis has been put on the multiple steady states and variability from decadal/interdecadal timescale to centennial and millennial timescale of the world ocean thermohaline circulation.

Key words Thermohaline circulation, Multiple steady states, Variability.