

气候系统模式发展中的耦合器研制问题*

周天军 俞永强 宇如聪 刘海龙 李 薇 张学洪

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 基于“耦合器”框架、采用模块化结构是当今气候系统模式发展的主要技术方向。作者概述了耦合器的基本功能, 对目前世界上应用比较广泛的 11 个耦合器进行了综合评述, 重点是美国通用气候模式耦合器和法国的 OASIS 耦合器, 扼要概括了目前较具影响力的三个耦合器发展计划, 在此基础上, 对耦合器的主要发展态势进行了总结, 并结合自身模式发展的需求进行了讨论。

关键词: 气候系统模式; 耦合器

文章编号 1006-9895 (2004) 06-0993-16 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

1 引言

所谓气候系统模式的耦合器 (Coupler), 简言之, 就是用于连接各子模式构成一个完整的耦合模式、并控制整个耦合系统积分的程序软件。耦合器的研制是应气候系统模式的发展需求而进行的, 气候系统模式的研制则与气候学研究进展密切相关。观测是气候学乃至大气科学研究的重要基础, 但是截至目前, 器测资料在时间与空间上的覆盖率都难以满足人类的实际需求, 作为解决该问题的有效手段之一, 数值模式在业务和科研中发挥着重要作用。20 世纪 70 年代以来, 气候学研究取得两项重要进展: 一是研究内容从“静态走向动态”, 以前认为气候就是温、压、湿的时间平均, 并且只要有 30 年的资料, 就可基本准确地确定其状态; 现在人们认识到气候也是变化的, 既有类似温室气体导致的全球变暖这样的长期趋势, 也有一些周期或准周期性的自然振荡现象 (气候变率); 二是研究范畴“从单一走向系统”, 以前主要关注大气的温、压、湿要素, 现在拓展到海洋、冰雪、陆面等圈层, 出现“气候系统”这一新专业术语。与气候学研究内容的延伸、范畴的拓展相对应, 数值模式的发展也从开发单一的气候模式 (大气环流模式) 来模拟大气平均态, 发展到开发海—陆—气—冰 (乃至地球生物化学循环) 耦合的气候系统模式, 来研究引起各种气候变化/变率的物理机制, 并进而预测其未来。当今的气候学研究已超越传统的气象学概念, 当之无愧地是一门交叉科学; 气候系统模式的研制工作, 也不折不扣地属于一项系统工程。

交叉科学的研究需要跨学科的协作, 气候系统模式的开发, 也需要系统工程式的组织, 集中相关专业研究机构的力量, 在现有的各子模式 (例如大气环流模式 AGCM、海洋环流模式 OGCM 等) 的基础上, 综合集成, 形成一个完整的气候系统模式。此间

2003-06-20 收到, 2003-10-20 收到修改稿

* 中国科学院创新项目 ZKCX2-SW-210、国家重点基础研究发展规划项目 G200007850-2 和国家自然科学基金资助项目 40005004、40233031、40231004 共同资助

存在的一个技术问题是,不同的子模式是由不同学科的不同研究机构独立开发的,编程标准不同、计算平台不同、运行环境不同,要把这些模式组合到一起、构成一个完整的耦合气候模式,最为快捷的方式是开发一个高度模块化的、灵活的工具软件即“耦合器”。用户只需了解耦合器的接口而不必深究其内核,就可以方便地把自己的子模式(例如 AGCM 或 OGCM)通过类似计算机硬件中的“插拔方式”连接到耦合器上,从而与其他部分一起构成一个完整的耦合气候模式。开发耦合器的最初动机大致如此,但后来的发展,使得耦合器的功能得到进一步增强和拓展,其开发不仅着重海气耦合的技术性,而且更看重其间的科学性。利用“耦合器”来集成不同专业结构/研究群体开发的各种气候系统子模式,构建完整的气候系统模式,这是国际上一些知名研究机构的通常作法。目前在国际上较具影响力的一些先进的耦合气候系统模式,多采用耦合器框架结构,它代表着耦合气候系统模式的主流技术发展方向。中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(IAP/LASG)全球耦合气候系统模式的未来发展,亦将采用“耦合器”框架结构,对当前该领域的国际发展态势做一系统性的总结,以指导自身工作,这是本文的主要目的。同时,也希望借此引起国内气候模拟领域同行的兴趣和讨论。

本文其他部分安排如下:第2部分扼要介绍了耦合器的基本功能;第3部分对国际上现有的一些耦合器进行了评述,重点是美国国家大气研究中心(NCAR)通用气候系统模式(CCSM)耦合器和法国的OASIS(Ocean Atmosphere Sea Ice Soil)耦合器;第4部分概述了三个影响较大的耦合器的未来发展;第5部分讨论了耦合器在IAP/LASG全球海气耦合模式中的应用。第6部分对全文进行了总结。

2 耦合器的功能

2.1 技术性

从技术性的角度看,耦合器最基本的功能,就是作为一个工具软件,能够很方便地把各子模式连接起来,构建一个完整的气候系统模式。耦合器通过控制各子模式之间的消息交换,来控制整个气候系统模式的运行。由于现在的气候系统模式涵盖大气、海洋、冰雪、陆面乃至生物圈,内容不仅涉及到数学、物理,还包括化学(生物地球化学)、计算科学(程序并行、消息传递通讯技术)等,其开发和维护是一个复杂的系统工程。受自身专业知识等的限制,偏重于科学问题研究的用户个体不可能成为了解模式系统每个细节的通才。在此情况下,采用耦合器框架的耦合气候系统模式,可以极大地方便用户,使得用户只需专注于自己所熟悉领域的子模式(例如大气、海洋或陆面模式等),而无需费时费力地去改动其他部分。同时,气候系统模式所涵盖的学科领域决定了其开发必须进行跨学科的协作,耦合器框架的采用,极大地方便了这种合作的开展。

模块化是当今气候模式发展的一个主流方向,对于耦合气候系统模式而言,耦合器的使用,使得整个系统的模块化结构更为简洁,使用起来更加方便。整个耦合系统被分割为若干个独立的部分(例如大气、海冰、陆面和海洋等),这些子模式被插进耦合器,每一个子模式都是一个独立的程序,可以自由选择自己的空间网格和时间步长,

其建立、修改或替换不需要改动其他子模式的程序。由于各子模式是以独立的可执行文件来运行的,通过消息传递来进行相互间的通讯(例如 MPI (Message Passing Interface)、PVM (Parallel Virtual Machine) 或者其他通讯协议),因此,各子模式还可以分布在不同的(甚至异地的)计算机上运行。

2.2 科学性

从科学性的角度看,耦合器所涉及到的核心科学问题,是整个耦合模式系统的总能量和总质量的守恒问题。耦合器的重要功能是确保整个耦合气候系统的物质和能量的守恒,保证通量的守恒性是对耦合器的最基本要求。由于每一个子模式都是独立开发的,有着自己的界面通量计算方案(例如大气模式和海洋模式各自利用状态变量计算通量的参数化方案往往是不同的),当把这些子模式利用耦合器组装成一个完整的气候系统模式时,如果不对这些跨界面交换的通量进行适当的处理,就很容易导致整个系统物质和能量的不守恒(早期的海气耦合模式,在这方面的处理就嫌粗糙)。因此,需要由耦合器对各个子模式发送来的通量(或是由耦合器利用状态变量重新计算的通量)进行处理,随后,在保证通量守恒的前提下,把这些通量分配给所有的子模式。例如,当动量、热通量和水通量在耦合系统的各子模式之间交换的时候,不应破坏这些量的全球守恒性。

不同耦合器处理该方法各具特色,NCAR CCSM 耦合器是在最细的模式网格上计算与不同子模式相互作用有关的界面通量^[1],然后再将通量守恒地插值到粗分辨率的格点系统。这样做可以在通量中保留细网格模式的分辨率信息,避免因通量计算中的非线性相互作用造成通量在模式界面上不守恒。具体做法是,从各子模式把需要的界面状态变量发送给耦合器,随后把粗网格上的场(通常是大气模式的)插值到细网格(通常是海洋模式的)上,在细网格上根据相应的参数化公式计算出通量,接着将其或是直接发送到细网格模式,或是插值后发送给粗网格模式;细网格上的通量向粗网格上的转换,采用面积加权插值以保持守恒。一般的处理方案通常如此,不过对于一些特殊情况要特殊处理。例如,净向下的太阳辐射和降水都是表面通量,因为它们不涉及到大气模式与下垫面的相互作用,故只在大气模式内部计算。大气模式把这些通量发送给耦合器,由耦合器在保证守恒的前提下将其插值到细网格上,然后再把它们发送给海洋或海冰模式。只有保证计算的表面热通量守恒,离开大气的总热通量才等于陆面、海冰和海洋模式得到的热通量,这样,气候系统的热容量才是守恒的,使得大气顶不存在虚假的热源或热汇,保持整个耦合系统的总体能量守恒。耦合器还通过提供径流处理方案,将大气模式的降水与蒸发之差汇聚成径流,并提供给陆面模式和海洋模式而保证耦合系统水通量的总体守恒。此外,耦合器还负责全球开洋面和海冰区域降水和蒸发的总量平衡。

3 现有的耦合器评述

3.1 NCAR CCSM 耦合器

3.1.1 CCSM 耦合器的发展历史

NCAR CCSM 耦合器是国际上目前发展比较成熟、应用比较广泛的耦合器之一^[1]。

其雏形源自 NCAR 气候与全球动力部 (CGD) 的海洋组 (OS) 的工作。出于 ENSO 研究的需要, 20 世纪 90 年代初, OS 学者把一个太平洋区域海洋模式与大气模式 CCM2 进行了耦合, 工作中发现把海洋模式作为一个子程序由大气模式来调用是非常笨拙的耦合方法, 因此, 设想开发一种方便的软件, 在结构上使海洋模式、大气模式成为高层的驱动器/耦合器程序的子程序。该“耦合器”能够协调不同子模式的空间格点(进行不同网格间数据的投影), 协调不同时间步长间隔, 控制耦合系统积分的启动和结束。这样, 就可以使两个子模式彼此独立, 在使用时不必顾及另外一个模式的细节, 也可以相对容易地把一个海洋模式换成另外一个。

该工作随后得到加强, 拟定了耦合器和耦合系统的科学设计原则, 例如, 子模式的合理边界条件应是穿越表面的通量, 这些通量应该是守恒的, 最好不要进行随意的通量订正。有专家提出这些模式应是独立的可执行文件, 它们通过消息传递进行通讯。根据这一建议, 在耦合器中应用了 MPMD (Multi-Processes and Multi-Data, 即多任务多数据流) 技术, 实践证明该技术非常成功。CGD 的气候模拟组 (CMS) 随后参与了该工作, 主要对大气模式进行了改进, 使其在采用通量型底部边界条件、而不是固定边界条件时, 依然能够得到高质量的模拟结果^[1]。

有了耦合器和相关的耦合系统发展框架, NCAR 管理者认为启动一个高级别耦合气候模式研制计划的时机已经来临, 随之于 1993 年向美国国家自然科学基金会提交了 NCAR 气候系统模式 (CSM) 研制项目建议书, 其目标是建立、维护和长期持续地改进一个复杂的气候系统模式。现有的耦合器原型和耦合系统设计原则构成了 CSM 软件框架的基础。该计划于 1994 年立项并正式启动。在该计划框架之下, 与耦合气候模式的发展同步, CSM 耦合器也得到了快速发展。迄今为止, NCAR 耦合器的发展经历了五代^[1]。

cpl1: 研制于 1990 年, 没有公开发布。该耦合器是一较粗糙的驱动程序, 负责高层控制(例如各子模式积分的开始/结束/继续)和不同格点间的数据投影。整个系统是一个可执行文件, 有海洋/海冰和大气/陆面两个子模式程序, 用 Fortran 77 写成。

cpl2: 由 NCAR/CGD 海洋组于 1992 年完成, 没有公开发布。采用了新的科学设计原则进行通量的计算, 以保证其守恒性。各子模式有独立的可执行文件。利用 PVM 进行消息传递。

cpl3: 由 NCAR/CGD 于 1996 年完成, 随 CSM 1.0 发布, 含大气/陆面、海洋和海冰三个子模式, 利用 MCL 进行消息传递, 数据存储格式采用 NetCDF (Network Common Data Form)。cpl3 是该耦合器的第一个完整的功能性版本。

cpl4: 由 NCAR/CGD 于 1998 年完成, 随 CSM 1.2 发布, 可以同时与大气、陆面、海洋和海冰四个子模式进行数据交换, 并控制整个耦合模式的运行进程, 耦合器与其他四个子分量模式的数据通讯是通过 MPI 实现的。

cpl5: 由 NCAR/CGD 于 2002 年完成, 随 CCSM 2.0 发布, 用 Fortran 90 写成, 能够处理移位的极地网格点, 增加了对陆地径流的处理方案, 以闭合耦合系统中的全球水循环过程。

3.1.2 CCSM 耦合器的功能

CCSM 在框架上把整个模式分成若干子模式, 通过耦合器把它们连接起来。耦合

器的作用相当于一个网络集线器，大气、陆面、海洋和海冰等子模式都和耦合器相连，且只和耦合器进行数据交换。耦合器的功能包括：

(1) 把 CCSM 分割为若干独立的子模式模块，每个子模式都是一单独的程序，可独立运行，彼此间通过 MPI 交换数据。

(2) 同步协调和控制各分量之间的数据流，以此来控制整个 CCSM 的运行和时间积分。

(3) 在保证通量守恒的前提下，在各子模式之间进行界面通量的通讯。需要时，耦合器可以利用状态变量来计算界面上的某些通量。

3.1.3 CCSM 耦合器的特点

(1) 系统分解和子模式的独立性 CCSM 耦合框架和耦合器允许对庞大而复杂的气候系统模式进行直观的分解，这些子模式（如大气、海冰、陆面和海洋模式）可以彼此独立地进行设计、发展和维护。

(2) 运行控制和系统的时间积分 由耦合器来控制模式运行和整个系统的时间积分。

(3) 所有子模式的适当边界条件是穿越表层界面的通量 耦合器通过为所有的子模式提供通量边界条件实现把所有的子模式耦合起来的目的。只有当耦合器或某一个子模式在计算通量需要时，状态变量才流向耦合器。

(4) 通量的守恒性 所有的表面通量都流经耦合器，该框架能够保证耦合系统的通量守恒。耦合器通过对所有的、经过处理的通量项进行空间和时间平均，来监测通量是否守恒。

(5) 一个通量场只在某一子模式中计算一次，随后，根据需要将通量输送给其他子模式 海洋模式的分辨率一般比大气模式高，如果先把表层海温（SST）平均到大气模式格点上，然后由大气模式利用它来计算长波辐射，而海洋模式依然利用自身格点上的 SST，那么系统的总热通量就不守恒，因为通量的计算是非线性的，两种计算方法将产生不同的结果。为了避免在两个不同模式的、两套不同的网格上对同一通量计算两次，任一通量应只计算一次，随后在保证守恒的前提下，将其投影到其他子模式的格点上。

(6) 在最合理的地方计算通量 当一个大气网格元覆盖陆地和海洋时，如果首先在大气格点上计算出风应力，随后把它插值到海洋格点上，那么就会出现这个问题。因为陆面的粗糙度明显大于海洋的，如果大气模式利用平均的下垫面粗糙度来计算风应力，随后把它插值到沿岸地区的陆地和海洋网格元上，那么风应力对陆地来说就会明显偏低、对海洋点就会明显偏高，这将导致虚假的近岸海流。在此情况下，更好的选择是在海洋格点上计算出表层应力，随后合并和投影到大气格点上。

(7) 允许子模式以不同的分辨率进行耦合 发展耦合模式时，人们都期望各子模式可以采用不同的空间分辨率，在设计某一个子模式时，无需考虑其他子模式的情况。这可以通过耦合器来实现，由它负责处理不同模式格点之间数据交换的投影问题。

不过，出于科学上的考虑，目前的 CCSM 版本要求大气和陆面模式必须采用同样的空间网格，所以目前的耦合器（cp14、cp15）功能不允许大气和陆面模式采用不同的网格。相似地，目前的 CCSM 版本要求海洋模式和海冰模式采用同样的网格，因此现

版的耦合器在功能上不允许海洋和海冰模式采用不同的网格。除此之外,子模式不必顾及其他子模式的空间分辨率,由耦合器来对不同子模式之间的、分布在不同空间网格上的数据进行投影。在对各种网格上的资料相互间进行投影时,这些子模式自身无需做任何改变。

(8) 允许模式以不同的时间步长进行耦合 除了模式内部对时间步长有某些要求(例如积分一天时间的步数必须是整数)之外,耦合器允许各子模式自由选择其内部的时间步长。通常 CCSM 的四个子模式分别采用四种不同的时间步长。

3.2 OASIS 耦合器

3.2.1 OASIS 耦合器的发展历史

OASIS 由位于法国的“欧洲气候模拟和全球变化研究中心(CERFACS)”开发^[2]。OASIS 的研制始于 1991 年,最初是 CERFACS 为了利用现有的、由其国内各实验室独立开发的不同大气/海洋环流模式发展一个“法国耦合模式”而研制的。OASIS 的开发联合了法国气候模拟学界、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和 UGAMP(UK universities Global Atmospheric Modeling Program)成员单位。目前,OASIS 用户已经扩展到法国气象局、德国气候计算中心、英国气象局、澳大利亚气象局、澳大利亚“联邦科学与工业研究院”、美国气候预测国际研究所、佛罗里达州立大学和挪威 Bjerknes 气候中心等。发展 OASIS 的目的,是为在不同学科间、不同计算环境下进行模式耦合,提供一个高度模块化、高度灵活的工具。OASIS 被欧洲发展新一代气候模式的“棱镜计划”(PRISM)作为发展其耦合器的基础^[3,4]。

OASIS 的零版本完成于 1991 年,借助它完成了用 AMIP(大气模式比较计划)型模式积分产生的大气通量场来强迫海洋环流模式这一工作。OASIS 1.0 完成于 1993 年,在 CERFACS 内部应用,利用它完成了最初的热带太平洋 10 年耦合模式模拟。OASIS 1.1 于 1994 年发布,增加了许多新功能,如可以利用它来把大气模式和海冰模式耦合;增加了一些新的插值格式,还能处理不需要插值的情况(即所有子模式都采用同样的网格)。该版本在法国气候模拟界、ECMWF 和 UGAMP 各机构得到广泛应用。特别是 CERFACS 利用它完成了两个全球耦合积分,其中一个采用 T21 大气完成了 50 年的积分,另一个采用 T42 大气完成了 25 年积分,二者都采用了高分辨率的海洋模式。

OASIS 2.0 对此前版本进行了重写以提高灵活性。从 2.0 版开始,OASIS 的模块化程度得到了前所未有的提高,能够处理任意数目的模式和耦合场(以前的版本只能处理两个模式、有限数量的耦合场)。另外,利用该版本,各子模式可以选择或是同时运行、或是顺序运行。而且,模块还扩展了分析功能。利用 CLIM(一种基于 PVM 的界面库)通讯技术支持分布式模拟,例如 CERFACS 利用 OASIS 对两个异地分布的环流模式进行了耦合,这两个模式一个位于巴黎、一个位于法国南部的图卢兹。OASIS 2.0 和随后的 OASIS 2.1 被用于一系列的全球耦合积分,这其中包括两个 100 年积分:一是模拟当今气候的控制试验,二是 CO₂ 增加的试验。

OASIS 2.2 加入了基于 SVIPC(System V InterProcess Communication)的通讯库,以支持包括当时刚刚推出的富士通 vpp700 这样的分布式内存矢量并行计算机,插值程序增加了处理新网格的功能,增加了新的外插方法、对 FSCINT(Fast SCalAr IN-

Terpolator) 库内的内存分配进行了重写以利用 Fortran 90 的动态内存, 还增加了把 OASIS 作为纯粹的插值器的功能。

OASIS 2.3 基于 NEC 计算机的全局内存概念, 增加了四种通讯技术, 还增加了处理 T213 和 T319 简约高斯网格的功能。

OASIS 2.4 于 2000 年 6 月发布, 在富士通公司的帮助下, 在 CLIM 通讯技术内增加了 MPI2 消息传递功能。支持 NetCDF 格式的格点文件和再启动辅助文件。

3.2.2 OASIS 耦合器的功能

OASIS 的标准耦合功能包括: 控制耦合积分、通过四种可供选择的通讯技术交换物理量场(通讯技术的选择因计算机型而异)、插值、物理量合并与守恒处理。

OASIS 自身并不计算任何通量, 它能够方便地把类似太阳辐射这样的次网格尺度的通量从粗网格投影到细网格上(该过程被称作“通量的再分配”)。耦合器控制模式积分采用并行或串行方式。耦合器自身是共享内存的程序。

OASIS 有 Fortran77、Fortran 90 和 C 语言三个版本, 不提供与其他语言连接的界面。其结构分层比较简单, 分为控制层、功能层和通讯层。通讯层通过调用库函数实现, 控制层和功能层通过调用模块化的子程序来实现。OASIS 不支持区域分解, 所有变量采用一维数组, 共享内存; OASIS 支持高斯网格、矩形网格和简约网格等。

OASIS 可以在诸多科学计算平台上运行, 例如 IBM RS6000、IBM SPs、SPARC s、SGIs、CRAY 系列、Fujitsu VPP 系列、NEC SX 系列、COMPAQ 等。最新版 OASIS 能够耦合任意数目的模式、在这些模式之间以任一耦合频率、交换任意数量的物理场。耦合系统中的每一个子模式保持为独立的、可以是并行的模块, 与未耦合时相比, 其主要功能参数无需改动。子模式只需要调用少数几个低层的耦合程序, 来处理与 OASIS 之间的耦合场的输入输出。

3.2.3 OASIS 耦合器的特点

(1) 各子模式之间的通讯 同步地在各子模式与耦合器之间交换耦合场, OASIS 支持四种通讯方式: 一是“PIPE”方式, 利用 CRAY 通道协调各子模式积分的同步性; 二是“CLIM”方式, 基于 PVM3.3 或 MPI 来同步协调和传递耦合消息, 该技术还支持非同步耦合; 三是“SIPC”方式, 利用 UNIX 系统的内部通讯功能, 通过消息传递来保证各子模式的积分同步性, 通过共享内存块来交换耦合场; 四是“GMEM”方式, 其工作方式与 SIPC 相似, 但是基于 NEC 计算机的全局内存概念的。

(2) 耦合场的转换和插值 子模式输送给 OASIS 的物理场, 必须经过处理和转换, 以使得接收这些物理场的子模式能够直接读取和利用。这些转换或分析过程, 具体因物理场而异。首先, 要对数据进行预处理, 按照 OASIS 的规则重新安排数组、处理可能存在的海陆不匹配问题, 需要的话还可以利用外部数据来订正这些物理场。随后, 按照从某一模式格点到另一模式格点的需要, 对物理场进行插值处理。OASIS 提供寻找临近点、双线性插值、样条插值、网格平均、高斯法等插值程序, 在保证守恒性的前提下进行不同网格间的数据转换。最后, 后处理过程把这些物理场处理成目标模式所需格式。

3.3 GFDL FMS 耦合系统

美国普林斯顿大学地球物理流体动力学实验室(GFDL)开发 FMS(Flexible

Model System) 的目的, 是试图使运行耦合气候模式像运行一个单一的模式那样方便^[5]。目前在 GFDL, 其格点大气模式和谱模式、前后两代格点海洋模式、陆面模式和海冰模式都在利用 FMS 软件。FMS 可以调用的子模式包括大气、陆面、海洋和海冰模式。在 FMS 中, 耦合器是主程序, 由它来驱动各子模式。这些子模式只通过耦合器在彼此间交换数据。这些数据可以分布在不同网格点上、采用不同的数据分解方案, 由耦合器根据子模式的需要进行数据转换。此外, 各子模式的程序还进行了并行。

FMS 耦合器为一非公开软件, 用 Fortran 90 写成。目前的版本尚不是独立于子模式的模块, 但这是其发展方向。由各子模式共享的 FMS 的程序模块, 包括通讯、I/O 控制、内存管理内核、诊断界面、日历与时间控制器、插值程序、对各耦合模式边界上的通量进行守恒插值的耦合处理器、用于描述次网格物理过程的程序标准界面等。

在并行方面, FMS 支持直线网格, 支持二维分割, 能够对任何物理或相空间中的数组进行分解。FMS 的初级版不支持混合并行 (即将 MPI 置于所有线程的顶端), 鉴于这方面的需求与日俱增, 目前已着手这方面的改进。软件开发设计了通讯库以方便地处理通讯问题, 这样用户就无需在通讯处理上再花费功夫、额外增加程序的复杂性。

限于软件开发人员的力量, FMS 的设计主要是为了满足 GFDL 内部的需要。不过, 考虑到气候模拟的需求总是大致相似的, 因此, GFDL 以外的用户使用 FMS 不应是一件很困难的事情。

3.4 UCLA 分布式数据管理器

分布式数据管理器 (DDB) 是一个软件工具包, 具有耦合器的功能, 用于处理美国加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 地球系统模式 (ESM) 各子模式之间的分布式数据交换^[6]。这些子模式包括: 大气环流模式、大气化学模式、海洋环流模式、海洋化学模式。上述子模式分别作为独立的程序块来执行。DDB 由注册器 (RB) 和三个与子模式相连的库文件组成: 模式通讯库 (MCL)、通讯库 (CL)、数据转换库 (DTL)。

RB 在模式启动之初收集模式信息, 它仅在耦合积分开始时起作用。在注册阶段, 各子模式注册它们的“产品”和“消费”的耦合资料, RB 在耦合积分运行时进行相应的协调。MCL 包含一些可随时调用的程序, 这些程序在耦合积分开始之初被各子模式调用来进行注册, 并在随后的耦合积分中用来进行数据的交换。CL 是一程序库, 被 DDB 根据计算机平台上的通讯库情况来调用, 进行数据交换管理。在积分过程中, 生成数据的模式在给定的时间段上, 直接把数据发送给“消费”模式; “消费”模式随后根据自身的计算需要、以一定的频率接收数据。只要计算平台所安装的通讯库支持, 可以进行异机耦合。DTL 把特定网格区域的数据转换到目标模式的区域。该程序库内容非常丰富, 提供了从简单的线性插值程序直到高阶资料转换程序。

3.5 GEMS

GEMS (Goddard Earth Modeling System) 由美国国家航空航天局 (NASA) 研制^[7]。GEMS 的开发始自 1997 年, 其功能比较强, 除了用来建立耦合气候模式外, 还可用于其他用途, 如把大气环流模式的物理过程和动力部分进行耦合、同时对一个耦合气候模式进行集合积分等。

从较高的概念层次上看, 例如对一个耦合系统的关键模式分量的定义、各子模式

间数据交换的控制等, GEMS 和 NCAR CSM 耦合器在结构上非常相似, 都呈“中心辐射状”设计、初始化/运行/结束的界面也很相似。二者间最大的不同, 在于 CSM 耦合器是显式地把一个气候模式分成大气、海冰、陆面和海洋几个模块、并且处理各子模式之间的二维界面上的数据交换。GEMS 能够处理的目标更广, 甚至可以包括完全的三维界面。举例来说, CSM 耦合器只能把大气、海冰、陆面和海洋模式这些高层目标耦合起来, 而 GEMS 还能够把大气模式的动力部分、大气模式的物理过程部分、大气与海洋之间的通量部分、海洋模式的动力和物理过程等部分耦合起来。目前 GEMS 仅有 Fortran 90 版, 并且不提供与其他语言的接口。

3.6 COWPOKE

COWPOKE (Climate Ocean Weather Parallel Object Kernels) 由 ORNL (Oak Ridge National Laboratory) 研制^[8], 其目的是为开发气候模式提供一个基本的内核。COWPOKE 为一免费软件, 用 Fortran 90 写成, 留有与 Fortran 77 和 C 语言连接的接口。并行中采用区域分解, 支持高斯网格等。支持 MPI 和 OpenMP (Open Multi Processing) 的混合同步编程。

COWPOKE 作为用 Fortran 90 写成的模块, 能够对气候模式、海洋模式和天气模式中的内核进行并行数据分割。这些模式的内核可以独立地进行优化, 不依赖于耦合系统整体。COWPOKE 包括参数模块、物理过程模块和动力过程模块 (包含高斯网格、简约高斯网格、快速傅里叶变换、球谐变换、谱截断处理程序等)。

3.7 PALM

“PALM” (Project d'Assimilation par Logiciel Multimethode) 计划目前正在 CERFACS 实施, 其目标是发展一个包含模块化的资料同化系统的耦合器^[9]。在该系统中, 资料同化算法被分割为若干基本“单元”, 例如观测资料处理单元、观测误差校正矩阵的计算单元、预报模式单元等。PALM 对这些“单元”进行同步协调, 驱动各单元之间的数据通讯, 并根据需要进行基本的代数运算。PALM 要求和标准的资料同化系统相比, 不能有丝毫的性能欠缺。因此, PALM 软件的设计开发, 必须遵循以下规则、满足以下要求:

(1) 模块化: PALM 能够对事先定义的一些功能元进行同步协调, 这些功能元可以顺序执行、同时执行或二者间而有之。PALM 的一个重要功能是允许对功能元进行动态运行 (即在模拟积分过程中, 可以在任意时刻启动或停止这些功能元) 和有条件的运行。PALM 同时负责在这些功能元之间按照需要进行数据交换。

(2) 可移植性: PALM 的目标是能够在现有的所有高性能计算平台上运行, 如果可能的话, 甚至在下一代高性能计算机上运行。

(3) 性能: PALM 将同时被用于业务和科研工作。在科研上, 它主要被用于设计新的算法, 更注重灵活性; 相反, 在业务上, PALM 中的算法是固定的, 更强调性能优化和运行状态的监控。

总之, PALM 是一非常灵活高效的工具, 但是程序比较复杂。

3.8 其他耦合器

除了上述较具影响力的 7 个耦合器之外, 还有一些耦合器不是专门为气象学设计、但是可以用于气候模拟的, 这包括欧盟和德国教育科技部资助的 MpCCI (Mesh based

parallel Code Coupling Interface)^[10]、法国 EDF (Electricite De France) 开发的 Calcium 耦合器^[11]、NASA 资料同化部研制的 PILGRIM (Parallel Library for Grid Manipulations)^[12]、法国几个水文类研究所合作开发的 COUMEHY (COUplage MEtéo Hydrologie)^[13]等。

MpCCI 为多学科的交叉合作而设计, 主要是一个并行的模式界面库, 提供一些常用的耦合功能, 例如耦合场的插值问题、不同子模式之间耦合数据的交换等。MpCCI 用 C++ 写成, 基于 MPI1, 它不是共享软件, 但是其编译好的库文件可以免费从网上下载, 它包括了一些基本的功能, 能够满足一般用户的需求。用户如果有更高层次的要求 (如更复杂的插值技术等), 就需要和软件开发商单独签署购买协议。

Calcium 耦合器适合多学科的应用, 可以使各子模式同步地交换耦合数据。数据交换基于 PVM, 也支持异步耦合。而且, 如果源程序发送数据的频率和目标程序接收数据的频率不一致, Calcium 可以自动地对耦合数据做时间插值。

PILGRIM 是为 NASA 资料同化部资料同化系统研制的, 以便有效地进行网格旋转和网格转换。PILGRIM 为一免费软件, 支持并行的插值和二维网格点的旋转, 其实现手段是提供一系列的资料分割方法、支持稀疏矩阵-矢量构建和应用。PILGRIM 采用 Fortran 90 编写, 没有提供与其他语言的接口。在并行上, 支持矢量区域分割。可进行线程或 MPI 并行, 但不支持混合并行方式。

COUMEHY 是为了是把一个大气环流模式与几个不同的水文模式在不同的计算平台上进行耦合而设计的, 以评估在全球变化背景下大气和陆面水循环二者间耦合过程的重要性, 故主要适用于大气环流模式与水文模式的耦合, 该耦合器支持多种计算平台。

4 耦合器的未来发展

4.1 CCSM 耦合器的未来发展

NCAR 下一代耦合器 (NGC) 是其第六版, 主要用于 CCSM^[14~16]。其目标设计已经完成, 目前正处于开发阶段。NGC 的开发要求可分为两个方面: 科学要求和计算功能要求。前者列出了耦合器在耦合模拟系统中的角色, 给出耦合器必须提供的关键功能; 后者列出了耦合器必须提供的界面的编写语言、可移植性和性能问题。

(1) 科学计算上的要求 应能够控制整个耦合模式系统; 必须在整个系统范围内进行一致性检查, 以保证所有的子模式的配置和初始化正确; 必须足够灵活, 使得用户可以方便地利用新的或改进的子模式来替换现有的子模式; 必须是可扩展的, 允许用户很容易地通过对耦合器交换的物理场或资料数量进行修改, 以及增加新的子模式; 必须支持耦合积分或是非同步的、或是循环的进行; 必须支持界面上的物理通量的计算、在不同的子模式的网格之间进行数据的映射和转换、对诸多子模式提供的、输送给某一其他子模式的界面通量进行合并、对通量和状态变量进行时间累积和时间平均、提供一些诊断量, 例如在不同子模式之间交换的通量和状态变量的时空平均; 必须能够接收、处理、传递多种网格上的数据 (包括非结构网格), 必须能够处理这些网格中被屏蔽的区域。

(2) 计算功能需求 必须适合一系列的计算平台，特别是基于 RISC 的多处理器机群和单纯的分布式内存多处理器；耦合器及为其开发的特定的程序库至少应提供一个 Fortran 90 的程序应用界面，耦合器的所有通量项的物理软件包应该用 Fortran 90 写成；必须支持单纯的共享内存并行、单纯的消息传递并行、混合并行方式（即在多处理器节点上采用线程、在多处理器之间采用消息传递）；如果采用同样的系统配置和输入资料、利用同样数目的处理器、在同样的计算平台上运行，耦合器必须在上述并行状态下能够不折不扣地实现可重复性；必须既支持“event-loop”耦合（即并行气候模式 PCM 的耦合方式）、又支持非同步耦合（即气候系统模式 CSM 的耦合方式）；必须最低限度地具有目前的 CSM 1.2 和 PCM 1.0 的耦合器的性能；必须兼容耦合模拟系统的或是单一的、或是多个可执行文件的结构；耦合器的并行算法必须能够在任意数量的处理器上运行（即不要求处理器的数目一定是 2 的某次幂）；只允许在耦合器和子模式之间进行通讯；耦合器的网格再处理功能利用转换矩阵必须能够高效、快捷地再处理屏蔽网格；必须能够读、写历史数据和重启动数据；需具备错误处理功能，能够停止所有的耦合系统的子模式。

此外，耦合器进行的数据转换包括插值（利用数学库进行的守恒插值）、对来自不同模式的分布在不同网格上的耦合数据进行整合、时间累积和时间积分、诊断计算、历史资料的存写、计算各子系统模式界面上的特定通量。之所以增加这一功能，是因为通量要在高分辨率网格上、以很高的频率来计算。所有耦合数据的交换利用 MPI 来进行。任何两个子系统模式之间的所有耦合场的交换都需要通过耦合器来进行，不同分辨率的资料间的转换是在耦合器中完成的，不允许进行子模式到子模式的直接数据交换。不过，要求所有的子模式之间的通讯必须通过耦合器可能导致系统的瓶颈（cpl4、cpl5 就存在这一问题），因此，为了提高模式系统的性能，各子模式和耦合器之间的通讯必须是并行的。获取高效的矢量处理性能不是 NGC 的主要要求。

4.2 OASIS 耦合器的未来发展

在 PRISM 计划的框架之下，CERFACS 将完成 OASIS 2.5 版，该版本将作为 PRISM 耦合器的原型^[17]。相对于早期版本，OASIS 2.5 将在如下方面做出改进：首先，在各模式之间建立一个通用界面来和 OASIS 交换信息。该界面也可用于初始时给定模式网格信息和其他相关信息。该界面将允许具有同样网格的两个并行模式之间直接进行数据通讯（即不通过耦合器过渡），因为在此情况下不需要做插值处理。其次，实现 OASIS 的完全并行化。这样，OASIS 可以在许多处理器上并行，每个处理器负责处理一定数量的耦合场。第三，目前的耦合器采用“Fast Scalar INterpolator (FSINT)”软件包进行双线性、样条和临近点加权插值，未来版将利用 Los Alamos 国家实验室开发的“SCRIP”库来替换 FSINT 库，以增强 OASIS 的插值功能。第四，利用 Fortran 90 重写 OASIS 程序，以更好地利用 Fortran 90 的动态内存功能。OASIS 2.5 版将作为 OASIS 3.0 的初始版本在 PRISM 计划后期（2004 年 9 月）发布。

4.3 PRISM 耦合器的未来发展

PRISM 是一由欧盟资助的基础性研究计划，有 21 个欧盟成员参加，由德国马普气象研究所负责协调^[3,4]。PRISM 的主要目标是发展一个灵活的模式结构，使之能够利用欧洲现有的各种模式，组装一个全球耦合气候模式。PRISM 全球气候模式的子模式

包括参与该计划的各研究机构目前发展和使用的海洋、大气、大气化学、海冰和海洋生物化学模式。为实现这一目标, PRISM 定义了标准的物理界面(即需要交换的信息)、技术界面(即交换这些信息的途径)。

PRISM 对其耦合器的总体要求是: ①高度模块化、高度灵活性。②在不同的硬件平台上, 整个系统都能快捷、高效地运行。软件必须是标准的和可移植的。然而, 对于特殊情况例如移植选项不存在或效率很低, 也可以针对不同机器提供特定选项。③耦合器软件程序应容易维护, 这样在支持未来的模式或耦合功能时改起来比较容易。④耦合器的不同部分各负其责, 具有明确的功能划分。⑤在现有的不同子模式的基础上, 可以利用 PRISM 系统框架组装一个耦合系统模式(即使这些子模式不完全符合 PRISM 的物理界面, 但只要它们应用 PRISM 系统模式界面库就可以比较方便地用于耦合系统的组装)。⑥可以利用 PRISM 系统的基础框架来耦合任意数量的子模式; 任一子模式可以单向或双向地与任何其他子模式耦合。

此外, 在结构上, PRISM 耦合器包括驱动模块、“变压器”模块、PRISM 系统模式界面库(PSMILe)(它把单一的子模式和耦合系统的其他部分联系起来), 此外还包含了资料交换库。驱动模块控制整个耦合系统, 在模拟中, 由它调用各子模式、监视其执行和终止、协调耦合数据的交换、收集和分发在各子模式中必须保持一致的模式参数、收集和分发各子模式的状态信息。变压器模块负责处理两个子模式之间所有的耦合数据的变压处理, 变压器负责进行时间操作、二维插值等, 它支持笛卡尔坐标、规则或非规则网格、在经向或纬向伸展的网格、在经圈上是规则的但在纬圈上不规则的网格(如简约大气格点)、在经圈和纬圈上都不规则的网格、交错网格等。PRISM 系统模式界面和资料交换库(PSMILe)是一套程序, 由各子模式调用、用于把自己和 PRISM 系统的其他部分(其他子模式或另外的耦合过程)通过界面连接起来。PSMILe 的基本要求是各子模式调用该库时对模式程序的改动越少越好、PSMILe 应该分层且其复杂性对于分量程序是不透明的、PSMILe 把数据交换库作为其最外层、子模式无需任何改动即可独立运行等。

5 耦合器在 IAP/LASG 气候系统模式中的应用

IAP/LASG 发展全球耦合气候系统模式已经有十余年的历史^[18], 受当时计算机发展水平所限, 早期的耦合模式都不是并行的, 在结构上, 也没有采用模块化的结构。以全球海洋—大气—陆地系统模式 GOALS 为例^[19,20], 在结构上, 其陆面模式是大气模式的一个组成部分, 海冰模式是海洋模式的一个组成部分; 大气模式与海洋模式的耦合, 是通过一个主程序模块来进行的, 大气模式和海洋模式分别作为一个子程序模块由它来调用。主程序模块实际上承担了耦合器的功能, 负责协调大气和海洋模式的积分、进行大气和海洋模式间通量的转换与交换。GOALS 模式在气候学研究的许多领域中得到应用, 特别是其关于未来气候变化的模式研究结果被 IPCC 第三次科学评估报告引用^[21]。

近年来受高性能计算机的快速发展影响, 耦合气候系统模式的发展也有了前所未有的快速进步。在此背景下, 旧版 GOALS 模式非模块化、非并行的模式结构, 已远

不能适应耦合气候模式的发展态势。因此, IAP/LASG 采用耦合器的框架结构, 开始重新设计模块化的新一代耦合气候模式, 经过努力, 于 2002 年推出其试验版(暂称“FGCM”)^[22]。FGCM 在结构上与旧版 GOALS 不同, 其基础框架是 NCAR CCSM2, 以 NCAR 耦合器为核心, 采用了模块化结构, 其四个子模式大气、海洋、海冰和陆面均是彼此独立的, 大气和海洋模式可采用 OpenMP 或 MPI/OpenMP 混合同步并行技术, 整个耦合模式的运行包括五个进程, AGCM、OGCM 进程又包括若干线程, 各进程间的通讯通过 MPI 进行。与此同时, 基于耦合器框架、采用模块化结构和消息传递技术的 GOALS 模式的新版本亦于 2004 年初完成研制。

限于专业软件人才力量, 在未来可以预见的时间内, IAP/LASG 耦合气候模式的耦合器仍将走“引进—消化—改进”的路子。目前的耦合器在功能上主要存在两方面缺憾: 一是只允许耦合系统包含大气、海洋、海冰和陆面四个子系统模式模块, 二是耦合器对消息传递的处理不是并行的。气候系统模式的未来发展要引入生物地球化学循环等过程, cpl4、cpl5 都难以满足其需求; 由于 cpl4、cpl5 要求所有子模式相互间的信息传递必须通过耦合器、而消息传递的进行又未进行并行化处理, 这就造成了阻塞瓶颈。根据前文讨论, 未来的 NCAR NGC 强调了消息传递的效率问题, PRISM 计划的耦合器设计方案对考虑生物地球化学循环过程亦有明确要求。因此, IAP/LASG 耦合模式的未来发展, 应该以 NCAR 耦合器为基础, 适当引进 PRISM (OASIS) 的一些功能, 在消化吸收的基础上, 结合自己的实际需求加以改进。

表 1 IAP/LASG 全球 OGCM 及相应的耦合模式的发展 (1989~2004 年)

OGCMs	CGCMs
L4/4°×5° (1989)	2L AGCM+ L4/4°×5° OGCM (1992)
L20/4°×5° (1994)	2L AGCM+L20/4°×5° OGCM (1994) GOALS (1997)
L30T63 (1999)	NCC T63 AGCM+L30T63 OGCM (2000) FGCM-0 (2002)
LICOM 1.0 (L30/0.5°×0.5°, 2003)	FGCM-1 (2003) 采用耦合器框架的新一代 GOALS 模式 (2004)

最后, 需要说明的是, 在气候系统模式的发展中采用耦合器框架, 既是适应国际上该领域技术发展主流方向的必然选择, 客观上也将极大地加速气候系统模式的构建进程。表 1 给出 IAP/LASG 全球耦合模式发展进程, 从中不难发现耦合器对模式发展的推进作用。这使得我们既可以较为从容地应对诸如 IPCC 评估报告这样的模式应用需求, 同时也使得我们有可能将有限的人力投入到气候模式发展的其他方面, 例如国内至今仍然薄弱的物理过程参数化研究等, 这样, 假以时日, 或许我们能够和国际上走在前沿的研究团体一争短长。

6 结语

“耦合器”概念的提出已有近十年的历史, 但是其快速发展还是近年来的事情, 推动因素包括三个方面: 首先, 模块化结构是当今国际上气候系统模式发展的主流方向,

而采用“耦合器”结构的耦合框架，则是实现模块化的重要技术途径。其次，随着气候学研究的逐步深入，跨学科协作是必然的选择。无论是从耦合气候模式的开发、还是从耦合气候模式的推广应用上来看，都需要进行多学科的合作。气候系统模式的复杂性，使得来自不同学科的、利用模式开展相应科学问题研究的学者不可能成为了解耦合系统的每一个细节的通才，耦合器结构的采用，使得研究者只需深入了解自己专业领域的子模式分量（而不必太多地考虑其他部分），这极大地推进了跨学科协作的开展；在模式发展上，耦合器架构的采用，使得在耦合系统中逐步增加新的子系统模式变得更加容易。第三，并行计算机是高性能计算机发展的主要方向，采用耦合器框架结构，使得各子模式可以作为单独的模块以并行方式运行，这极大地提高了计算效率，使得耦合系统采用高分辨率模式、开展长期耦合积分成为可能。因此，采用耦合器框架结构是目前国际上耦合气候系统模式发展的主流技术方向，也是现阶段气候系统模式设计的最佳方案。

现阶段的耦合器在功能上主要包括技术性和科学性两个方面。不过近年来推动耦合器发展的更多的是技术性，耦合器的开发研制更多地是从工程性的角度来进行的。例如，耦合器的重要作用之一是必需保证耦合系统的总质量和总能量的守恒、以及物理量在界面上的连续性（例如海气界面的热通量和水通量的连续性），耦合器并不是实现这一目的的唯一方式，类似旧版 GOALS 模式那样的串行、未采用耦合器的耦合模式，只要在各子模式之间的通量和物理量的交换上做细致处理（实质是不同网格间的资料插值技术问题），依然可以实现质量和能量守恒的目的。不过，耦合器框架的采用，显然使得这种处理更加方便，类似 NCAR 耦合器中对通量计算的处理（即在耦合器中统一计算通量、摒弃各子模式中原有的通量计算方案），使得这种目的更容易实现。

关于耦合器的研制，目前具有国际影响力的耦合器，主要是 NCAR CCSM 耦合器和 CERFACS 的 OASIS 耦合器。此外，基于 OASIS 的、处于发展阶段的 PRISM 耦合器，也应给予充分的关注，不过其初级版在功能上超不出新版的 OASIS。CCSM 耦合器和 OASIS 耦合器的共性包括：结构上都是模块化的，能够使各子模式保持独立；具有很高的可移植性，软件适用于不同的计算平台；负责整个耦合系统模式的积分控制；具有通讯功能，负责各个子模式之间的信息传递；具有数据转换功能，对来自不同子模式的通量进行合并、对不同模式网格间的数据进行投影，进行守恒性处理，保证整个耦合系统的通量守恒；此外，在开发方面，两个耦合器都由专业软件工程师组成的项目组负责。不同之处在于，CCSM 耦合器不支持各子模式之间的通讯，即所有的数据通讯必须通过耦合器，而 OASIS 耦合器则允许具有相同分辨率的子模式相互间直接进行数据通讯；OASIS 对通量的计算，是分散在各个子模式中进行的，由耦合器负责守恒性调整，而 CCSM 耦合器则不仅仅负责守恒性调整，还进行通量的计算（未来版在这方面的功能将简化）。此外，二者都是公开发布的免费软件。

未来耦合器的发展，依然将围绕着物理界面（即界定需要交换的信息）和技术界面（即交换这些信息的途径）两个层次来展开，兼顾技术性和科学性。此外，还必需增加耦合分量的可扩展性。现阶段的耦合器主要考虑海、陆、冰、气四个分量模式的耦合问题，未来的全球气候模式的子模式还将包括大气化学和海洋生物化学模式等，

未来的耦合器必须为在耦合系统中增加这些子系统留有适当的接口。随着气候学研究的深入, 在耦合气候系统模式中将不断增加新的分量模式这一趋势, 可以从 PRISM 计划中清楚地看到。

参 考 文 献

- 1 Kauffman, B. G. , and W. G. Large, The CCSM Coupler Version 5.01: Combined User's Guide, Source Code Reference and Scientific Description. National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307, USA, 2002, 1~46.
- 2 Terray, L. , S. Valcke, and A. Piacentini, Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS) User's Guide and Reference Manual, CERFACS, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1. 1998, 1~77.
- 3 Guilyardi, E. , R. Budich, G. Brasseur, and G. Komen, PRISM System Specification Handbook, version 1.0, ISBN Nr. 90-369-2217-8. 2003, 59~73. (can be ordered via email from prism-director@enes.org).
- 4 Ford, R. W. , and G. D. Riley, A Flexible Unified Model Environment; Model Coupling Review. Manchester Information Ltd. , The University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK, 2002, 1~13.
- 5 <http://www.gfdl.noaa.gov/~fms/>
- 6 <http://www.atmos.ucla.edu/~drummond/DDB/>
- 7 DAO, 1997, Geos-3 data assimilation system architecture design, Technical Report OFFICE NOTE 97-06, <http://polar.gsfc.nasa.gov/operations/terra.php>
- 8 <http://www.csm.ornl.gov/~bbd/projects.html>
- 9 http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/
- 10 <http://www.mpcii.org/>
- 11 <http://www.irisa.fr/orap/Publications/Forum8/berthou.pdf> (in French)
- 12 <http://www.geo.umw.ethz.ch/staff/homepages/sawyer/pilgrim.html>
- 13 <http://lthent1.hmg.inpg.fr/GRID/Site/Index.html>
- 14 CCSM Coupler 6 Development Team, CCSM Coupler Architecture: Version 6, the Next Generation Coupler, National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307, USA, 2001, 1~22.
- 15 CCSM Coupler 6 Development Team, CCSM Coupler Project Plan; Version 6, the Next Generation Coupler, National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307, USA, 2001, 1~3.
- 16 CCSM Coupler 6 Development Team, CCSM Coupler Requirements: Version 6, the Next Generation Coupler, National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307, USA, 2001, 1~8.
- 17 <http://www.cerfacs.fr/globc/software/oasis/oasis.html>
- 18 Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, and Guo Yufu, Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**, 444~455.
- 19 吴国雄、张学洪、刘辉等, LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究, *应用气象学报*, 1997, **8** (增刊), 15~28.
- 20 Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui et al. , *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*, Science Press, Beijing, New York, 2000, 252pp.
- 21 Houghton, J. T. , Y. Ding, D. J. Griggs et al. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, UK. The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU, ENGLAND, 2001, 944pp.
- 22 Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong et al. , A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.* , 2002, **19**, 169~190.

Coupled Climate System Model Coupler Review

Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, Liu Hailong,
Li Wei, and Zhang Xuehong

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Modularization and flexibility are major requirements for the future development of coupled climate system models, and the coupler can provide a friendly coupling framework for this purpose. The authors survey the existing couplers or coupling applications, targeted or not to climate models. The primary function of the coupler is described. Critical functionalities of the most popularly worldwide used 11 couplers are introduced, and the emphases have been put on the Community Climate System Model (CCSM) coupler and the French Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS) coupler including their future development plan. Functionality and techniques, which might be used in our future coupled model development, are the major concern of this review.

Key words: climate system model; coupler