

# 我所理解的耦合器

刘群

(清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084)

**摘要** 地球系统模式是研究全球气候变化的重要工具, 耦合器是耦合模式中的关键组件之一, 耦合器的性能在一定程度上决定了模式的性能。耦合器主要负责各个分量模式之间的数据传递和交换功能, 控制模式积分的进程等。在耦合器的发展历程中, 国外的相关研究走在了中国的前列, 比如美国 NCAR 的 CPL 耦合器, 法国的 OASIS 耦合器等, 但同时这些耦合器也存在着一些问题。从 2010 年起, 中国开始自主研发耦合器, 现在已经发布了 C-Coupler1, 采用了先进的架构设计, 具备了国外耦合器所没有的一些特点, 比如三维耦合和对二进制可重复性的支持等, 但是其并行可扩展性还有待提高。随着耦合器的进一步发展, 地球系统模式的发展也必将迎来新的跨越。

**关键词:** 耦合器 地球系统模式

## 一、引言

近百年来, 全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化, 对生态环境造成了严重影响<sup>[1]</sup>。为了减少气候变化对人类的影响, 人们就需要采取相应的措施来应对气候变化。地球系统模式就是全球变化研究的最重要的、不可替代的研究工具之一。

地球系统模式是基于地球系统中的动力、物理、化学和生物过程建立起来的数学方程组(包括动力学方程组和参数化方案)来确定其各个部分(大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈)的性状, 由此构成地球系统的数学物理模型, 然后用数值的方法进行求解, 编制成一种大型综合性计算程序, 并通过计算机付诸实现对地球系统复杂行为和过程的模拟与预测的科学工具<sup>[1]</sup>。其主要包括大气模式、陆面模式、海洋模式、海冰模式等, 如图 1 所示。今后的耦合模式还会加入生物地球化学模式等其他分量模式。从图 1 中可以看出, 连接各个分量模式的部件就是耦合器。

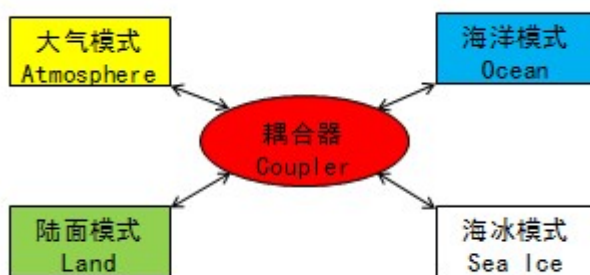


图 1 地球系统模式示意图

下面我们将从几个方面对耦合器进行详细的介绍。首先介绍一下耦合器定义及其功能，然后介绍一下耦合器的发展历史，然后介绍一下中国自主开发的耦合器 C-Coupler1，最后对耦合器目前存在的问题及其可能的发展方向进行探讨。

## 二、 耦合器简介

耦合器是地球系统模式的核心部件之一，它可以连接各个分量模式构成一个完整的耦合模式，其主要功能是完成各个分量模式之间的数据传递和通信功能，同时控制模式积分的进程。与计算机的架构进行对比，我们可以将耦合器比作计算机的主板，各个分量模式相当于主板上的插件，而耦合器如同主板一样，保证数据在各个部件之间进行传递。由于耦合器的开发，既需要模式相关的知识，同时又是对软件编写的巨大挑战，需要解决各种技术上的困难，同时还需要考虑到今后应用的方便性与可扩展性，因此可以说其开发过程是科学、技术与应用三者的有机结合。

由于耦合器的功能主要是进行分量模式之间的数据交换和传递，因此由于不同分量模式之间网格类型和分辨率的不同，就不可避免地要用到插值相关的算法。当前在耦合器中应用的插值算法还比较有限，主要是线性、双线性、样条插值、反距离权重插值和守恒插值等。由于在分量模式之间传递的数据，很多是一些通量数据，比如辐射通量、水汽通量等，因此就需要一些守恒插值算法，来保证在分量模式之间通量守恒。但是目前的守恒插值算法精度较低，这就需要更高精度的守恒插值算法。

## 三、 耦合器发展历史及其现状

耦合器的发展也是随着地球系统模式的发展而发展的。早期的模式只是一些单独的分量模式，比如单独大气模式、海洋模式等，这些模式只需要提供初边值条件就可以运行，不需要进行数据交换，因此此时并不需要耦合器。但是地球系统是一个统一的有机整体，各个圈层之间是相互作用的，因此单独的分量模式并不能准确的描述地球系统的各种状态。随着模式的进一步发展，越来越多的分量模式出现了，此时我们可以将分量模式耦合起来综合进行模拟。此时就需要耦合器在分量模式之间进行数据的交换和通信。耦合器也是随着模式的发展而产生的，下面我就对耦合器的发展历史及其现状做一个简单的介绍。

当今世界上主流的耦合器有美国 NCAR 的 CPL，法国的 OASIS<sup>[3]</sup>等，中国

目前也有了自己第一个自主的耦合器 C-Coupler1。国外的耦合器一般都发展了十几年到二十年，因此在某些方面还是有很多领先的地方值得我们学习。

确切的说，现有的耦合器其实可以大致分为三类。法国的 OASIS、美国的 MCT 等都属于耦合工具库，并没有实现模块化的耦合；美国 NCAR 的 CPL 耦合器属于通量耦合器，是一种模块化的架构；中国的 C-Coupler 属于耦合器框架，是一种模块化的耦合器，同时也是一个耦合器平台。

美国 NCAR 的 CPL1 耦合器的开发始于 1990 年，但是当时并没有公开发布<sup>[2]</sup>。后来，NCAR 又开发了 CPL 一系列耦合器 CPL2-CPL6，目前已经开发了 CPL7，并且在 CMIP5 的模式 CCSM4 和 CESM1 中使用<sup>[4]</sup>。NCAR 耦合器的架构适合于多个独立的分量模式的情形，其相当于一个网络集线器<sup>[2]</sup>，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，并且可以做到允许分量模式以不同的时间步长进行耦合<sup>[2]</sup>。应该说，NCAR 的耦合器是很先进的，有些理念确实很超前，在这种耦合架构下，特别适合大气、海洋、陆面、海冰等各自领域的专业人员分别开发各自的分量模式，然后通过耦合器进行耦合。特别需要指出的是，很多参加 CMIP5 的中国模式采用的都是 NCAR 的 CPL6 耦合器，比如 FGOALS-g2、FGOALS-s2、BNU-ESM、BCC-CSM、FIO-ESM 等，可以说 NCAR 的 CPL 耦合器为中国自主开发耦合器和耦合地球系统模式提供了很多帮助和借鉴意义。NCAR 最新的耦合器 CPL7 继承了 CPL6 的很多特性，但同时也有一些新的特点，比如采取单一的可执行文件来耦合模式，提供了顶层的驱动，并且包含了并行读写函数库<sup>[4]</sup>，但是 NCAR 耦合器 CPL7 目前仍然不支持三维耦合。

OASIS 耦合器是由位于法国的欧洲气候模拟和全球变化研究中心（CERFACS）于 1991 年开始开发的<sup>[3]</sup>，现在也是经过了多代的发展，目前已有 OASIS3 和 OASIS4。OASIS3 是一个二维版本的耦合器，目前在欧洲的地球系统模式中广泛采用。OASIS 采用多可执行文件来进行耦合，为每一个插值任务和分量模式单独生成一个可执行文件。OASIS 的优点有分量模式间直接进行耦合，避免了冗余的通信；采用基于 XML 的配置方式，这具有一定用户友好性；插值算法选择和耦合频率选择具有灵活性，比如说可以采用 SCRIP 插值算法提供的插值权重；属于耦合工具库，使用上比通量耦合器灵活。但是 OASIS3 也有一些问题，比如说分量模式间的耦合连接需要用户完成，计算性能的优化也需要由用户来完成，这也大大加重了用户的负担，而且可能还达不到最优的效果。现在新的 OASIS3-MCT 已经在开发，提高了 OASIS3 的并行效率<sup>[4]</sup>。

OASIS4 是一个实现了三维耦合的耦合器，并且实现了完全并行，实现了非常高效的并行搜索算法<sup>[5]</sup>。OASIS4 也采用了基于 XML 的配置文件。在三维耦合方面，OASIS4 支持二维和三维的插值，并且实现了自己三维插值算法。但是目前 OASIS4 仅仅支持结构化的网格和高斯网格，不支持现在很流行的各种非结构化网格，这是它今后需要努力的方向。

除此之外，国际上还有一些其他的耦合器和耦合工具包，比如 MCT 和 ESMF<sup>[4]</sup>等，在这里就不再一一介绍。下面介绍一下中国耦合器的发展历史。

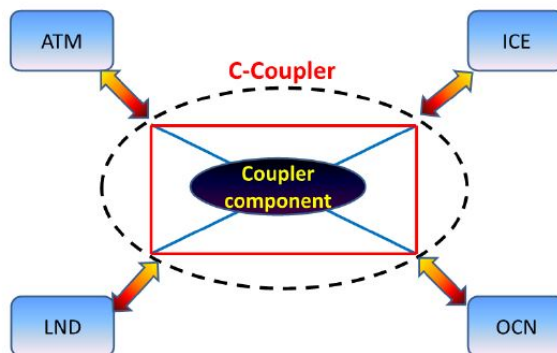


图 2 采用 C-Coupler 耦合器的地球系统模式架构<sup>[4]</sup>

中国自主开发耦合器始于 2010 年，整整比国外的耦合器的研发晚了近 20 年的时间。在借鉴国外先进经验的基础上（如图 2 所示，我们采用了类似于 NCAR CESM 的架构），经过几年的时间，我们自主开发了 C-Coupler 耦合器，超过 90% 的代码是由 C-Coupler 组自己完成，并且具有一些自己的特色。C-Coupler1 在某些方面已经超越了国外任何一个耦合器，比如说在三维耦合方面，并且是模块化的耦合结构，可以方便的进行耦合，耦合流程方便可配置。还有就是 C-Coupler 特别强调试验结果的可重复性，做到了二进制一致性。

C-Coupler 可以说是一个公共耦合器及其平台，而 NCAR 的耦合器 CPL 还仅仅是一个通量耦合器。也就是说，在 C-Coupler 平台上，我们可以支持各种各样的耦合模式，那些可以用 NCAR 的耦合器运行的模式，在 C-Coupler 平台上经过移植连接后也可以直接运行，并且可以做到模式运行结果的二进制一致性。

当然，C-Coupler1 还存在一些不足之处，比如说用户友好性做的还不够，现在的配置文件写起来比较麻烦，需要手工写耦合配置文件，使得构建耦合模式难度较大。因此，在未来 C-Coupler 将借鉴国外模式及其耦合器的经验，采用基于 XML 的配置方式，大大简化模式耦合配置的难度。在未来 C-Coupler2 的设计中已经充分考虑了这一点。除此之外，C-Coupler2 还将进一步提高用户友好性，比如说自动生成相应的耦合流程，自动进行数据的转换和匹配等。同时，C-Coupler2 还将更加灵活，比如说可以动态调整模式的积分时间步长和耦合的时间步长。同时还将支持区域嵌套等。当然还会进一步提高模式的可重复性和可靠性，比如可能会自动实现生成集合的方法，挑选合适的集合数量，通过对集合的分析，得到更加可靠的结论。

#### 四、 总结和讨论

在地球系统模式中，耦合器起着非常重要的作用，是地球系统模式不可缺少

的重要的组件，主要负责各个分量模式之间的数据的交换和通信，在模式的运行过程中控制模式的积分等。

总的来说，国外的耦合器发展较早，比如美国 NCAR 的 CPL 耦合器、法国的 OASIS 耦合器等。他们在耦合器的研发和应用方面经验较多，也取得了不错的成绩，对中国耦合器的发展也很有借鉴意义。目前国际上现存的耦合器有的已经具备了三维耦合的功能，但是它们实现的方式还有很大的改进和提升空间。比如说它们在低维中采用的算法不能很好的扩展到三维的情形。还有就是配置方式比较繁琐，在耦合新的分量模式的时候需要修改很多代码，给用户造成了很多不便。

在考虑了目前耦合器发展现状的基础上，在充分调研和借鉴国外耦合器开发相关经验和教训的基础上，中国开始自主研发的 C-Coupler 耦合器，已经发布了第一个版本 C-Coupler1。C-Coupler1 可以说是一个耦合平台，可以耦合各种模式，并且实现了动态三维耦合等功能，能够确保模式积分结果的二进制一致性，这些在国际上都是很先进的。但是目前 C-Coupler1 的配置方式还有待改进，之后的版本将采用基于 XML 的配置方式，同时将进一步提高 C-Coupler 的并行度和可扩展性。

随着耦合器的发展，地球系统模式必将迎来新的发展。

## 五、 参考文献

- [1] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- [2] 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 993-1008.
- [3] S. Valcke. The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software [J]. Geoscientific Model Development, 2013, (6): 373-388.
- [4] L. Liu, G. Yang, B. Wang, et al. C-Coupler1: a Chinese community coupler for Earth system modeling [J]. Geoscientific Model Development, 2014, (7): 2281-2302.
- [5] R. Redler, S. Valcke, H. Ritzdorf. OASIS4 - a coupling software for next generation earth system modelling [J]. Geoscientific Model Development, 2010(3): 87-104.