

地球系统模式耦合器

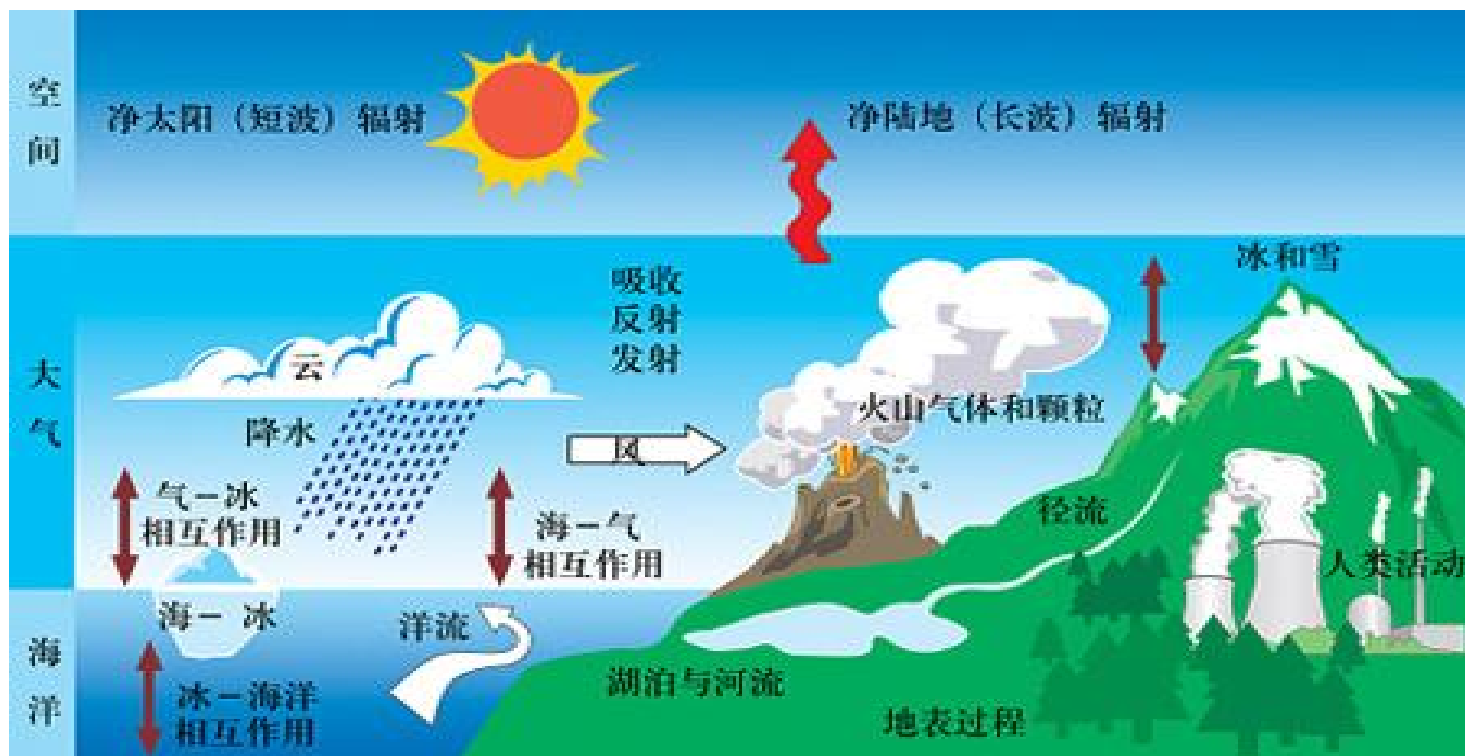
刘利等

清华大学地球系统科学系

liuli-cess@tsinghua.edu.cn

地球天气-气候系统

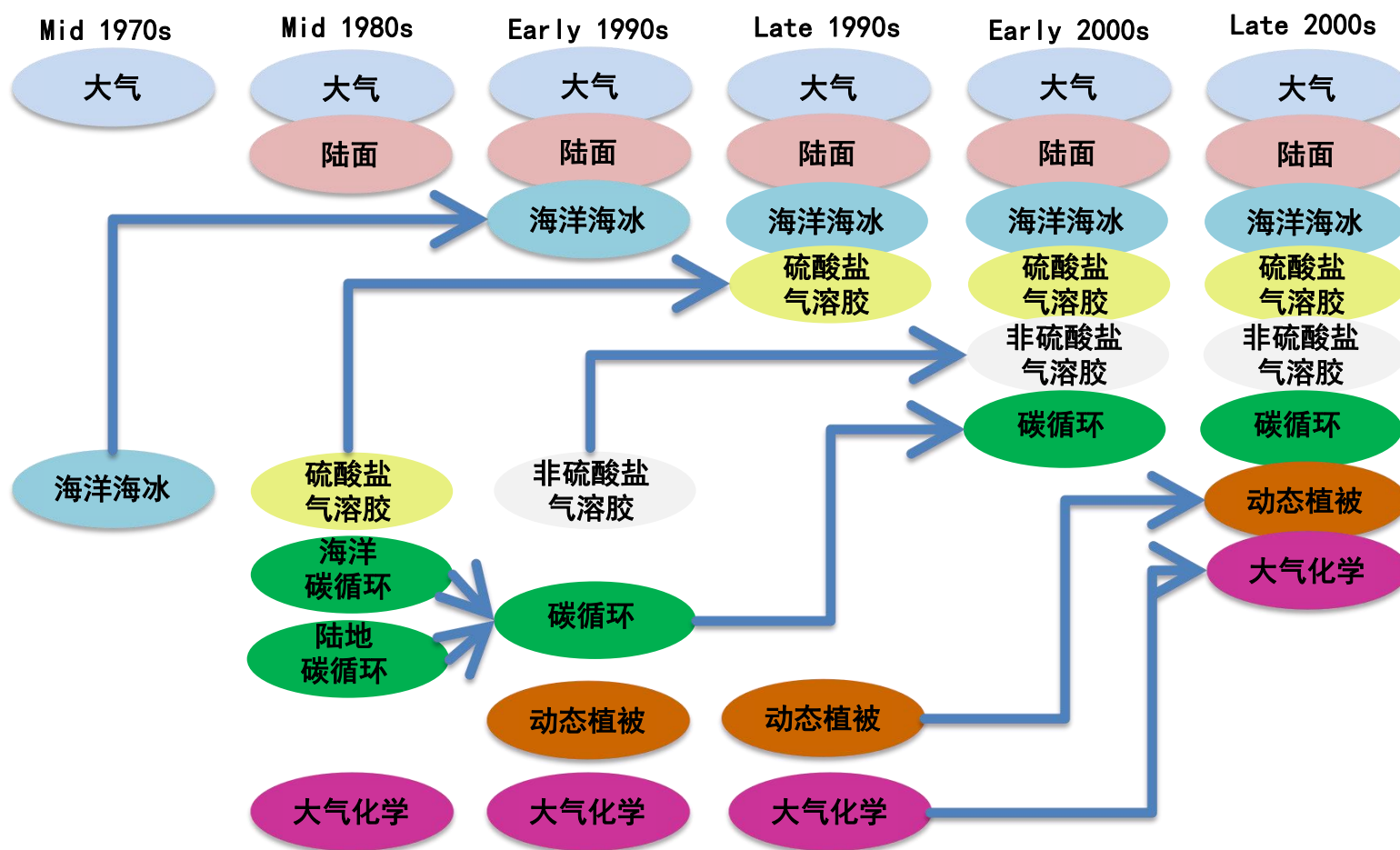
- 地球天气-气候系统是由多圈层、多过程及其**相互耦合**组成的复杂系统



(From 互动百科)

模式的模块化发展

- 是研究地球系统复杂行为的重要科学工具



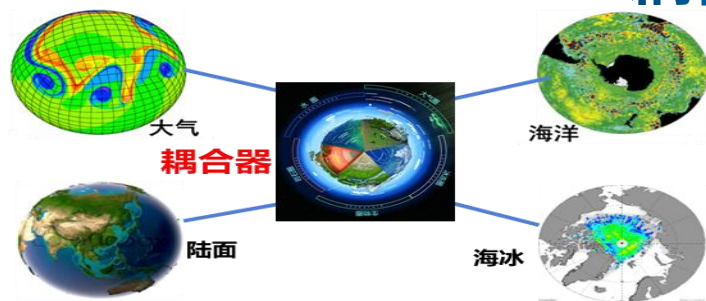
耦合模式：防灾减灾、气候变化应对的核心科技

国家重大需求



耦合模式

多学科交叉



超算

地球系统模式与耦合数值预报模式等**耦合模式是支撑**防灾减灾、气候变化应对等**国家重大需求的核心科技**，是通过超级计算客观定量预报/预测未来天气/气候变化的**系统性工程**

耦合器是耦合模式的基础平台

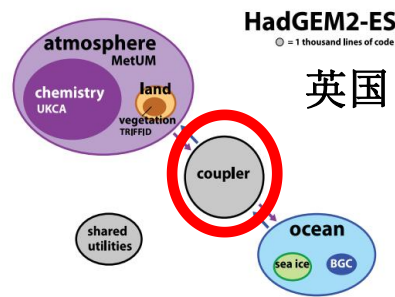
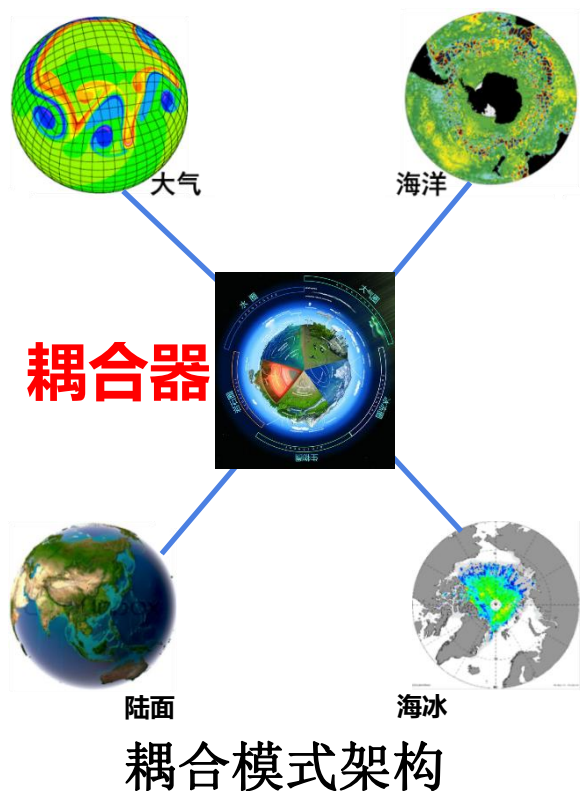


Figure 5. Architecture diagram for HadGEM2-ES.

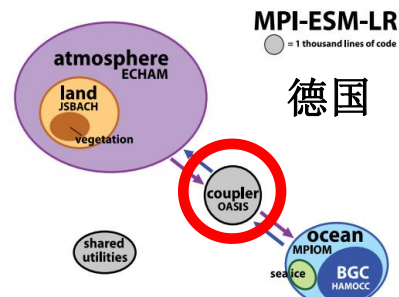


Figure 7. Architecture diagram for MPI-ESM-LR.

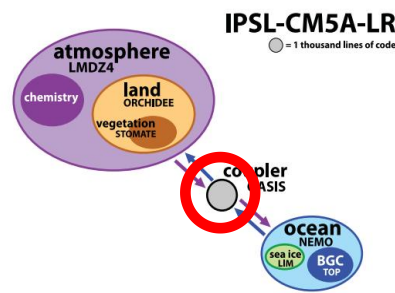


Figure 6. Architecture diagram for IPSL-CM5A-LR.

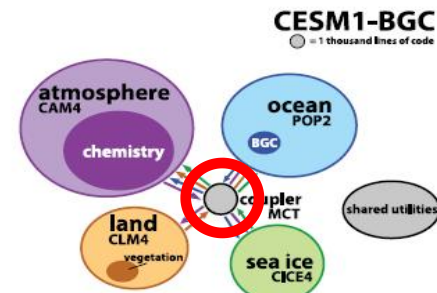
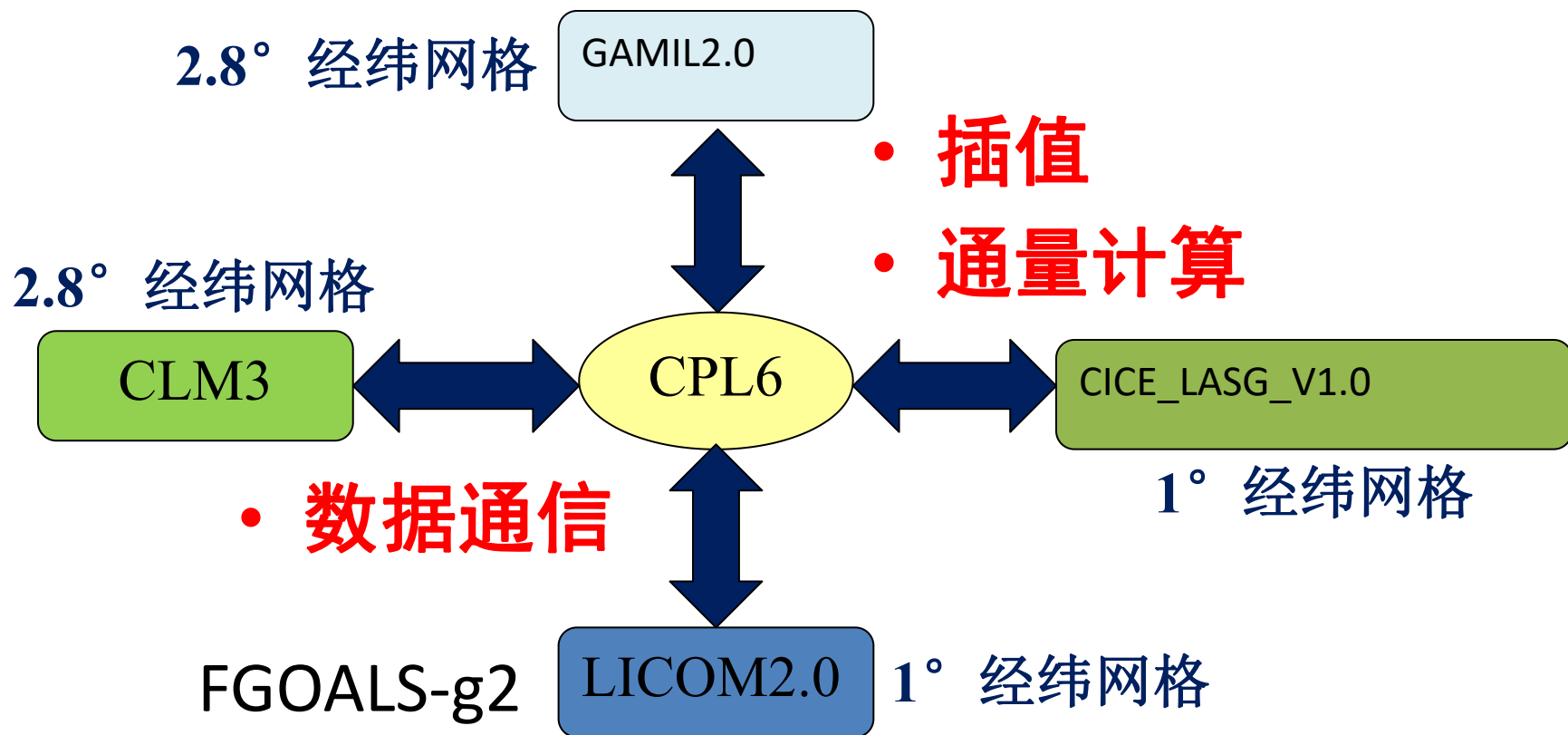


Figure 1. Architecture diagram for CESM1-BGC.

Alexander and Easterbrook, 2015, GMD

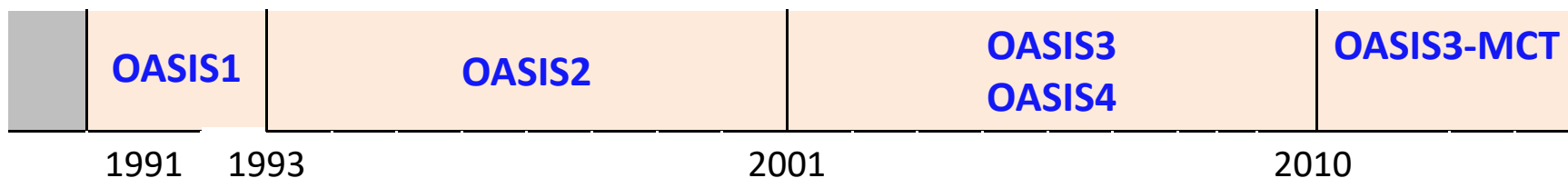
耦合器是位于耦合模式架构中心位置的**关键核心部件**，是支撑地球系统各圈层分量模式间**相互作用与系统集成**所**不可或缺的**
基础软件平台

耦合器的主要功能

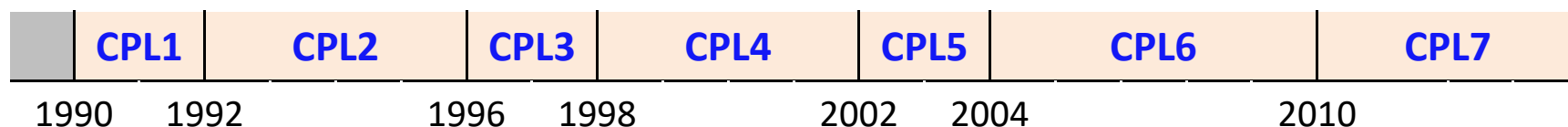


耦合器发展史

- 国外耦合器：法国的**OASIS**、美国的MCT/FMS/ESMF/**CPL(CPL6/CPL7)**、德国的YAC
- 较长发展史
 - 法国CERFACS的OASIS



- 美国NCAR的CPL



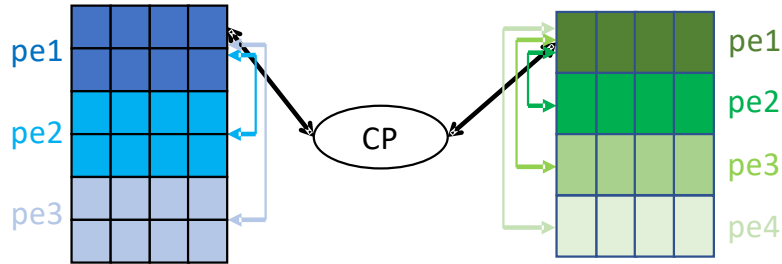
- 中国的C-Coupler



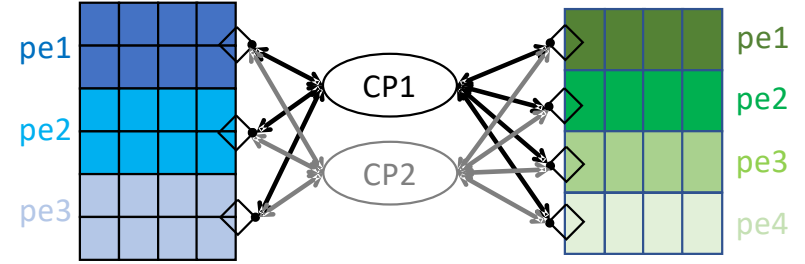
晚于欧美近20年

OASIS的版本升级

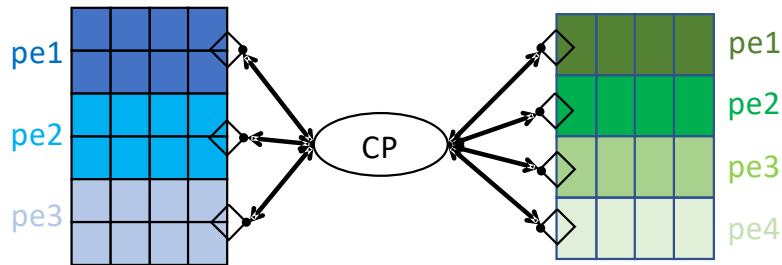
A) OASIS1



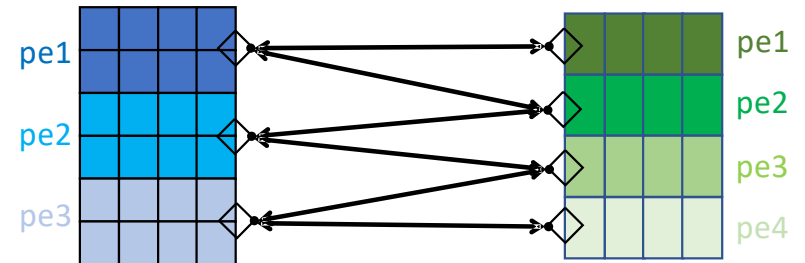
C) OASIS3



B) OASIS2



D) OASIS3-MCT



CP OASIS additional coupling process

◇ OASIS library



OASIS community today

About 35 groups world-wide (climate modelling or operational monthly/seasonal forecasting)

- France: CERFACS, METEO-FRANCE, IPSL (LOCEAN, LMD, LSCE), OMP, LGGE, IFREMER
 - Europe: ECMWF + Ec-Earth community
 - Germany: MPI-M, IFM-GEOMAR, HZG, U. Frankfurt
 - UK: MetOffice, NCAS/U. Reading, ICL
 - Denmark: DMI
 - Norway: U. Bergen
 - Sweden: SMHI, U. Lund
 - Ireland: ICHEC, NUI Galway
 - The Netherlands: KNMI
 - Switzerland: ETH Zurich
 - Italy: INGV, ENEA, CASPUR
 - Czech_Republic :CHMI
 - Spain: U. Castilla
 - Tunisia: Inst. Nat. Met
 - Japan: JMA, JAMSTEC
 - China: IAP-CAS, Met. Nat. Centre, SCSIO
 - Korea: KMA
 - Australia: CSIRO
 - New Zealand: NIWA
 - Canada: RPN-Environment Canada, UQAM
 - USA: Oregon State U., Hawaii U., JPL, MIT
 - Peru: IGP + downloads from Belgium, Nigeria, Colombia, Saudi Arabia, Singapore, Russia
- OASIS3 is used in 5 of the 7 European ESMs that participate in IPCC AR5
-



OASIS3-MCT: namcouple input file

```
$NFIELDS
20
$END

$RUNTIME
21600
$END

$NLOGPRT
10
$END

$STRINGS

FSEDOCN FRECVATM 1 7200 1 fdocn.nc EXPOUT
182 149 96 72 torc lmdz LAG=+3600
P 2 P 0
MAPPING
my_remapping_file_bilinear.nc src

FSENDATM FRECVOCN 1 10800 1 fdatm.nc EXPOUT
96 72 182 149 lmdz torc LAG=+1800
P 0 P 2
SCRIPR
BILINEAR LR SCALAR LATLON 1

$END
```

← Number of Coupling Fields

← Run Length

← Debug Level

← List of Coupling Interactions
- field names
- coupling periods
- grid names
- coupling lags
- transforms

Sophie Valcke et al, 2015

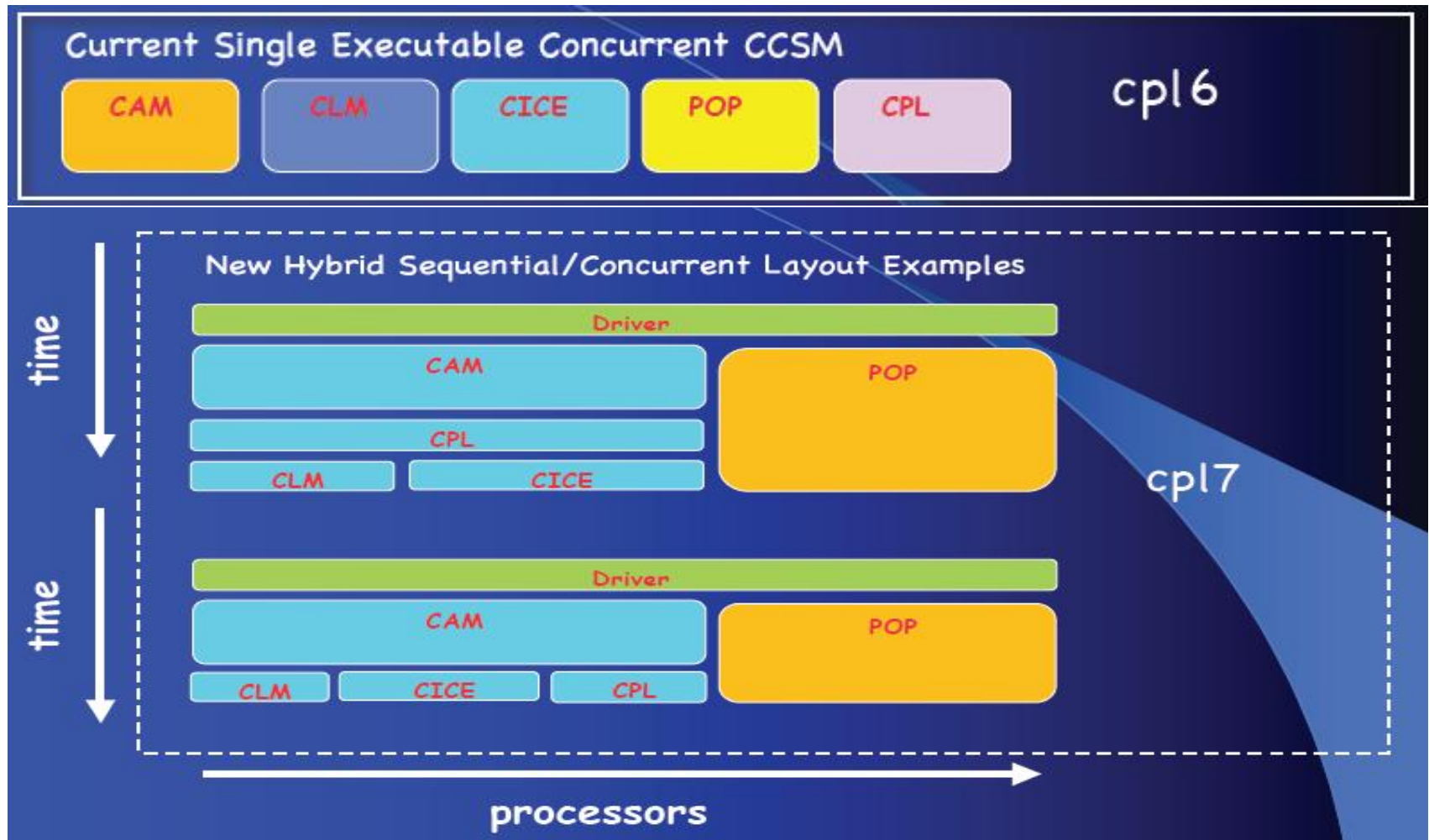
OASIS3-MCT主要功能

- 具有基本耦合功能（基于MCT和SCRIP）：
分量模式间的数据传递和不同网格间的数据插值
- 通过配置文件提高了耦合配置设置的灵活性
- 可自动生成变量耦合所需的数据传递和数据插值操作
- 支持对耦合延迟的配置

美国CPL耦合器版本升级

- 始于1990年
 - CPL3.a, 1996年6月
 - CPL3.a.2, 1996年6月
 - CPL4, 1998年7月, 实现四个分量模式耦合、控制分量模式运行
 - **CPL5, 2002年5月→CCSM2.0**, 处理移位极地网格点、处理陆地径流
 - **CPL6, 2004年6月→CCSM3.0**, 实现并行通信、增加耦合变量如SST
 - **CPL7, 2010年→CCSM4.0和CESM1.0**, 陆冰耦合、海浪、**单可执行文件**、并行IO

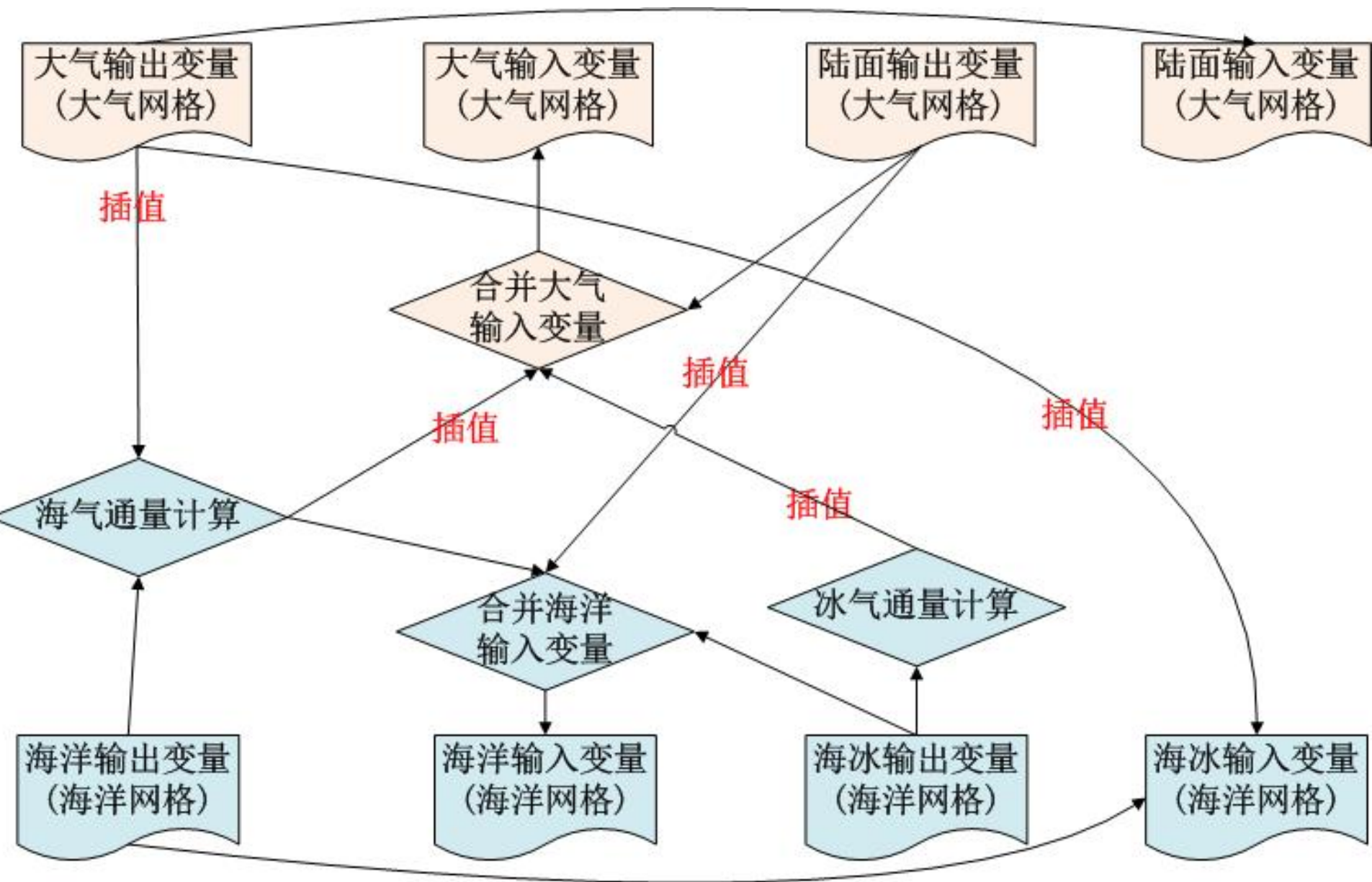
CPL6 VS CPL7



(From M. Vertenstein et. Al, 2008)

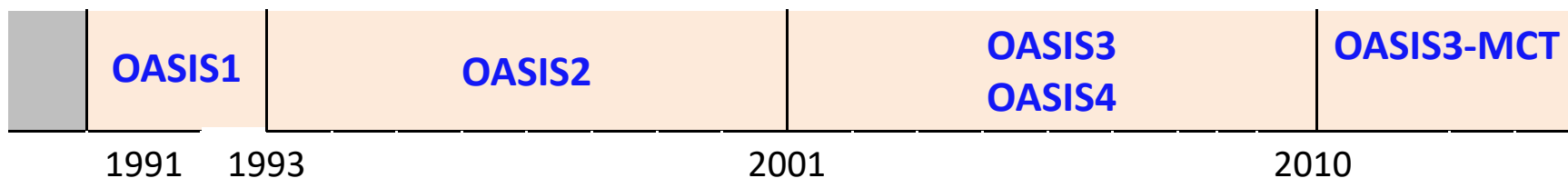
美国CPL耦合器的主要功能特点

- 具有基本耦合功能（基于MCT和SCRIP）：
分量模式间的数据传递和不同网格间的数据插值
- 建立了针对耦合气候系统模式和地球系统模式的耦合流程，包含通量计算
- 给出了保证通量与质量守恒的方案

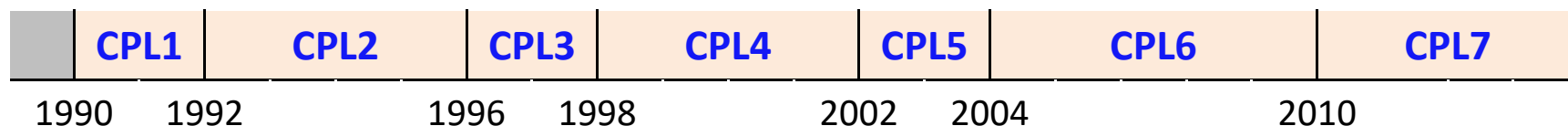


耦合器发展史

- 国外耦合器：法国的**OASIS**、美国的MCT/FMS/ESMF/**CPL(CPL6/CPL7)**、德国的YAC
- 较长发展史
 - 法国CERFACS的OASIS



- 美国NCAR的CPL



- 中国的C-Coupler



晚于欧美近20年

我国耦合模式发展因依赖欧美耦合器而受到限制

CPL6: 美国CCSM3耦合模式的专用耦合器



- 只能晚于欧美升级耦合器



- 只能忍受欧美耦合器的技术瓶颈

The CCSM Coupler -- Version 6
Project Home Page

Overview

In early 2001, the CCSM Coupler 6 Project was launched as a joint DOE/NCAR effort to design and build a more robust coupler component, cpl6, for use in the CCSM coupled system. The primary goals for cpl6 were to introduce significant improvements in portability, performance, and extensibility, and to create one coupler component to replace the two existing CCSM and PCM coupler components. Like previous CCSM couplers, cpl6 fits into the existing CCSM software framework and is responsible for providing the same functionality within that framework, but cpl6 represents a major re-write of the coupler component involving the creation of two new lower level, general purpose libraries, [MCT](#) and [MPH](#), to handle message passing data transfers.

Fully functional beta versions of cpl6 are in use, and, as of early 2003, all internal CCSM development has migrated from cpl5 to cpl6. The first public release cpl6 will be as part of the CCSM3.0 release, which is scheduled for Summer 2004.

我国耦合模式发展因依赖欧美耦合器而受到限制

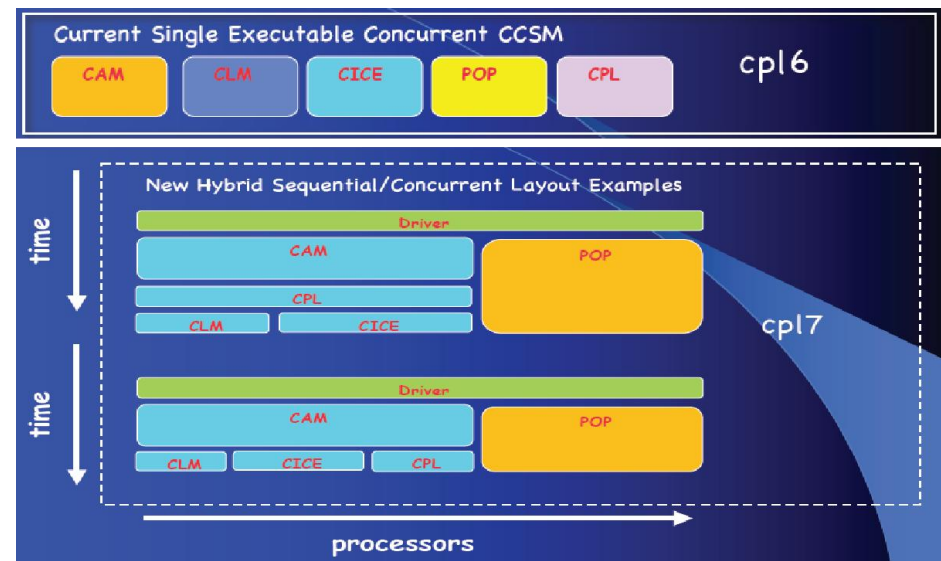
CPL7: 美国CCSM4/CESM1耦合模式的专用耦合器



■ 只能忍受欧美耦合器的技术瓶颈

■ 只能晚于欧美升级耦合器

■ 不得不被动接受耦合器升级，不得不承担其中的大量工作



(From M. Vertenstein et. Al, 2008)

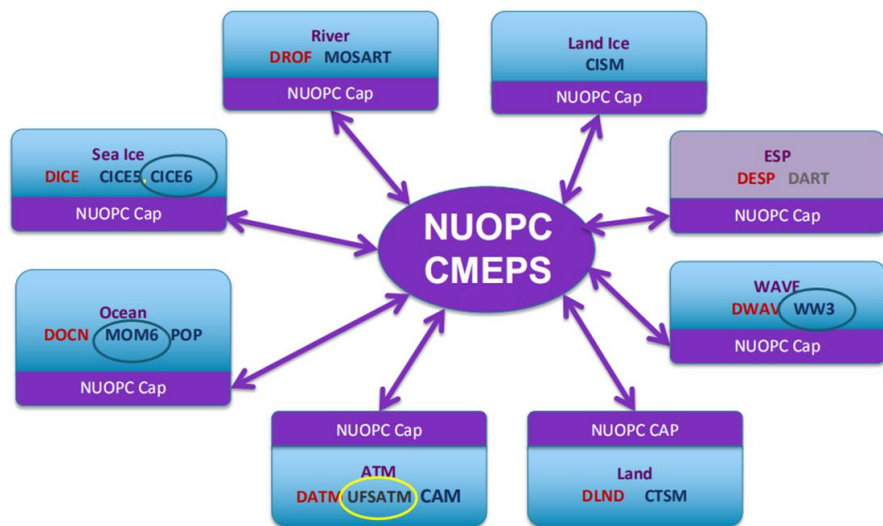
我国耦合模式发展因依赖欧美耦合器而受到限制

CMEPS: 美国CESM2耦合模式的专用模式耦合平台



CMEPS enables new functionality and collaborations

Vertenstein et al, 2020



- 只能忍受欧美耦合器的技术瓶颈
- 只能晚于欧美升级耦合器
- 不得不被动接受耦合器升级，不得不承担其中的大量工作
- 重复引进的门槛不断提高：难以引进到无法引进

把科技自立自强作为国家发展的战略支撑

--十九届五中全会



- 科技自立自强是全面建设社会主义现代化国家的必由之路
- 科技自立自强是中国特色自主创新道路的新要求
- 新时期推动科技自立自强基础坚实但任务艰巨
- 加快科技自立自强，全面塑造发展新优势



我国于2010年启动耦合器的自主研制



中华人民共和国科学技术部

Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China

请输入关键字

搜索

首页 组织机构 信息公开 科技政策 科技计划 政务服务 党建工作 公众参与 专题专栏

当前位置: 科技部门户 > 通知公告

www.most.gov.cn

【字体: 大 中 小】

国家高技术研究发展计划(863计划)信息技术领域“地球系统模式中的高效并行算法研究与并行耦合器研制” 重点项目申报指南

日期: 2010年02月01日 来源: 科技部

一、指南说明

依据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》、《国家“十一五”科学技术发展规划》、《国家高技术研究发展计划(863计划)“十一五”发展纲要》和《中国应对气候变化国家方案》, 863计划信息技术领域围绕国家应对全球变化的需求, 设立了“地球系统模式中的高效并行算法研究与并行耦合器研制”重点项目。

地球系统模式是研究全球变化成因和机理、预估未来演变趋势的重要工具, 是耦合大气、海洋、海冰和陆地表面等地球系统分量、定量研究它们之间繁复非线性相互作用的一种大型综合软件。地球系统模式的水平已成为衡量一个国家综合科技实力的重要标志之一, 也是全球变化研究最核心的内容之一。

耦合器之中国道路的抉择

- 改造已有自主软件？
- 引进欧美耦合器后改进？
- **自立自强的道路：学习欧美耦合器知识，但以我国模式发展为导向，自力更生、自主研制**

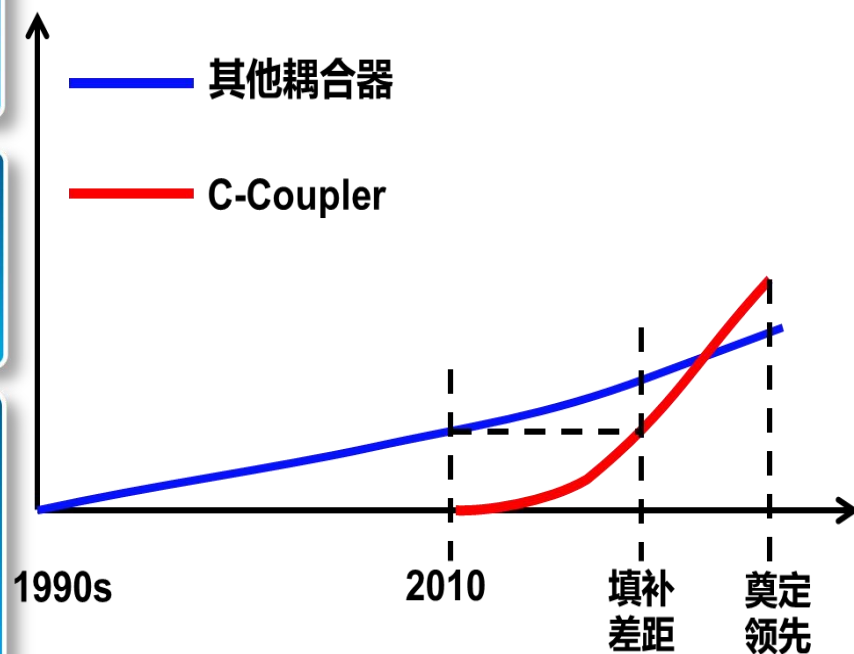
国产耦合器的应有发展目标

不能是引进后改进，而必须是独立于欧美的全新耦合器

必须是由我国需求定制、且解决了欧美耦合器技术瓶颈的软件产品

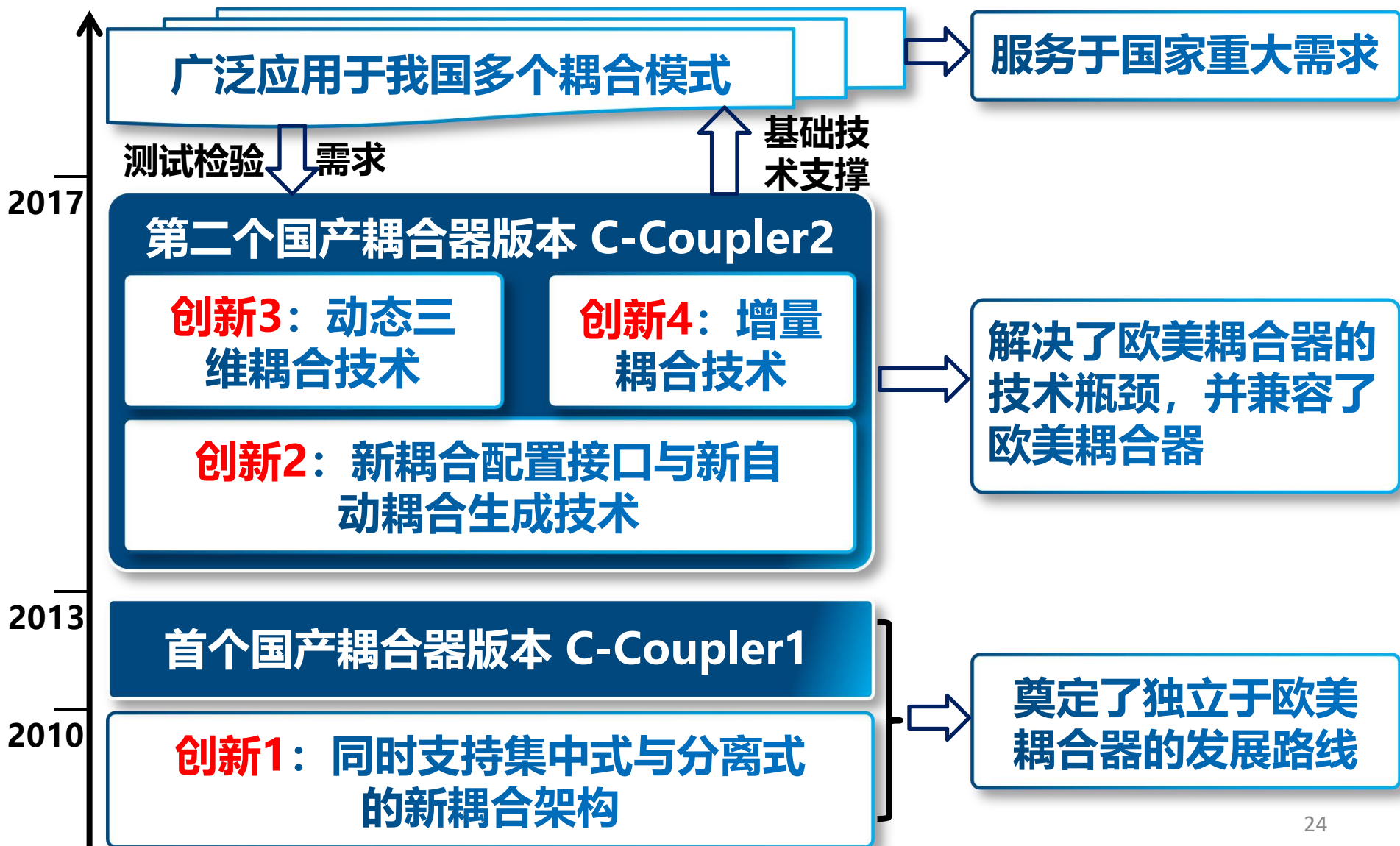
其必须兼容欧美耦合器：使我国已有耦合模式能平稳过渡到国产耦合器上

以积极服务好我国模式发展为使命



**充满挑战和失败
风险的艰辛之路**

C-Coupler总体进展



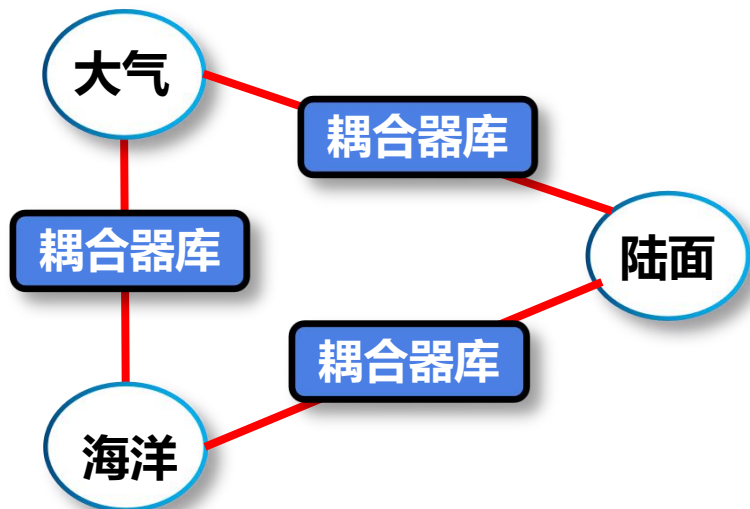
C-Coupler的一系列新功能

- 同时支持集中式和分离式的耦合架构
- 通用、灵活且易用的耦合配置接口
- 灵活的自动耦合生成功能
- 动态三维耦合功能
- 对增量耦合与模式嵌套的支持
- 非阻塞式数据传输
- 耦合程序调试功能
- 灵活的重启动功能
- 插值权重的自动在线并行计算与自动复用更新
- 对同一可执行文件内或同一分量模式内耦合的支持

同时支持集中式和分离式的新耦合架构

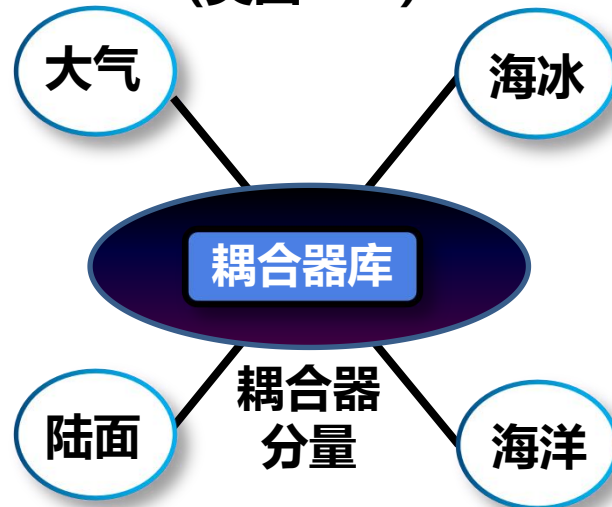
分离式耦合架构

(法国OASIS, 美国MCT、FMS、ESMF)



集中式耦合架构

(美国CPL)

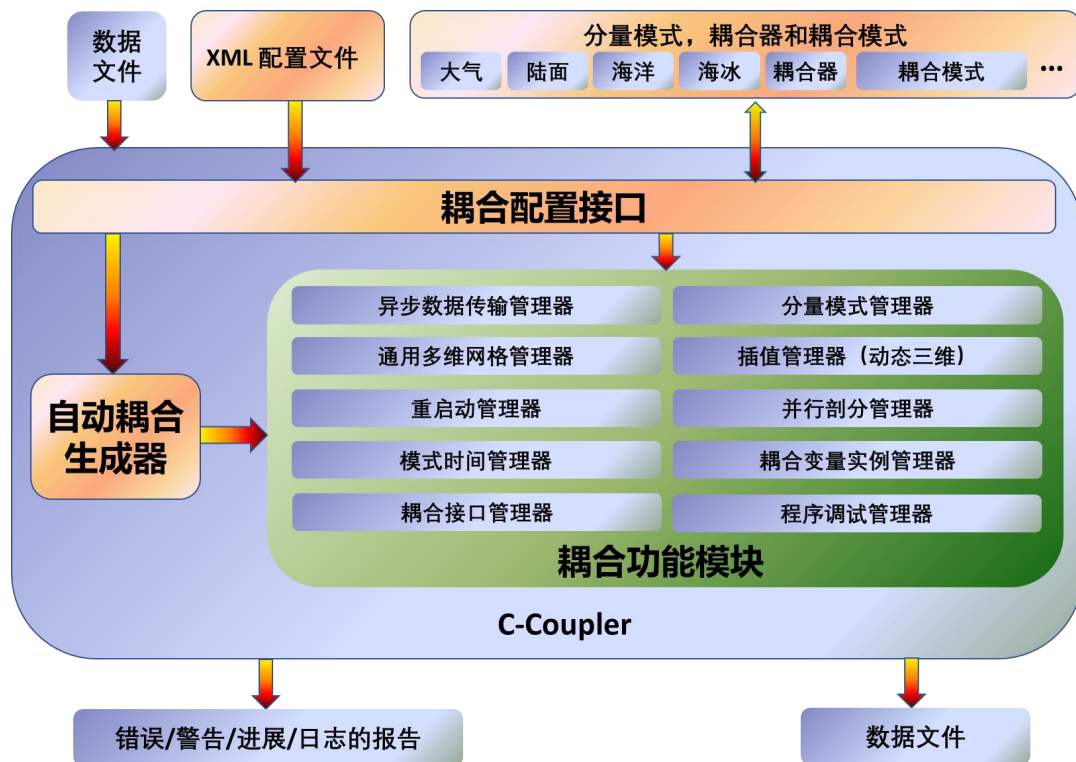


集中式	使用的工作量小	通用性与灵活性不佳
分离式	使用的工作量大	通用性与灵活性好

尚未解决统一应用接口下自动生成不同耦合架构的技术难题

同时支持集中式和分离式的新耦合架构

解决了统一应用接口下自动生成不同耦合架构的技术难题



同时支持集中式
和分离式的新耦合架构

C-Coupler模块化软件结构

新耦合配置接口与自动耦合生成技术

耦合配置接口：
耦合器的
操作台



自动耦合生成技术：
耦合器的自动
化生产流水线



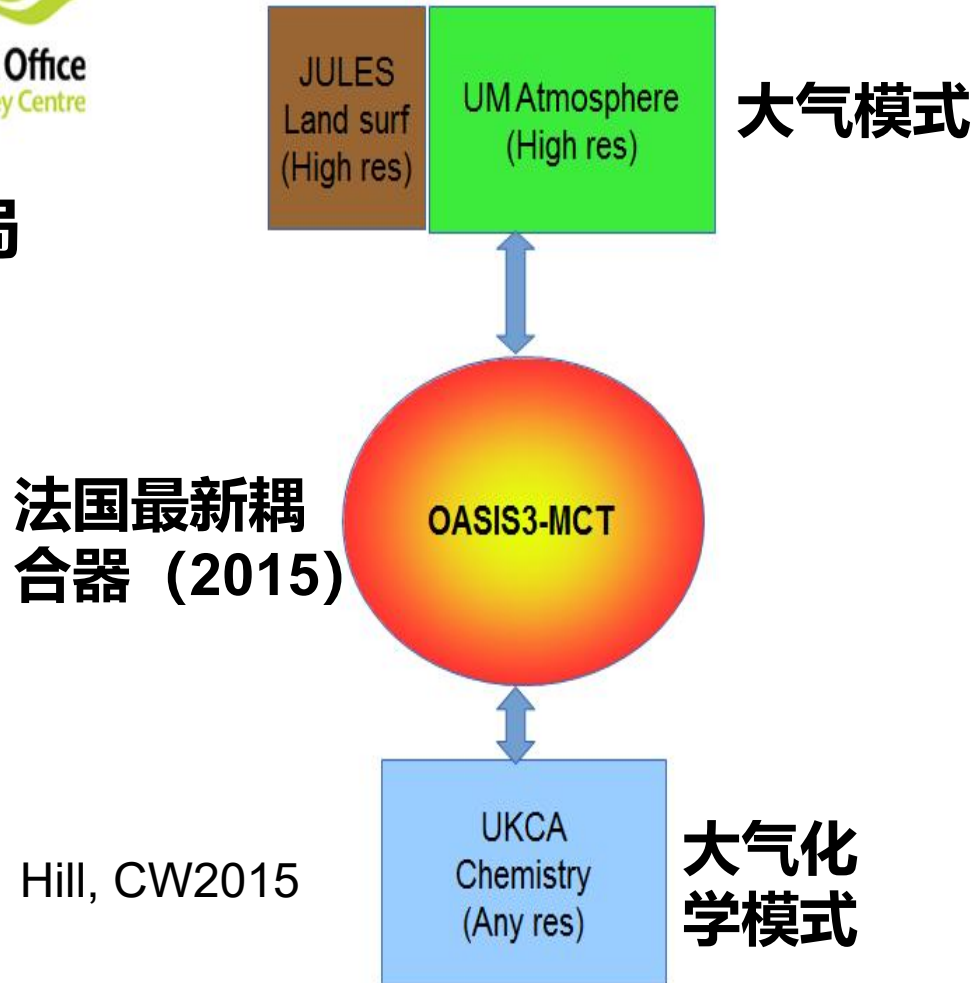
新耦合配置接口与自动耦合生成技术

		美国CPL、MCT、FMS 和 ESMF	法国OASIS	中国C-Coupler
耦合配置接口	对并行设置、并行剖分和耦合变量的配置	✓	✓	✓
	对模式网格、耦合生成方案和插值方案的配置	X	X	✓
自动耦合生成技术	全局耦合生成	X	✓	✓
	局部耦合生成	X	X	✓

关键技术	法国OASIS	中国C-Coupler
耦合接口	< 30个	近80个
分量模式间的同步技术	仅有全局同步技术	解决了任意一组分量模式间的局部同步技术

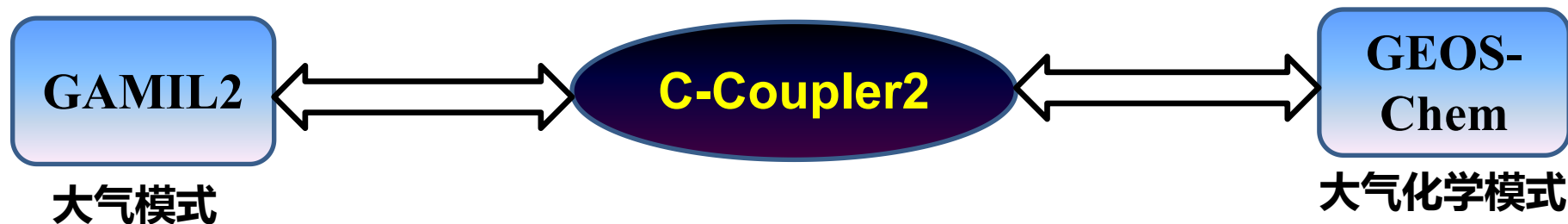
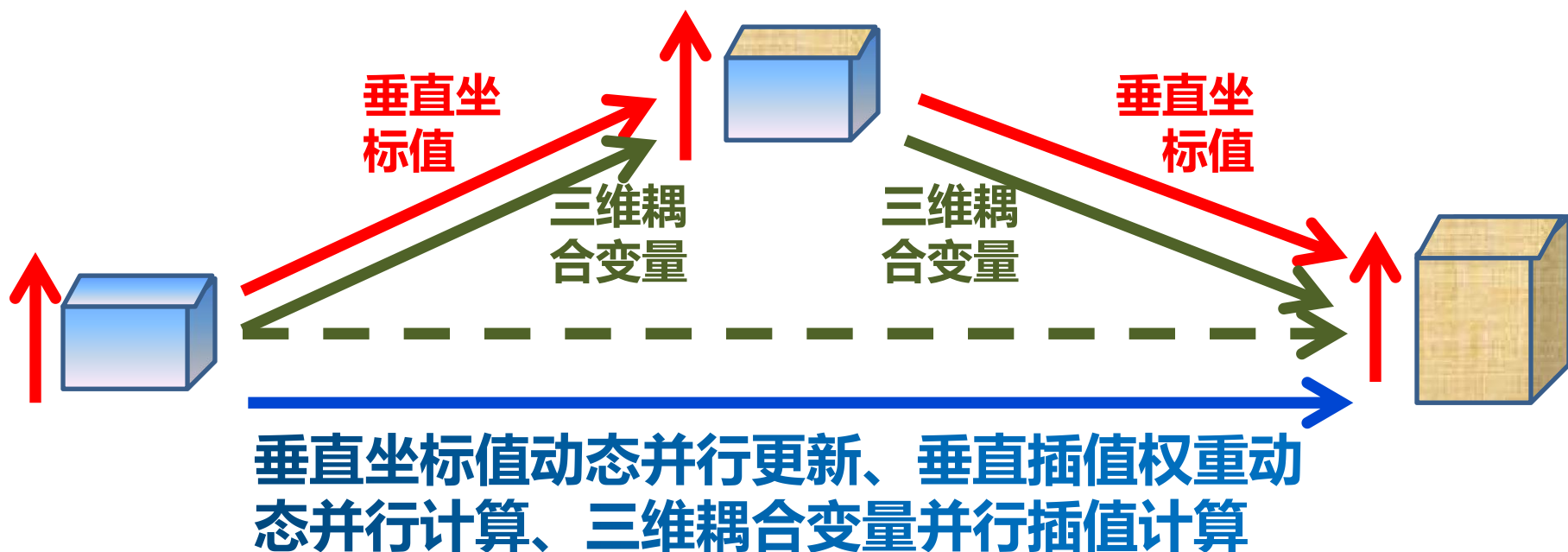
动态三维耦合技术

So we can't do this... (at least not easily)

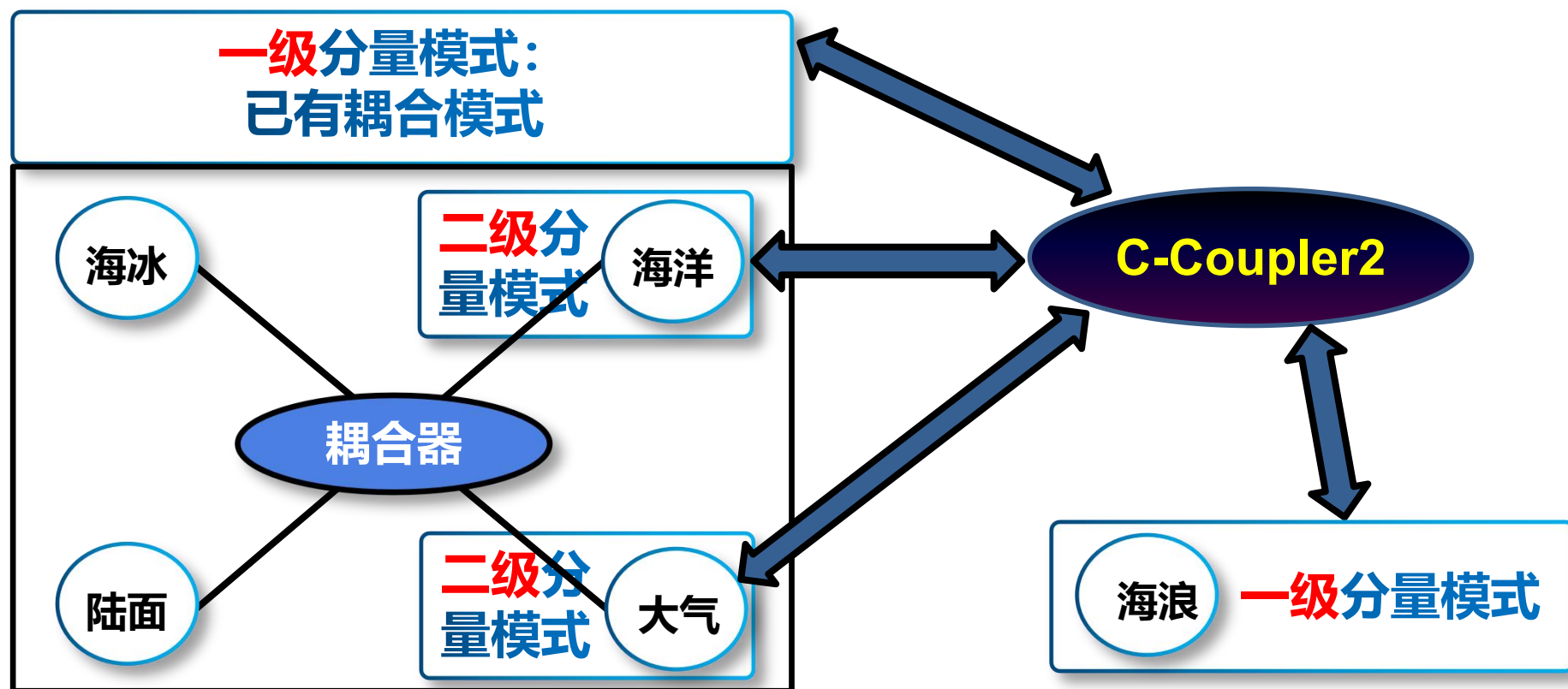


尚未解决垂直坐标值随模式积分动态改变下的动态三维耦合问题

动态三维耦合技术

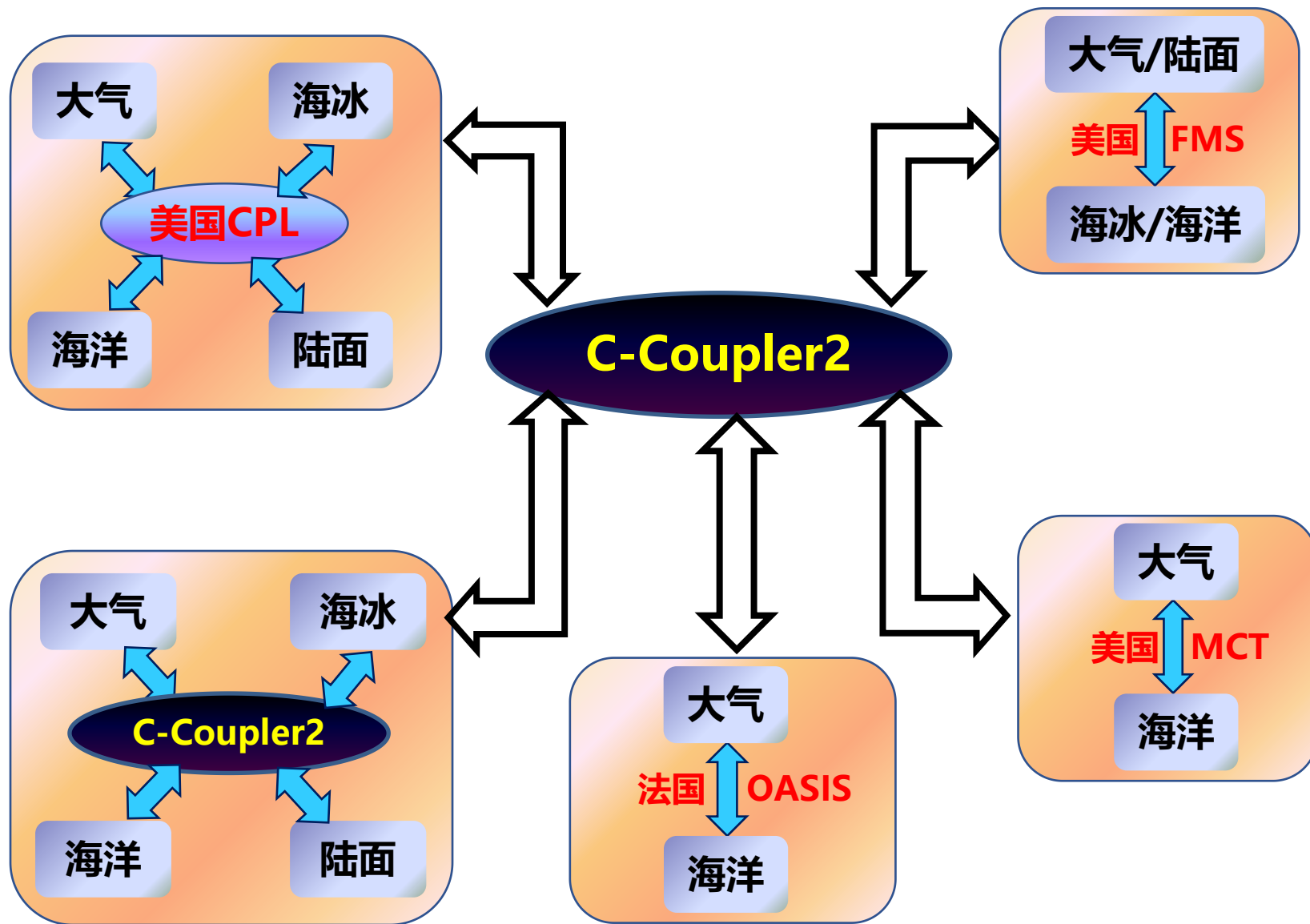


增量耦合技术



分量模式的分级管理体系

增量耦合技术



C-Coupler2的软件测试

- 源码中有超过**1700**个错误诊断
 - 近**600**个为C-Coupler2自身的诊断
 - 超过**1100**个为针对耦合配置正确性的诊断
- 基于理想模式的上千个功能单元测试
- 基于我国**多个真实耦合模式**的应用测试：基于**二进制一致性**的测试标准
- 在多种高性能计算机平台上的**可移植性测试**
 - 神威太湖之光，多个Intel商用平台，IBM商用平台
 - 多种处理器、多种操作系统、多种编译器、多种MPI库
- 开源释放：<https://github.com/C-Coupler-Group/c-coupler-lib>
- 测试奖励：**每个bug**提供**1000-1500元**奖励

C-Coupler2得到了我国地学专家的肯定

综合评分与评价结论

综合评分：95.08

评价结论：

2018年4月17日，中科创（北京）科技成果评价中心在北京组织召开了清华大学完成的“地球系统模式耦合器C-Coupler2”项目科技成果评价会。与会专家审阅了项目资料，听取了技术总结汇报、第三方测试报告和查新报告，经质询、答疑和讨论，形成如下评价意见：

- 1、提供的资料完整、规范，符合科技成果评价要求。
- 2、C-Coupler2作为由我国完全自主研制的地球系统模式耦合器，以实际应用为目标，以解决耦合器技术存在的难点问题为引导，具有如下主要创新点：
 - （1）具备了有机结合应用程序接口和配置文件的耦合配置接口。相比国际上现有耦合器的耦合配置接口，C-Coupler2的耦合配置接口更具通用性、灵活性和易用性。
 - （2）具备了灵活的自动耦合生成能力，可对同一分量模式内不同过程模块之间、同一分量模式内多重网格之间、多个分量模式之间、或耦合模式整体分别进行多次自动耦合生成。国际上现有耦合器要么不具备自动耦合生成能力，要么只允许耦合模式进行一次全局自动耦合生成。
 - （3）具备了动态三维耦合功能，能便捷完成三维网格垂直坐标值随模式积分动态改变情况下的三维耦合。国际上现有耦合器要么不具备三维耦合功能，要么要求三维网格垂直坐标值在模式积分过程中保持不变。
 - （4）提供了对增量耦合支持。即除分量模式外，C-Coupler2能把一个完整的耦合模式当作分量模式，便捷实现其与其他分量模式的耦合。国内外现有其他耦合器不能直接把一个耦合模式当成分量模式与其他分量模式进行耦合集成。

当前，C-Coupler2已在清华大学、中国科学院大气物理研究所、国家气候中心的气候系统模式或地球系统模式的发展中得到应用，已在国家海洋局第一海洋研究所的海气耦合模式发展中得到应用，并正用于国家气象中心和国家海洋环境预报中心的业务预报系统研发。

综上所述，C-Coupler2在耦合配置、自动耦合生成、动态三维耦合以及增量耦合等方面的技术性能在国际上处于领先地位，使得我国模式发展打破了必须依赖于国外耦合器的不利局面，对推动我国地球系统科学和相关的业务发展具有重大意义。成果技术达到国际领先水平，评价专家组一致同意通过成果评价。

建议对C-Coupler2以开源发布、用户培训和学术交流等方式加强推广，以更好地促进地球系统模式的发展。

评价专家组组长：

徐冠华
2018年4月17日

评价咨询专家名单

姓名	工作单位	职务/职称	从事专业	签字
徐冠华	科技部	院士	全球变化	徐冠华
曾庆存	中国科学院大气物理研究所	院士	地球流体力学	曾庆存
李泽椿	国家气象中心	院士	气象	李泽椿
丁一汇	国家气候中心	院士	气候	丁一汇
穆穆	复旦大学	院士	大气科学	穆穆
吴立新	中国海洋大学	院士	海洋地质	吴立新
陈大可	国家海洋局第二海洋研究所	院士	物理海洋	陈大可
董文杰	中山大学	教授	气候	董文杰
沈学顺	国家气象中心	研究员	数值预报	沈学顺
吴统文	国家气候中心	研究员	气候	吴统文
俞永强	中国科学院大气物理研究所	研究员	气候	俞永强

C-Coupler2在耦合配置、自动耦合生成、动态三维耦合以及增量耦合等方面的技术性能在国际上处于领先地位，使得我国模式发展打破了必须依赖于国外耦合器的不利局面，对推动我国地球系统科学和相关的业务发展具有重大意义。成果技术达到国际领先水平。

C-Coupler2得到了我国地学专家的关注



2018年5月26日C-Coupler2
应用启动暨专家研讨会现场



2018年5月26日C-Coupler2
培训会现场

近30家单位、超过100位专家学者

C-Coupler各项创新得到国际同行的认可

C-Coupler2: a flexible and user-friendly community coupler for model coupling and nesting

Li Liu^{1,2}, Cheng Zhang^{1,2}, Ruizhe Li^{1,2}, Bin Wang^{1,2,3}, and Guangwen Yang^{1,2}

Abstract. The Chinese C-Coupler (Community Coupler) family aims primarily to develop coupled models for weather forecasting and climate simulation and prediction. It is targeted to serve various coupled models with flexibility, user-friendliness, and extensive coupling functions. C-Coupler2, the latest version, includes a series of new features in addition to those of C-Coupler1 – including a common, flexible, and user-friendly coupling configuration interface that combines a set of application programming interfaces and a set of XML-formatted configuration files; the capability of coupling within one executable or the same subset of MPI (message passing interface) processes; flexible and automatic coupling procedure generation for any subset of component models; dynamic 3-D coupling that enables convenient coupling of fields on 3-D grids with time-evolving vertical coordinate values; non-blocking data transfer; facilitation for model nesting; facilitation for increment coupling; adaptive restart capability; and finally a debugging capability. C-Coupler2 is ready for use to develop various coupled or nested models. It has passed a number of test cases involving model coupling and nesting, and with various MPI process layouts between component models, and has already been used in several real coupled models.

GEOSCIENTIFIC MODEL DEVELOPMENT



impact factor

5.154 5.697

2018

5 年

**GMD: 领域顶级期刊
(10/196)**

JCR® 类别	类别中的排序	JCR 分区
GEOSCIENCES, MULTIDISCIPLINARY	10/196	Q1

Acknowledgements. This work was jointly supported in part by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China (grant no. 2014CB441302) and the National Key Research Project of China (grant nos. 2017YFC1501903 and 2016YFA0602200).

Edited by: Sophie Valcke

Reviewed by: two anonymous referees

论文编辑是法国OASIS耦合器的负责人

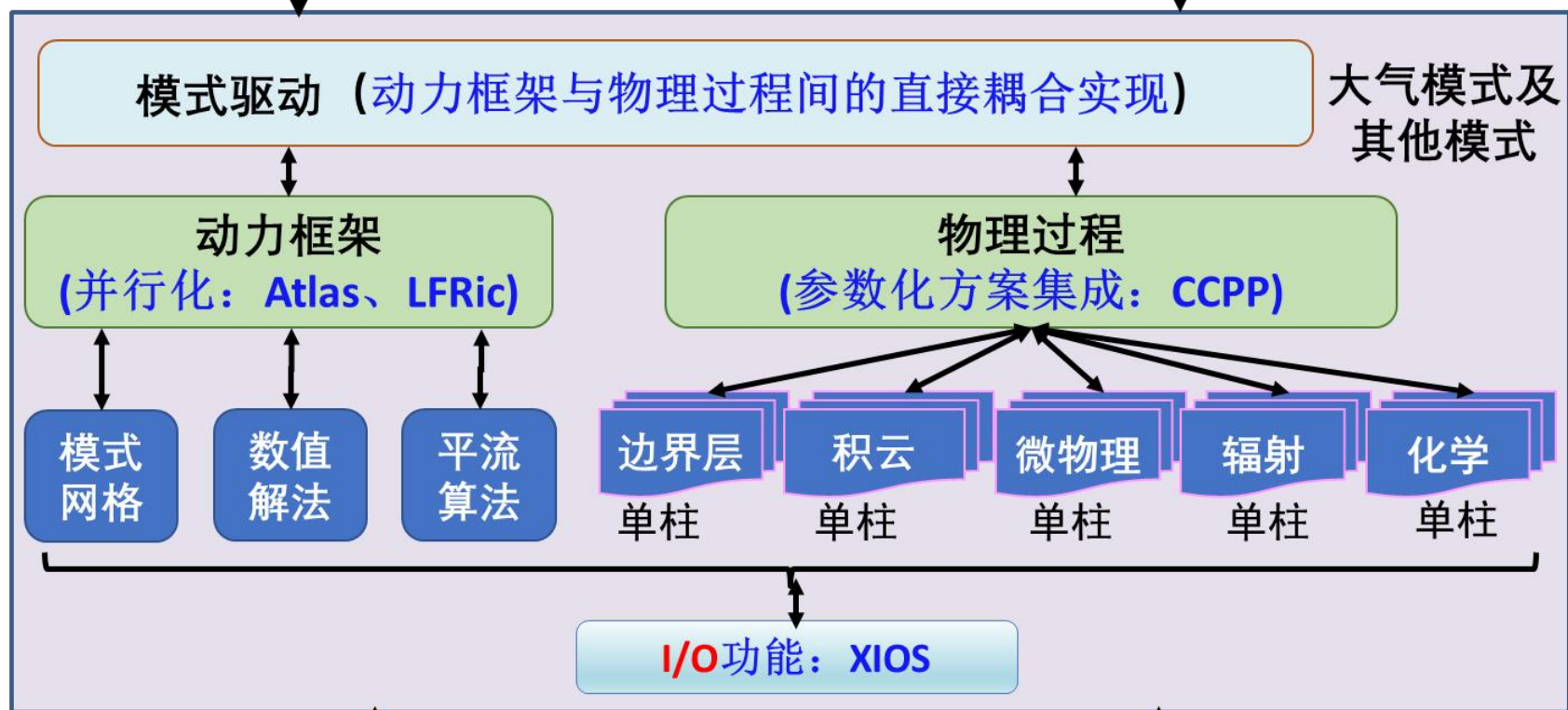
论文摘要列出了C-Coupler的上述各项创新

我国模式软件支撑技术仍很落后

美国ESMF 欧洲的MESSI

耦合器：OASIS、CPL、C-Coupler等

同化算法的集成应用：DART、PDAF等



模拟试验平台：CIME、FMS、C-Coupler平台

软件测试：pyCECT

新使命：面向地球系统数值预报的通用耦合器

高可扩展耦合器：全面
完成并应用

通用在线集合耦合同化框架：
全面完成弱耦合同化版本

C-Coupler3

模式驱动（动力过程与物理过程间基于耦合器的耦合：全面已完成并应用）

大气模式及
其他模式

动力过程
(通用并行框架：全面完成并
应用)

物理过程
(支持单柱与三维的通用集成框架：全面
完成并应用)

模式
网格

数值
解法

平流
算法

边界层
三维

积云
单柱

微物理
单柱

辐射
三维

化学
三维

通用I/O框架：全面完成并初步应用

通用集合耦合模拟试验平台：
外单位完成

通用软件测试平台：完成并
应用

**将于2022年完成并
开源释放**

原始创新的新机遇

证书号第 4117948 号

发明专利

发明名称：面向数值模

发明人：刘利;李锐皓

专利号：ZL 2019 1 1

证书号第 4182200 号

发明专利

发明名称：一种数值应用程序的软件

发明人：刘利

专利号：ZL 2020 1 0037868.4

证书号第 4119203 号

发明专利证书

发明名称：一种数值预报的集合耦合同化系统和方法

发明人：刘利;孙超;李锐皓;王斌

专利号：ZL 2019 1 1154881.1

Editor(s): GMD topical editors | Coordinator: R. Dunlap

► More information

Download citations of all papers

- Bibtex
- EndNote
- Reference Manager

12 May 2021

Developing a common, flexible and efficient framework for weakly coupled ensemble data assimilation based on C-Coupler2.0
Chao Sun, Li Liu, Ruizhe Li, Xinzhu Yu, Hao Yu, Biao Zhao, Guansuo Wang, Juanjuan Liu, Fangli Qiao, and Bin Wang
Geosci. Model Dev., 14, 2635–2657, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2635-2021>, 2021

► Short summary

10 Dec 2020

DiRong1.0: a distributed implementation for improving routing network generation in model coupling
Hao Yu, Li Liu, Chao Sun, Ruizhe Li, Xinzhu Yu, Cheng Zhang, Zhiyuan Zhang, and Bin Wang
Geosci. Model Dev., 13, 6253–6263, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6253-2020>, 2020

► Short summary

26 Jul 2019

PatCC1: an efficient parallel triangulation algorithm for spherical and planar grids with commonality and parallel consistency
Haoyu Yang, Li Liu, Cheng Zhang, Ruizhe Li, Chao Sun, Xinzhu Yu, Hao Yu, Zhiyuan Zhang, and Bin Wang
Geosci. Model Dev., 12, 3311–3328, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3311-2019>, 2019

► Short summary

16 Jan 2019

Toward modular in situ visualization in Earth system models: the regional modeling system RegESM 1.1
Ufuk Utku Turuncoglu
Geosci. Model Dev., 12, 233–259, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-233-2019>, 2019

► Short summary

证书号第 3741463 号

发

发明名称：一种二

发明人：刘利;杨昊

专利号：ZL 2018 1

专利申请日：2018 年 11

专利权人：清华大学

地址：100084 北

公室

授权公告日：2020 年 04

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法第五十六条第一款的规定，对发明专利权的实质审查结果作出决定，自公告之日起生效。

专利证书记载专利权的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨

证书号第 4157196 号

发

发明名称：一种

发明人：刘利

专利号：ZL 20

专利申请日：2020 4

专利权人：清华

地址：100084 北

公室

授权公告日：2020 4

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法第五十六条第一款的规定，对发明专利权的实质审查结果作出决定，自公告之日起生效。

专利证书记载专利权的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨

证书号第 5181558 号

发

发明名称：网格数据

发明人：刘利;于

专利号：ZL 2021 1

专利申请日：2021 年 04

专利权人：清华大学

地址：100084 北

公室

授权公告日：2022 年 05

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法第五十六条第一款的规定，对发明专利权的实质审查结果作出决定，自公告之日起生效。

专利证书记载专利权的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨

证书号第 5185768 号

发明专利

发明名称：数值程序的数据处理系统

发明人：刘利;于馨竹;张志远;孙超

专利号：ZL 2021 1 0567380.7

专利申请日：2021 年 05 月 24 日

专利权人：清华大学

地址：100084 北京市海淀区清华

公室

授权公告日：2022 年 05 月 27 日

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法第五十六条第一款的规定，对发明专利权的实质审查结果作出决定，自公告之日起生效。

专利证书记载专利权的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨

C-Coupler3完全自主可控

高可扩展耦合器: **GMD,**
2019; GMD, 2020;
ZL201811400590.1;
ZL202010127096.3;
ZL202110417353.1

通用在线集合耦合同化框架:
GMD, 2021;
ZL201911154881.1

C-Coupler3
2022SR0728567

模式驱动

大气模式及
其他模式

动力过程

(通用并行框架:
ZL201911019068.3)

物理过程

(通用集成框架: **ZL202010037868.4**)

模式
网格

数值
解法

平流
算法

边界层
三维

积云
单柱

微物理
单柱

辐射
三维

化学
三维

通用I/O框架: **ZL202110567380.7; GMDD, 2022**

高质量软件产品：版本管理

科学技术评价应当...以科技创新**质量**、贡献、绩效为导向...
-- 《中华人民共和国科学技术进步法》

```
C-Coupler2
C-Coupler3
C-Coupler3-PIO
problem in decomp_grid null
C-Coupler3-distributed_H2D_grid
ricter test cases
C-Coupler3-distributed_grid_data_assimilation
C-Coupler3-distributed_wgts_input
more test cases are required
C-Coupler3-external_procedure
f CCPL_bcast
C-Coupler3-external_procedure_data_assimilation
model platform
* C-Coupler3_grid_assimilation_PIO
ome/liuli/c_coupler_yuhao into C-Coupler3_grid_assi
IO_improvement
root proc reads and then bcast.
coupling_generation_improvement
nd interface tag; Pass the test cases of the ideal
master
model
```

12个分支版本

```
Author: liuli <liuli-cess@tsinghua.edu.cn>
Date: Thu Dec 23 16:20:15 2021 +0800

Merge branch 'C-Coupler3_grid_assimilation_PIO' of /home/liul
i/c_coupler_yuhao into C-Coupler3_grid_assimilation_PIO

commit 6d4ebabd04dd9e915810fe078380722edc7de44b
Merge: 1b9b964 ad4bb99
Author: liuli <liuli-cess@tsinghua.edu.cn>
Date: Thu Dec 23 15:57:27 2021 +0800

Merge branch 'C-Coupler3_grid_assimilation_PIO' of /home/liul
i/c_coupler_yuhao into C-Coupler3_grid_assimilation_PIO

Conflicts:
src/Data_MGT/original_grid_mgt.cxx

commit 57be97adfde3f68c0347de81a0c073ab5a25ba71
Author: liuli <liuli-cess@tsinghua.edu.cn>
Date: Thu Dec 23 15:55:39 2021 +0800

basically finish OMP optimization for pack and unpack

10,1 0%
```

2018年以来共提交超过900个版本，
其中2021年提交178个版本

C-Coupler3代码量达到64000行，其中新研发的超过25000行

高质量软件产品：软件测试

- 坚持二进制一致的**测试标准**
- 不断开展应用测试
- 研发并使用各框架技术的**专用测试用例**
 - 提高测试效率
 - 提高测试的覆盖度
 - 加强压力测试
 - 确保没有越界错误

对集合同化XML配置文件的测试									
测试对象			错误类型						
			缺失	重复	错误	顺序			
1	同化实例XML配置文件	文件本身	1						
2		元素本身	1	1	1	1			
3		根元素<da_instance status>	属性名	1	1	1			
4			属性值	1		1			
5			元素本身	1	1	1	1		
6			status	1	1	1	1		
7			元素本身	1	1	1	1		
8			status	1	1	1	1		
9			status	1	1	1	1		
10			procedure_name	1	1	1	1		
63	processing_control	working_directory	属性名	status	1	1	1	1	
64			属性值	path	1	1	1	1	
65			属性值	status	1		1		
66				path	1		1		
67		config_scripts	元素本身	status	1	1	1	1	
68			属性名	status	1	1	1	1	
69				属性值	status	1		1	
70			pre_instance_script	元素本身	status	1	1	1	1
71				属性名	status	1	1	1	1
72					name	1	1	1	1
73				属性值	status	1		1	
74			name		1		1		
75			post_instance_script	元素本身	status	1	1	1	1
76				属性名	status	1	1	1	1
77					name	1	1	1	1
78	属性值	status		1		1			
79		name	1		1				
80	241				76	46	75	44	
81									

高质量软件产品：接口与代码质量

- 加强代码检查
- 加强代码运行错误检查
 - 错误检查超过2800处
- 尽量简化代码实现
- 采用统一代码风格
- 简化接口调用

```
INTEGER FUNCTION CCPL_ensemble_procedures_inst_init(set_comp_id, member_comp_id, inst_name, &  
field_inst_ids, grid_ids, decomp_ids, timers_id, control_vars, annotation)
```

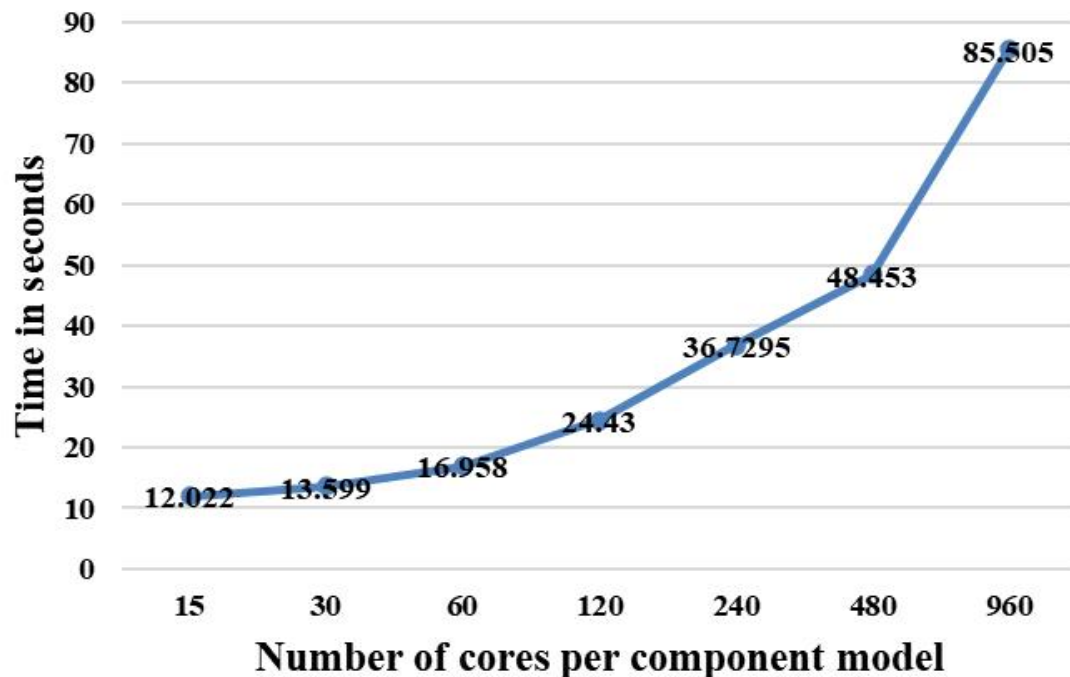
初始化接口



```
INTEGER FUNCTION CCPL_ensemble_procedures_inst_init(member_comp_id, inst_name, &  
field_inst_ids, control_vars, annotation)
```

- **高可扩展并行耦合技术**
- **通用并行框架**
- **通用集成框架**
- **通用I/O框架**
- **通用在线集合耦合同化框架**

C-Coupler2无法支持高分辨率耦合



启动开销快速增加：两个分量模式的水平网格点数仅为100万左右

内存用量高：当分辨率为全球5公里（2千万格点）时，一个进程存储一个水平网格的内存用量为超过1.6GB；

高可扩展并行耦合技术

- **网格并行三角化算法** (GMD, 2019; ZL201811400590.1)
- **并行通信路由生成** (GMD, 2020; ZL202010127096.3)
- **分布式水平网格管理** (ZL202110417353.1)
 - 基于分布式网格的并行插值权重生成
- 插值权重并行读入与写出

各并行优化技术不改变耦合器运行二进制结果

C-Coupler3成功支持超高分辨率耦合

当采用全球1.5公里（1.75亿水平格点；使用23000处理器核）与全球3.75公里（近3500万水平格点；使用近7600多核）耦合时，C-Coupler2用不到37秒时间完成模式耦合的并行启动、且内存用量不大；成功生成大小达15GB的插值权重文件

C-Coupler3明显降低启动开销

与国外最新耦合器对比

大气水平网 格点数(万)	大气 进程数	海洋水平网 格点数(万)	海洋 进程数	C-Coupler3 启动时间(秒)	OASIS3-MCT4.0 启动时间(秒)
3000	300	5000	300	23.70398	84.36566
3000	900	5000	900	16.02534	79.39579
3000	1200	5000	1200	12.84749	79.96576
3000	1600	5000	1600	15.08857	83.30277
3000	3200	5000	3200	10.80802	100.8317
3000	6000	5000	6000	9.911469	145.4961
3000	10000	5000	10000	11.35928	153.7385
3000	12000	5000	12000	14.16537	167.4978
3000	20000	5000	20000	45.37662	122.8683

启动明显快于国外最新耦合器，成功生成超大规模网格的插值权重文件，并确保并行一致性

- **高可扩展并行耦合技术**
- **通用并行框架**
- **通用集成框架**
- **通用I/O框架**
- **通用在线集合耦合同化框架**

通用并行框架的主要功能

- 通用性
 - 支持任意水平网格、任意并行剖分、任意影像区构造、数据任意维度及顺序
- 易用性
 - 自动建立进程间的通信映射、自动完成数据的打包拆包、自动完成通信过程、便捷易用的APIs
- 高效性
 - 支持并行通信、异步通信、多个变量同时通信
- 安全性
 - 为并行二进制一致性调试提供支持

相关工作



LFRic: PSy Code (Generated Fortran)

Written by PSyclone

Addition of code to support distributed memory parallelism:

```
...
IF (result_proxy%is_dirty(depth=1)) CALL result_proxy%halo_exchange(depth=1)
IF (rho_proxy%is_dirty(depth=1))    CALL rho_proxy%halo_exchange(depth=1)
IF (theta_proxy%is_dirty(depth=1))  CALL theta_proxy%halo_exchange(depth=1)
DO cell=1,mesh%get_last_halo_cell(1)
    map_w2 => result_proxy%funct_space%get_cell_dofmap(cell)
    map_w3 => rho_proxy%funct_space%get_cell_dofmap(cell)
    map_w0 => theta_proxy%funct_space%get_cell_dofmap(cell)

    CALL pressure_gradient_code( ... result_proxy%data, rho_proxy%data, theta_proxy%data, &
                                sizes, maps, basis functions for all function spaces )

END DO
CALL result_proxy%set_dirty()
...
```

(Atlas; Deconinck et al., 2017)

```
NodeColumns functionspace( mesh, Levels(100), Halo(1) );
Field field = functionspace.createField<double>( "name" );
functionspace.haloExchange( field );
```

Listing 3: C++ FunctionSpace example use

```
type(atlas_NodeColumns) :: functionspace
type(atlas_Field)       :: field
functionspace = atlas_NodeColumns( mesh, levels=100, halo=1 )
field         = functionspace%create_field( "name", atlas_real(8) )
call functionspace%halo_exchange( field )
```

Listing 4: Fortran FunctionSpace example use

- 通用性有限，仅支持规则的影像区结构
- 高效性有限，仅支持单个变量的影像区交换，无异步通信模式

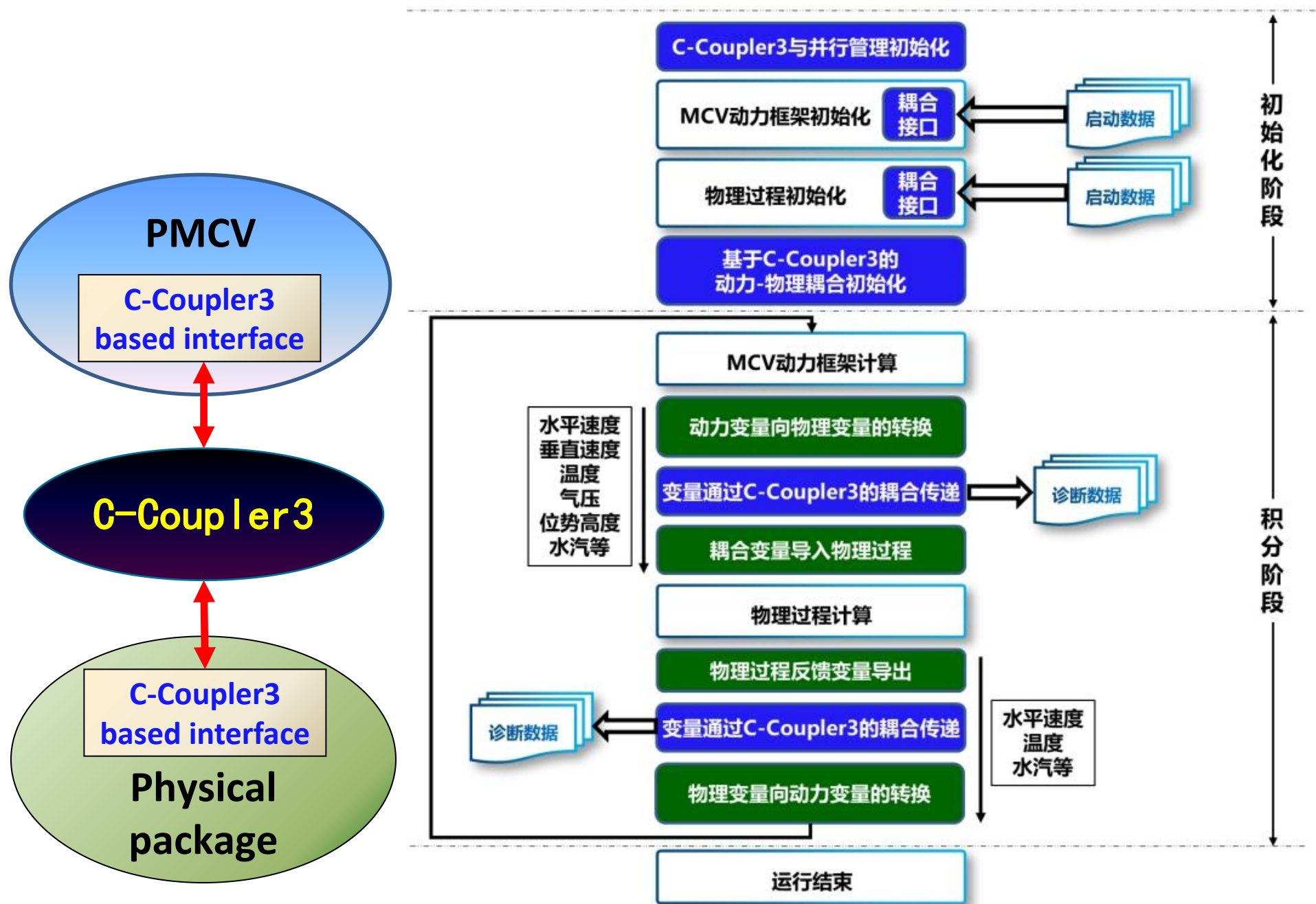
基于通用并行框架研制了MCV并行版本

全球0.5度、垂直61层

并行版本	总核数	节点数	进程数	线程数	运行时间(s)
原有MPI并行版本	192	6	192	-	8.45
新MPI+OpenMP并行版本	192	6	192	1	4.7395
			48	4	5.1264
			24	8	5.2744
	768	24	768	1	1.5120
			192	4	1.4449
			96	8	1.4544
	1536	48	384	4	0.7772
	3072	96	768	4	0.4795
	6144	192	1536	4	0.3656
	12288	384	1536	8	0.2229

为MCV发展建立了保障并行二进制一致的测试与工程化建设体系

- **高可扩展并行耦合技术**
- **通用并行框架**
- **通用集成框架**
- **通用I/O框架**
- **通用在线集合耦合同化框架**



- **高可扩展并行耦合技术**
- **通用并行框架**
- **通用集成框架**
- **通用I/O框架**
- **通用在线集合耦合同化框架**

通用I/O框架与XIOS的功能对比

通用I/O框架 应有功能	MESSy	XIOS	CIOFC
I/O过程加速	并行I/O	并行I/O与 异步I/O	并行I/O
通用输出时 序管理	不通用 ，仅有周期性 输出时序	不通用 ，仅有周期性 输出时序	通用 ：支持周期性、非周 期方式输出时序
时间序列数 据的灵活自 动输入	不通用 ，仅支持单时 次数据输入	不通用 ，仅支持单时 次数据输入	通用 ：支持读入时序的时 间（周期性、偏移）映射 和时间插值；可通过文件 名或时间变量（时间维度） 指定时次信息
通用多维插 值	支持多维插值，但不 支持动态三维插值	支持多维插值，但不 支持动态三维插值	可处理任意不规则网格间 插值， 支持动态三维网格 插值
灵活且用户 友好（灵活 配置文件接 口）	仅有对规则网格和周 期输出时序的配置接 口	缺少网格、时序等的 配置文件接口	与数据文件相关的信息通 过配置文件指定，输入/输 出操作信息通过接口指定

- **高可扩展并行耦合技术**
- **通用并行框架**
- **通用集成框架**
- **通用I/O框架**
- **通用在线集合耦合同化框架**

数据同化的重要意义及发展趋势

初值不确定性是数值天气预报模式中预报误差的最主要来源之一，**数据同化**在为数值预报模式提供更合理初值中**发挥关键作用**。

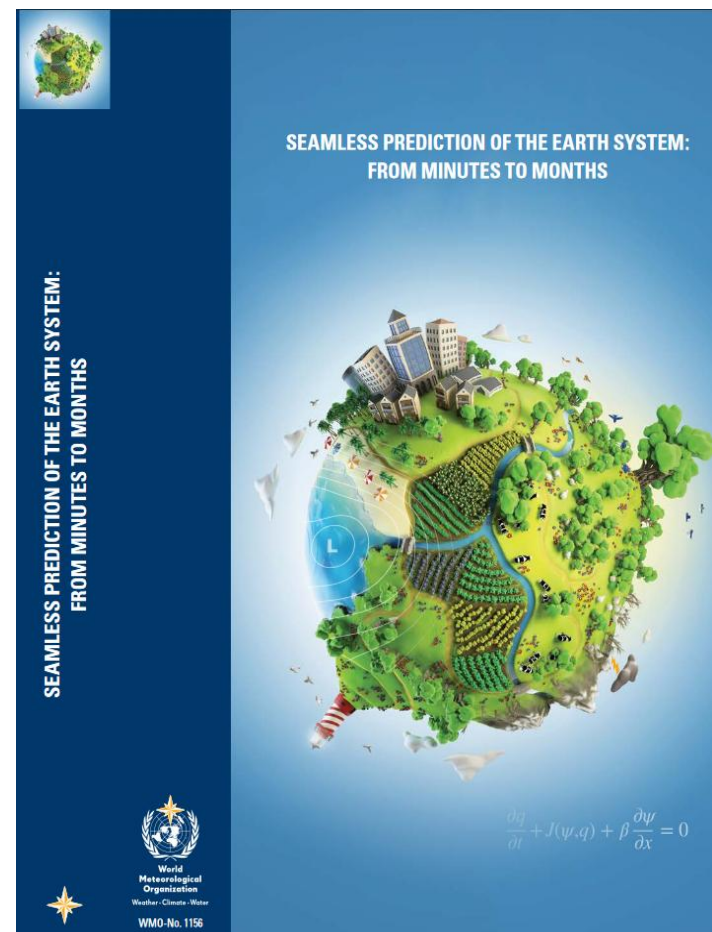
当前**四维变分**和**集合卡尔曼滤波**是较为先进的同化方法。

同化方法	主要优点	主要不足
四维变分	可以同化一段时间窗口内的观测资料，具有“隐式流依赖”特性	背景误差协方差保持不变；切线性和伴随模式研发难度大、不够通用
集合卡尔曼滤波	具有“显示流依赖”特性；易于实现；通用性强	有限集合数导致的不满秩问题；滤波发散和不平衡问题等
混合同化	能充分发挥两者优势，尽量避免两者缺陷，是未来数值预报中数据同化的发展趋势	

耦合同化是无缝隙数值预报的关键技术

- 实现**地球系统模式无缝隙预报**是当前数值预报的发展方向和挑战（如WMO 2015年的报告）
- **同化系统**必须朝着**支持耦合同化**的方向发展。
- 集合卡尔曼滤波或混合同化方法通常都需要**模式集合**的相关支持。

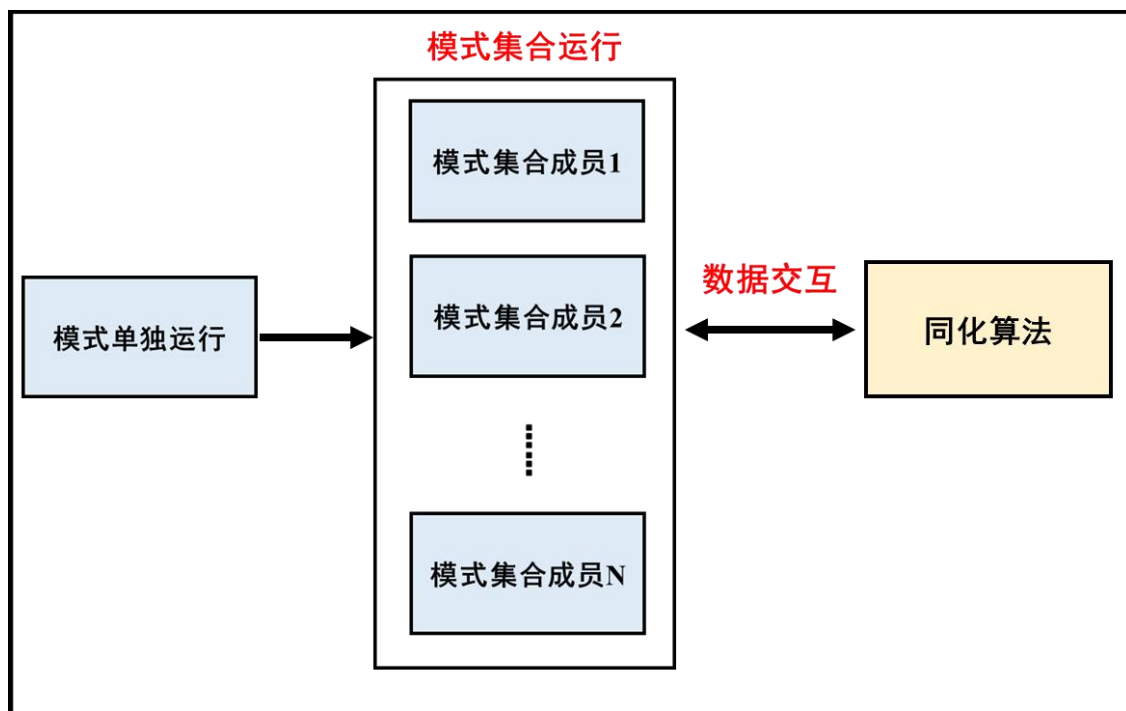
因此，亟需开展基于集合的耦合同化系统相关研究。



集合耦合同化系统构建的技术挑战

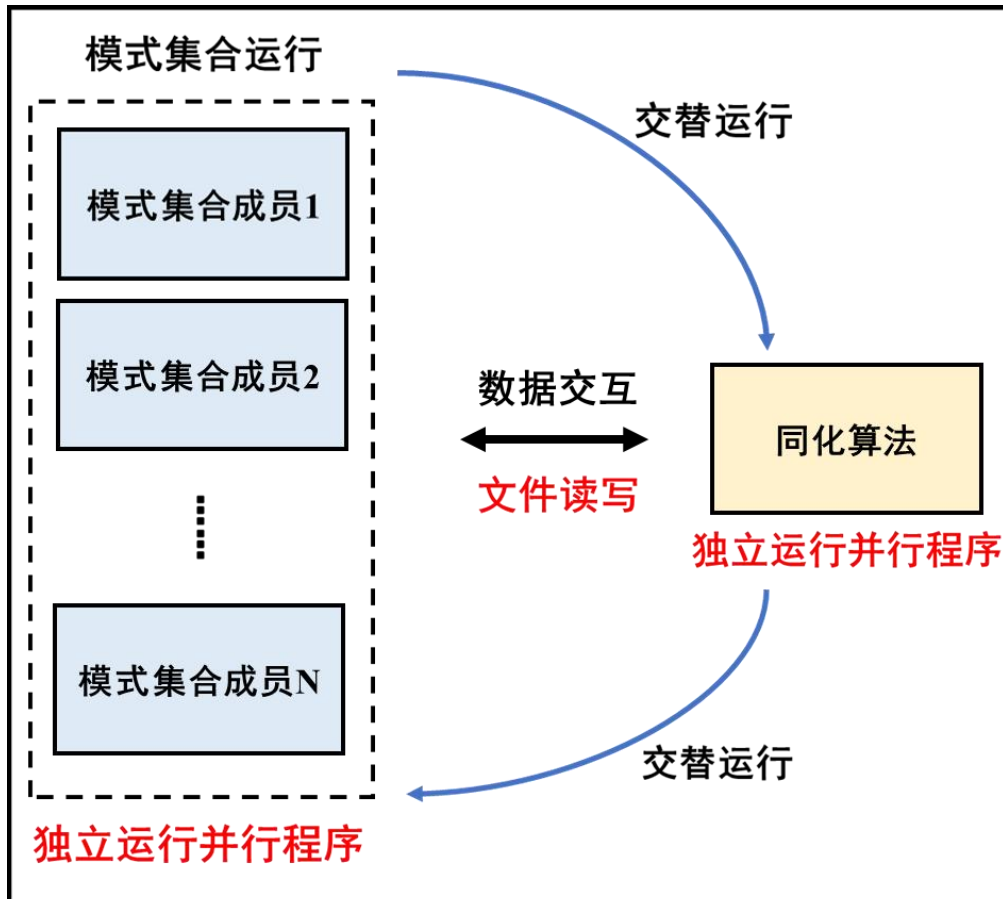
➤ 对于**集合耦合同化系统**的研究，除了在同化方法上面临的科学挑战外，在系统构建时也需要解决如下的**关键工程技术问题**：

- 如何便捷实现**模式集合运行**
- 如何便捷实现**模式集合和算法的集成**
- 如何便捷实现**模式集合和算法的高效数据交互**



模式与同化算法的集成

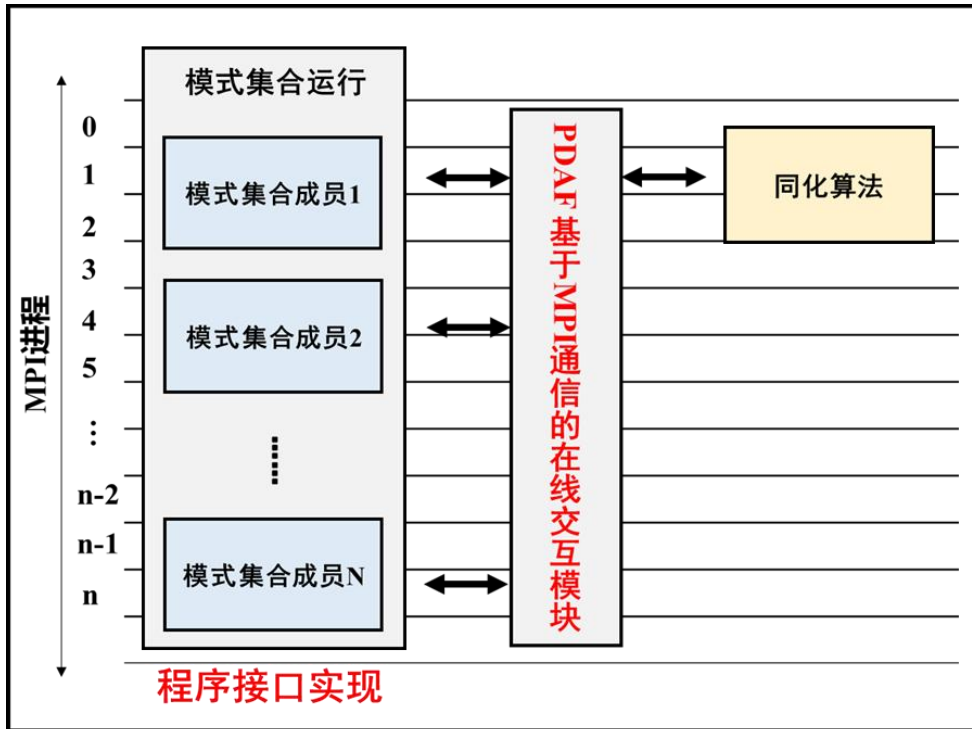
离线式交互集合同化系统



脚本控制实现

- 基于脚本串联，基于数据文件读写的实现方式被称为**离线式交互集合同化系统**。
- **实现容易**，保持模式和同化算法的**独立**，存在**计算效率低下**的明显缺点。
- **举例**：NCAR的DART平台、DTC的GSI/EnKF系统等。

PDAF在线集合同化框架

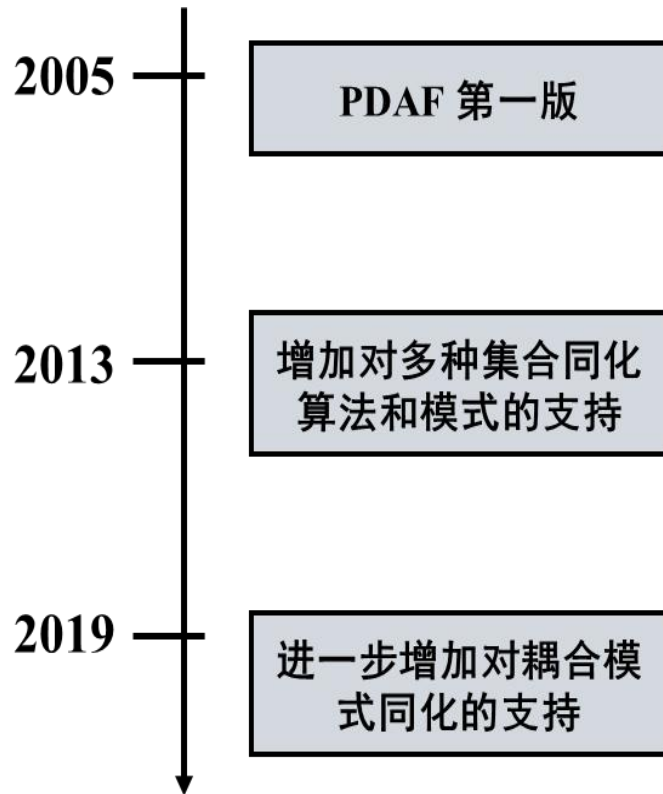


程序接口实现同一MPI任务运行

- 基于MPI通信的实现方式被称为**在线式交互集合同化系统**。
- **避免了**离线式交互中**数据文件读写**和**模式重启动**的问题，**效率更高**。

(Nerger et al., 2005; Nerger and Hiller, 2013; Nerger et al., 2019)

PDAF框架仍存在明显不足

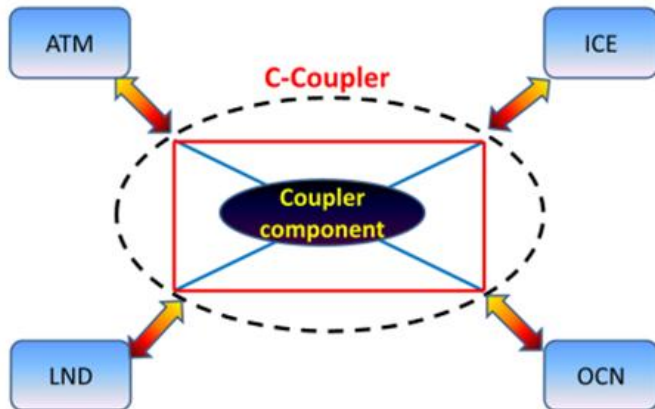


- 同化算法**内嵌于PDAF框架**，降低了同化算法与PDAF及模式之间的独立性；
- 同化算法默认使用**与模式相同的并行剖分**，默认使用**第一集合成员的进程**，明显限制了并行加速同化算法的空间；
- 提供了数据交互的**接口规范**，还**需用户**进一步**实现具体功能**；默认支持以外的配置需求，只能由**用户自行解决**多种技术挑战。

(Nerger et al., 2005; Nerger and Hiller, 2013; Nerger et al., 2019)

耦合器是解决集合耦合同化框架技术难题的新基础

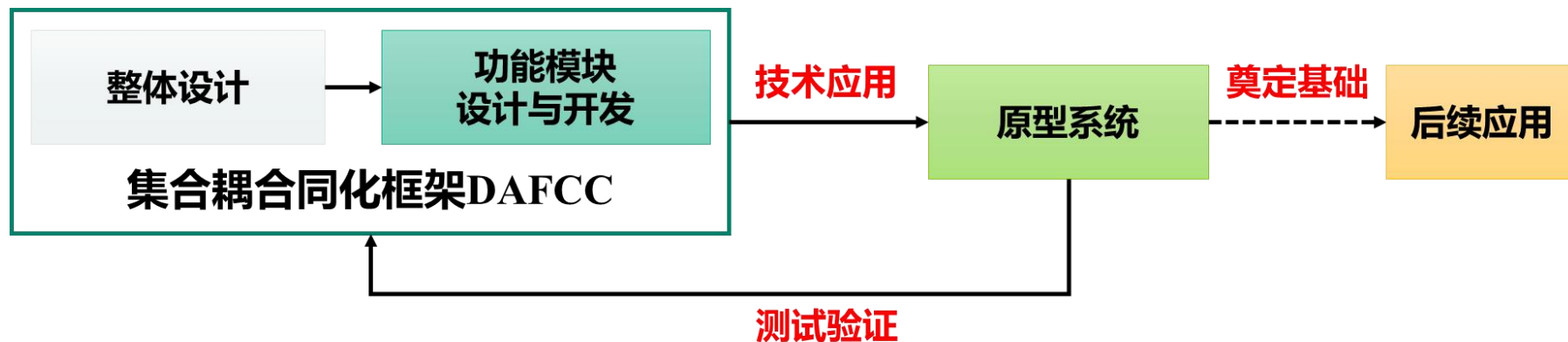
- 耦合器针对**模式集成**和**高效数据交互问题**已经提供了相对成熟的解决方案。



	美国CPL7	法国OASIS3-MCT_3.0	国产C-Coupler2
高效性	实现分量模式间的高效数据交换		
通用性和灵活性	CESM的专用耦合器, 通用性和灵活性较差	具有较为灵活的耦合配置接口和自动耦合生成功能	具有更加灵活、可读的耦合配置接口; 具有自动耦合生成、增量耦合、以及对同一分量模式内耦合的支持; 支持对外部算法的集成

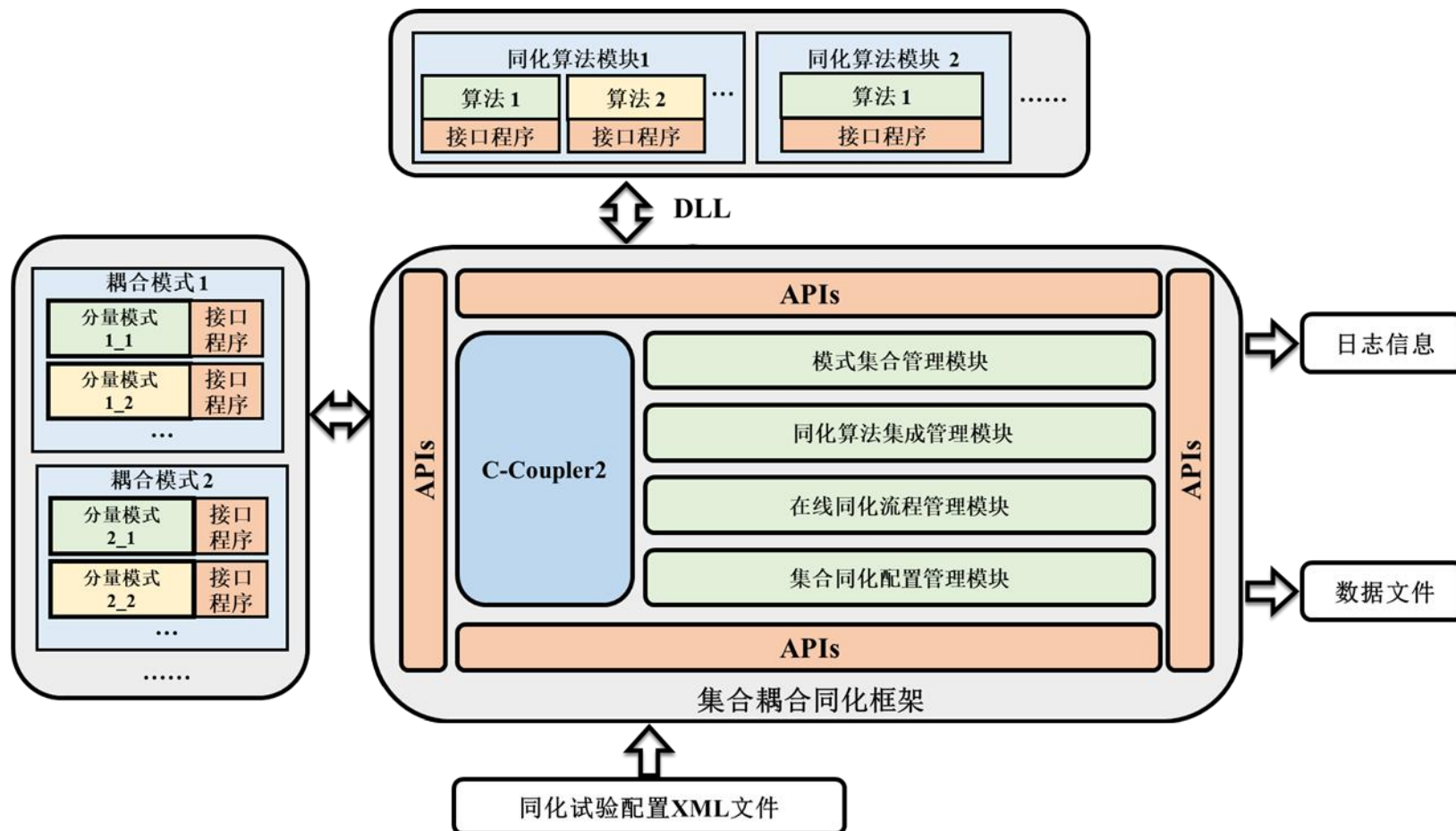
- **C-Coupler2灵活、通用的耦合功能**可以为解决集合耦合同化框架多种关键技术难题提供很好的支撑作用。

DAFCC整体思路



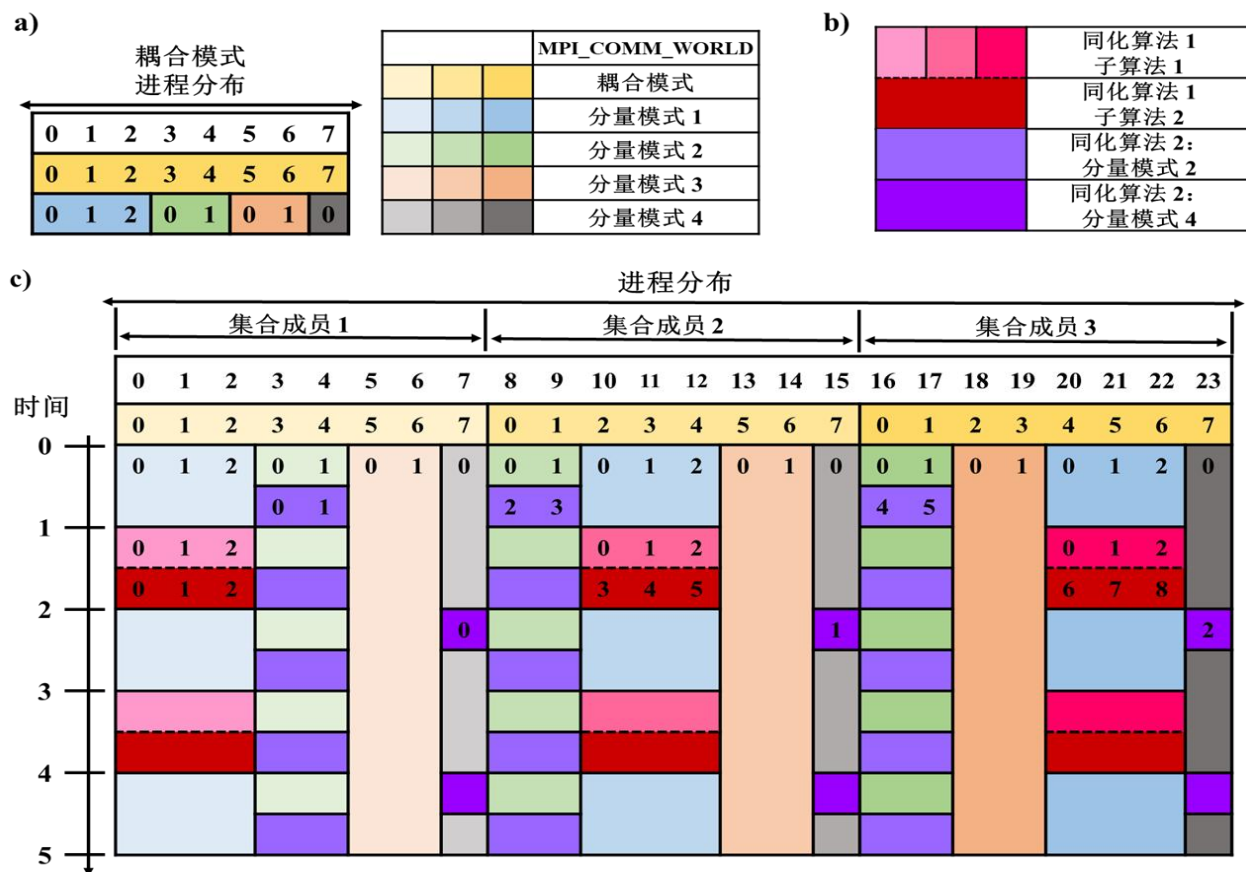
- 严格按照**软件工程**的设计思路，以确保新框架能**真正解决**集合耦合合同化系统的**技术瓶颈问题**。

DAFCC软件结构



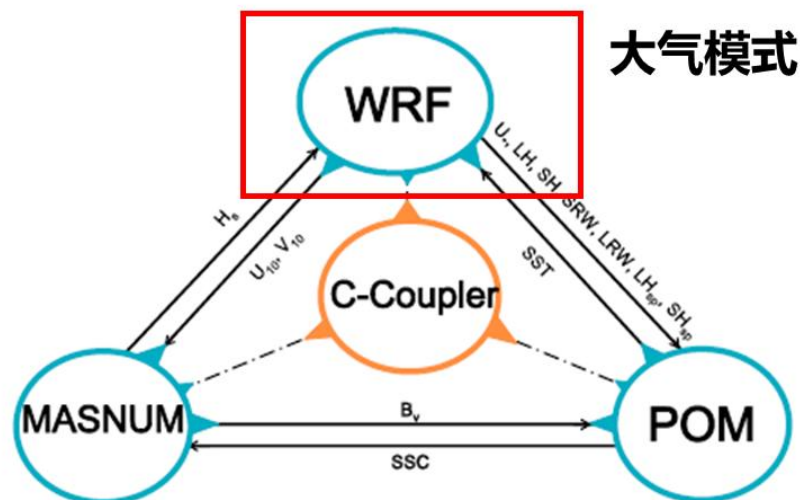
基于DAFCC的弱耦合同化样例

- 使用**动态链接库**实现算法集成
- 不同分量模式**可独立使用相同或不同的同化算法
- 同化算法**可以协同使用同一分量模式**所有集合成员**的所有或部分进程
- 无需用户开发数据交互功能



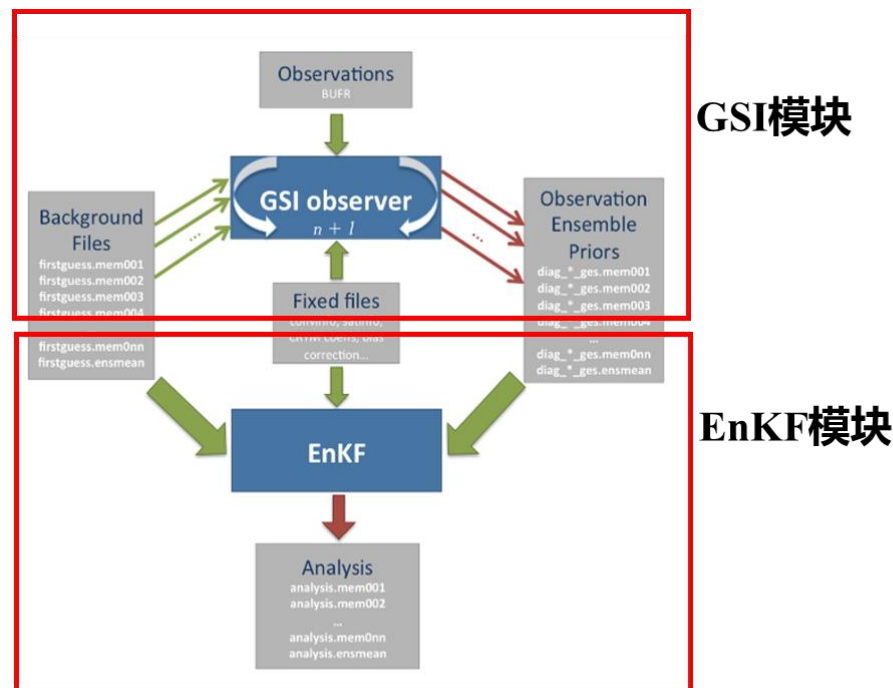
DAFCC系统性解决了当前集合耦合同化框架面临的多个关键问题

测试验证：耦合模式与集合同化算法



FIO-AOW

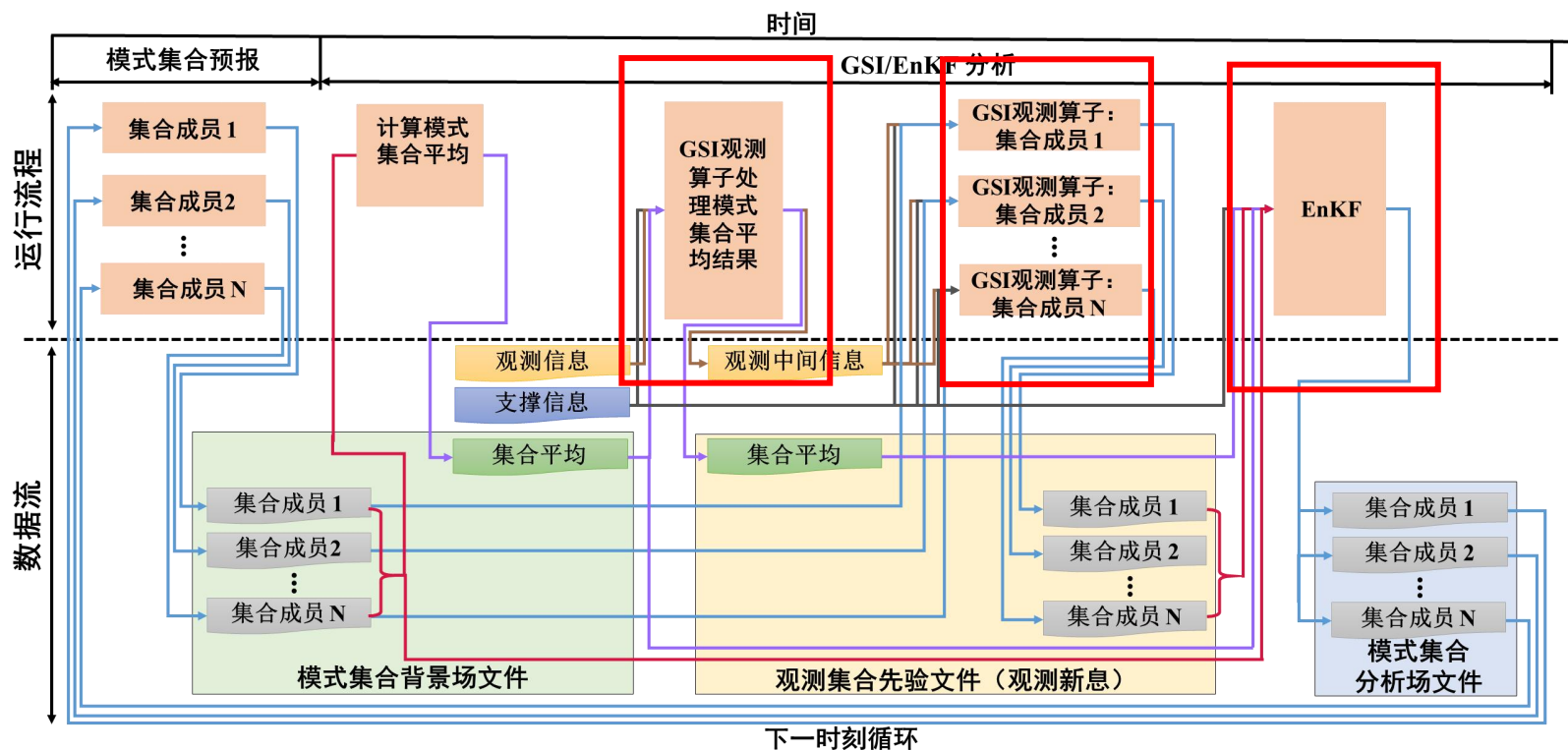
- 海洋一所研制的基于C-Coupler2实现的风浪流耦合模式。
- 海军第二代业务预报系统中的区域预报模式。
- 对于我国未来区域预报系统的升级有显著意义。



集合同化系统 GSI/EnKF

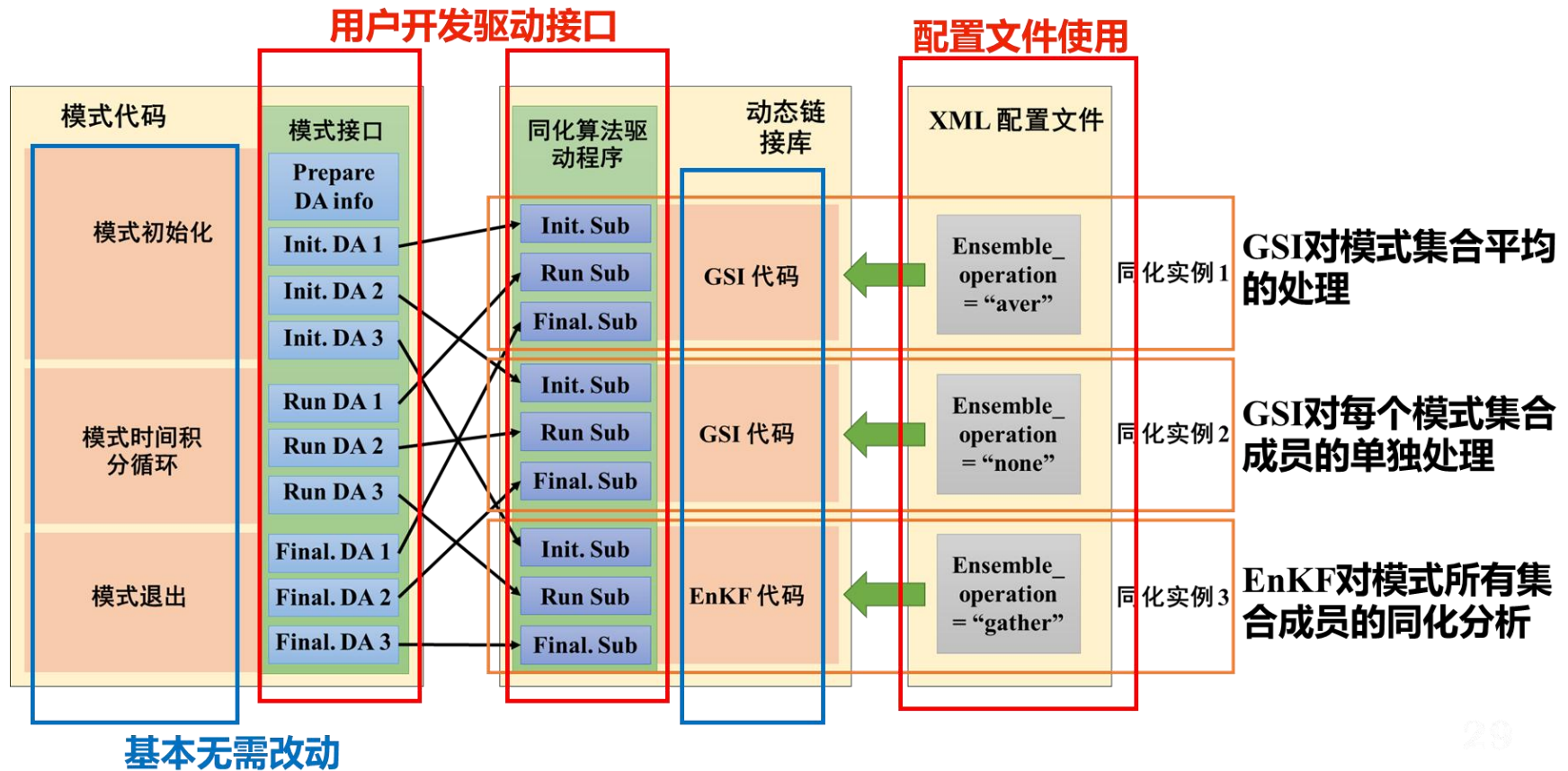
(Shao et al., 2016 ; Zhao et al., 2017; Liu et al., 2018a; Wang et al., 2018)

GSI/EnKF离线系统流程

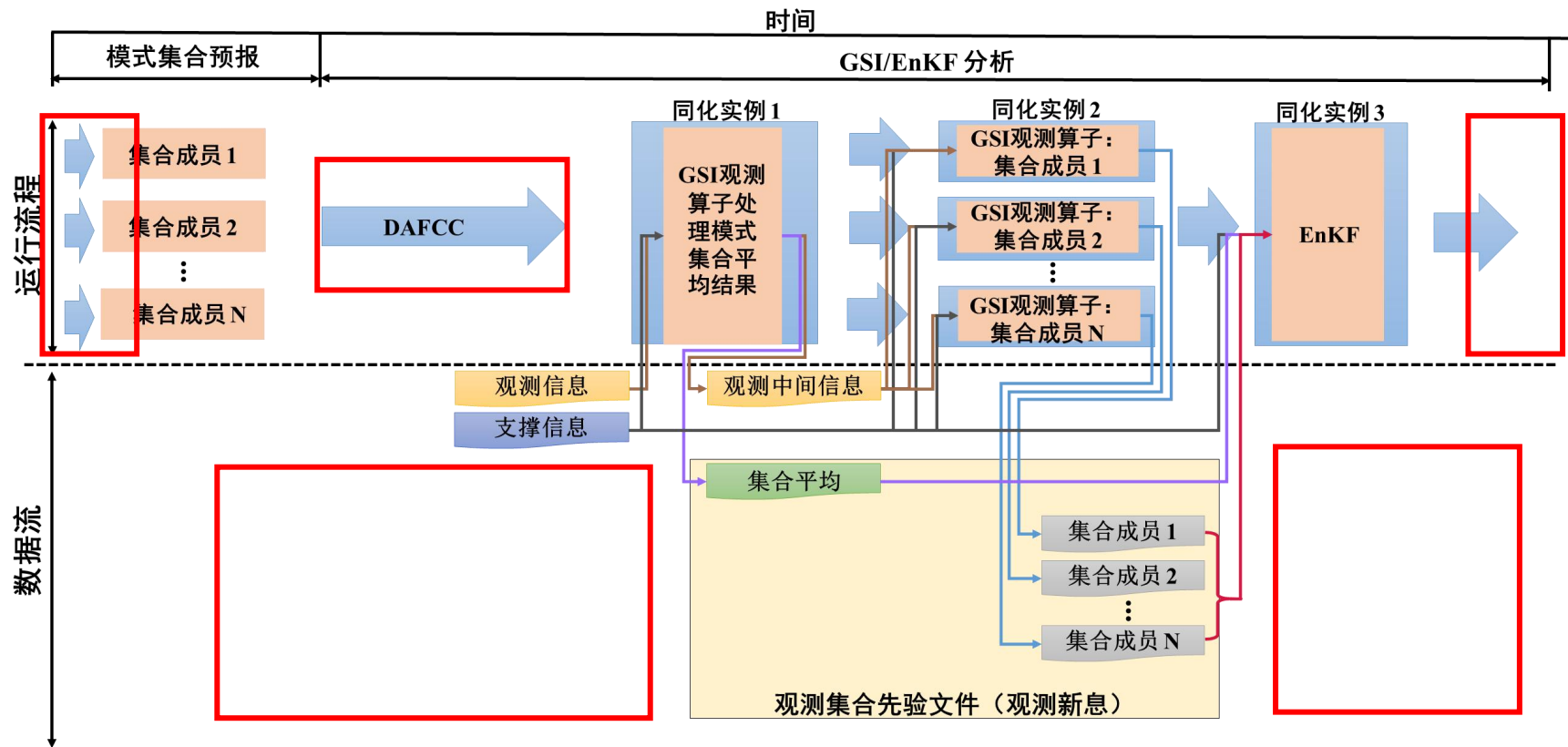


- 基于**文件读写**的**离线式交互**、存在模式和算法的**重启动**。
- 分析过程相对复杂，包含**三个**同化相关的**运行流程**：
 - GSI对模式集合平均的处理；
 - GSI对每个模式集合成员的单独处理；
 - EnKF对模式所有集合成员的同化分析。

GSI/EnKF基于新框架的集成

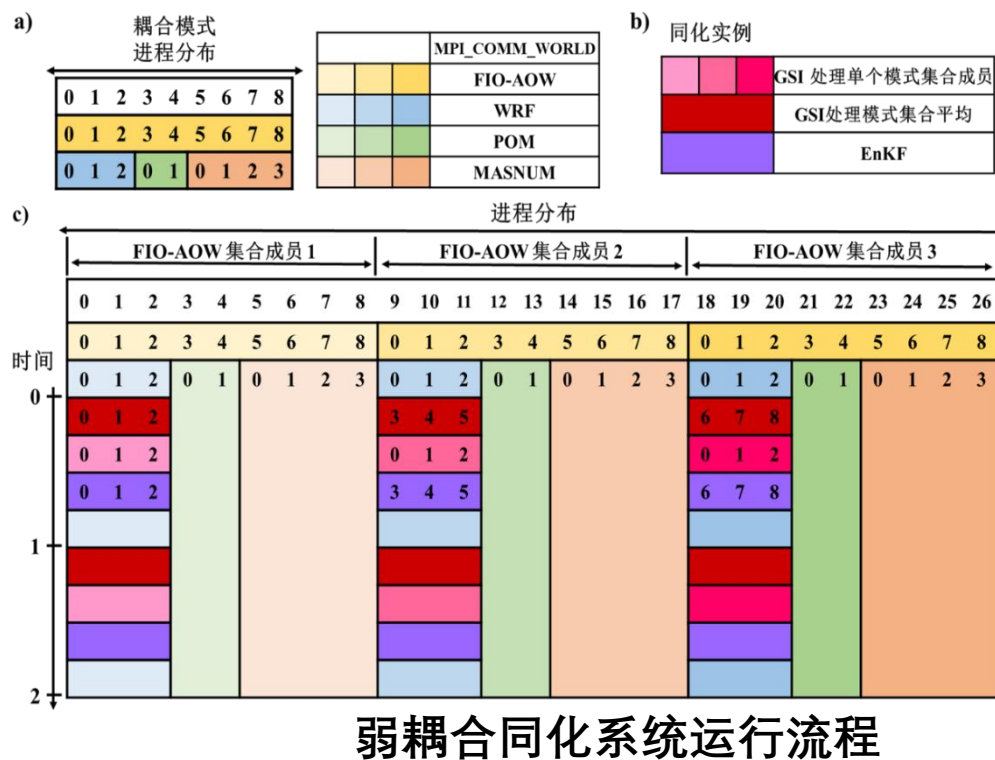
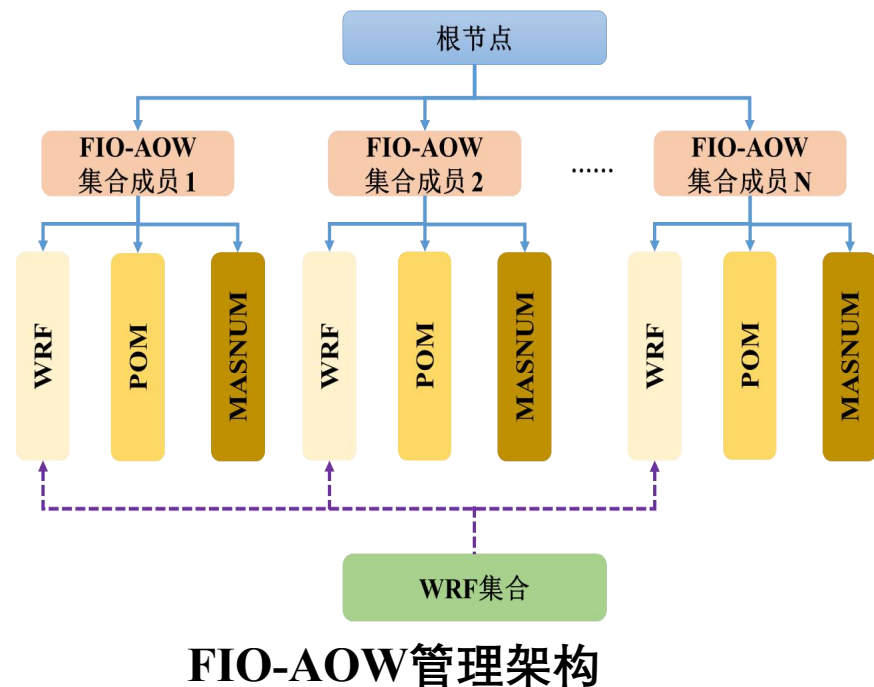


GSI/EnKF基于新框架的流程



- ✓ **避免了对模式集合文件的读写操作**
- ✓ **支持对模式集合数据的处理**
- ✓ **避免了对模式重启的过程**

FIO-AOW弱耦合同化系统构建



基于GSI/EnKF和WRF对新框架的测试



➤ WRF分辨率和相应时步设置

水平分辨率	水平网格数	积分时步
45KM	160×120	180s
30KM	240×180	120s
15KM	480×360	60s

- 同化的观测资料为NCEP 全球GDAS资料, 包括常规观测资料和卫星辐射资料。
- 同化的变量为温度 (T)、比湿 (QVAPOR)、风场 (UV) 。
- 2016年6月1日00时开始, 每6小时同化一次, 循环同化4次, 6月2日00时结束。

基于GSI/EnKF和WRF对新框架的测试

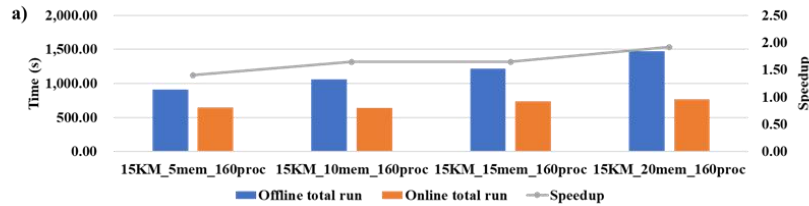
试验设置	水平分辨率	集合数目	每个集合成员进程数	试验编号
Set 1	15KM	5	160	15KM_5mem_160proc
		10		15KM_10mem_160proc
		15		15KM_15mem_160proc
		20		15KM_20mem_160proc
Set 2	15KM	10	40	15KM_10mem_40proc
			80	15KM_10mem_80proc
			160	15KM_10mem_160proc
			320	15KM_10mem_320proc
Set3	45KM	10	80	45KM_10mem_80proc
	30KM			30KM_10mem_80proc
	15KM			15KM_10mem_80proc
Set 4	45KM	10	40	45KM_10mem_40proc
	30KM		80	30KM_10mem_80proc
	15KM		320	15KM_10mem_320proc

➤ 对比了原始离线同化系统和基于新框架的在线同化系统的所有试验结果。

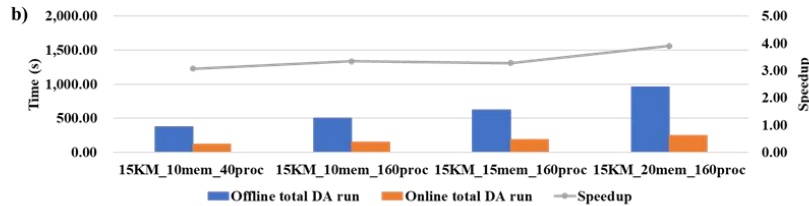
✓ 确保了基于新框架的在线系统与原始系统结果的二进制一致性。

DAFCC的加速效果

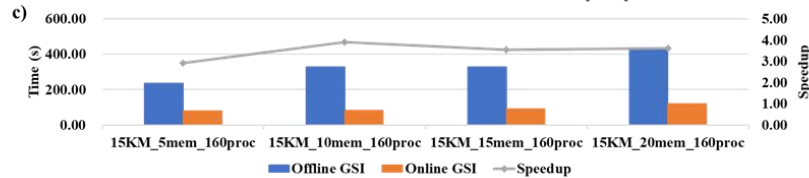
总时间



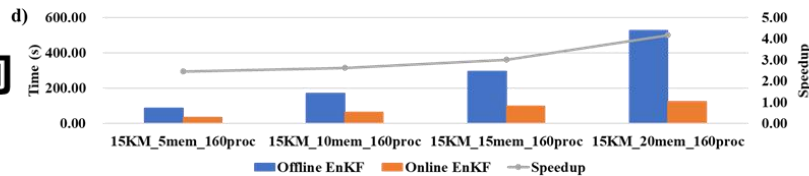
同化时间



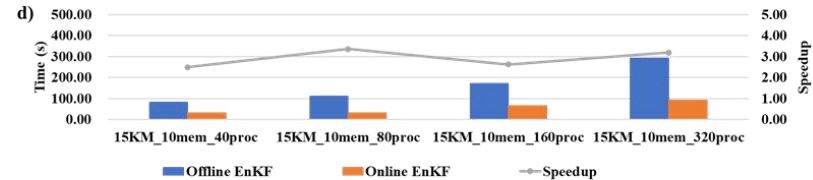
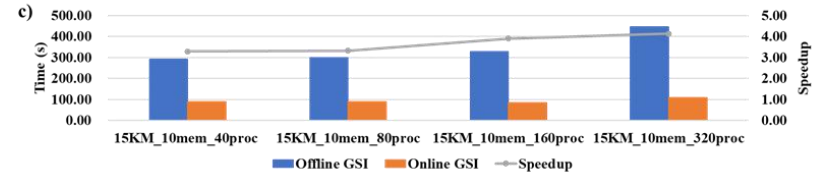
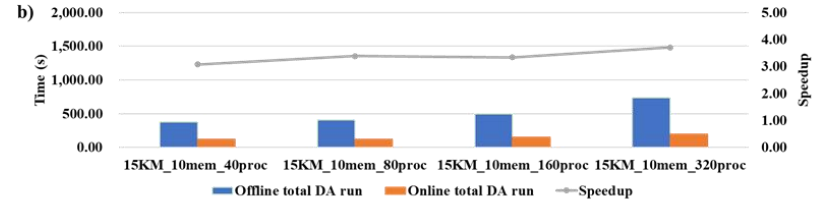
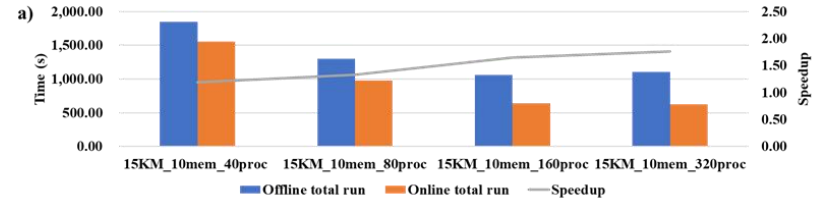
GSI时间



EnKF时间



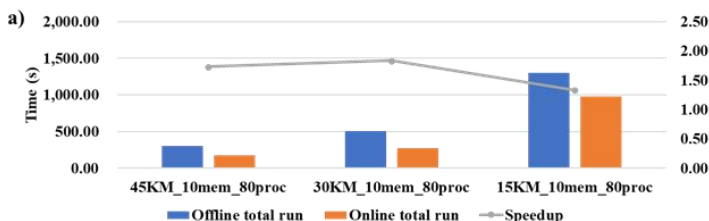
Set 1 集合成员数增加



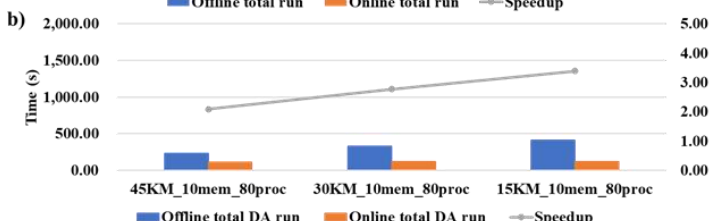
Set 2 进程数增加

DAFCC的加速效果

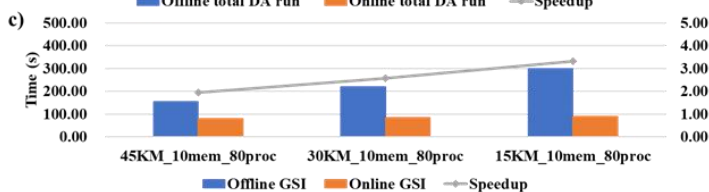
总时间



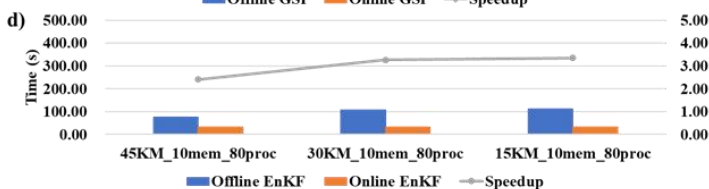
同化时间



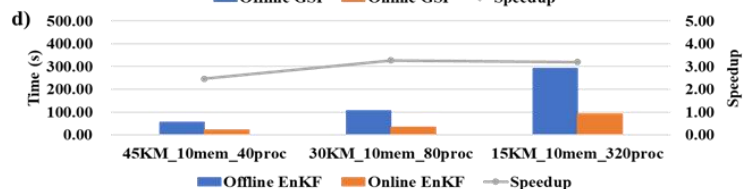
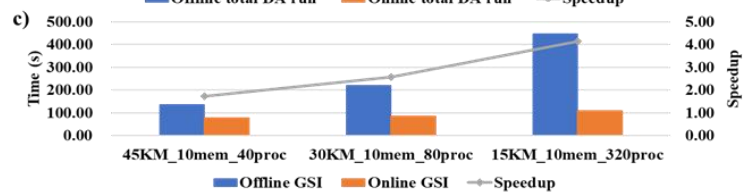
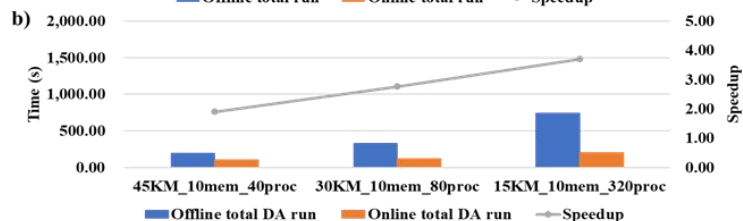
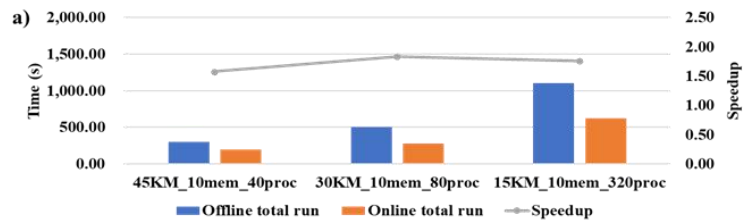
GSI时间



EnKF时间



Set 3 分辨率增加



Set 4 进程数和分辨率同时增加

相比原始离线系统，新框架明显提升了集合同化系统运行效率。

DAFCC的加速原因分析

➤ GSI/EnKF和WRF原始离线同化系统的文件读写统计

水平分辨率	集合成员数	对观测先验信息的文件读写次数	对观测先验信息的文件读写总量	对模式集合数据的文件读写总数	对模式集合数据的文件读写总量
15KM	5	12	0.11GB	324	129.13GB
15KM	10	22	0.21GB	624	251.30GB
15KM	15	32	0.30GB	924	373.48GB
15KM	20	42	0.39GB	1224	495.65GB
30KM	10	22	0.18GB	624	62.86GB
45KM	10	22	0.17GB	624	27.96GB

基于新框架的在线同化系统**大量减少了**原始离线系统对**模式文件数据的读写**，特别是在高分辨率、多模式集合成员的情况下。

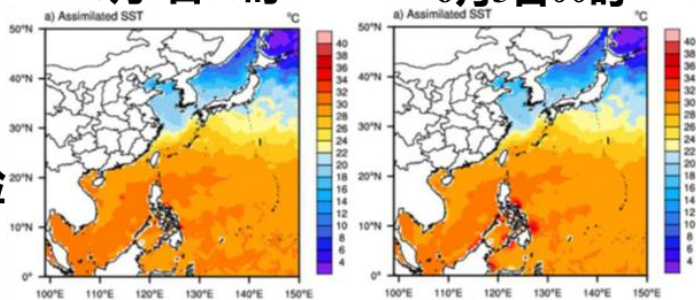
FIO-AOW弱耦合同化系统评估

海洋分量海表温度

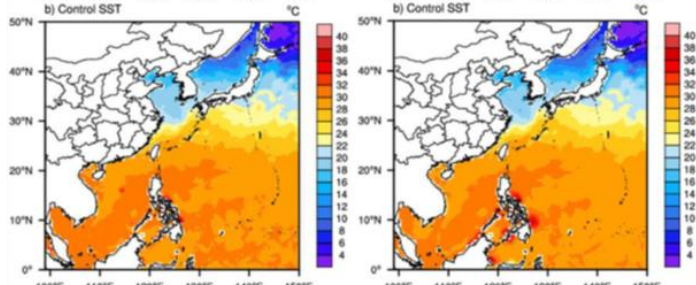
6月2日00时

6月3日00时

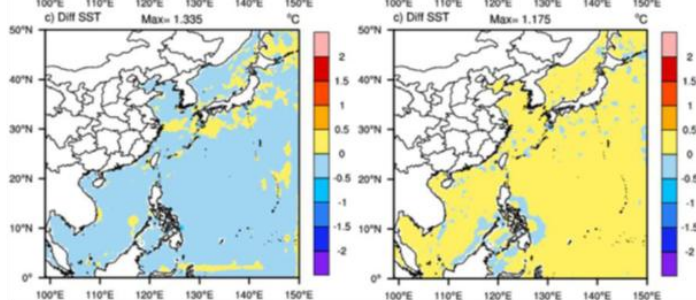
同化试验



参照试验



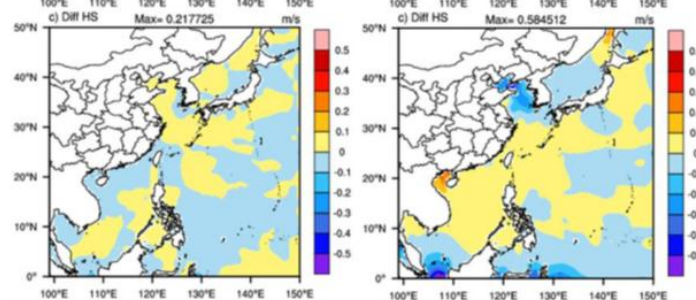
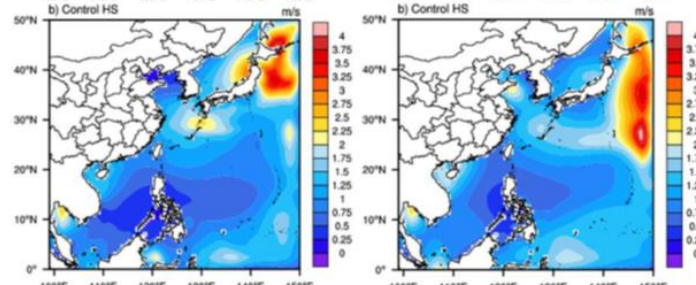
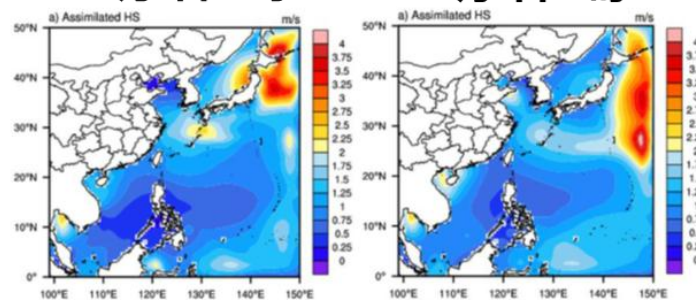
两者差值



海浪分量有效波高

6月2日00时

6月3日00时

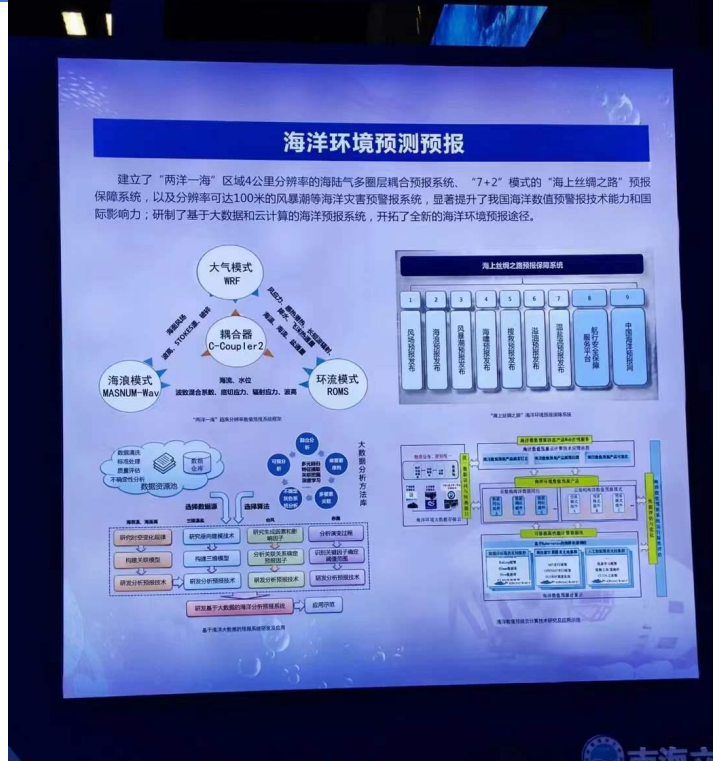
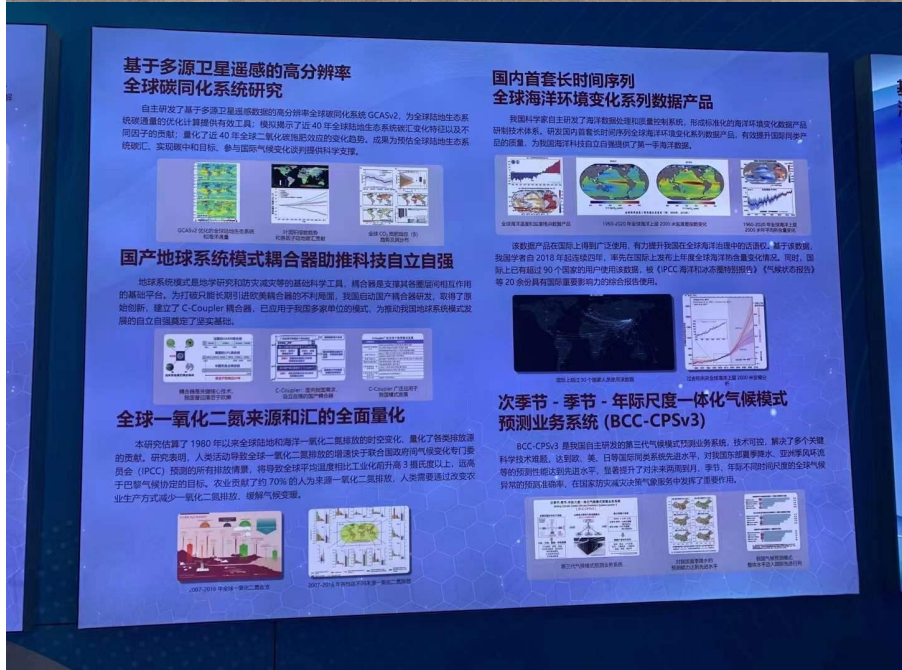


新框架对集合耦合同化系统的构建具有很好的支撑作用。

C-Coupler已稳定应用于我国模式

类别	单位	应用模式	目标
国家 业务 单位	国家海洋环境预 报中心	MPAS-WAVEWATCH3 全球风浪双向耦合系统	业务
		PolarWRF-MITgcm北极海气冰耦合系统	
		CFS-WAVEWATCH3全球大气-海洋-海浪耦合系统	
	国家气象中心	MCV大气动力框架的并行版本与动力物理模块化耦合	业务
	气象局地球系统 数值预报中心	GRAPES_TYM-LICOM区域海气耦合模式	
	国家气候中心	BCC-CSM气候系统模式并行耦合器升级与多大气模式实例	业务
国防 业务 单位	解放军91001部队	业务预报系统海气耦合模式	业务
	解放军93110部队	业务预报系统海气耦合模式	
科研 单位	自然资源部第一 海洋研究所	FIO-AOW区域海气耦合模式	科研
		区域大气-陆面-海洋多圈层耦合模式	科研
		GRAPES-FIOCOM全球海气耦合模式	业务
	中国科学院大气 物理研究所	CAS-FGOALS-g气候系统模式	科研
	中山大学	中山大学通用集成地球系统模式SYCIM	科研
	清华大学	CIESM气候系统模式	科研

国防科技大学、解放军某部队、天津大学



研究成果被推荐为有转化潜力的重点宣传推广对象，纳入基金委成果库

耦合器自主创新能力超越欧美

法国OASIS、美国MCT与CPL相关论文

Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT_3.0 (GMD, 2017)

A New Flexible Coupler for Earth System Modeling developed for CCSM4 and CESM1 (IJHPCA, 2012)

The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software (GMD, 2013)

Coupling technologies for Earth System Modelling (GMD, 2012)

OASIS4 – a coupling software for next generation Earth System Modelling (GMD, 2010)

C-Coupler相关论文

C-Coupler2: a flexible and user-friendly community coupler for model coupling and nesting (GMD, 2018)

C-Coupler1: a Chinese community coupler for Earth System Modeling (GMD, 2014)

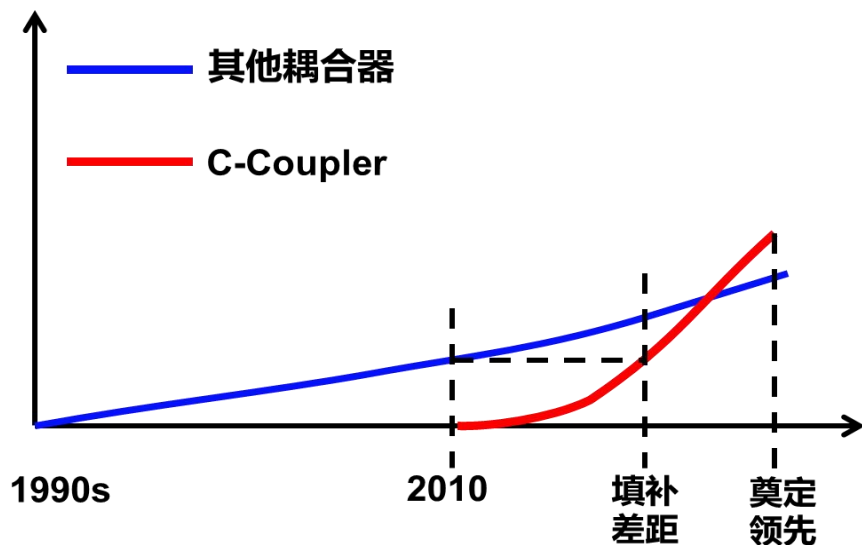
PatCC1: an efficient parallel triangulation algorithm for spherical and planar grids with commonality and parallel consistency (GMD, 2019)

A new adaptive data transfer library for model coupling (GMD, 2016)

Bitwise identical compiling setup: prospective for reproducibility and reliability of Earth system modeling (GMD, 2016)

DiRong1.0: a distributed implementation for improving routing network generation in model coupling (GMD, 2020)

Developing a common, flexible and efficient framework for weakly coupled ensemble data assimilation based on C-Coupler2.0 (GMD, 2021)



C-Coupler团队多次被邀请到国际耦合技术研讨会上做报告；刘利应邀担任了该研讨会组委会的唯一欧美以外委员

Atmosphere-Ocean Modeling

Coupling and Couplers

Carlos R Mechoso
Soon-Il An
Sophie Valcke

 World Scientific

buffer. On the target side, a standard blocking operation is implemented for receiving the coupling field, i.e., the call will not return before the data is effectively received. Specific tests have shown reasonable performance of YAC initialization phase and good scaling of the coupling communication involving the remapping.

YAC is available to the climate modeling community. In the next-generation of MPI-M ESM, YAC couples the ICON ocean and atmosphere components. DKRZ also aims to make YAC a part of the German national ESM strategy (NatESM). Some algorithms of the coupler, in particular the sophisticated conservative remapping algorithm are also reused within other software projects like the Climate Data Operators (CDOs, see <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>). Future plans include built-in support for the coupling of vector fields, support for changing land-sea masks at runtime, and possibly an OpenMP thread-level parallelization of the initialization phase.

8.2.7 C-Coupler2

The development of the Community Coupler (C-Coupler) family started in 2010 in China in order to provide extensive coupling functions to a strongly increasing number of model users. In a manner similar to OASIS3-MCT and YAC, C-Coupler2 works as a library which API routines are called in the component codes, without a driving layer. C-Coupler2 can exchange coupling fields between components running as separate executables or within one executable on non-overlapping, partially overlapping, or overlapping sets of processes. For the regridding, the C-Coupler2 can use weights read from an existing file or can generate the weights with its own parallel library, CoR1. This library supports 2D horizontal regridding, possibly combined with a time-evolving 1D vertical interpolation for grids with sigma or hybrid vertical coordinate (but without any parallel decomposition along the vertical dimension).

Coupling exchanges are determined through the combination of API calls in the codes and a set of XML-formatted configuration files. The API contains calls for expressing the horizontal grid parallel decomposition thanks to global grid cell indexes (as in OASIS3-MCT and MCT), for sending or receiving the coupling fields using MPI, and for explicit field regridding. In particular, the coupling procedure may perform some data type transformation, and apply time operations such as lag, interpolation or averaging, as chosen by the user.

The C-Coupler2 includes facilitations for model nesting supporting the coupling between multiple copies of the same executable, each one having its own input parameters and data and being registered as a separate component. It also supports incremental coupling in the sense that an existing multi-component application internally using any coupling software can be considered as one component and coupled to other components. Finally, C-Coupler2 guarantees

exact r
capabil

The
a series
institut
Marine
Institut
Univer

8.2.8

MOAF
Orient
packag
is dev
[E3SM
system

Th
hub-ar
genera
appro

M
only lo
The c
meshe
to effi
Temp
regrid
elemen

mesh.
the sc
elemen
regrid
meshe
face a
M
its su
therel

8.3

Altho
softw

C-Coupler学习资料

- 开源释放: <https://github.com/C-Coupler-Group/c-coupler-lib>
- 系列论文
- 用户手册与宣传册
- 培训教程

总结

耦合器是地球系统模式的核心部件。尽管我国耦合器的自主研发比欧美晚了近20年，但在我国自立自强战略支撑和应用需求的驱动下，坚守独立于欧美的自主发展道路，国产耦合器C-Coupler取得了系列自主创新，完成了三个版本的研制，使C-Coupler从成长为国际首个面向地球系统数值预报的一体化软件平台，使我国模式发展能够率先使用更为领先的基础技术支撑

致谢!