

模式研发支撑系统与智能模式发展

我的模式研发心路历程

黄小猛

清华大学地球系统科学系

2022年8月26日，北京

自我介绍

教育背景

- 2003~2007, 博士, 清华大学, 计算机科学与技术
- 2000~2003, 硕士, 华中科技大学, 水利水电工程
- 1996~2000, 学士, 武汉大学, 电子工程

工作经历

- 2022~至今, 清华大学地球系统科学系长聘教授
- 2016~2022, 国家超级计算无锡中心总工
- 2010~2018, 清华大学地球系统科学系助理教授、副教授、长聘副教授
- 2007~2010, 清华大学计算机系高性能所博士后、助理研究员

模式及高性能成果

- 研制了三维自动并行海洋模式算子库OpenArray, 实现算子的高效自动并行
- 发展了联合地球系统模式CIESM, 提交第六次国际耦合模式比较计划CMIP6计算结果
- 发展了广义算子海洋模式GOMO, 实现“两洋一海”范围30年5公里高分辨率稳定模拟
- 研制了高可扩展海洋环流模式正压求解器P-CSI, 被NCAR接受为CESM2.0默认求解器
- 研制了高效并行输入/输出库CFIO, 实现TB级模式的秒级异步并行处理
- 率先研制了完全基于GPU和神威平台的区域海洋模式POMgpu和swPOM
- 与海洋一所合作发展了千万核可扩展海浪模式MASNUM, 获2016年国际超算领域最高奖“戈登·贝尔”奖提名
- 发展了大气模式中的湿物理过程智能参数化方案ResCu, 性能优异



内 容 提 要

1 地球系统模式与超算

2 地球系统模式高性能计算支撑软件系统 (863)

3 超级模拟支撑与管理系统 (地球系统数值模拟装置)

4 智能模式发展 (NSFC)



内 容 提 要

1 地球系统模式与超算

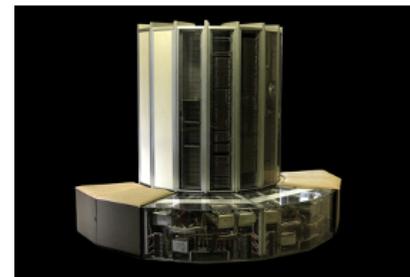
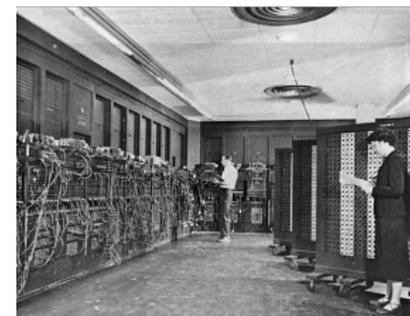
2 地球系统模式高性能计算支撑软件系统 (863)

3 超级模拟支撑与管理系统 (地球系统数值模拟装置)

4 智能模式发展 (NSFC)

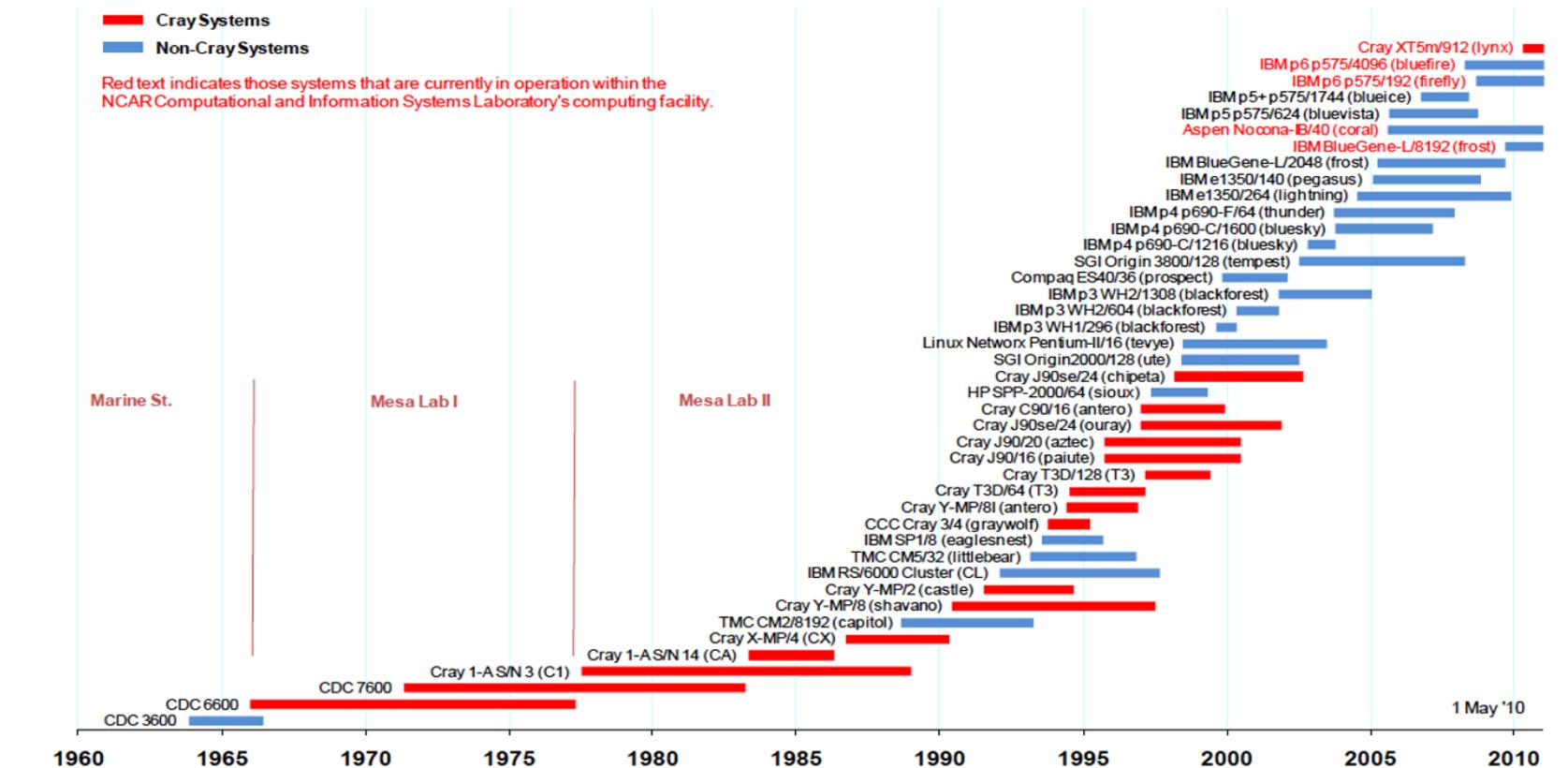
地球系统模拟与超算的发展历史

- 全球首台计算机ENIAC上的天气模拟
 - Von Neumann and Jule Charney实现了两层的大气动力模拟
 - 24 hrs in 24 hrs
- NCAR and CRAY-I
 - 第一台CRAY-I（史上最成功的超级计算机，80Mflops）就安装于NCAR
- 日本的地球模拟器
 - 连续4次世界第一
 - 3次Gordon Bell奖（大气、地震、地球动力学）



NCAR的超算历史

History of Supercomputing at NCAR



国家超级计算无锡中心

- 以863计划重大项目“十亿亿次国产高效能计算机系统”研制成果为基础构建的国家级超级计算中心
- 主机系统全面采用国产处理器和自主可控的软件生态链，具有运算高效和数据安全的行业优势
- 由清华大学与无锡市政府共同运维，并成立无锡恒鼎超级计算中心有限公司作为运营主体



国家超级计算无锡中心建设历程



建设单位	无锡江南计算技术研究所
应用单位	国家超级计算无锡中心
任务来源	国家863计划信息技术领域重大项目“高效能计算机及应用服务环境（二期）”
建设投资经费	科技部国拨6亿元，江苏省和无锡市各配套6亿元，共计18亿元
研制周期	2014-2016

神威太湖之光主要技术指标

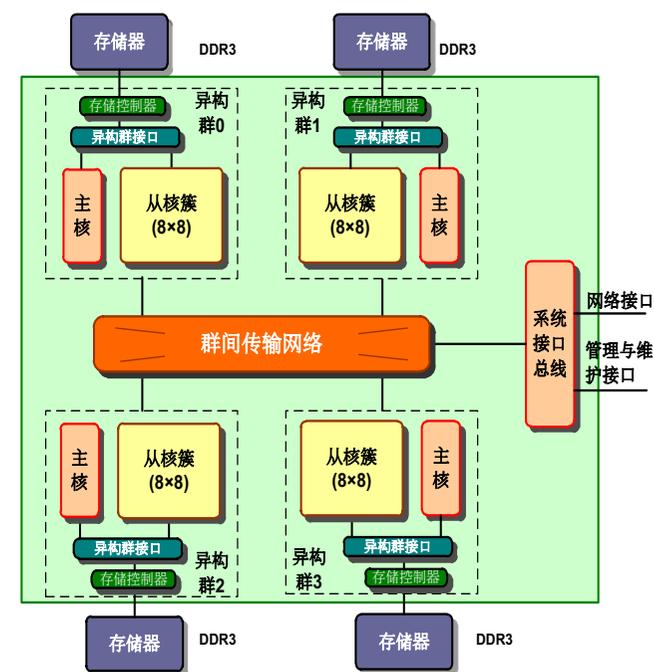
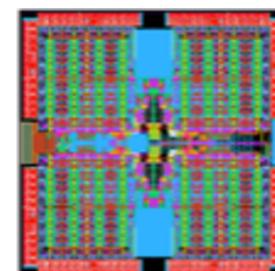


四次蝉联“全球最快的超级计算机”

- 系统峰值性能：**125.4 PFlops**
- 系统Linpack效率：**74.16%**
- 外存总容量：**20 PB**
- 系统绿色指标：**5.75 GFlops/W**
- 系统持续性能：**93 PFlops**
- 主存储器容量：**1.31 PB**
- LINPACK运行功耗：**15 MW**

亮点——申威26010众核处理器

- 自主设计的高性能异构众核处理器
 - 64位申威指令系统，支持256位向量扩展指令集
 - 核心数量：4个运算控制核心和256个运算核心
 - 峰值性能：**3.168TFlops**
- 芯片集成4个核组，每个核组包括：
 - 主核：提供管理服务和计算功能
 - 从核阵列：提供主体计算能力



Prof. Jack Dongarra



- 划时代的新机器
- 125P，千万核

Prof. Satoshi Matsuoka



- 全国产众核芯片,令人吃惊的巨大成就
- 系统级的优化设计,而非简单的性能堆砌

钱德沛教授

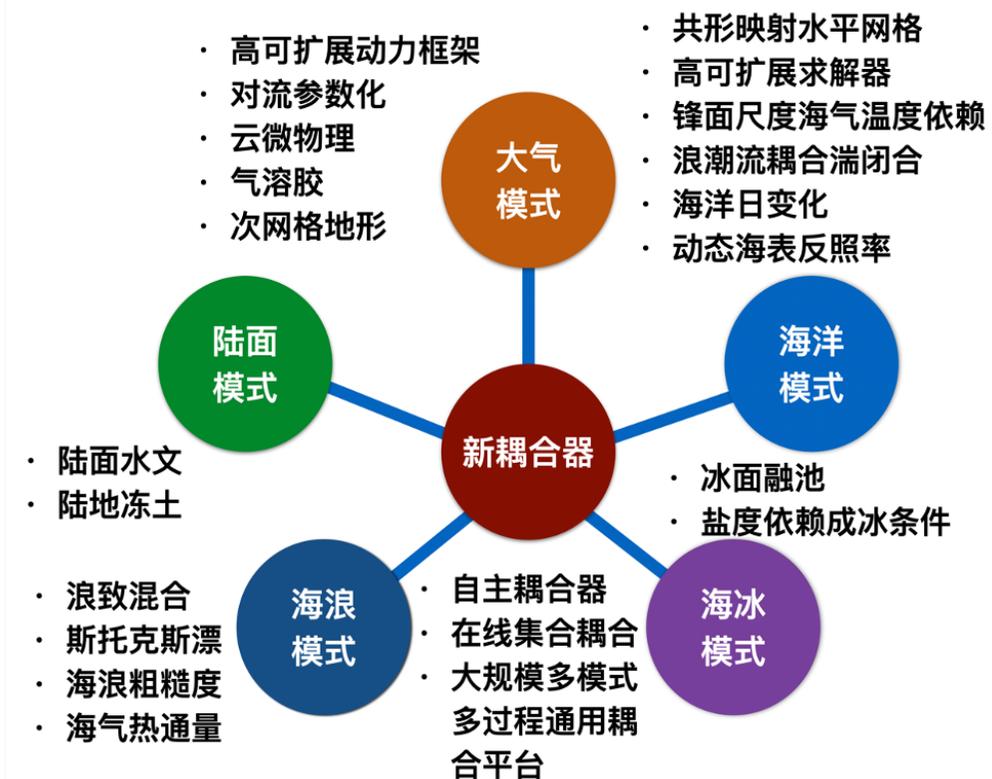


- 3个GB奖入围,里程碑式的事件
- 对芯片禁运事件的有力回答

联合地球系统模式CIESM

联合单位：

- 清华大学
- 北京师范大学
- 国家海洋局海洋一所
- 国家气候中心
- 中国气象局数值预报中心
- 国家气象信息中心
- 无锡江南计算技术研究所
- 国家超级计算无锡中心
- 南京大学
- 华东师范大学



JAMES | Journal of Advances in Modeling Earth Systems

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2019MS002036

Community Integrated Earth System Model (CIESM): Description and Evaluation

Key Points

- Community Integrated Earth System Model (CIESM) includes many new developments and modifications
- Preindustrial control and historical simulations were performed and evaluated
- Some persistent climate model biases are alleviated, but sea ice is significantly underestimated in the warm season

Supporting Information:

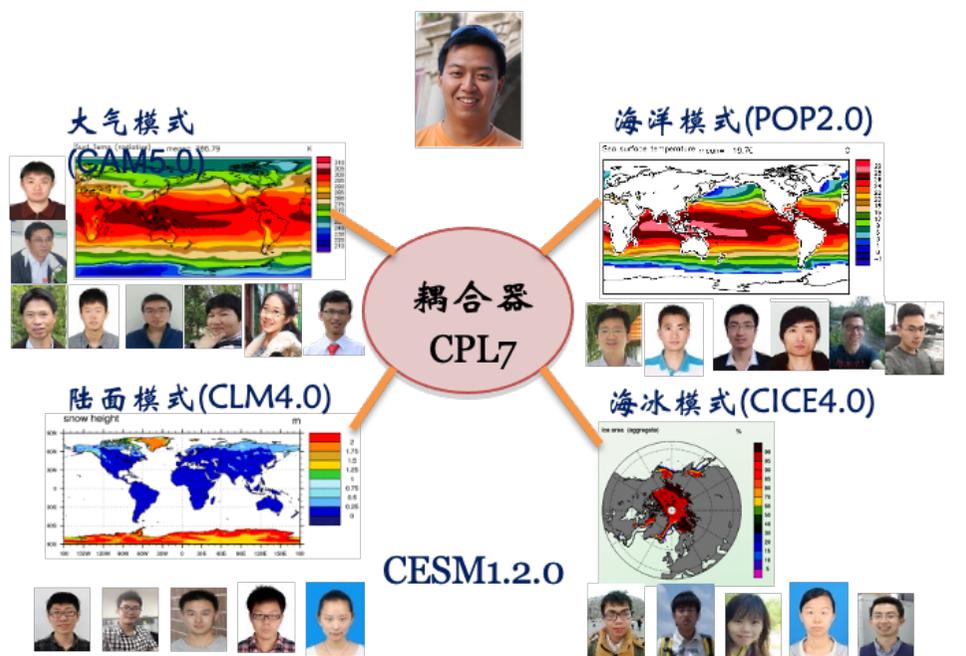
- Supporting Information S1

Correspondence to:
Y. Lin,
yulin@tsinghua.edu.cn

Yanhuan Lin¹, Xiaomeng Huang², Yishuang Liang², Yi Qin³, Shiming Xu⁴, Wenyu Huang⁵, Fanghua Xu⁶, Li Liu⁷, Yong Wang⁸, Yiran Peng⁹, Lanning Wang¹, Wei Xue¹, Haohuan Fu¹, Guang Jun Zhang¹, Bin Wang¹⁰, Ruizhe Li¹, Cheng Zhang¹, Hui Lu¹, Kun Yang¹, Yong Luo¹, Yuqi Bai¹, Zhenyn Song¹, Minqi Wang¹, Wenjie Zhao¹, Feng Zhang¹, Jingheng Xu¹, Xi Zhao¹, Chunsong Lu¹, Yizhao Chen¹, Yiqi Luo¹, Yong Hu¹, Qiang Tang¹, Dexun Chen¹, Guangwen Yang¹⁰, and Peng Gong¹

¹Department of Earth System Science/Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Tsinghua University, Beijing, China, ²College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing, China, ³Scipos Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA, ⁴Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, ⁵First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, China, ⁶Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai, China, ⁷Joint Innovation Center for Modern Forestry Studies, College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, ⁸Center for Ecosystem Science and Society, Department of Biological Sciences, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, USA, ⁹Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi, China, ¹⁰National Supercomputing Center in Wuxi, Wuxi, China

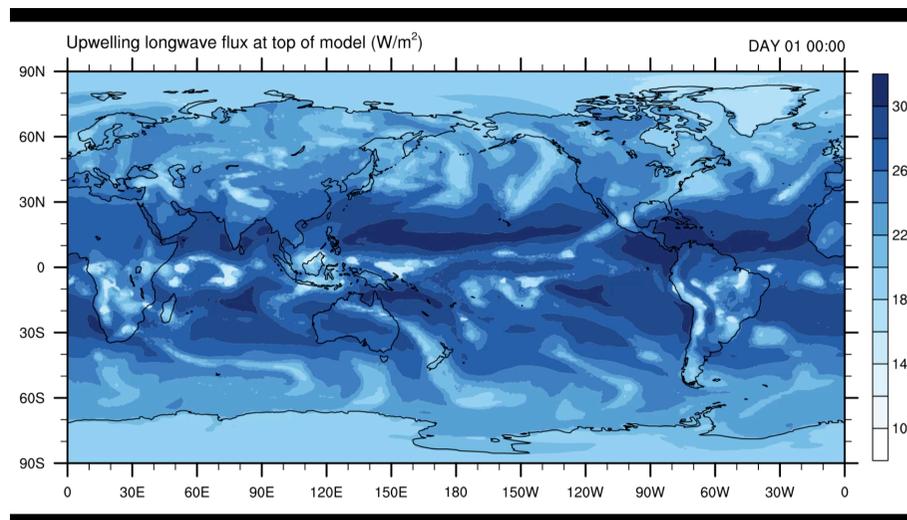
面向神威众核平台的模式移植



清华与北师大的20多位老师和学生组成的交叉研究团队

•2015年就成功完成了100多万行代码的移植工作，实现高分辨率模式在“太湖之光”的大规模运行

- 2.4万主核，百万从核
- 高分辨大气（0.25度）及海洋模拟（0.1度）
- 计算核心64从核可加速20至30倍
- 模拟速度达到2.81模式年/天





内 容 提 要

1 地球系统模式与超算

2 地球系统模式高性能计算支撑软件系统 (863)

3 超级模拟支撑与管理系统 (地球系统数值模拟装置)

4 智能模式发展 (NSFC)

863项目——面向地球系统模式研究的高性能计算支撑软件系统

“三库一平台”

- 针对我国地球系统模式研究的迫切需要，依托国产高性能计算机，研究支持地球系统模式开发的高性能计算支撑软件关键技术，研制基于“模式模块库、模板库、工具库和插件式平台”（三库一平台）架构的一体化地球系统模式集成开发环境，支持全球变化研究，填补我国在地球系统模式软件支撑平台方面的空白；为建立我国地球系统模式公共平台提供技术支撑，使我国地球系统模式研究支撑软件技术达到世界先进水平；培养一支具有国际水平的高性能地球系统模式计算研究队伍。

总体原则

- 致力于减轻地球科学研究者的软件开发负担与高性能计算机的使用难度，提高效率，使他们腾出精力专注于模式研究

地球系统模式研发面临的主要技术问题

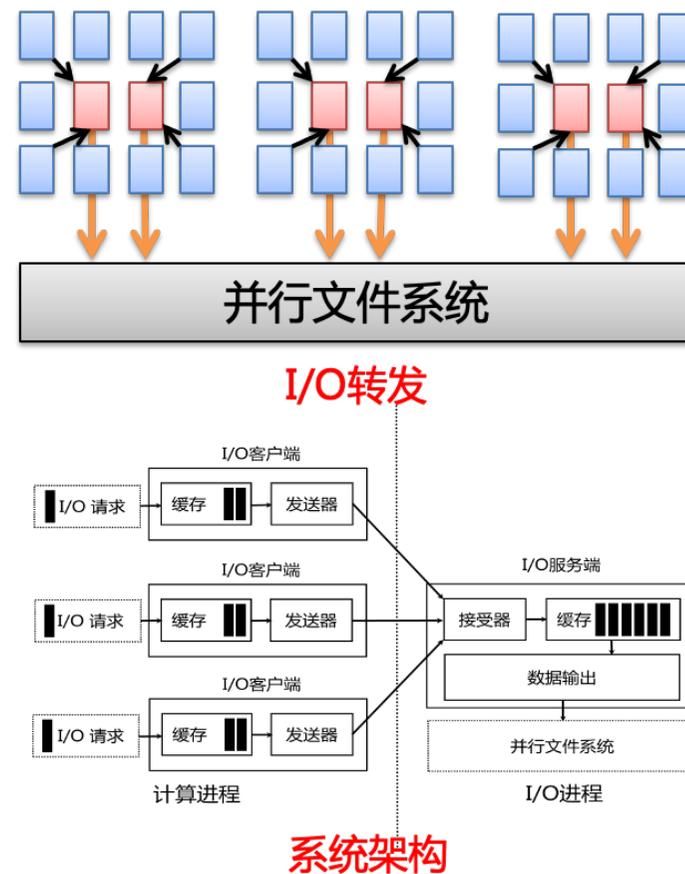
- 基础数据对地球系统模式研究支撑不足
- 地球系统模式海量数据并行可视化关键技术有待突破
- 适合地球系统模式程序特点的调试、分析与高可用技
- 缺乏高性能计算环境下支持地球系统模式开发的集成平台术研究相对滞后



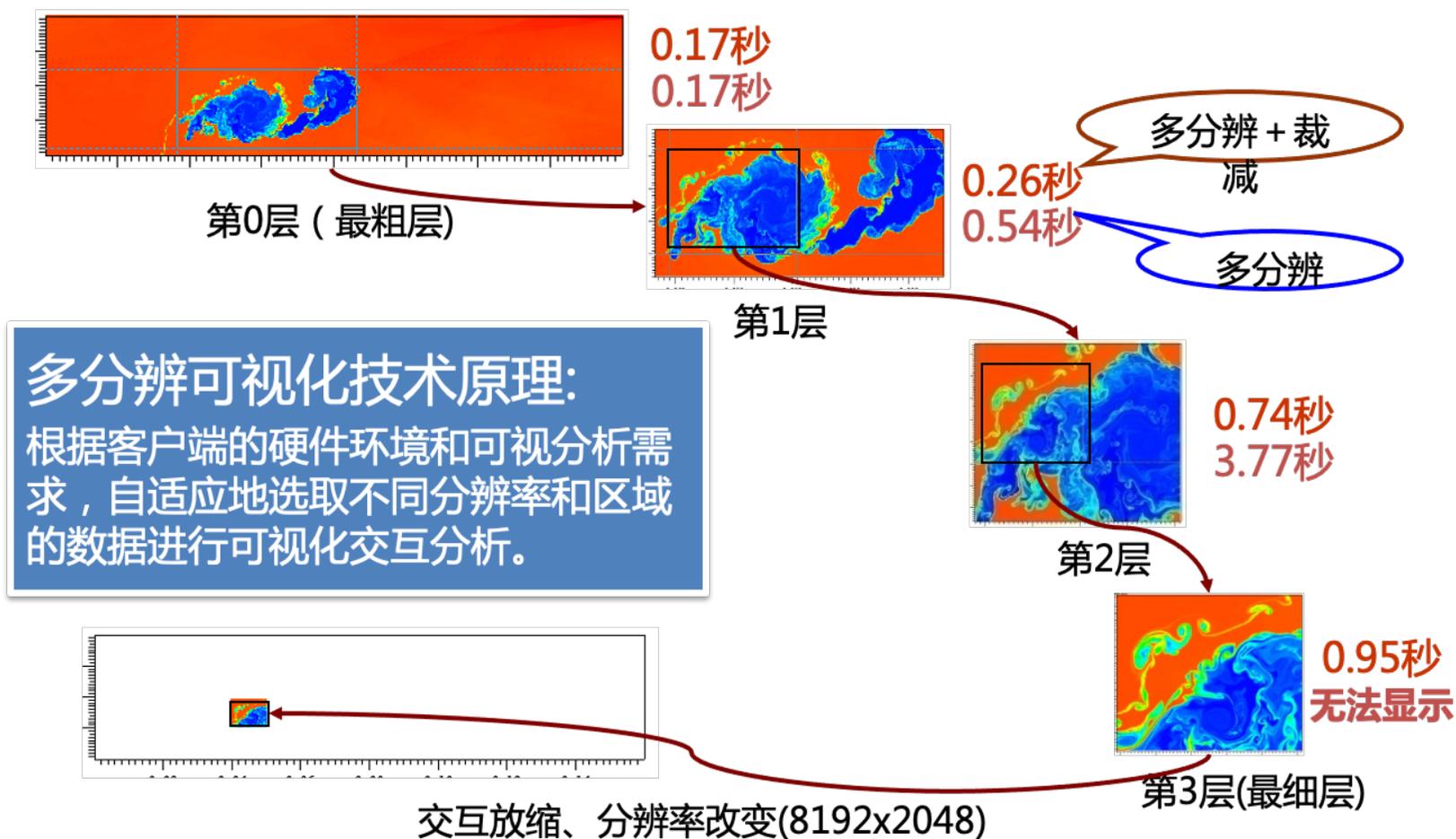


主要成果1： 高速I/O库

- 问题：
 - 高分辨率地球系统模式海量的输出数据使得I/O成为模式计算的瓶颈
- 方法：
 - 通过I/O转发实现计算和I/O的重叠
 - 符合NetCDF文件接口
- 结果：
 - 应用于POP、CICE模式中I/O性能提升了2~8倍

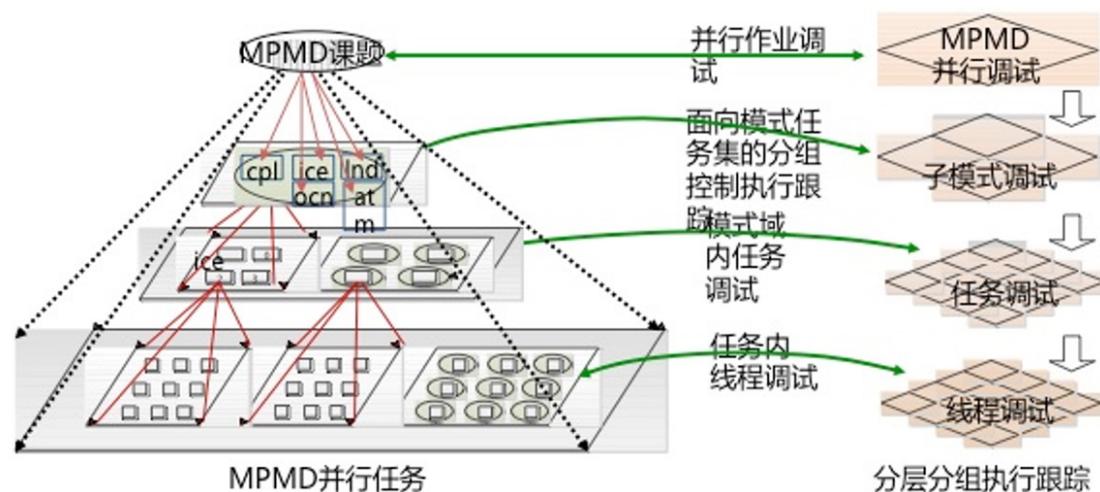


主要成果2: TB量级数据多分辨率抽取



主要成果3：MPMD耦合模式多层次跟踪技术

- 基于模式任务集的多层次分组监控，解决按需局部调试控制难题
- 全程跟踪与动态监控相结合的方法，灵活掌握调试时机，快速定位错误
- 多任务输出的聚类分析技术，适合大规模可扩展调试



面向MPMD模式、任务、线程等多种粒度的并行调试

主要成果4：集成开发界面与代码自动生成





内 容 提 要

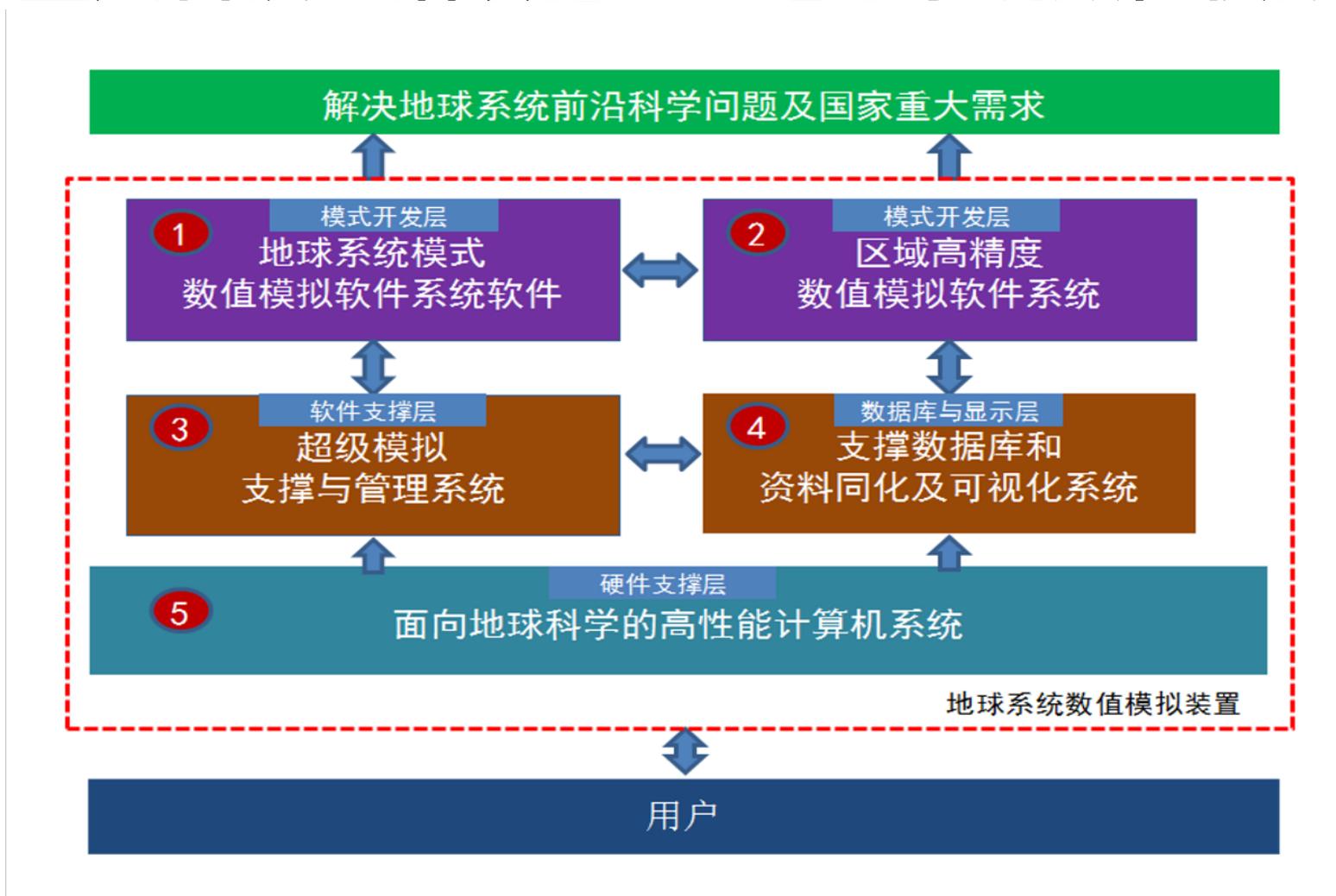
1 ↓ 地球系统模式与超算

2 ↓ 地球系统模式高性能计算支撑软件系统 (863)

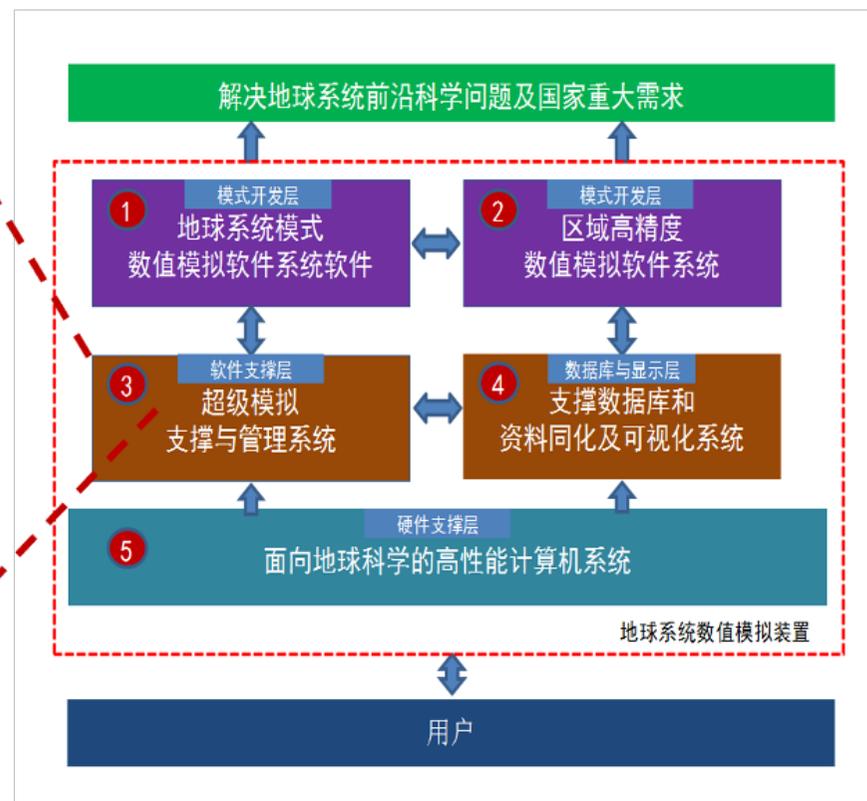
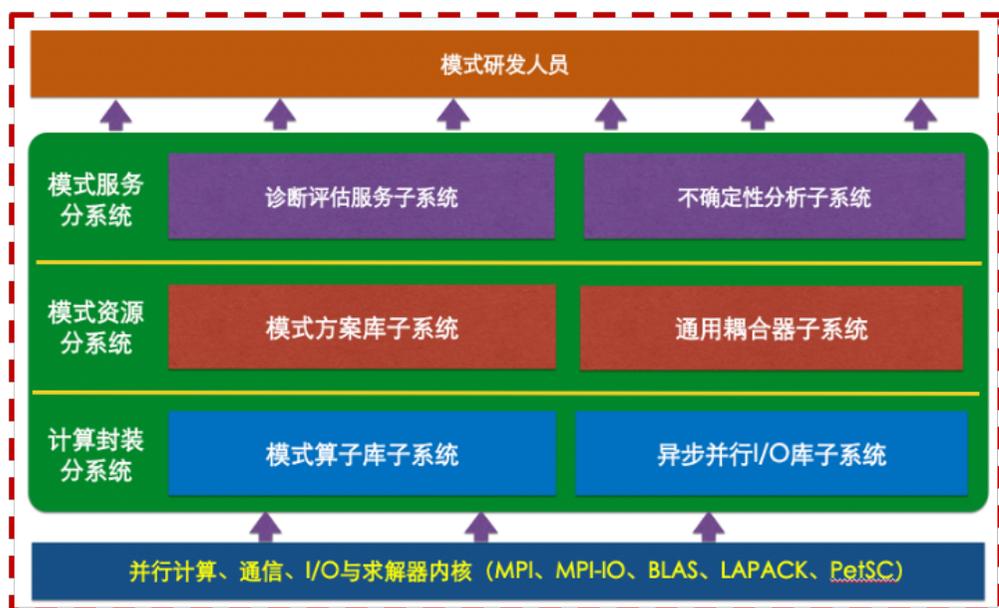
3 ↓ 超级模拟支撑与管理系统 (地球系统数值模拟装置)

4 ↓ 智能模式发展 (NSFC)

国家重大科技基础设施——地球系统数值模拟装置



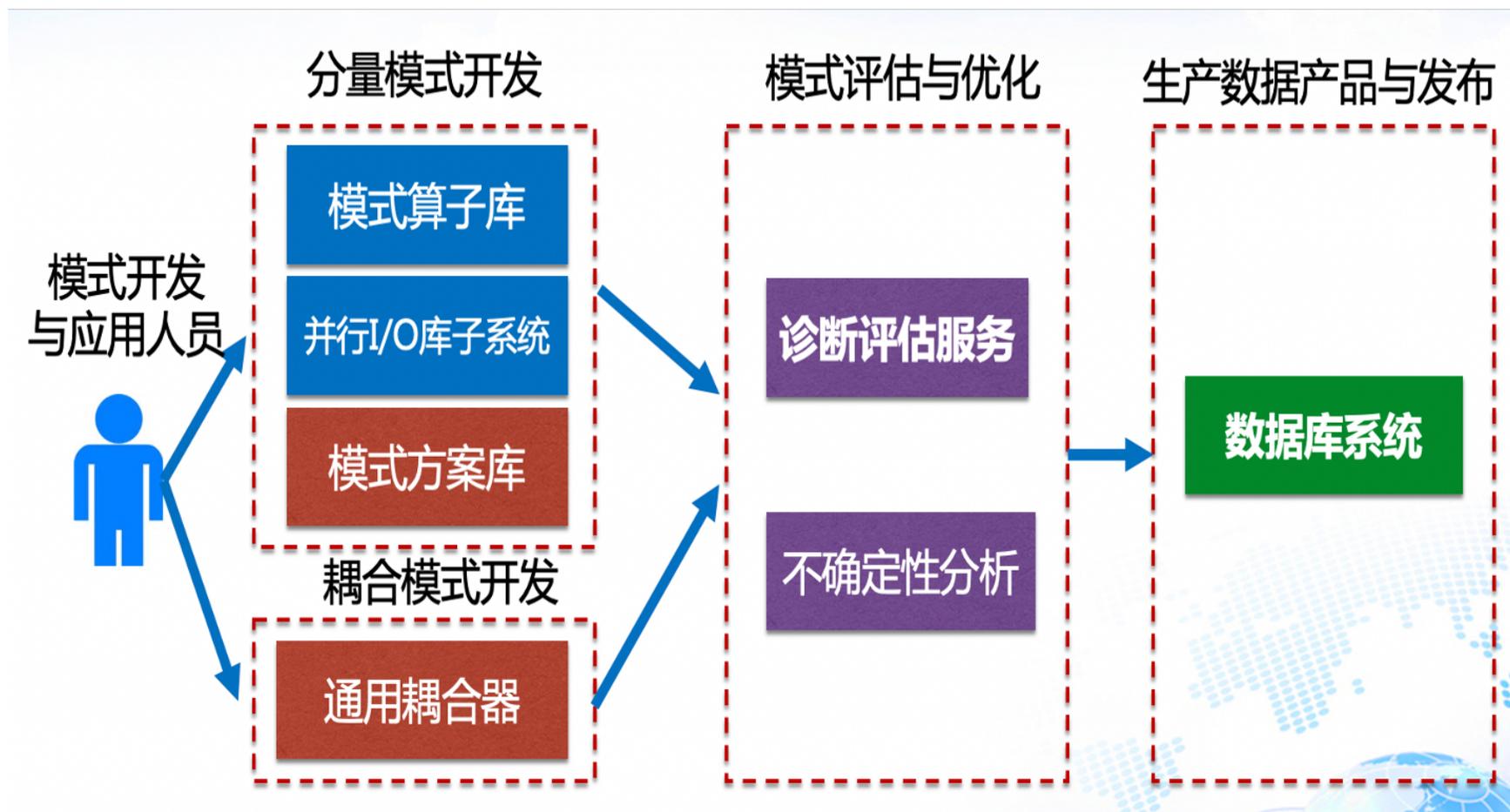
超级模拟支撑与管理系统的定位与架构



1个系统->3个分系统->6个子系统->274个模块

经费6428.00万

目标用户与使用流程



主要成果及关键指标完成情况

- 高效自动并行算子库
- 异步并行I/O库
- 模式集成方案库
- 国产自主耦合器
- 不确定性分析工具
- 模式诊断分析工具

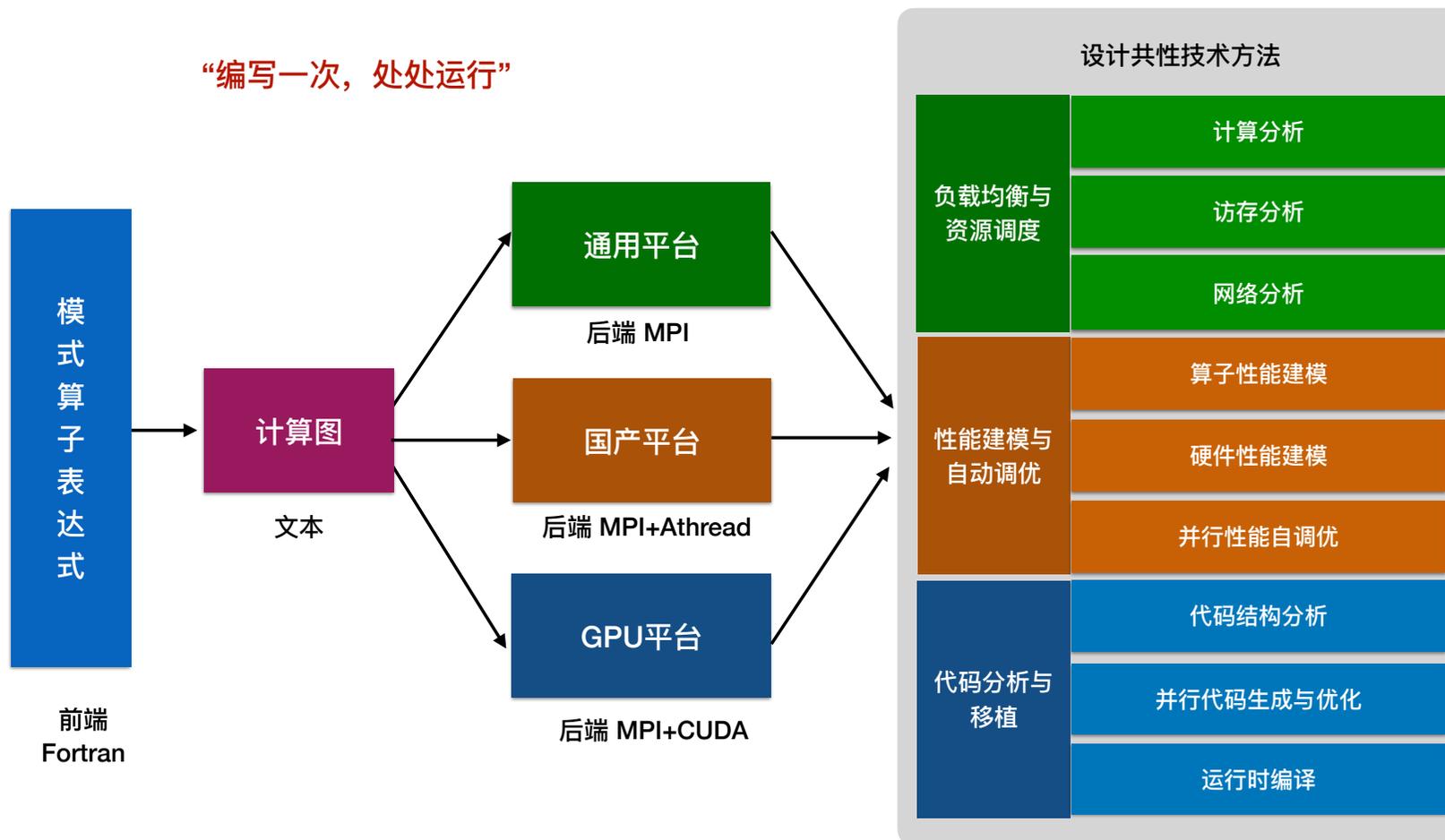
高分模式2万核并行效率 > 30%	75%	集成的方案 > 30个	67个
每天积分2年	4年	参数调优降低模式运行次数20%	72%
I/O时间减少 50%	98.9%	参数寻优计算量减少 > 30%	88%

高效自动并行算子库

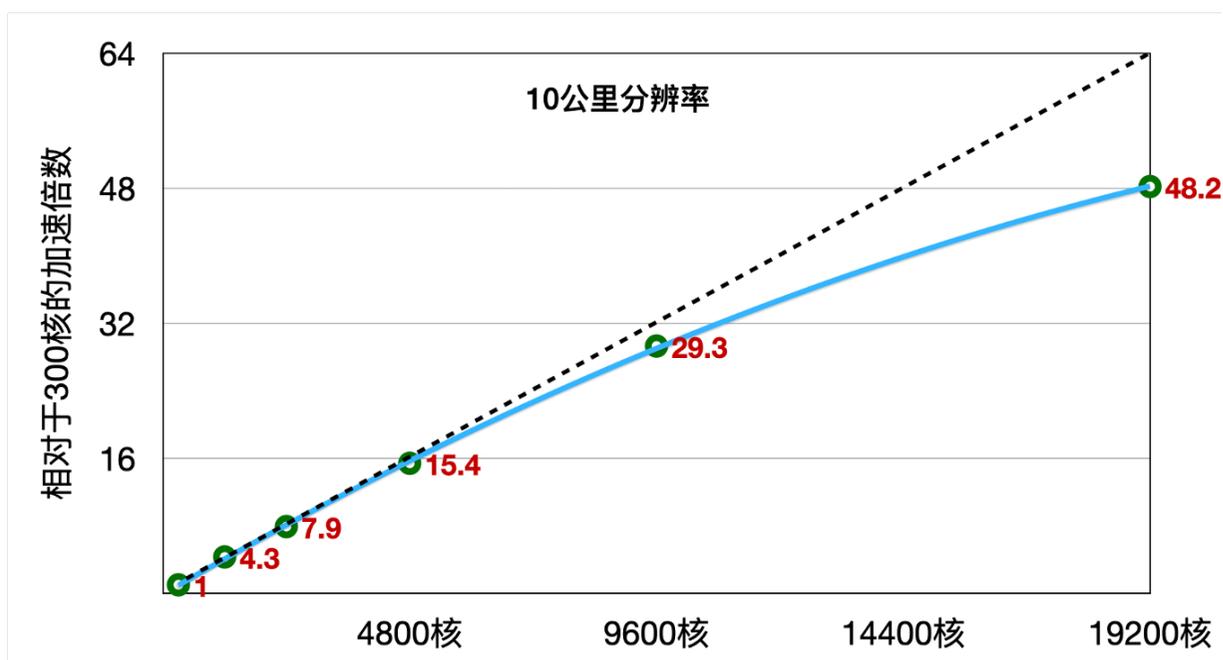


关键思路：以流场和算子为载体，对流场变量进行整体计算，在算子内部实现自动并行

核心技术：模式并行代码自动生成

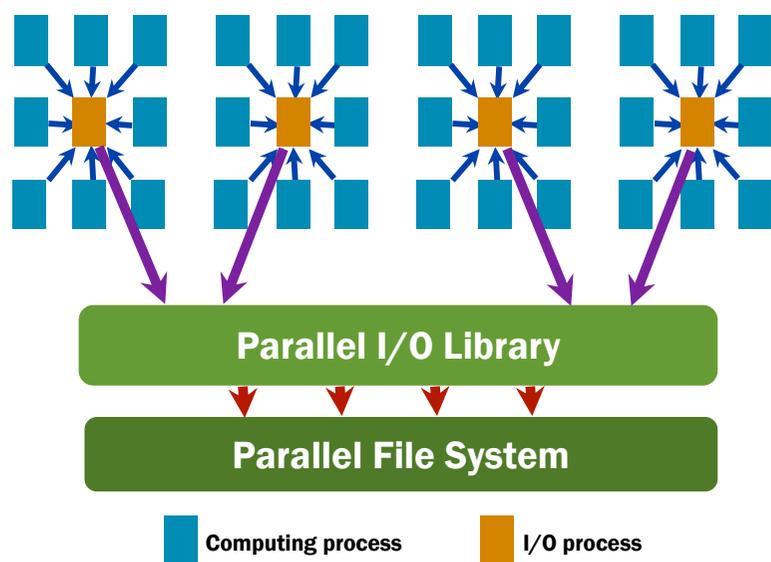


模式算子库重构模式可扩展性好

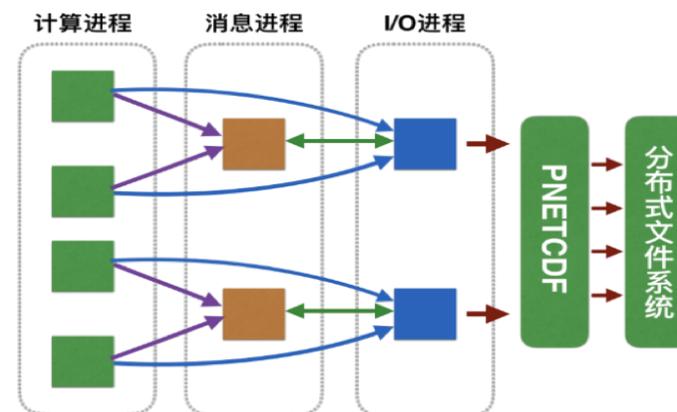


使用算子库重构CAS-ESM海洋分量模式LICOM3，19200核相比于300核加速48.2倍，并行效率75%，墙钟时间1天积分4年，远超过30%并行效率、1天积分2年的设计指标。

异步并行I/O库

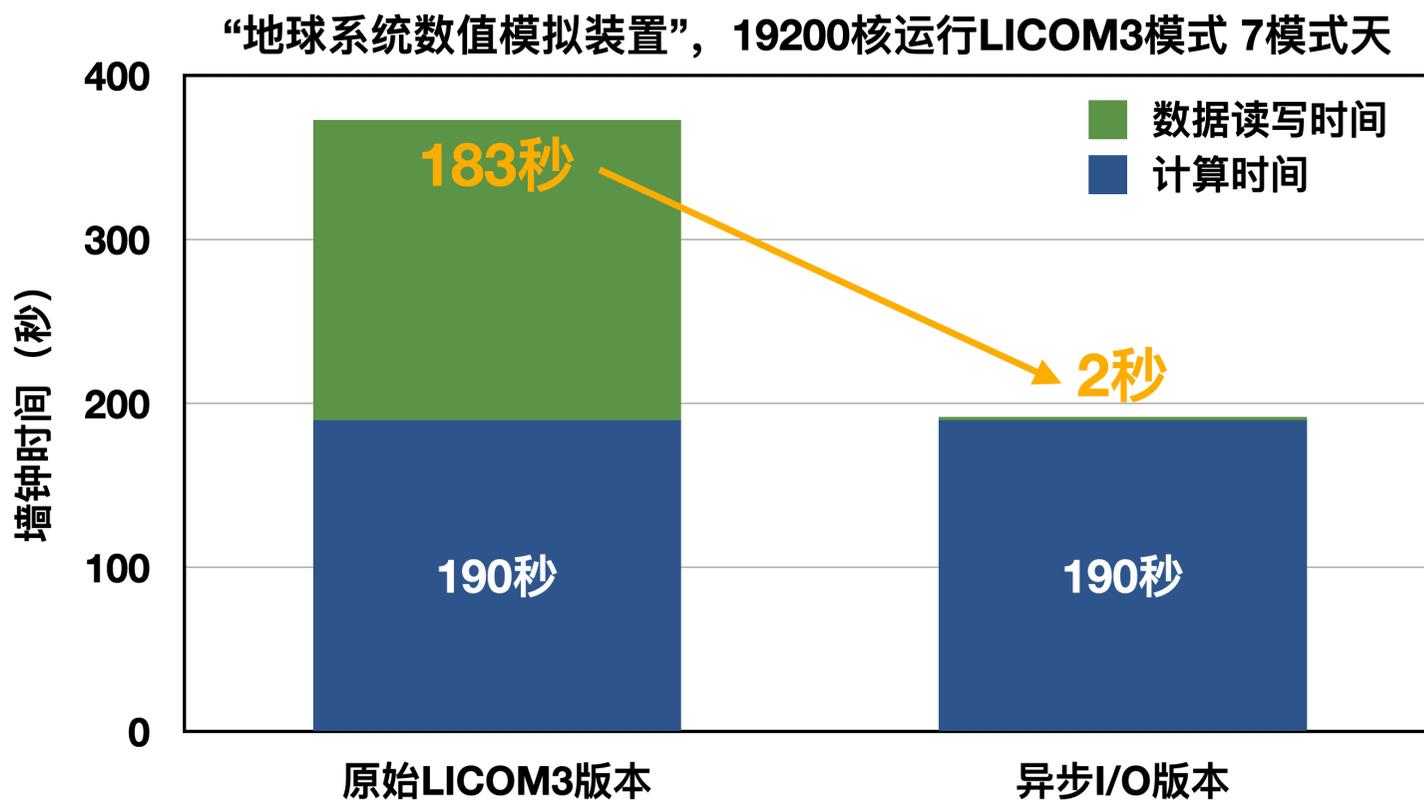


I/O转发示意图



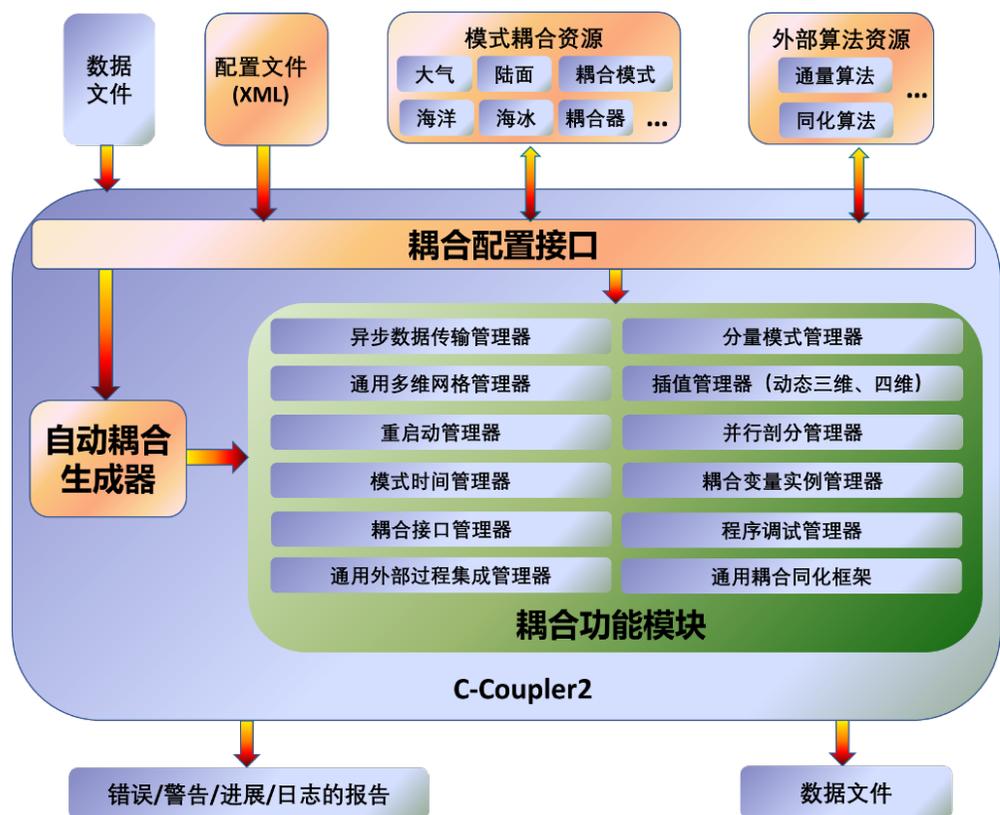
- (1) **生成请求**：计算进程负责模式的计算过程并生成I/O请求消息，然后将消息发送给消息进程。
- (2) **处理请求**：消息进程把从计算进程得到的I/O请求消息缓存到消息队列中。消息进程跟踪I/O进程的忙碌状态，把I/O请求消息转发给空闲的I/O进程。
- (3) **异步IO**：空闲的I/O进程得到由消息进程转发的I/O请求消息后，向指定的计算进程获取相应的数据块，调用底层的PnetCDF库完成异步并行写文件的功能。

异步并行I/O库大幅提高模式效率



大幅提升文件读写速度，实现了I/O隐藏的效果

功能强大的国产自主耦合器C-Coupler2



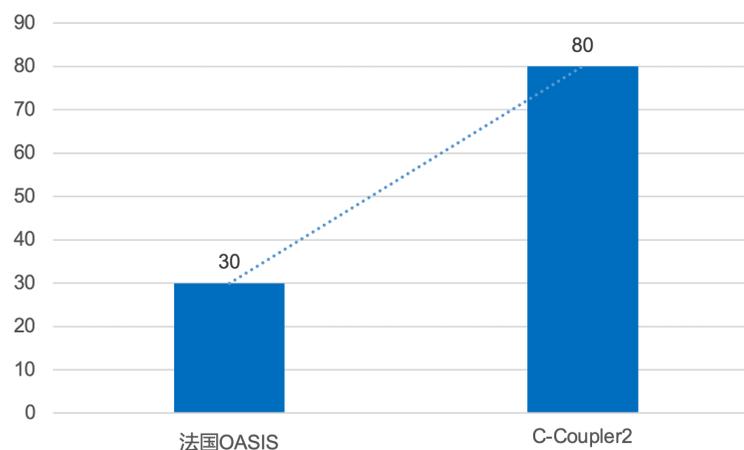
- 通用、灵活且易用的耦合配置接口
- 灵活的自动耦合生成功能
- 动态三维耦合功能
- 对增量耦合与模式嵌套的支持
- 非阻塞式数据传输
- 灵活的重启动功能
- ...

国内外耦合器对比效果

		美国CPL、MCT、FMS和ESMF	法国OASIS	中国C-Coupler2
耦合配置接口	对并行设置、并行剖分和耦合变量配置	√	√	√
	对模式网格、耦合生成方案和插值方案的配置	×	×	√
	全局耦合生成	×	√	√
自动耦合生成技术	局部耦合生成	×	×	√

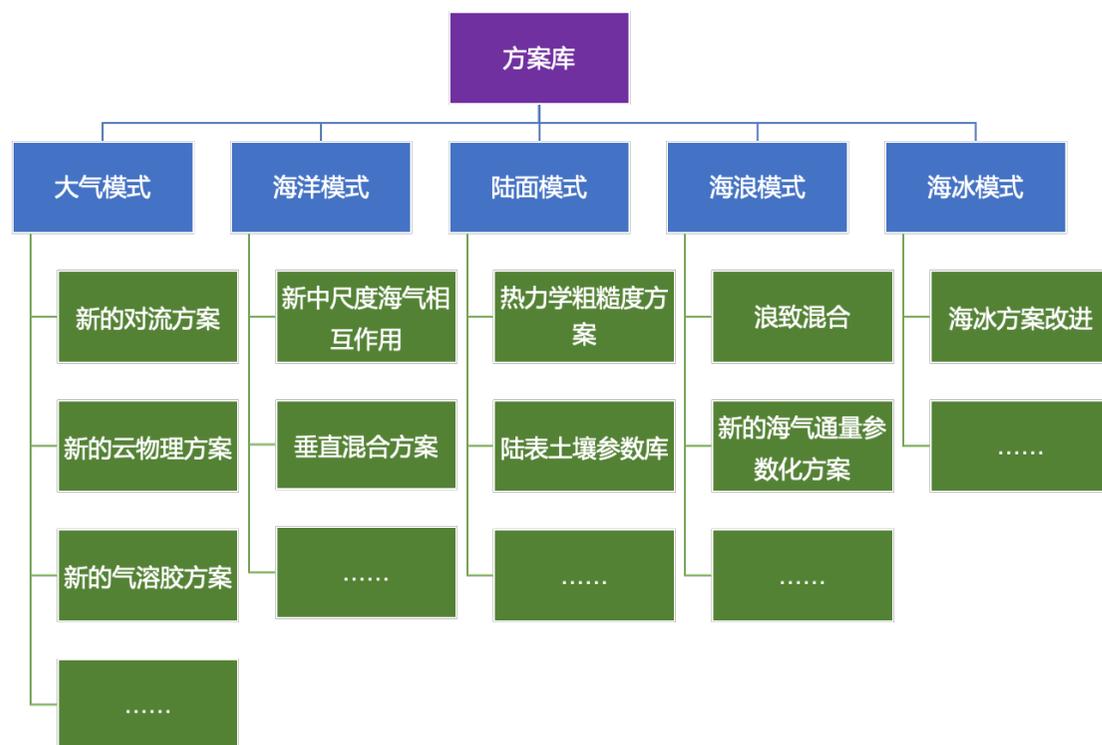
- 与欧美耦合器相比，C-Coupler2具备有明显优势
- 唯一提供了网格、耦合生成方案和插值方案的配置接口的耦合器
- 唯一支持局部耦合生成的耦合器

耦合器接口对比



- C-Coupler2具备了更多的耦合接口
- 解决了任意一组分量模式间的局部同步技术

可灵活调用的模式集成方案库



- 显著缓解海洋低云模拟和热带降水(减少双ITCZ)
- 显著缓解海温异常，改进ENSO模拟
- 显著改善全球尺度细粒子气溶胶的浓度和分布模拟
- 有效改进了陆表温度和能量通量的模拟精度
- 有效融合了海洋混合层预报型和诊断型湍流参数化方案

服务于分量模式的集成和耦合，支撑灵活建立各类敏感性试

不确定性分析工具

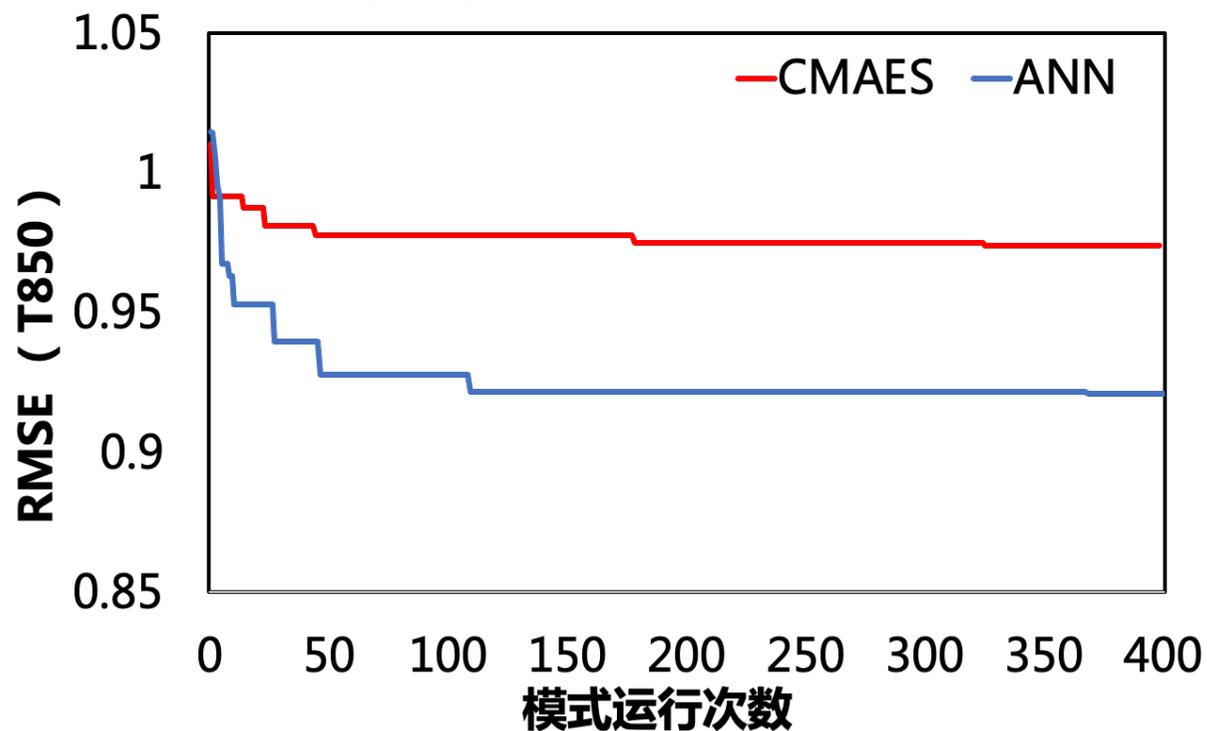
建成我国首套面向地球系统模式开发与应用的专用不确定性分析工具：

- ✓ 轻量易用
- ✓ 支持软件所需环境一键安装配置
- ✓ 提供标准化配置文件，一键自动运行
- ✓ 内置数据库，支持历史算例查重复用
- ✓ 标准化输出运行状态信息



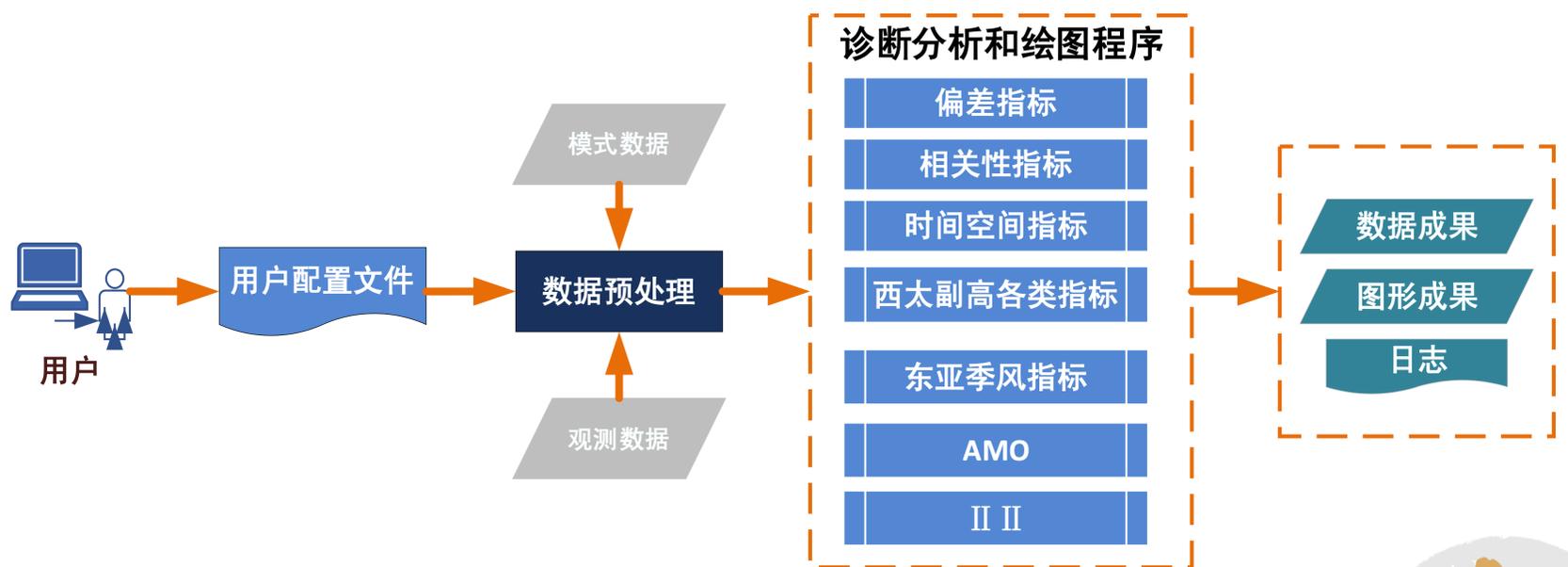
模式参数调优功能

模式参数调优性能结果



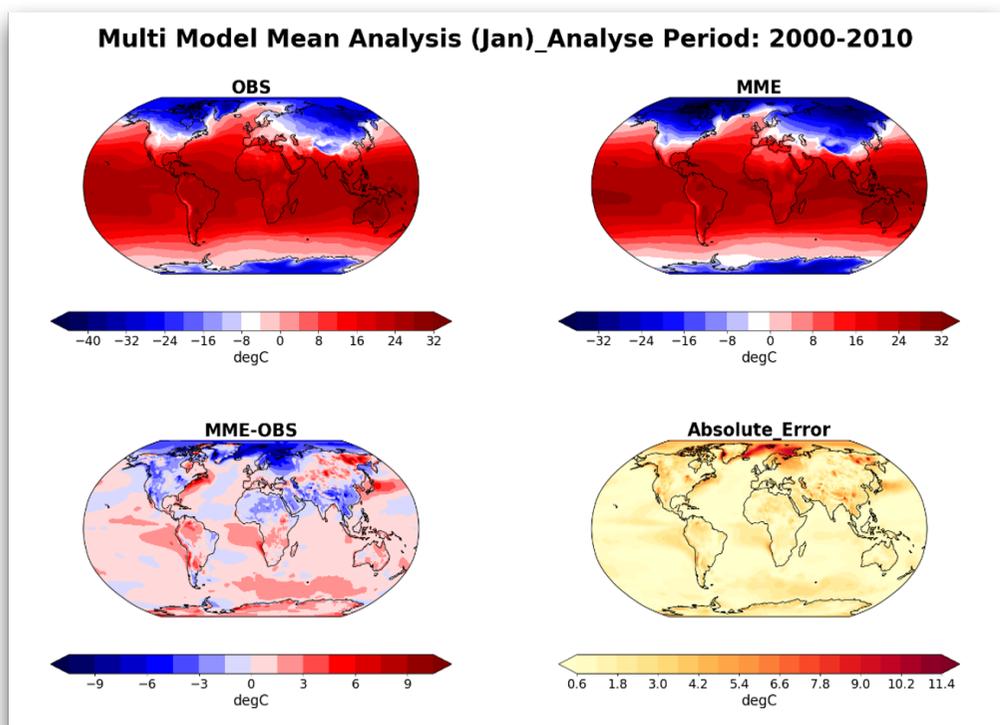
针对多维的不确定性参数，利用系统改进的人工智能代理模式实现了高效自动化的参数优化流程，寻优次数由1343次降为369次，降低72%

模式诊断分析工具

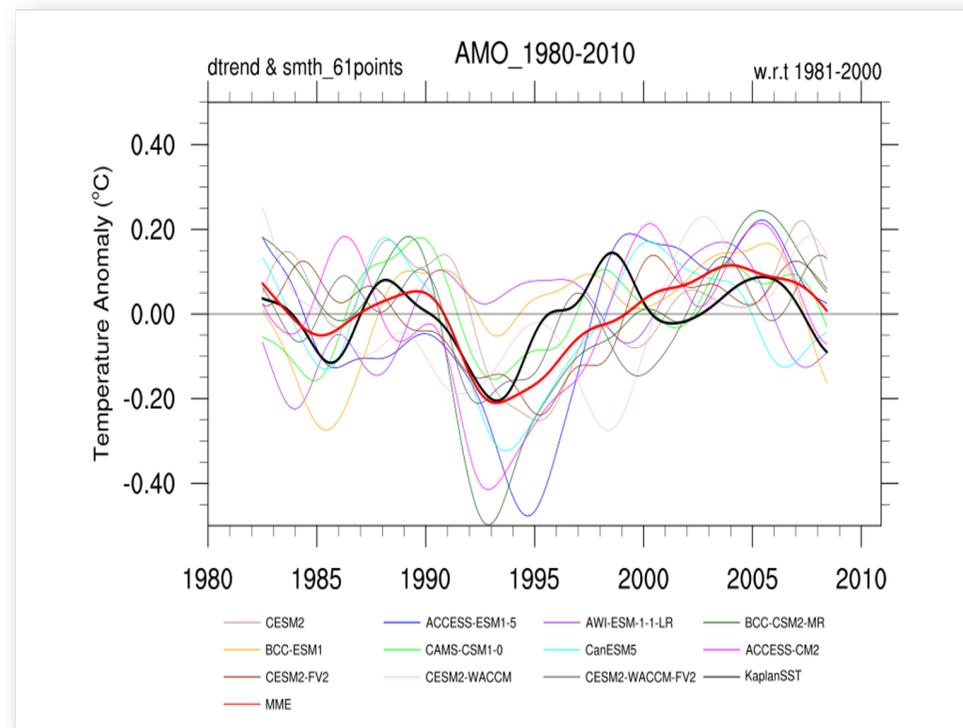


提供扩展性强的基础运行框架，灵活插拔各类诊断分析程序。预置10种预处理分析程序、10种数据运算程序、438种诊断分析和图示化成果，为模式开发人员提供可用性高的基础分析工具

诊断分析软件成果展示



多模式平均气温与观测气温分布分析图



多模式平均比单个模式更好地反映了北大西洋涛动 (AMO) 变化趋势



内 容 提 要

1 ↓ 地球系统模式与超算

2 ↓ 地球系统模式高性能计算支撑软件系统 (863)

3 ↓ 超级模拟支撑与管理系统 (地球系统数值模拟装置)

4 ↓ 智能模式发展 (NSFC)

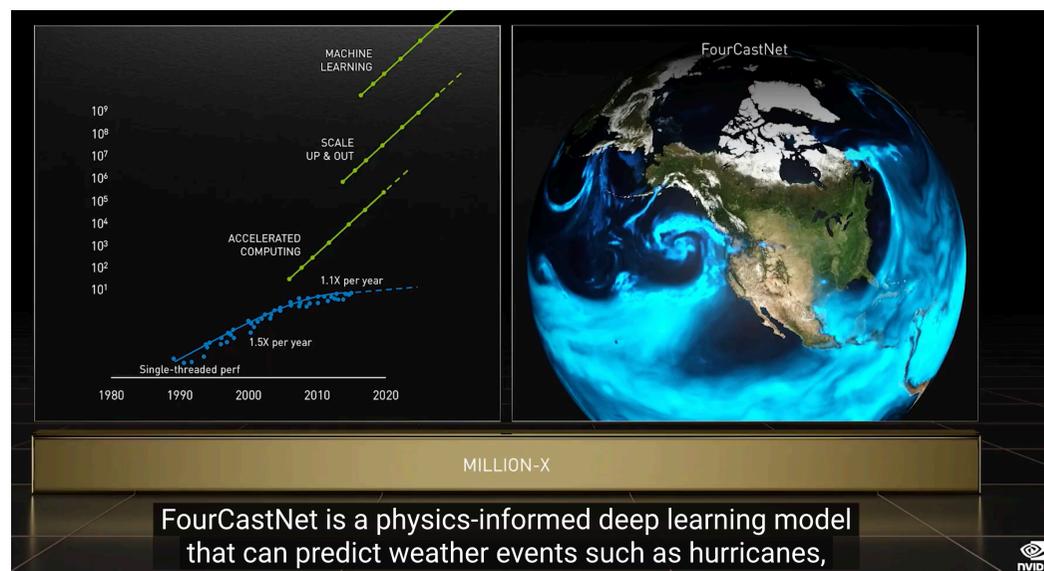
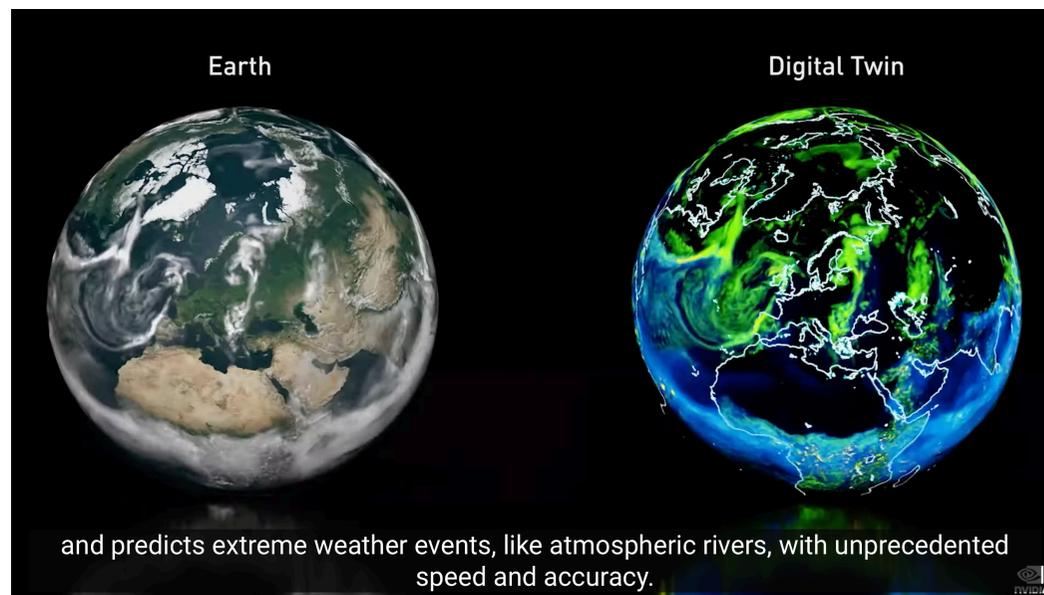


来自 NVIDIA、加州理工学院、伯克利实验室、普渡大学、密歇根大学和莱斯大学的研究人员

数字孪生地球

Digit Twin Earth

- 数字孪生：
 - 全生命周期
 - 实时/准实时
 - 双向交互
- 数字孪生地球：
 - 地球克隆体，仿真辅助决策的信息系统
 - 天气和气候模式是基础
 - 受益于人工智能的繁荣



大数据与人工智能正在引发一场深刻的地球科学研究革命



大数据与人工智能应对全球变化研究呈爆发性增长，有力促进了地球系统的机理、模拟和预测研究，**人工智能与数值预报的融合**成为热点和难点

清华大学地学系AI for Earth案例

目标识别

- 1.2000-2020 全球无缝遥感数据立方体构建与应用
- 2.中国30m-10m分辨率地表覆盖制图
- 3.大规模油棕树木识别
- 4.百度街景的树木特征识别
- 5.长时间序列城市制图与扩张
- 6.农作物AI识别

预测提升

- 1.基于因果关系网络的海冰预报
- 2.ECMWF气温和风速误差订正
- 3.ECMWF产品降水订正
- 4.中国汛期降水预测
- 5.台风生成短期预报
- 6.ENSO的深度学习业务化预报
- 7.结合WRF和同化的AI风能预报
- 8.珠江口区域海雾预报

模型替代

- 1.深度学习湿物理过程参数化方案替代
- 2.深度学习陆面模式参数化方案
- 3.长序列高精度地表土壤水分反演
- 4.估算网格化PM2.5日均浓度
- 5.三维海洋要素场智能重构
- 6.海洋水文环境数据融合与预报保障
- 7.AI-PDE方程求解 (PINNs)

人工智能在数值模式中的研究应用情况

极端天气事件检测

天气预报与偏差订正

物理参数化过程替代

数值模式替代



识别极端天气事件的“E级”深度学习

2018年“戈登·贝尔奖”获奖工作

利用CAM5模拟结果对改进后的DeepLabv3+神经网络进行训练，用于识别热带气旋和大气河

CAM5模拟数据

数据量巨大

要素多

时空分辨率高

类别高度不平衡

识别目标无明确边界

多层次优化

数据流水线优化

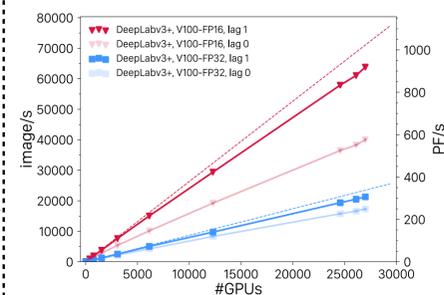
损失加权

逐层学习率自适应

梯度延迟更新

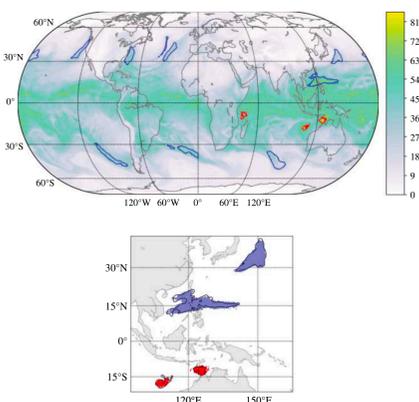
多通道分割

超高性能



持续吞吐量达325.8 PFlops
并行效率达90.7%

高质量分割结果



首个将深度学习应用于气候数据的像素级分割，

可扩展至27360块NVIDIA V100 GPU加速卡，性能最高达到1.1Eflops

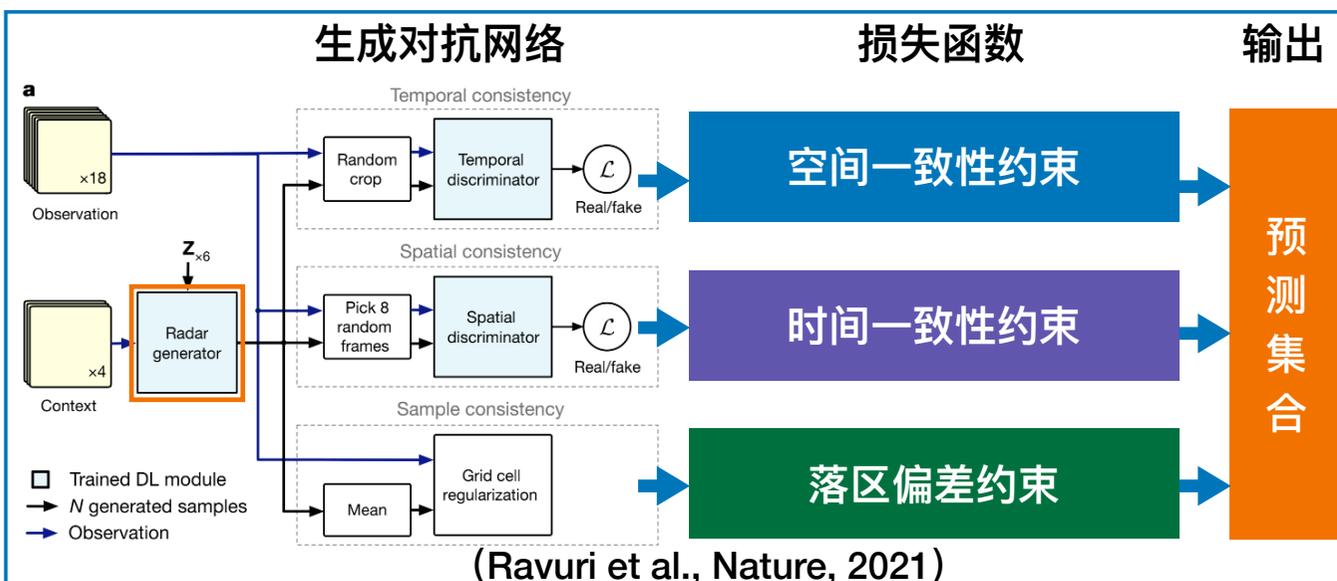
(Kurth et al., SC, 2018)

降水临近预报

深度生成模型 (Deep Generative Models, DGMs)

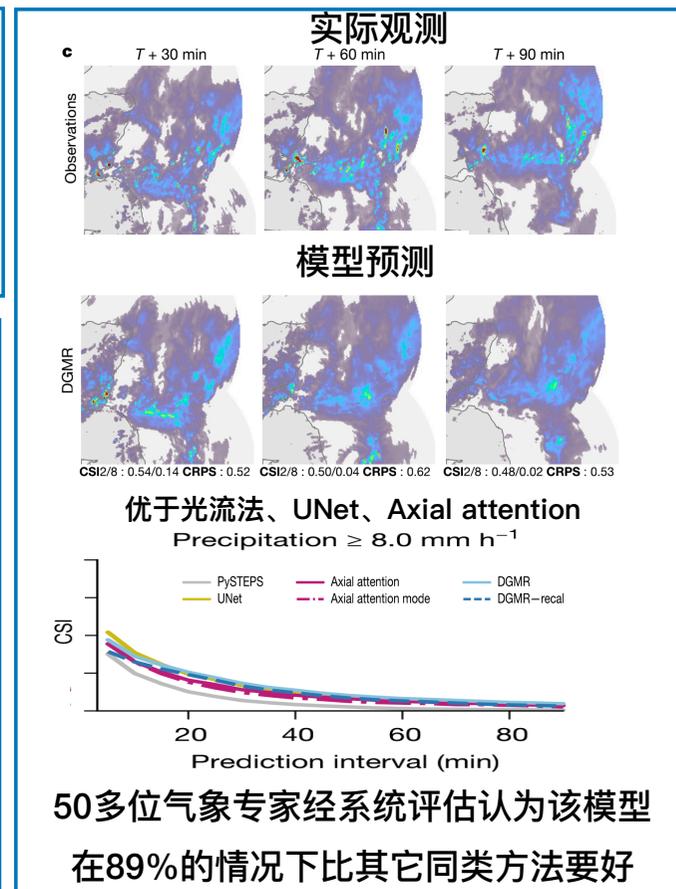
雷达图像序列预测时效越长越模糊，中到大雨的预测效果差

- 1秒钟快速预报 (1块NVIDIA V100 GPU)
- 更好的时空和落区一致性，中到大雨预报准确率更高



输入过去一段时间的雷达图像序列

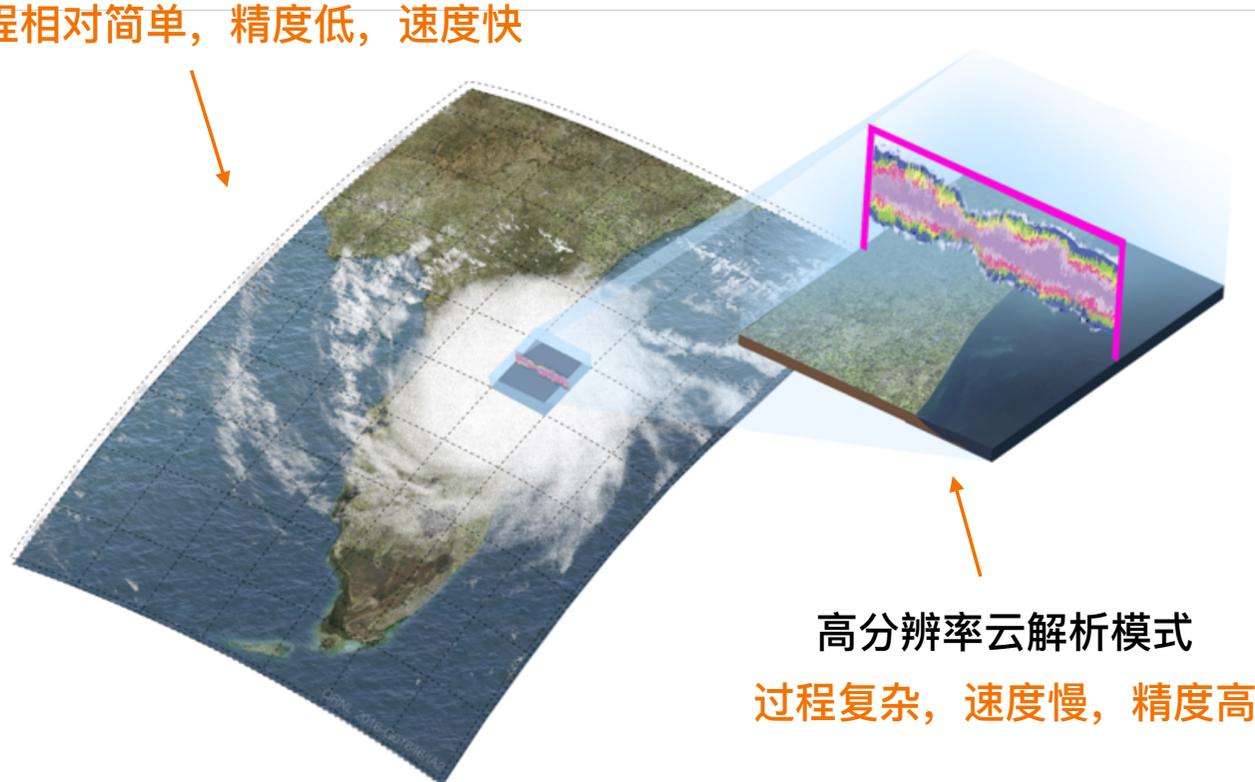
预报未来一段时间的雷达图像序列



模式模拟难点

低分辨率大气模式

过程相对简单，精度低，速度快



高分辨率云解析模式

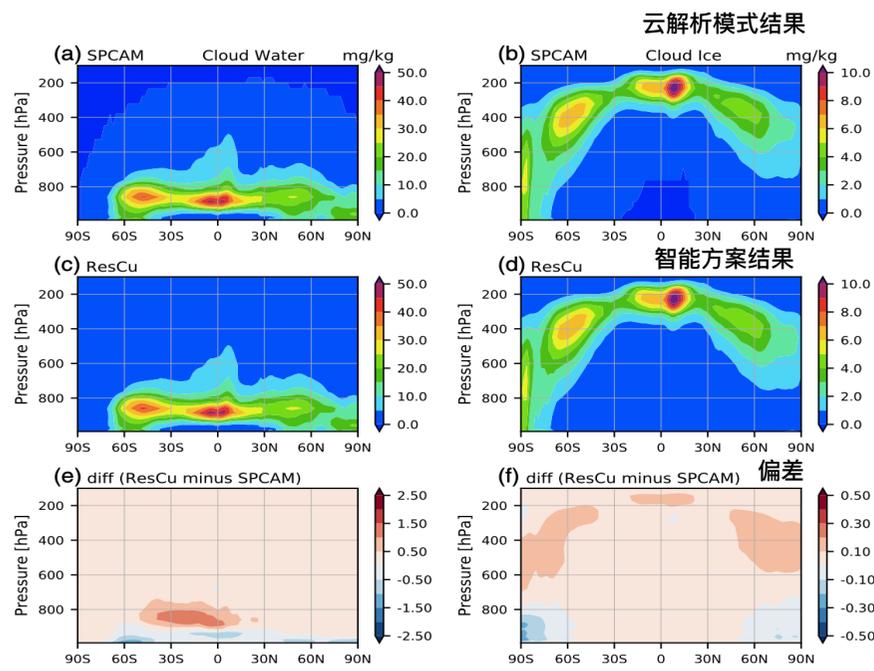
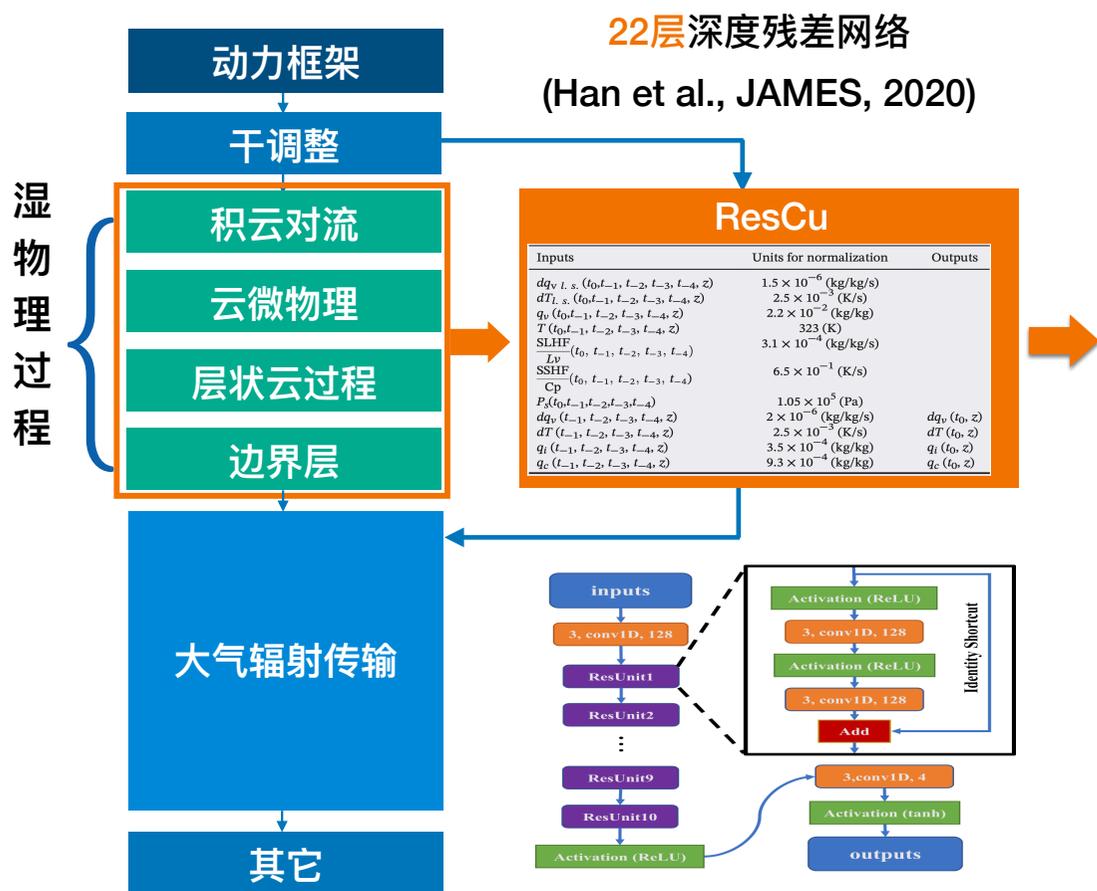
过程复杂，速度慢，精度高

● 模式模拟不确定性的
重要来源：

- 大气中的云和辐射
- 海洋中的涡
- 陆地中的碳
-

大气模式中的智能参数化方案

智能湿物理过程参数化方案



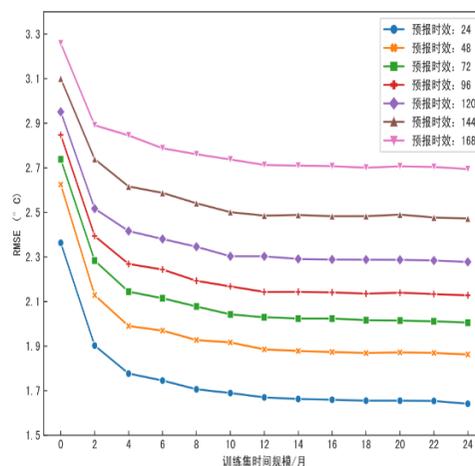
显式加入了**湿静力能守恒约束**，国际同类模式降水量相关系数仅为0.39，使用该方案大幅提高至**0.85**，速度比云解析方案快约**30倍**

ECMWF预报产品气温和风速误差订正



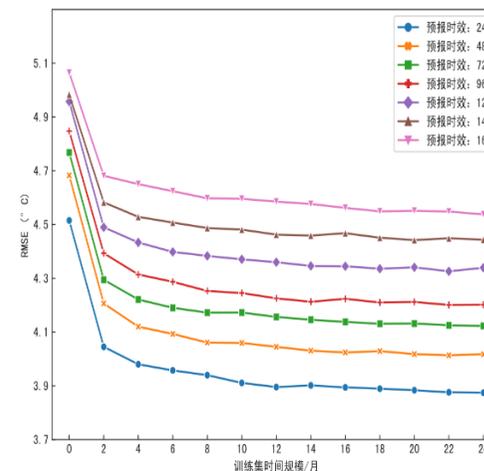
- 利用聚类解决单站数据训练量太少问题
- 将多源数据作为LightGBM决策树模型输入
- 利用迁移学习补充新建站点数据不足

误差降27.9%



气温订正RMSE随训练集规模变化结果

误差降30.4%

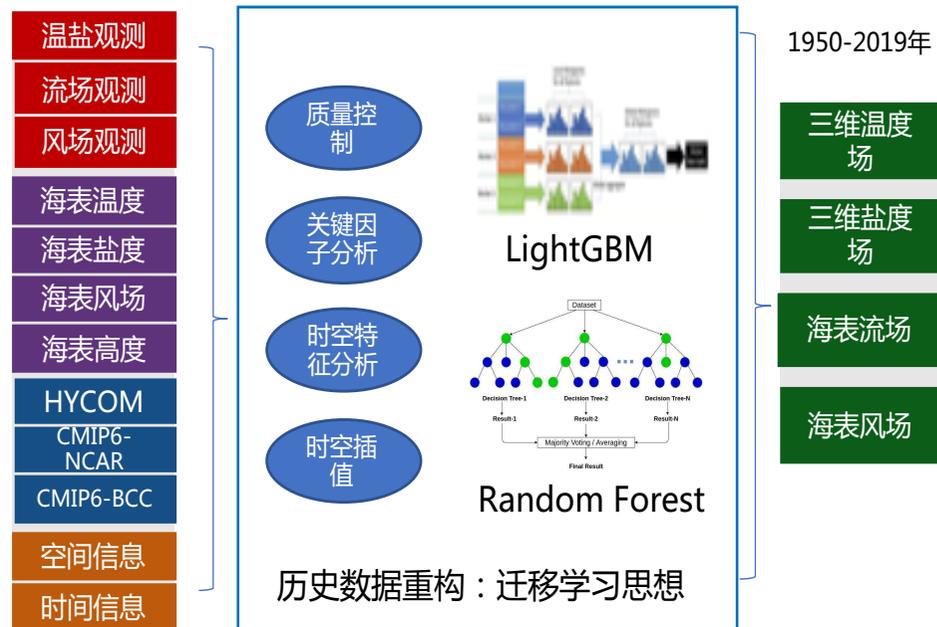
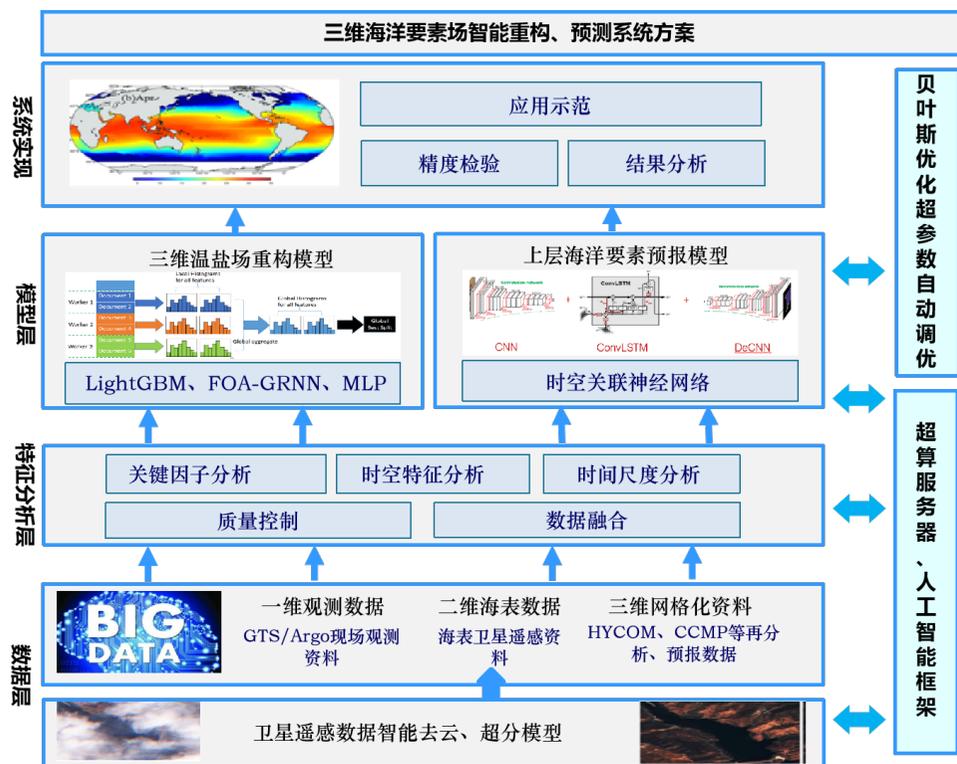


风速订正RMSE随训练集规模变化结果

(陈昱文等, 应用气象学报, 2020)

三维海洋要素数据集智能重构

如何实现现场观测、海表卫星资料、模式预报及再分析等多变量、多维度、多模态海洋大数据资料的智能融合，重构出时空连续的高精度三维海洋要素场？



实现了1950-2019年三维温盐场、海表流场及海表风场多要素智能融合，数据集时间覆盖范围以及精度均优于HYCOM再分析数据

珠江口区域海雾预报

有/无雾的24预报精度96%

问题

珠江口海雾频发，云雾难以区分
海雾特点：多变性、局地性
海洋天气预报的难点

目标

格点化预报

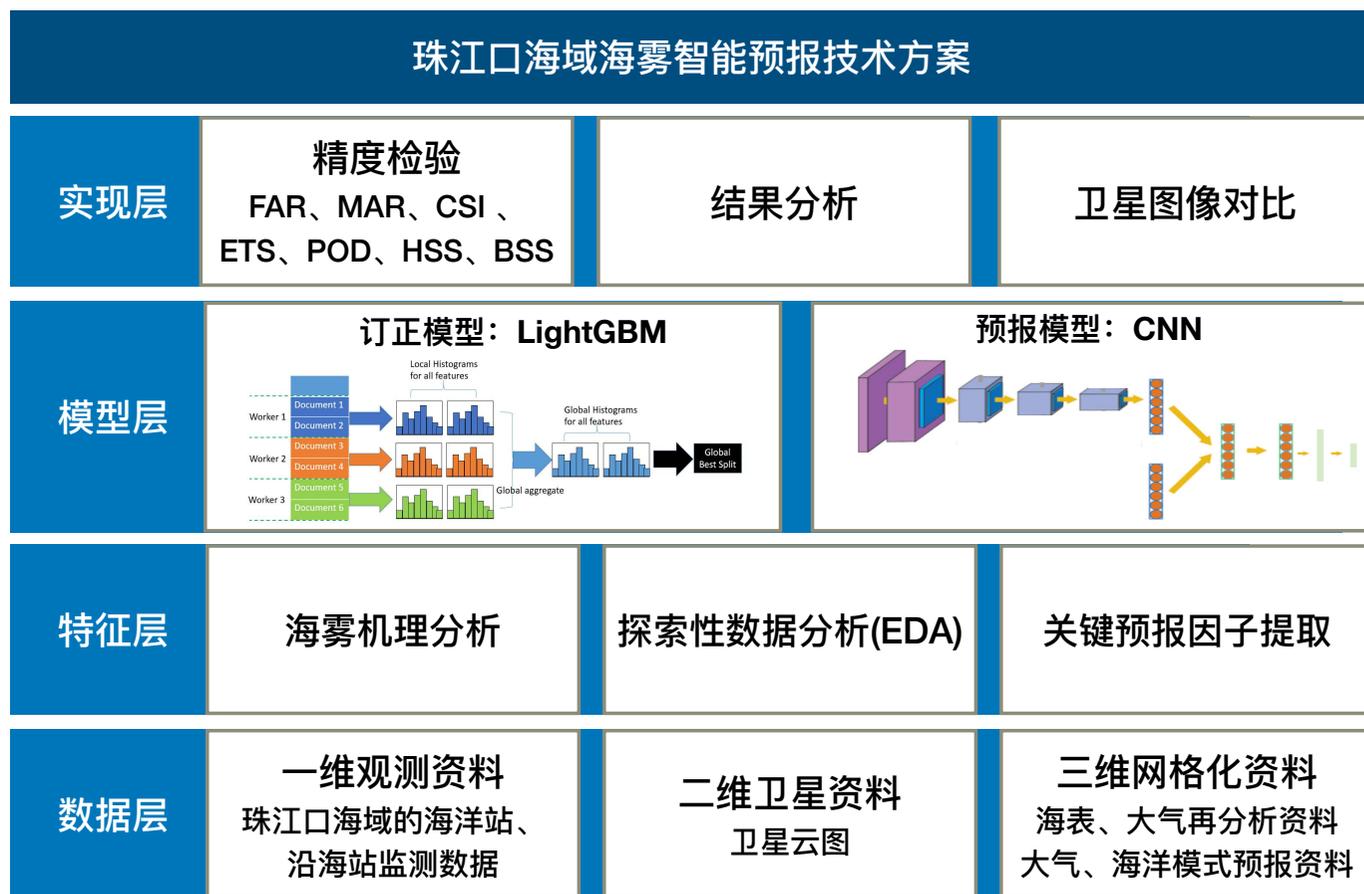
目标区域：珠江三角洲海域

海雾等级预报：无雾、轻雾、浓雾

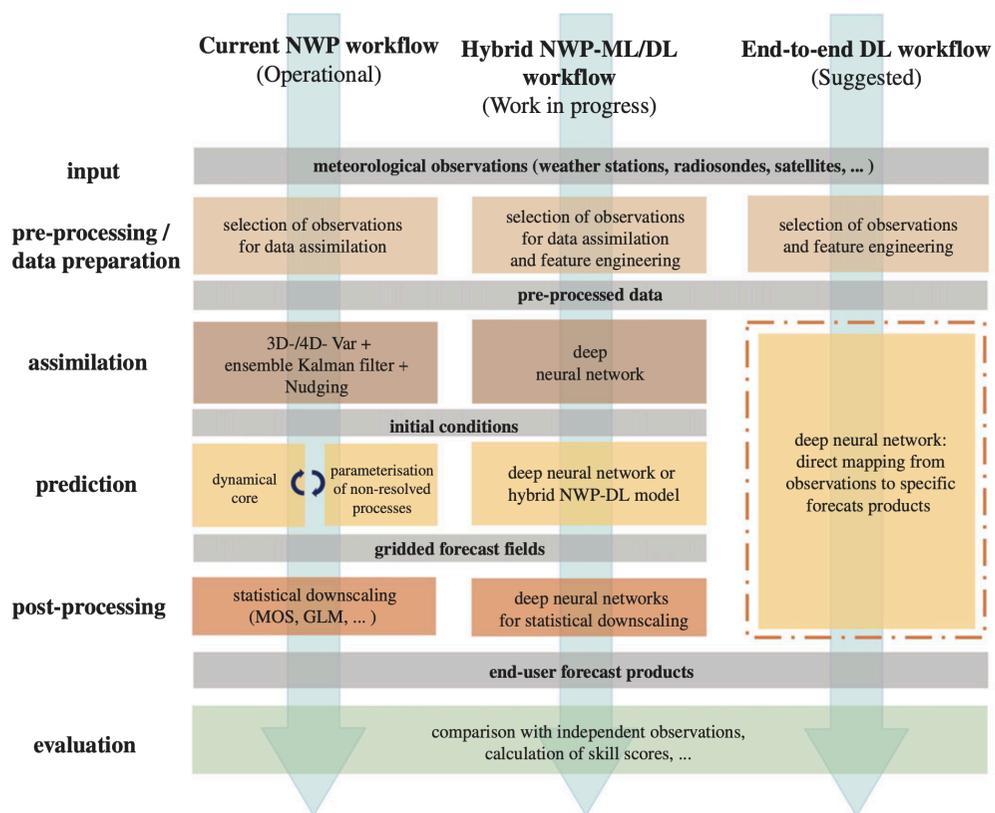
预报时效：24、48、72h

预报频率：逐3小时/次

空间分辨率：1.5km



智能模式



智能模式1.0版本

智能模块替代

智能模式2.0版本

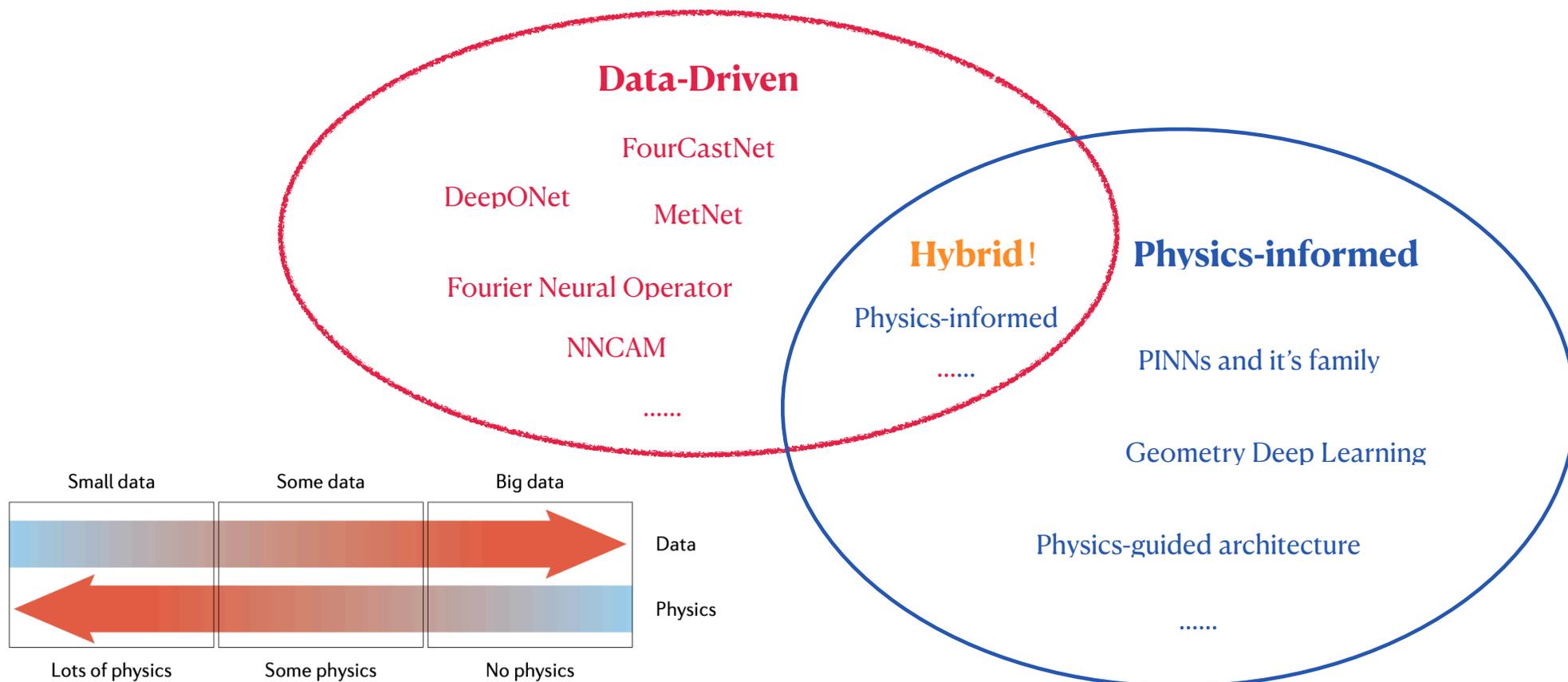
智能模式替代

智能模式3.0版本

数据驱动和物理驱动混合

"Can deep learning beat numerical weather prediction?" **Philosophical Transactions of the Royal Society A** 379.2194 (2021): 20200097.

数据驱动vs物理驱动?



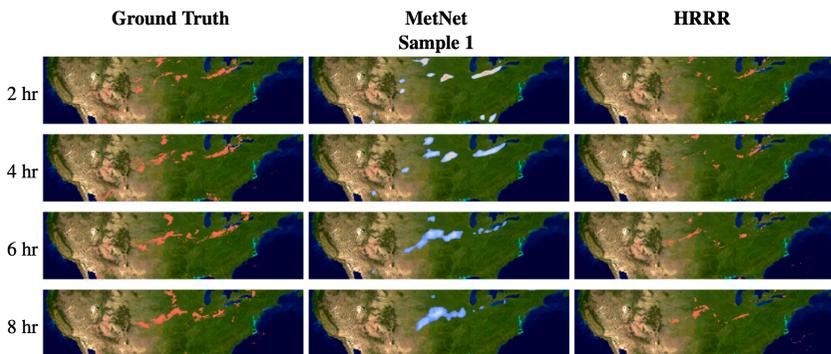
"Can deep learning beat numerical weather prediction?" **Philosophical Transactions of the Royal Society A** 379.2194 (2021): 20200097.

数据驱动的模式替代

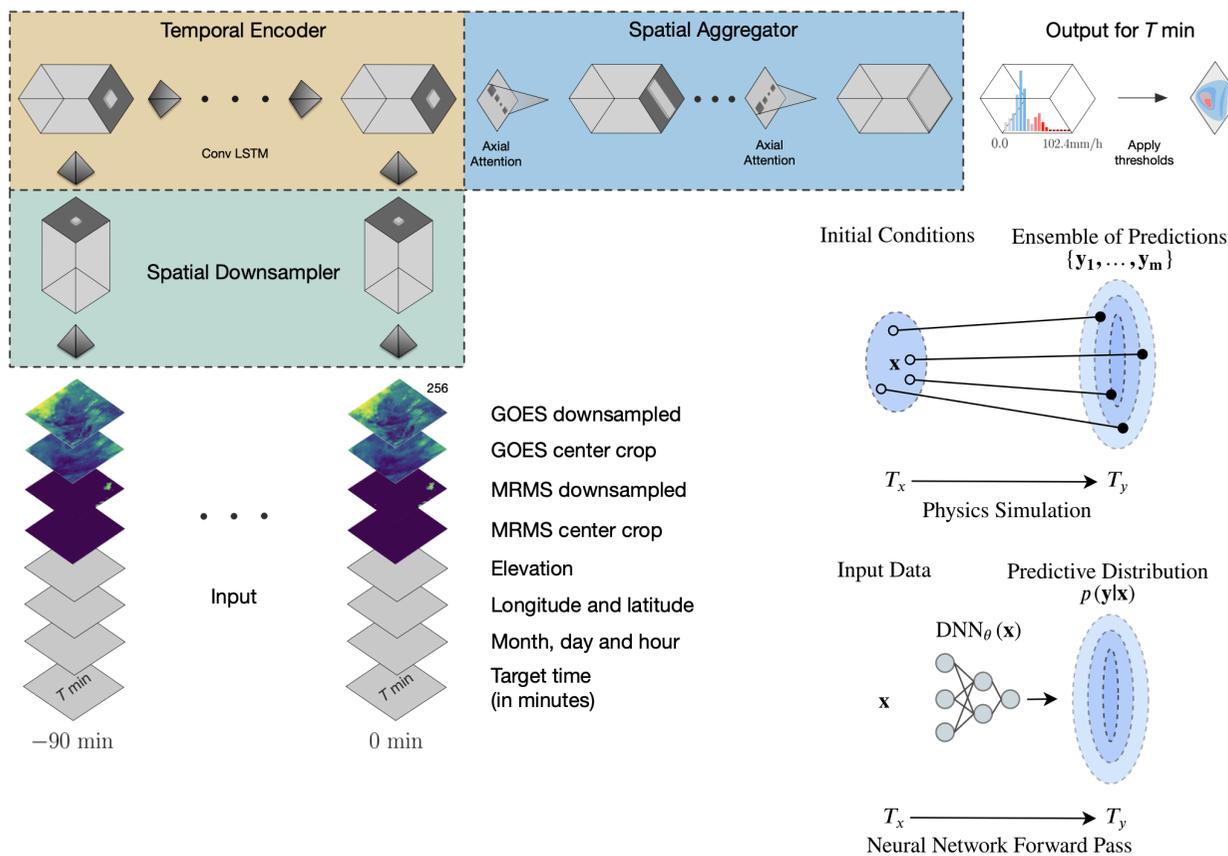
MetNet by Google



GOES-16 visual bands



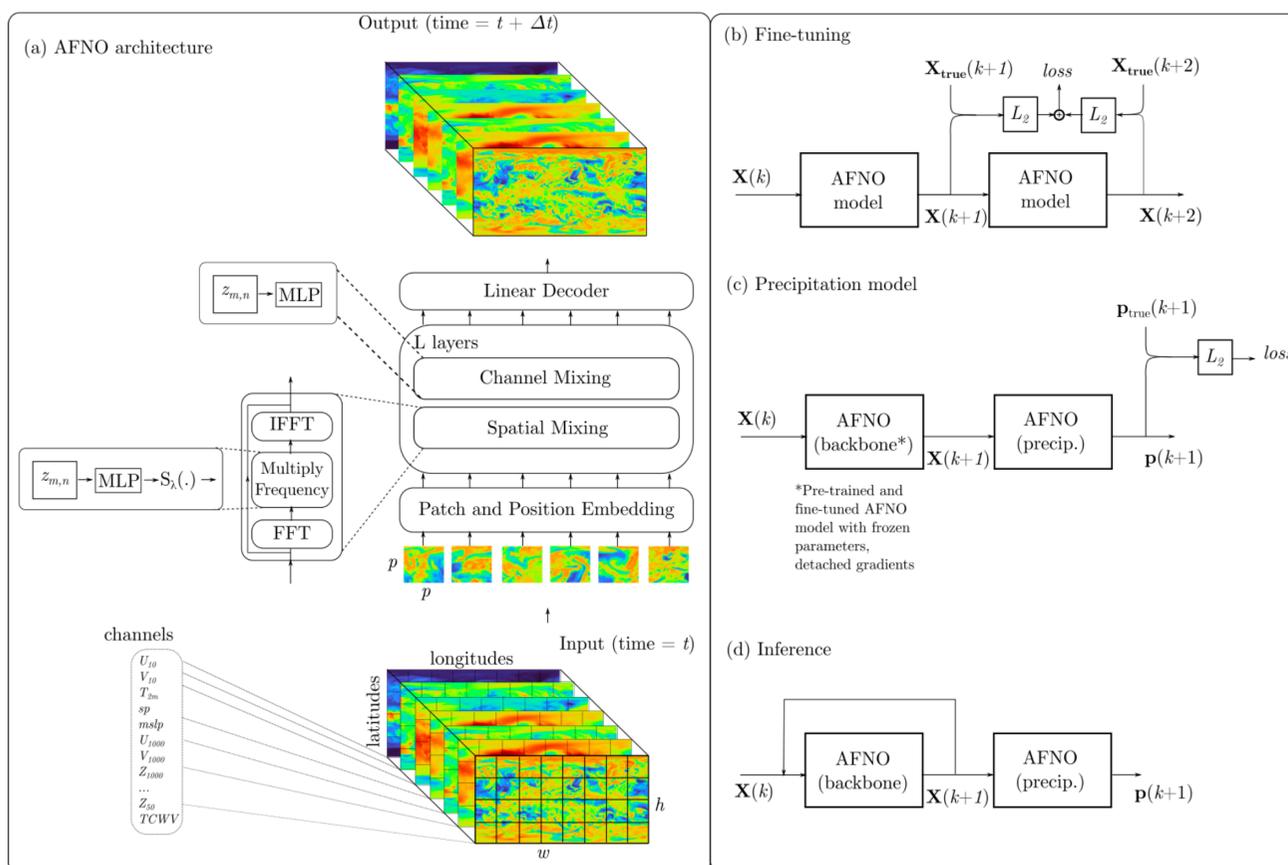
Structure



"Metnet: A neural weather model for precipitation forecasting." arXiv preprint arXiv:2003.12140 (2020).

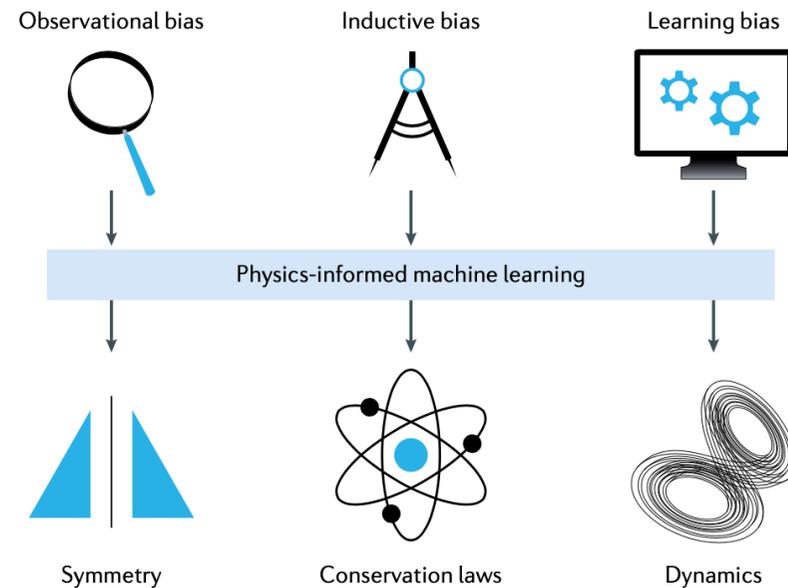
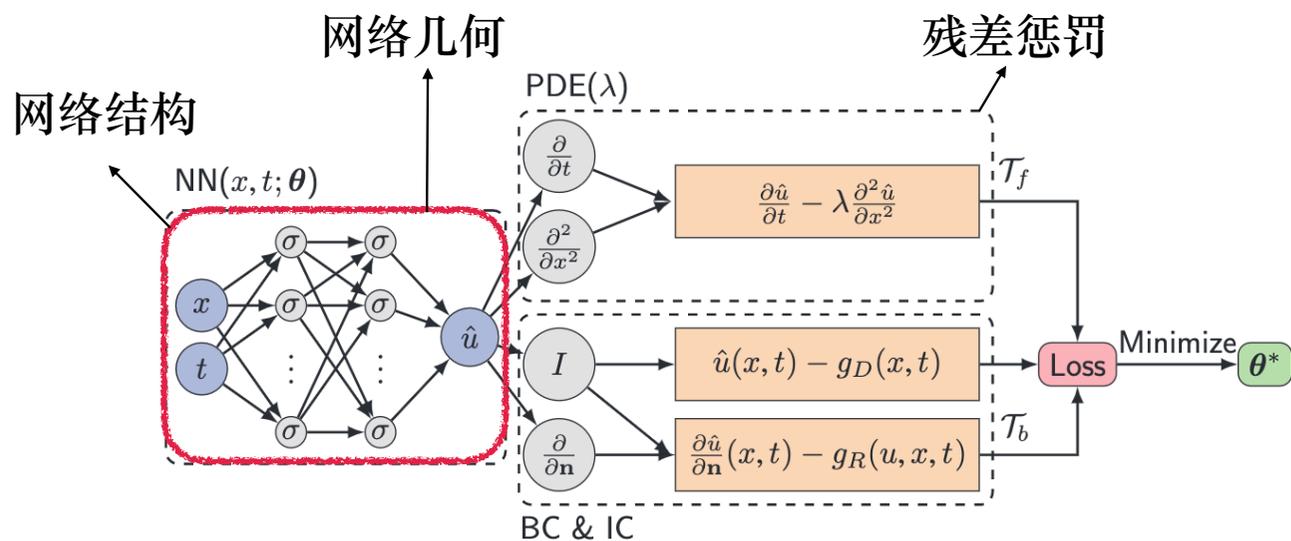
数据驱动的模式替代

FourCastNet by NVIDIA



- 使用10年ERA5数据
- 分辨率0.25度
- 比IFS模式快45,000 倍
- 在Typhoon和Atmospheric River预报上表现良好
- 值得重点关注的模型

物理驱动模型的发展现状



人工智能在数值预报带来新的机遇与挑战

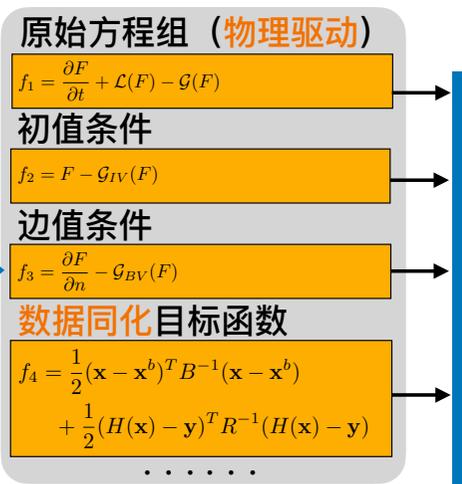
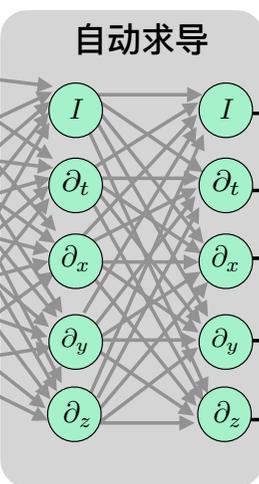
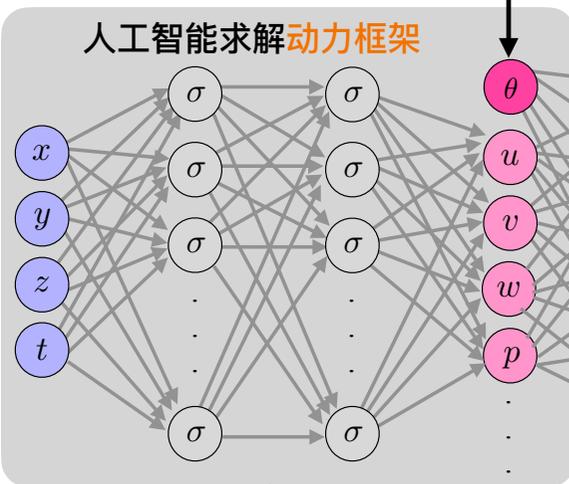
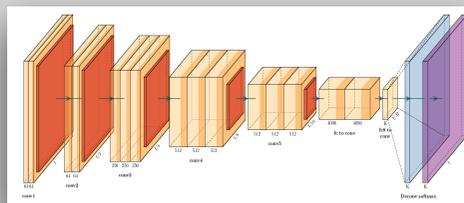
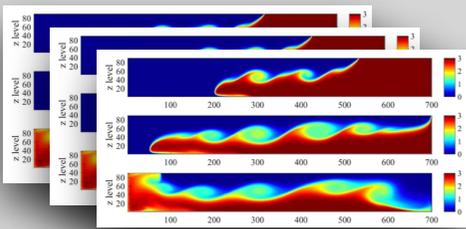
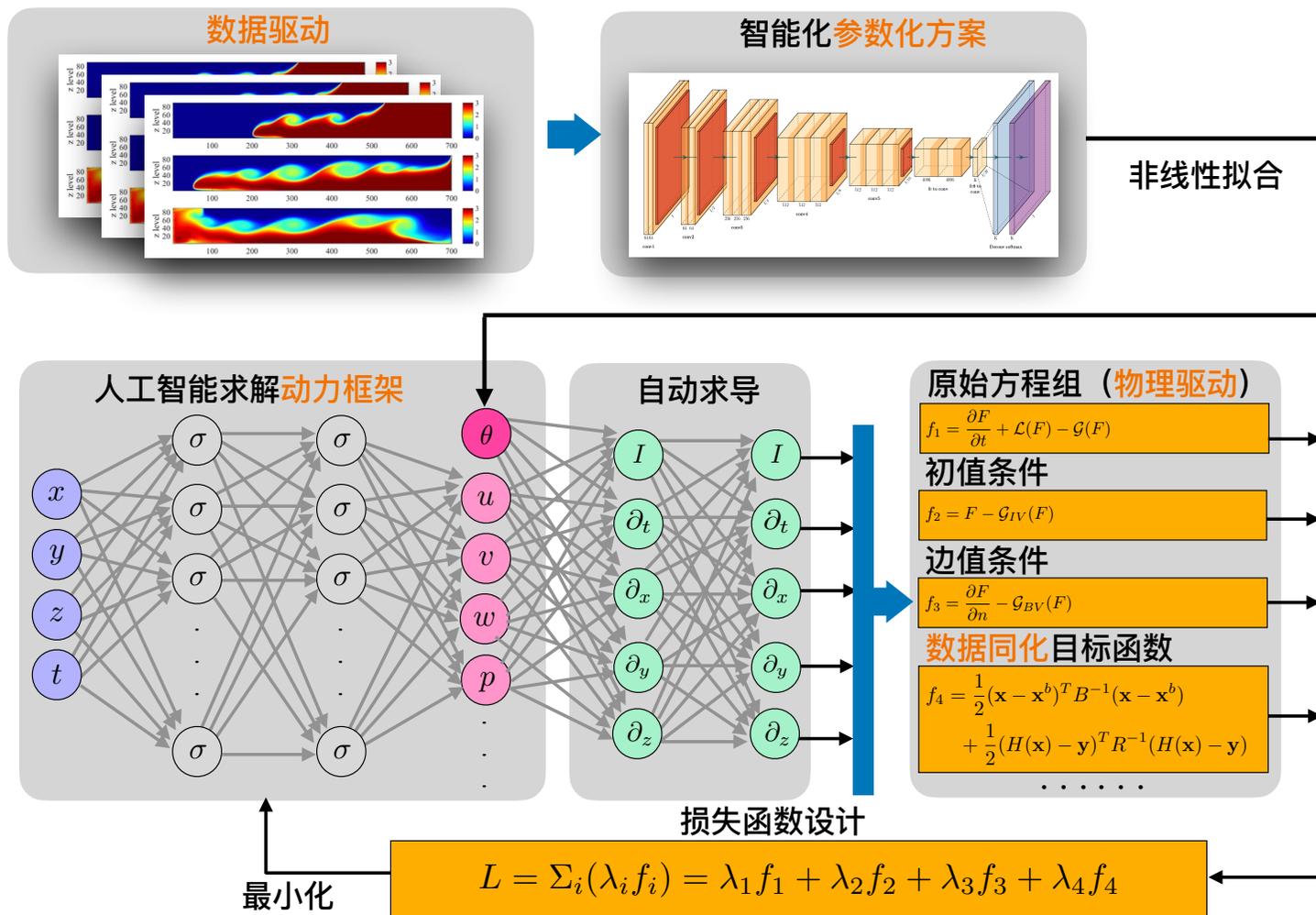
机遇

1. 更准的目标识别
2. 更高的预测能力
3. 更快的预测效率

挑战

1. 可解释性
2. 物理一致性
3. 求解PDE方程
4. 有限的样本
5. 巨大的计算需求

发展数据驱动和物理驱动混合的智能数值模式



最小化

$$L = \sum_i (\lambda_i f_i) = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4$$

谢谢!