

# GRIST天气-气候一体化模式系统框架设计和应用

王一鸣<sup>1</sup> 张祎<sup>1,2</sup> 李晓涵<sup>1,2</sup> 刘壮<sup>3</sup> 周逸辉<sup>2</sup>

(1 航天宏图信息技术股份有限公司, 2035未来实验室, 北京 100195; 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3 清华大学地球系统科学系地球系统模拟教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 全球-区域一体化预测系统 (GRIST) 是近年来我国模式开发团队独立设计、自主研发的新一代非结构化网格天气-气候一体化模式系统。该模式采用标准化、模块化的软件体系结构, 具有静力-非静力一体化模拟、分辨率灵活可调、多物理包配置灵活可选等特点, 可满足天气预报至长期气候模拟等不同时空尺度预测模拟需求。模式框架系统包括基础设施支撑层和模式运行层, 外延功能包括前处理层和数据诊断层。每层中的模块都具有灵活的功能设计。初步应用表明, GRIST模式能够兼顾天气和气候模式运行的需求特点, 是对天气-气候一体化模式研发的有力实践。

**关键词:** 数值模式框架, 天气-气候一体化模拟, GRIST

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.04.002

## Design and Application of a Unified Weather-Climate Modeling System Framework: GRIST

Wang Yiming<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>1,2</sup>, Li Xiaohan<sup>1,2</sup>, Liu Zhuang<sup>3</sup>, Zhou Yihui<sup>2</sup>

(1 2035 Future Laboratory, PIESAT Information Technology Co. Ltd., Beijing 100195; 2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3 Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** GRIST (Global-Regional Integrated Forecast System) is a next-generation unstructured-grid unified weather-climate modeling system, independently designed and developed by Chinese model development team during recent years. The model adopts a standardized and modular software architecture. It has the features such as unified hydrostatic and nonhydrostatic modeling, flexible and adjustable resolution, and multiple physical packages. Therefore, it can satisfy the computing demands of various spatial and temporal scales, ranging from weather forecasts to long-term climate simulations. The model framework system consists of the infrastructure layer and the model operating layer, and the epitaxial function includes the pre-processing layer and the data diagnostic layer. The modules in each layer have flexible design functions. The preliminary application of the modeling system shows that GRIST can meet the operational needs both from weather modeling and from climate modeling, demonstrating a forceful implementation of unified weather-climate model development.

**Keywords:** numerical modeling framework, unified weather-climate modeling, GRIST

### 0 引言

随着地球系统数值预报模式的不断发展完善, 具有天气-气候一体化模拟能力的框架系统成为当前国际数值模拟的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。为发展高性能天气-气候模式, 国际上的模式团队在对模式程序设计和动力框架研发方面进行了诸多尝试。英国气象局致力于研发LFRic模式框架, 作为天气-气候模拟的统一模型框

架<sup>[4]</sup>。该框架采用GungHo动力内核, 在半结构化的立方球面网格上运行<sup>[5]</sup>。其基础软件设施的设计遵循面向对象指导原则, 以促进模式的模块化和对外部库的广泛使用。LFRic框架特别关注模式科学代码和并行代码间的“关注点分离”, 以提高其可移植性。德国气象局 (DWD) 和马普气象研究所 (MPI-M) 联合开发的二十面体非静力大气模式 (ICON) 框架, 旨在为数值天气预报和气候模拟建立统一的模式系统。其动力内核能够更好地应对陡峭山脉等地形<sup>[6]</sup>。欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 开发的集成预测系统 (IFS) 传统地使用谱转换动力内核, 近年也发展了面向全球高分辨率模拟的有限体积非静力动力内核, 以解决目前

收稿日期: 2022年12月4日; 修回日期: 2023年1月30日

第一作者: 王一鸣(1995—), Email: wangyiming\_sz@piesat.cn

通信作者: 张祎(1988—), Email: yizhang@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划(2019YFC1510003); 国家自然科学基金(41875135)

的谱模式在面向全球高分辨率非静力模拟时物理性能和计算性能无法兼得的问题<sup>[7]</sup>。美国国家环境预报中心(NCEP)的全球预报系统(GFS)近年来也将其动力内核升级为有限体积-立方球动力内核(FV<sup>3</sup>),以满足未来的全球/区域预报需求<sup>[8]</sup>。

我国模式研发团队对天气/气候模式的研发也有相当久的实践基础。例如,中国气象局自主研发的全球/区域同化预报系统(GRAPES),近年来在动力框架和物理过程等方面均取得了进展<sup>[9-10]</sup>。GRAPES基于半隐式-半拉格朗日动力框架分别发展了全球模式和区域模式版本。此外,一些区域业务中心也根据其所处地域特点进一步对本地化的区域模式进行了改进<sup>[11]</sup>。气候模式的发展方面,我国已有多个自主研发的模式参与了CMIP6耦合模式比较计划<sup>[12-21]</sup>;近年来各模式团队也在不断更新地球系统模式版本。未来,大气数值模式发展将更侧重于天气、气候模式的协同化发展。

在这一背景下,我国模式开发团队近年来自主设计并研发了基于非结构网格的全球-区域一体化预测系统(GRIST)。GRIST模式的发展历程体现了对天气预测、气候模拟这两类大气数值模拟功能一体化发展

思路的探索性实践。模式框架系统的主要设计思路可概括为:1)天气-气候一体化,最大限度地利用一套模式框架和动力内核构建天气和气候模型;2)在进行与气象业务相关的天气-气候预测应用时,最大限度地使用统一的模型构造,从而实现无缝隙天气-气候预测。

在模式系统的功能设计和组件实施过程中,GRIST保证了模式系统框架的通用性,使其能够广泛适用于各大计算机平台(通用英特尔平台、国产神威异构平台、国产飞腾平台等)。同时,软件设计方面采用了模块化、标准化的现代程序设计思想,确保了模式软件结构的独立性、通用性和灵活性。

本文从GRIST模式基本架构、框架系统和外延功能、模式运行和数据流、模式应用等方面介绍GRIST在程序设计中天气-气候一体化数值模拟功能的探索性实践。

## 1 基本架构

GRIST框架系统及其外延功能可分为4层(图1)。框架系统本身包括基础设施支撑层和模式运行层,外延功能包括前处理层和数据诊断层。

前处理层处理与计算环境和模式相关的外部数

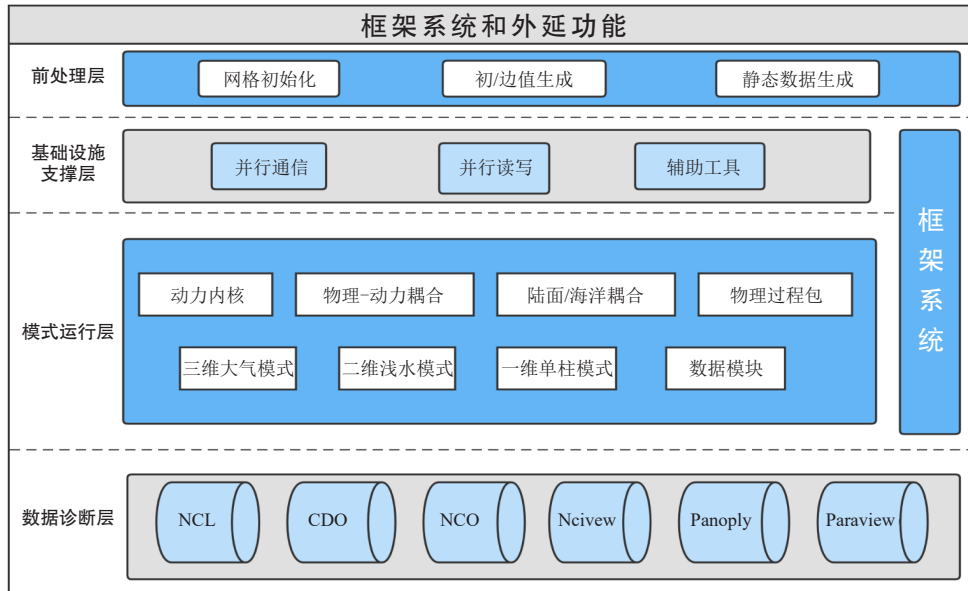


图1 GRIST框架系统和外延功能  
Fig. 1 Frame system and extended functions of GRIST

据,包括网格、初值文件、下边值文件、静态数据等。基础设施支撑层由并行通信、并行读写和辅助工具等组成,为模式运行层提供各类计算支撑功能,包括网格区域分解、并行通信和并行读写等。比如,模式运行层可以通过基础设施支撑层提供的读写套件,

获取前处理层产生的数据,从而进行各类科学计算,并控制模式数据输出。

模式运行层是GRIST执行科学计算功能(即模式的时间向前积分过程)的核心层。根据模式的功能性和空间维度,可分为一维单柱模式,二维浅水模式和

三维大气模式。其中，单柱模式和浅水模式均为简化模式。单柱模式主要负责测试GRIST的物理过程参数化套件。浅水模式负责测试GRIST的基础设施功能组件和水平离散算子。三维模式是用于开展实际预报的模型，包括动力内核、物理-动力耦合模块、物理过程包、数据模块、三维模式驱动、陆面/海洋模型等。这些模块的组合形成了完整的三维大气模式。

模式运行层的计算/预测结果通过数据输出传递到数据诊断层。数据诊断层可利用目前一些主流的数据处理工具对模式的非结构化网格数据进行后处理。这些工具包括CDO (<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>)、NCO (<http://nco.sourceforge.net/>)和NCL (<http://www.ncl.ucar.edu/>)等软件，可以对模式输出文件进行水平/垂直插值、文件合并、可视化等操作。此外，Ncview ([http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview\\_home\\_page.html](http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview_home_page.html))、Panoply (<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>)和Paraview (<https://www.paraview.org/>)等可视化软件也可以对输出文件直接进行快速可视化。

## 2 框架系统和外延功能

### 2.1 前处理层

模式在前处理层生成运行所需的网格文件、初/边值文件和静态数据。GRIST支持准均匀网格和变分辨率网格的灵活切换。默认采用基于正二十面体递归等分的方式生成目标分辨率的准均匀网格，分辨率可表示为 $GxBn$ 。 $x$ 表示基于正二十面体递归二等分的次数， $n$ 表示最后一次的 $n$ 等分数。比如，G5B3表示对正二十面体进行5次二等分后，再进行一次3等分。如果最后一步也是二等分，则可直接用下一级的 $Gx$ 表示。比如，G5B2等价于G6。

原始正二十面体产生的网格通过球面质心约束(SCVT)后代产生最终的网格文件。SCVT网格一般可基于Lloyd算法产生，在满足一定约束条件下进行迭代。相较于全球准均匀网格(密度函数为常数)，区域加密型网格的密度函数全球分布不均匀，需要更多的迭代次数才可满足收敛条件，使网格产生的时间代价大大增加。为此，GRIST也支持利用外部软件(如JIGSAW)和本地化网格生成器结合的方式产生网格文件：即通过外部文件产生点集，再通过网格生成器产生网格要素。这一功能大大提高了网格产生的灵活性。

初值文件包含用于初始化大气模式和陆面模式的变量。边值文件则主要包括海表温度和海冰密集度。初值和边值可通过模式提供的脚本产生。静态数据包括用于描述模式下垫面特征的关键静态信息，比如陆

地-海洋掩码、地形数据，陆表和植被类型等。其可通过静态数据软件包依托模式的网格文件生成。

### 2.2 基础设施支撑层

基础设施支撑层提供用于数据读写、并行通信和一些其他底层功能的接口。GRIST采用METIS工具对非结构网格进行全局网格区域划分。为提高缓存效率，模式采用高效的索引策略以提高计算速度。针对高分辨率或大规模并行仿真中读写效率较低的瓶颈，模式实现了一种群组并行读写的方法，测试证明，该方法具有较高的效率。灵活的网格分区和计算资源调度以及高效的信息通信极大地提升了模式的运行效率。辅助工具包含网格权重计算、球面计算几何工具、数学模块和异常处理模块等基础辅助功能。

### 2.3 模式运行层

模式运行层执行模式科学计算并负责输出结果。其中，三维模式是GRIST的主要模型组件，包括动力内核、物理-动力耦合、物理过程包、陆面/海洋耦合、数据模块和三维模式驱动层等多个组件。数据模块负责处理外部的数据读取。海洋/陆面耦合模块使模式具备和外部海洋/陆面模式交互的功能。三维模式驱动则负责模式整体的控制流和调度运行。下文将简要介绍动力内核、物理-动力耦合和物理过程包这三个主要模块。此外，还将简单介绍用于理想测试的单柱模式和浅水模式。

#### 2.3.1 动力内核

GRIST模式动力内核<sup>[22-23]</sup>求解原始方程，通过恢复垂直加速项可实现非静力模拟。垂向基于干质量的广义垂直坐标，并使用控制体积层平均离散化方式，可实现静力(HDC)和非静力(NDC)求解器的一体化积分。水平方向采用非结构网格，可以实现全球准均匀分辨率或变分辨率数值模拟<sup>[24]</sup>。水平离散化采用基于交错有限体积法的六边形C网格设计方案<sup>[25]</sup>。水平和垂直离散化采用了显式欧拉方法，对垂向压力项采用半隐式方案，以避免垂向声波带来的时间步长限制。动力内核配备了多种水平扩散算子(Smagorinsky扩散、四阶超粘性扩散等)用于模式动力优化调试。

#### 2.3.2 物理-动力耦合

GRIST模式的物理-动力耦合模块具有较强的通用性，可针对不同时空尺度的应用选择特定的物理过程包。模块内部耦合采用流程拆分形式。物理过程在动力模块结束后被唤起，基于动力更新后的状态，计算物理倾向并传回给动力内核进行物理倾向的积分。物理倾向可通过多种算子耦合到动力内核的积分过程，包括倾向算子和时间分离算子等。针对不同的物理参

数化包，可以采用不同的耦合方法，以适应不同应用需求。

模块建立了通用的物理-动力耦合 workflow，含有鲁棒和高效的动力-示踪物-物理时步分离功能。该功能下的动力积分、示踪物传输算子和物理过程可以采用不同的时间步长，大大提高了模式计算效率。其中，示踪物传输与动力积分的耦合遵循模式内部质量通量一致性原则。

### 2.3.3 物理过程包

GRIST目前有2个主要的物理过程包可作为持续研究和开发的基础。两个物理包间彼此独立，具有不同的物理驱动程序和数据结构。它们分别是面向长期气候模拟的PhysC和面向高分辨率天气预报的PhysW。

PhysC是一个面向长期气候模拟的物理过程包，该物理包侧重于长期积分背景下的能量和水物质平衡，可用于长达世纪尺度的模式应用。其物理参数化方案可选择：Zhang-McFarlane<sup>[26-27]</sup>或Double-Plume对流方案<sup>[28]</sup>、华盛顿大学湿边界层湍流方案<sup>[29-30]</sup>、Park宏观云凝结方案<sup>[31]</sup>或GaussPDF诊断云凝结方案<sup>[32]</sup>、Morrison-Gettleman双参微物理方案<sup>[33]</sup>或简冰微物理方案<sup>[34]</sup>。短波和长波辐射由RRTMG方案计算<sup>[35-36]</sup>。

PhysW是面向天气-气候预报应用的物理包，主要侧重于对大气过程层面的精准模拟，特别是高分辨率（千米尺度）。其包括六种物质（水汽、云水、云冰、雨、雪和霰）的云微物理方案<sup>[37]</sup>、Tiedtke-Bechtold积云对流方案<sup>[38-39]</sup>、延世大学（YSU）行星边界层方案<sup>[40]</sup>和RRTMG长短波辐射方案<sup>[35-36]</sup>等。

### 2.3.4 浅水模式

浅水模式可以看作对三维干绝热无摩擦大气的整层近似，物理上描述了静力、不可压缩的固定密度流体。数学层面，浅水模式涵盖了三维大气模式水平离散的主要数值算子，因此通常被用作开发三维大气模

式的初始测试原型。在GRIST中，浅水模式<sup>[25, 41]</sup>的功能包括：1) 测试和开发模式的水平数值算子性能；2) 测试和检验模式水平并行通信和读写功能；3) 模式跨平台移植正确性的检验标准。

### 2.3.5 单柱模式

单柱模式有助于孤立地检验模式物理包的性能，并在无三维物理-动力交互的条件下评估其模拟行为。单柱模式能够与PhysC和PhysW物理包进行耦合，可以被看作是简化的动力模型和物理过程包的组合桥梁。GRIST单柱模式可用于物理参数化开发、调优测试和性能分析。它也是评估特定物理过程不同实现方案的有效计算工具。

## 2.4 数据诊断层

模式中的物理量经过积分计算输出预报结果。在诊断层，利用文件处理工具将预报结果处理成用户需要的格式，后处理包括对非结构网格的水平/垂直插值以及时间维度合并等。此外，诊断层也支持利用绘图软件（如Panoply、Paraview等）对输出结果进行可视化。

## 3 模式运行和数据流

GRIST模式的运行流程和数据流相对应（图2）。首先模式在前处理层对数据进行初始化，通过基础设施层提供的并行读写工具，在模式运行层读取数据并进行科学计算，最终输出结果。输出文件在诊断层进行后处理和可视化。

### 3.1 输入流

前文提到，外部数据的初始化包括制作海表温度/海冰密集度文件、初值文件和静态数据。其中，初值文件和静态数据仅在模式的初始化过程中读取一次。而海温/海冰数据根据模式积分类型，可采用不同模态读取。

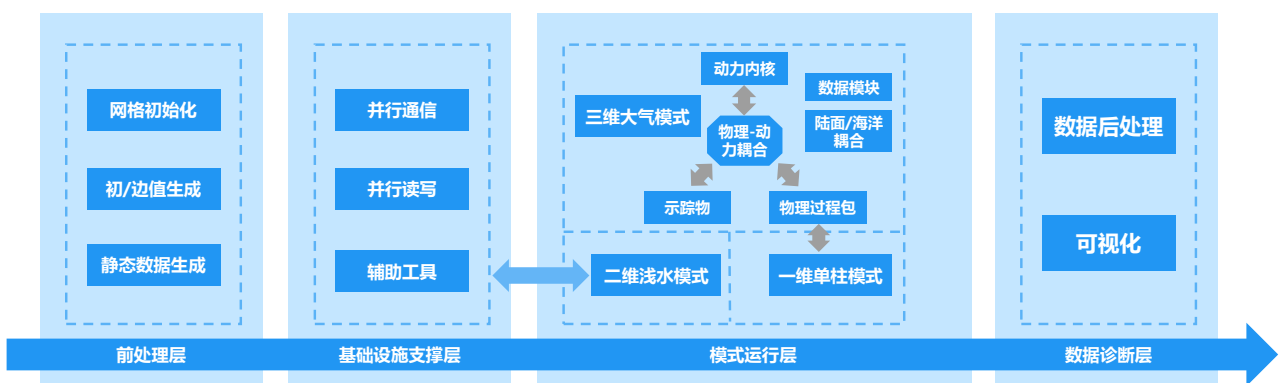


图2 GRIST模式运行流程  
Fig. 2 Operation process of GRIST

GRIST的初值可基于再分析或预报模式分析场产生, 比如ERA5数据或NCEP-GFS数据。产生初始的过程包括数据格式转换, 变量提取、整合, 网格插值等。GRIST提供了初始化处理脚本, 下载对应数据后可完成初始化。用户也可参照初始化脚本选取其它资料集进行初始化。

海表温度和海冰密集度是单独大气模式运行时的下边界条件。根据不同的模式积分形式, 模式可支持三种类型的下边界条件使用方式, 下面以海表温度为例进行说明。

1) 历史模态。该模态遵循经典大气模式比较计划试验 (AMIP) 规定的逐月海温强迫模式。每个文件包含一个整数十年及相邻的两个月份数据 (例如, 196912—198001)。由于一般AMIP试验的海温为“月中时刻”数据, 在使用该模态时, 模式会通过线性插值, 得到每一天的海温强迫。该模态可以用于开展标准类型的AMIP试验。

2) 循环模态。海表温度文件为年循环的12个月数据。该模态主要用于进行模式自由气候积分, 从而检验模式的基本气候态。此外, 该模态也可用于开展海温固定条件下的天气预报型试验, 仅需将12个海温数据设为同一数值即可。

3) 逐日模态。该模态的海温数据为逐日, 每个文件涵盖一日数据。运行时, GRIST模式会逐日读取海温数据, 并用于强迫大气。此外, 该模态也可以广义化为以任意时间间隔读取文件。

除上述给定下边界条件外, GRIST也允许混合层海洋模型对海温进行计算, 而无须给定海温强迫。在大气-海洋耦合中, 也可以通过动力海洋模式进行海温计算。

### 3.2 输出流

GRIST模式的输出为基于非结构网格分布的文件数据。非结构网格数据将二维空间的格点信息存储至一维数组。模式的输出文件因此根据不同维度, 分为一维文件、二维文件和三维文件。一维文件存放降水、2 m气温、500 hPa高度场等二维单层空间变量。二维文件存放大气风场、温度场等三维空间变量。三维文件目前主要存放包含不同示踪物成分的四维变量, 即在垂直层的基础上增加了“类型”这一维度。

输出文件根据其应用类型, 可分为三种。

1) 月平均诊断输出 (h0)。该类型下每月输出一次月平均数据文件。

2) 根据自定义时间间隔的输出 (h1)。该类型下根据用户自定义的输出文件时间间隔进行输出。最短

时间间隔为模式运行时间步长。

3) 重启动文件。该类型如果开启, 将产生用于模式重启动计算所需的数据。根据重启动数据的来源, 主要分为大气动力文件 (Dyn), 大气物理文件 (Phy) 和陆面文件 (Lnd)。

模式输出结果在诊断层进行后处理和可视化。非结构网格数据后处理可通过CDO/NCO等处理软件进行。GRIST提供了一些后处理脚本, 包括提取变量, 水平插值和垂直插值等。例如水平插值可利用CDO中提供的remapdis或者remapycon函数完成。除后处理外, GRIST输出文件格式也支持多种绘图软件进行可视化。

## 4 模式应用

依托上述模式的系统功能设计, GRIST目前已有较多的数值模拟应用。除了用于理想测试的单柱模拟、浅水模拟、单独动力框架模拟外, GRIST主要提供了两个模式原型, 分别面向典型的天气预测和气候模拟应用。

中尺度天气-气候预测模式配置 (AMIPW)。该配置采用PhysW物理包, 主要用于开展与业务预测时间尺度相关的天气预报乃至气候预测。该配置已被用于开展最高分辨率可达全球均匀3~5 km的超高分辨率风暴解析模拟试验<sup>[42]</sup>, 相关数据已提交国际风暴解析尺度模式比较计划 (<https://www.esiwace.eu/services/dyiamond-initiative/services-dyiamond-winter>)。基于AMIPW模式配置, 前人也开展了百千米尺度的AMIP型气候积分试验, 并重点分析了模式气候平均态和对东亚小时尺度降水特征的模拟, 结果表明模式对东亚降水及日变化特征具有较好的模拟性能<sup>[43]</sup>。AMIPW也被用于开展夏季气候回测试验。模式能较好地模拟出西北太平洋及中国东部地区季节内降水变化及其演变过程, 且能准确地再现雨带和副热带高压脊线的位置及其向北推进过程, 并能基本抓住大气季节内振荡 (ISO) 经向北传特征<sup>[44]</sup>。

典型气候模式配置 (AMIPC)。传统类型的长期气候模拟对模式的能量和水物质平衡有较高的要求。全球模式在此类应用中, 需要较好保持大气顶和地表的能量通量平衡和水物质平衡。针对该应用领域, 开发人员成功地将本文2.3.3提到的全球气候模拟的物理过程包PhysC耦合到GRIST框架<sup>[28]</sup>。长期气候积分结果显示, AMIPC配置下的GRIST模式能较好地模拟全球降水、辐射强迫的气候态特征, 并且在百千米分辨率下也能够较好地再现MJO的传播。研究还进一步改善了该配置对东亚降水日变化的模拟性能。

## 5 结语

本文简要介绍了GRIST天气-气候一体化模式的系统框架功能设计及其初步应用案例。GRIST模式的基本框架结构设计, 兼顾了目前天气和气候模拟两大类大气数值模拟应用的需求特点, 提供了强大的底层技术支持能力和优化的顶层组织管理能力。模式框架采用灵活的模块化结构设计, 确保了模式开发的可持续性、可重组性、可拓展性。该框架系统设计已得到国家发明专利认证(ZL201810226798.X)。

针对未来数值预报对全球高分辨率千米尺度模式的需求, 研发团队将进一步提高模式的物理性能、计算性能、代码鲁棒性及逻辑结构, 以更好地适应实际业务性的数值天气预报产业。

### 参考文献

[1] Yu R C, Zhang Y, Wang J J, et al. Recent progress in numerical atmospheric modeling in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(9): 938-960.

[2] Giorgetta M A, Brokopf R, Crueger T, et al. ICON-A, the atmosphere component of the ICON Earth system model: I. Model description[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(7): 1613-1637.

[3] Brown A, Milton S, Cullen M, et al. Unified modeling and prediction of weather and climate: a 25-year journey[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1865-1877.

[4] Adams S V, Ford R W, Hambley M, et al. LFRic: meeting the challenges of scalability and performance portability in weather and climate models[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2019, 132: 383-396.

[5] Melvin T, Benacchio T, Shipway B, et al. A mixed finite-element, finite-volume, semi-implicit discretization for atmospheric dynamics: cartesian geometry[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 145(724): 2835-2853.

[6] Zängl G, Reinert D, Ripodas P, et al. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(687): 563-79.

[7] Kühnlein C, Deconinck W, Klein R, et al. FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(2): 651-676.

[8] Harris L, Chen X, Zhou L J, et al. The nonhydrostatic solver of the GFDL finite-volume cubed-sphere dynamical core[R]. Princeton: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2020.

[9] 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES\_GFS全球中期预报系统的研发和业务化[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 1-10.

[10] 万子为, 王建捷, 黄丽萍, 等. GRAPES-MESO模式浅对流参数化的改进与试验[J]. *气象学报*, 2015, 73(6): 1066-1079.

[11] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. *气象学报*, 2018, 76(4): 493-510.

[12] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 533-539.

[13] 唐彦丽, 俞永强, 李立娟, 等. FGOALS-g模式及其参与CMIP6的方案[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 551-557.

[14] 宋振亚, 鲍颖, 乔方利. FIO-ESM v2.0模式及其参与CMIP6的方案[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 558-565.

[15] 容新尧, 李建, 陈昊明, 等. CAMS-CSM模式及其参与CMIP6的方案[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 540-544.

[16] 林岩奎, 黄小猛, 梁逸爽, 等. 清华大学CI-ESM模式及其参与CMIP6的方案[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 545-550.

[17] 曹剑, 马利斌, 李娟, 等. NUIST-ESM模式及其参与CMIP6的方案[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 566-570.

[18] Li J X, Bao Q, Liu Y M, et al. Evaluation of FAMIL2 in simulating

the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(4): 1117-1136.

[19] He B, Bao Q, Wang X C, et al. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(8): 771-778.

[20] Bao Q, Wu X F, Li J X, et al. Outlook for El Niño and the Indian Ocean dipole in autumn-winter 2018-2019[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(1): 73-78.

[21] Zhang H, Zhang M H, Zeng Q C. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: interpretation of differences between dry models and moist models[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1558-1576.

[22] Zhang Y, Li J, Yu R C, et al. A multiscale dynamical model in a dry-mass coordinate for weather and climate modeling: moist dynamics and its coupling to physics[J]. *Monthly Weather Review*, 2020, 148(7): 2671-2699.

[23] Zhang Y, Li J, Yu R C, et al. A layer-averaged nonhydrostatic dynamical framework on an unstructured mesh for global and regional atmospheric modeling: model description, baseline evaluation, and sensitivity exploration[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(6): 1685-1714.

[24] Zhou Y H, Zhang Y, Li J, et al. Configuration and evaluation of a global unstructured mesh atmospheric model (GRIST-A20.9) based on the variable-resolution approach[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(12): 6325-6348.

[25] Zhang Y. Extending high-order flux operators on spherical icosahedral grids and their applications in the framework of a shallow water model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(1): 145-164.

[26] Zhang G J, Mcfarlane N A. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model[J]. *Atmosphere-Ocean*, 1995, 33(3): 407-446.

[27] Neale R B, Richter J H, Jochum M. The impact of convection on ENSO: from a delayed oscillator to a series of events[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(22): 5904-5924.

[28] Li X H, Zhang Y, Peng X D, et al. Improved climate simulation by using a double-plume convection scheme in a global model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(11): e2021JD036069.

[29] Bretherton C S, Park S. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(12): 3422-3448.

[30] Park S, Bretherton C S. The university of washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the community atmosphere model[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(12): 3449-3469.

[31] Park S, Bretherton C S, Rasch P J. Integrating cloud processes in the community atmosphere model, version 5[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(18): 6821-6856.

[32] Qin Y, Lin Y L, Xu S M, et al. A diagnostic PDF cloud scheme to improve subtropical low clouds in NCAR community atmosphere model (CAM5)[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(2): 320-341.

[33] Morrison H, Gettelman A. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part I: description and numerical tests[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(15): 3642-3659.

[34] Li J B, Peng X D, Li X H, et al. Evaluation of a flexible single ice microphysics and a gaussian probability-density-function macrophysics scheme in a single column model[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(5): 638.

[35] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13103.

(下转40页)

来提升防雷减灾能力。首先,在气象台站基础设施建设、区域开发等重大规划中应考虑雷电灾害的影响。针对精密仪器设备的选址,应重点关注信息系统的雷电防护,雷灾多发区域可提升防护等级;针对人口密集或GDP高的区域,应优先配置完善的防雷系统,可布设雷电监测设备开展定点预警。其次,建议各行业采取完善的雷电防护措施。农、林、牧、渔业应以保障人身安全为主,多关注雷电预警信息,在雷电来临时避免户外作业;信息传输、软件和信息技术服务业应重点关注设备的防护。建议各行业安装符合规范要求的防雷装置,建立雷电预警信息接收和响应机制,并将雷电灾害科普知识纳入各行业安全教育内容,提升公众防雷避险能力。

### 参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [2] López R E, Holle R L. Changes in the number of lightning deaths in the United States during the Twentieth Century[J]. Journal of Climate, 1998, 11(8): 2070-2077.
- [3] Coates L, Blong R, Siciliano F. Lightning fatalities in Australia, 1824-1991[J]. Natural Hazards, 1993, 8(3): 217-233.
- [4] Singh O, Singh J. Lightning fatalities over India: 1979-2011[J]. Meteorological Applications, 2015, 22(4): 770-778.
- [5] Hoque M A A, Billah M, Pradhan B. Spatio-temporal and demographic distribution of lightning related casualties in northeastern part of Bangladesh[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: 101197.
- [6] 马明, 吕伟涛, 张义军, 等. 1997-2006年我国雷电灾情特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 393-400.
- [7] 保尔汗江·买买提. 2000-2009年新疆雷电灾情分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 301-305.
- [8] 周方媛, 肖稳安. 安徽省近10年的雷电灾害分布特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1908-1911.
- [9] 刘晓东, 李松如, 冯旭宇, 等. 内蒙古雷灾特征及灾情的灰色关联评估[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 251-255.
- [10] 黄小彦, 王学良, 李慧. 2000-2006年湖北省雷电灾害时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 73-77.
- [11] 金晨路, 肖稳安, 王学良. 湖北省雷电灾害易损性分析与区划[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(3): 272-276.
- [12] 朱传林, 王学良, 贺姍, 等. 基于层次模型及权重分析的湖北省雷电灾害易损度区划[J]. 中国农学通报, 2015, 31(8): 206-211.
- [13] Holle R L, López R E, Navarro B C. Deaths, injuries, and damages from lightning in the United States in the 1890s in comparison with the 1990s[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2005, 44(10): 1563-1573.
- [14] Elsom D M. Deaths and injuries caused by lightning in the United Kingdom: analyses of two databases[J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1-4): 325-334.
- [15] 田德宝, 冯瑜骅, 张雪慧, 等. 2012-2017年全国雷电灾害事故统计分析[J]. 科技通报, 2020, 36(5): 42-47.
- [16] 吴孟恒, 田艳婷, 崔海华, 等. 2003-2008年河北省雷电灾害特征统计分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 21-25.
- [17] 彭相瑜, 陈笑娟, 陈小雷, 等. 河北省雷电灾害事件特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 100-104.
- [18] 夏雷, 金勇根, 段和平, 等. 江西省雷灾灾情和闪电活动时空分布特征及灾情等级划分研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 252-260.
- [19] 顾媛, 徐震宇, 崔雪东. 1998-2020年浙江省雷电灾害特征分析[J]. 科技通报, 2021, 37(7): 38-43.
- [20] Tanaka M. Lightning hazards in Japan[J]. Electrical Engineering, 1951, 70(12): 1065-1067.
- [21] Montanya J, Fabró F, van der Velde O, et al. Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(6): 1465-1472.
- [22] Plumer J A, Robb J D. The direct effects of lightning on aircraft[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, EMC-24(2): 158-172.
- [23] Matos W L N, Leal A F R, Ferreira E R, et al. Lightning fatalities in the livestock industry in the Brazilian amazon region (2012-2019) [C]//Proceedings of 2019 International Symposium on Lightning Protection. Sao Paulo: IEEE, 2019: 1-6.
- [24] 刘兆旭, 刘晶, 范子昂. 2005-2020年新疆雷电灾害特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1402-1414.
- [25] 蔡永祥, 罗少辉, 唐文婷, 等. 1995-2020年青海省雷电灾害时空分布及其灾害特征分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 92-95, 119.
- [26] 余田野, 王学良, 袁海锋, 等. 基于投影寻踪方法的湖北省雷电灾害风险区划[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 291-296.
- [27] 中国气象局. 雷电灾情统计规范(QX/T 191-2013)[S]. 2013.
- [28] 中国气象局. 雷电灾害调查技术规范(QX/T 103-2017)[S]. 2017.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)[S]. 2017.
- [30] 贺姍, 肖稳安, 王学良, 等. 雷电强度客观分级方法探讨[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1291-1296.
- [31] 张旋. 湖北省产业结构分析与优化研究[J]. 科技和产业, 2017, 17(8): 26-30, 63.

(编辑: 郑秋红)

(上接20页)

- [36] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [37] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [38] Bechtold P, Semane N, Lopez P, et al. Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(2): 734-753.
- [39] Zhang C X, Wang Y Q. Projected future changes of tropical cyclone activity over the western north and south Pacific in a 20-km-mesh regional climate model[J]. Journal of Climate, 2017, 30(15): 5923-5941.
- [40] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [41] Wang L, Zhang Y, Li J, et al. Understanding the performance of an unstructured-mesh global shallow water model on kinetic energy spectra and nonlinear vorticity dynamics[J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(6): 1075-1097.
- [42] Zhang Y, Li X H, Liu Z, et al. Resolution sensitivity of the GRIST nonhydrostatic model from 120 to 5 km (3.75 km) during the DYAMOND winter[J]. Earth and Space Science, 2022, 9(9): e2022EA002401.
- [43] Zhang Y, Yu R C, Li J, et al. AMIP simulations of a global model for unified weather-climate forecast: understanding precipitation characteristics and sensitivity over east Asia[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2021, 13(11): e2021MS002592.
- [44] 陈苏阳, 张祎, 周逸辉, 等. GRIST模式夏季气候回报试验中东亚降水季节内特征的评估[J]. 气象学报, 2023, 81(2): 269-285.

(编辑: 卢冰)