

# 高分辨率全球气候模式大气物理过程参数化研发和应用

◆ 张广俊<sup>1</sup> 汪名怀<sup>2</sup> 陆春松<sup>3</sup> 包庆<sup>4</sup> 王勇<sup>1</sup>

1. 清华大学地球系统科学系,北京 100084;
2. 南京大学大气科学学院,南京 210023;
3. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044;
4. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室,北京 100029

**摘要** 本项研究将充分利用各种观测数据、再分析数据以及针对不同尺度的模式,包括大涡模式、云分辨模式、单柱模式以及全耦合气候系统模式,借助对这些数据和模拟结果的深入和细致分析,加深对宏观云物理、云微物理、对流以及它们与边界层过程和气溶胶之间相互作用的认识,设计和发展适用于高分辨率大气环流模式的先进物理过程参数化方案,利用一系列的诊断工具来评估和进一步改进参数化方案,以降低模式中长期存在的重要模式偏差,推动我国大气环流模式的发展。

**关键词:** 高分辨率全球气候模式 大气物理过程参数化 内在物理一致性 分辨率自适应

**中图分类号:** P401 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2412(2017)05-0040-05

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-2412.2017.05.008

## 1 研究背景

在全球变暖的背景下,地球气候系统的变化影响着人类的生存和发展,并成为全球关注的重大政治、经济和外交问题。妥善应对全球变化,离不开全球气候模式(地球系统模式)对气候现象的准确模

收稿日期: 2017-08-15 修回日期: 2017-09-15

研究资助: 国家重点研发计划“全球变化及应对”专项项目(2017YFA0604000)。

联系作者: 张广俊,教授, gjzhang@mail.tsinghua.edu.cn。

拟,以及对未来气候变化的正确预估(即:次季节、季节、年际以及年代际预测)。因此,全球气候模式的发展直接影响着我国气候变化政策的制定及政府的外交决策等,进一步影响着国民经济的发展。然而,由于对模式中物理过程,特别是大气环流分量模式中物理过程的描述不够准确,地球系统模式对未来气候情景预估具有很大不确定性(IPCC 2013)。近期研究表明,不同气候模式的平衡气候敏感度(二氧化碳加倍造成的全球变暖幅度)差异和模式中的云辐射强迫有密切关系(Su et al., 2014)。热带地区大气对流对空气的混合也和气候敏感度显著相关(Sherwood et al., 2013)。Stevens and Bony (2013)认为对气候模式中水物质(即云水、雨水等)和大气环流的相互作用的深入理解和更准确的参数化对降低气候敏感度的不确定性极为重要。Bony et al. (2015)提出注重解决一些包括云反馈在气候变化中的作用、有组织的对流以及决定赤道辐合带(ITCZ)位置、强度和变率的因素等关键的科学问题将能极大地促进未来全球以及区域气候变化的研究进展。大洋东岸的洋面上海洋性边界层低云在云反馈中起着重要作用,而这些区域的低云主要是受边界层相关过程所驱动。全球气候模式是地球系统模式的重要组成部分,目前世界上全球气候模式中海洋边界层云量模拟都偏低。因此,为了提高全球气候模式的模拟能力,降低对未来气候变化预估的不确定性,迫切需要对气候模式中大气物理过程参数化进行系统性研发和改进。

另一方面,随着计算能力的提高,高分辨率大气环流模式的研制和应用正成为目前全球气候模式发展的趋势。国外主流模式发展中心[欧洲中期数值预报中心(ECMWF)、日本、美国地球流体动力实验室(GFDL)、美国国家大气研究中心(NCAR)等]的大气环流模式最高分辨率已达到10 km左

右。随着模式分辨率的提高,对模式物理过程参数化方案提出了更高的要求,这就需要对模式中的物理过程参数化方案进行改进,以适用于高分辨率大气模式。一个亟待解决的重要科学问题是目前物理过程参数化方案都是针对低分辨率( $\sim 200$  km)模式设计的,它们并不适用于高分辨率气候模式。以积云对流参数化方案为例,在高分辨率大气环流模式中,传统对流参数化方案的一些基本假设不再成立(Arakawa and Wu 2013; Xiao et al., 2015)。比如,由于模式分辨率的提高,次网格对流的效应不能再看成是对流集合平均的结果,而需要考虑次网格对流的随机性(Plant and Craig 2008)。在云物理参数化方面,国外大多数大气环流模式采用双参数预报云方案,预报云中水凝物的质量浓度和数浓度。对大气边界层过程的参数化研究,最近几年针对边界层-浅对流-边界层层状云-宏观云量这一系列紧密相连的物理过程不再是分别单独设计互不相关的参数化方案,而是设计一个统一的参数化方案(Park 2014)。

国际上许多气候模式发展团队正在积极地改进气候模式中的各种物理过程来降低未来气候预估的不确定性。我国在气候系统模式物理过程参数化方案发展方面近10年来得到了快速发展,然而,在物理过程参数化方案(比如对流、云、云-气溶胶-辐射相互作用以及边界层过程等)整体水平上与国际上先进的模式相比依然存在较大差距。本项研究将针对目前国内外主流大气物理参数化方案的不足,设计和发展一套先进的物理过程参数化方案,包括对流、云、边界层及其它它们与气溶胶的相互作用等,以降低大气环流模式中长期存在的重要模式偏差,推动我国地球系统模式大气物理过程参数化方案的发展,提升我国在国际上气候变化领域的地位。

## 2 研究目标及内容

当前国内外气候模式中心都在开发高分辨率全球气候模式。尽管提高模式分辨率能解决之前模式存在的一部分问题,但是至今模式仍普遍存在一系列主要系统偏差及与之相应的亟待解决的关键科学问题。不同模式预估的在二氧化碳加倍情况下地球增温的幅度差别很大,从2度到将近5度不等,研究表明不同模式增温幅度的差别与模式的云辐射和赤道辐合带的模拟误差密切相关;在地球的水循环和

水资源方面,很多研究表明在全球变暖的背景下,极端降水频繁发生,干的地区将越干,湿的地区将越湿,区域气候变化的预估将取决于模式对当前气候条件下降水分布和强度的模拟能力。然而,当前世界上大气环流模式对降水分布以及强度的模拟存在明显的误差,比如与观测相比模式模拟出现虚假的双赤道辐合带,模式中毛毛雨发生太频繁而极端降水发生频率太低等;对流云的动力学、热力学特征以及微物理特征相互影响和联系没有被很好地描述,这直接导致当前大气环流模式无法模拟气溶胶对深对流发展和降水过程的影响;因此,如何通过改进深对流及与其相关的微物理过程的参数化,降低大气环流模式中存在的明显降水偏差,包括降水强度、分布和变率等方面的偏差是一个极具挑战性的关键科学问题。

边界层湍流、低云及浅对流的参数化对全球能量平衡、水循环、云反馈和气溶胶气候效应等关键科学问题的回答至关重要。目前大气环流模式在模拟海洋边界层云的短波辐射强迫方面存在巨大的偏差,而这些偏差主要是来自边界层湍流等过程的影响;另一方面,边界层湍流和浅对流过程也为深对流发展提供水汽及动力条件,影响着深对流的发展。目前大气环流模式在模拟边界层湍流、浅对流和深对流这样一个连续演化过程的能力明显不足。如何有效的模拟这一过程一直是大气模式物理参数化发展的难点。因此如何通过完善边界层湍流、海洋性低云、浅对流、云宏观及微物理过程和云量参数化方案,提高大气环流模式中云及辐射的模拟能力,降低云的辐射强迫偏差也是一个关键科学问题。

在大多数模式参数化方案中,不同物理过程一般都是通过不同的参数化方案来处理的。但考虑到这些过程之间是紧密联系在一起,这样人为分开处理常常造成不同过程之间的不一致性,影响模拟结果。最近几年发展的基于高级湍流闭合的云方案 Cloud Layers Unified By Binormals (CLUBB, Golaz et al., 2002) 通过引进次网格垂直速度的三阶量,结合预报的不同热力动力量之间的概率密度函数,提供了一个对于边界层湍流、低云及浅对流的一体化方案,推进了对边界层湍流、浅对流、大尺度层云及深对流的模拟。但这一方案目前还存在一些重要缺陷。前期的工作显示这一方案在层积云的模拟上还有不足,并在对层云和浅对流的区分上有待进一步提高,这一方案对气溶胶-云相互作用的模拟,特别是

云微物理-动力学-气溶胶的耦合上模拟有待进一步检验和加强。因此,针对大气中不同物理过程(边界层湍流、大尺度层状云、浅对流及深对流),如何使各参数化方案之间在物理上相互协调,并使参数化方案适用于未来高分辨率大气环流模式是又一个关键科学问题。

针对以上科学问题,本项工作旨在发展和改进地球系统模式中关键大气物理过程的参数化方案,包括边界层湍流、深浅对流、云的宏观及微观物理等过程,并使其适用于未来高分辨率大气环流模式,以降低模式中长期存在的重要模式偏差。具体目标如下:

(1) 改进和发展一个能够对边界层湍流、低云及浅对流提供一体化处理的高阶湍流云方案,降低模式中云及云辐射强迫模拟的偏差。

(2) 发展一个先进的积云对流参数化方案,包含对流过程的随机性、对流微物理等,同时使其具备模式分辨率自适应能力和灵活性,适用于高分辨率大气环流模式,减少模式降水强度及变率方面的模

拟偏差。

(3) 发展一个三参数云微物理参数化方案,开发新的夹卷混合机制及水凝物下落末速度参数化方案等,提高模式对云及其辐射效应的模拟性能。

(4) 提高不同参数化方案之间的内在物理一致性,并借助模式诊断工具评估新参数化方案的模拟性能,以降低大气环流模式在海洋低云、降水强度及变率、赤道辐合带、大气中从季节内到年际变率等方面长期存在的模拟偏差。

本项研究将充分利用各种观测数据、再分析资料以及针对不同尺度的各类模式,包括大涡模式、云分辨模式、单柱模式、大气环流模式及全耦合气候模式,借助对这些数据和模拟结果的分析,加深对宏观云物理、云微物理、对流以及它们与边界层过程和辐射相互作用的认识,从而改进目前的参数化方案或发展新的参数化方案。这些参数化方案将在单柱模式、大气环流模式及耦合气候模式中,借助一系列诊断工具和我国自主模式比较计划试验来进行评估并进一步改进(图1)。

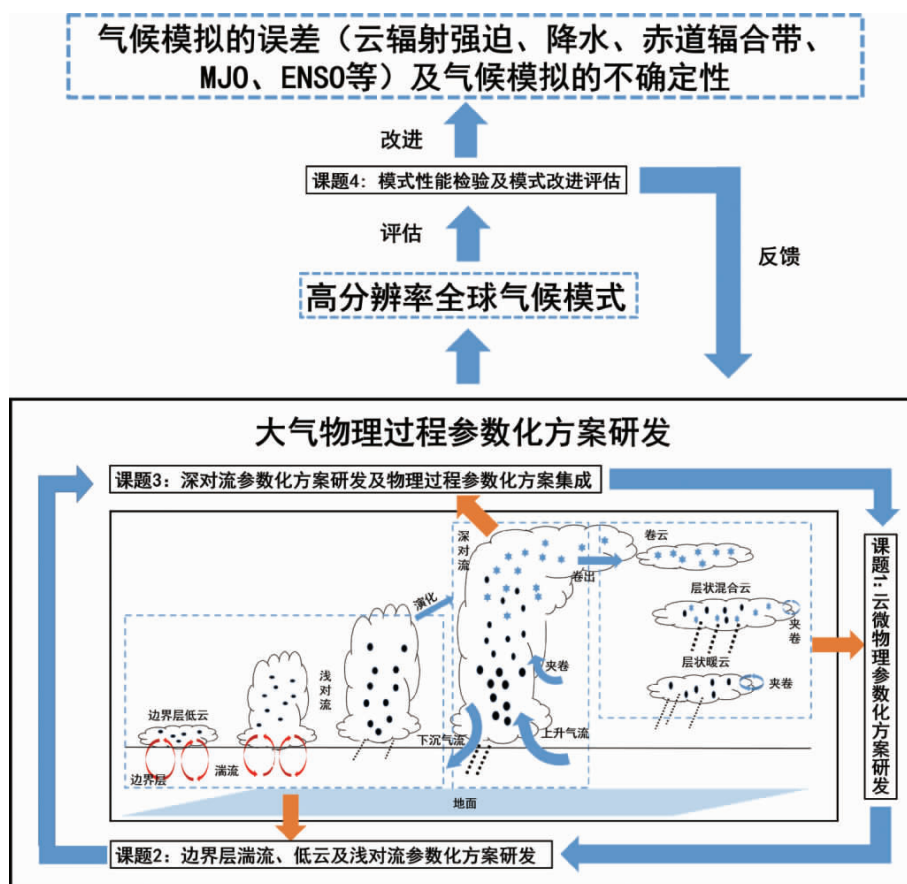


图1 研究内容示意图

具体包括: ① 利用观测数据、再分析资料和已经发展较完善的针对不同尺度过程的模式(包括大涡模式、云分辨模式、单柱模式、大气环流模式及全耦合地球系统模式), 探究边界层的发展、云的形成、浅对流向深对流的过渡以及深对流触发、形成、组织和演变过程。从而发展一套有着内在物理一致性的参数化方案。② 发展一个先进的三参数云微物理参数化方案, 改进夹卷混合机制的参数化方案, 研究降水粒子下落末速度对云的发展演变的影响。③ 发展一套对模式分辨率自适应的积云对流参数化方案, 考虑对流的随机性, 更好地描述大气环流模式分辨率越高, 对流随机性越明显的现象; 发展和改进次网格对流的夹卷、触发和其云体上升和下沉气流中的云微物理过程参数化。④ 发展和改进一个对边界层湍流、浅对流、大尺度云提供一体化处理的高阶湍流闭合云方案, 加入边界层湍流和大气辐射的在次网格上的耦合, 改进参数化中对层积云和浅对流的区分能力; 更好地处理边界层湍流、浅对流和低云等与气溶胶之间的耦合; 减少地球系统模式中云辐射强迫偏差, 提高对气溶胶间接气候效应的估计。⑤ 新的参数化方案将应用到单柱模式、大气模式以及全耦合气候模式中, 从而改进我国高分辨率全球气候模式对降水分布、强度、变率、ITCZ、季风、MJO、ENSO 以及热带气旋等方面的模拟能力。

由图 1 可见, 大气中与云相关的各物理过程存在着密切的联系, 即大气边界层的湍流影响边界层低云和浅对流, 当浅对流发展到一定程度后演变成深对流, 深对流的卷出又影响着高层的卷云/层状云, 同时, 暖云的微物理过程又包括了边界层低云中的微物理过程。因此, 本研究在高分辨率全球气候模式中发展一套具有内在物理一致性的大气物理过程参数化方案, 并应用到全球气候模式中, 评估模式对气候模拟误差和气候模拟不确定性, 然后进一步改进参数化方案。

### 3 预期成果和意义

针对目前全球气候模式的不足, 本研究将发展出一套具有内在物理一致性、适用于高分辨率大气环流模式的物理过程参数化方案, 包括三参数云微物理方案, 考虑对流的随机性和微物理过程, 并具备分辨率自适应能力的对流参数化方案, 改进的高阶湍流云参数化方案, 实现边界层湍流和大气辐射

在次网格上的耦合, 并将边界层湍流和浅对流参数化一体化, 将深对流的发生、发展与浅对流联系起来, 并应用到全球高分辨大气环流模式中; 在一些关键指标达到国际先进水平, 如赤道辐合带、厄尔尼诺、季节内振荡和降水的时空分布等, 从而推动我国气候模式的发展和改进其模拟能力。

进入 21 世纪以来, 气候变化受到了越来越广泛的关注。气候变化可能对环境、生态以及经济和社会造成重大影响。基于这种认识, 各国政府倾向于采取有预见性的科学规划, 力争对未来气候变化做出积极应对。只有对未来气候变化做出科学、准确的预测, 才能为国家应对气候变化重要决策提供科学依据。因此本研究在大气物理参数化方面的改进和发展将有力推动我国自主地球系统模式的发展, 为国家应对气候变化提供重要的支撑, 提升我国在国际上气候变化领域的地位。

同时, 我国是世界上气象灾害频发的国家之一, 每年由于气象灾害造成的经济损失约占国内生产总值的 1%~3%, 受重大气象灾害影响的人口达 4 亿人次。对云、对流、降水等物理过程相互作用机理的认识及其在天气预报模式中描述的不足是导致对我国极端降水等灾害性天气气候事件预报预测能力偏低的主要原因之一。因此, 针对云、气溶胶、降水等开展专门研究, 发展物理过程参数化, 既是当前全球变化影响与人类适应以及可持续发展的研究热点之一, 又是国家发展与安全战略决策的重要需求, 也是国家中长期科学和技术发展纲要中的重大前沿课题。这不但能够加深对气候变化机理的认识, 而且有利于深入理解我国旱涝等重大气象、气候灾害的成因, 提高我国天气气候的预测能力, 为国家防灾减灾政策的制定提供科学依据。

### 4 结论

地球系统模式是预估未来气候变化的重要工具, 然而由于模式对大气中云、对流等物理过程的描述不够准确, 导致对未来气候变化的预估存在很大不确定性。因此急需系统性地研发大气环流模式物理过程参数化。本研究针对这一重要科学问题, 发展一套具有内在物理一致性、适用于高分辨率大气环流模式的物理过程参数化方案, 包括三参数云微物理方案, 考虑对流的随机性和微物理过程, 并具备分辨率自适应能力的对流参数

化方案,改进的高阶湍流云参数化方案。这套参数化方案将会进一步应用到全球高分辨大气环流模式中,使得所发展模式在一些关键指标达到国际先进水平,从而推动我国气候系统模式的发展和改进其模拟能力。

## 致谢

本文主体内容来自全球变化及应对国家重点研发专项项目(2017YFA0604000),是参与项目的主要骨干成员的共同成果。

## 参考文献

- [1] Arakawa A, Wu C M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. part I[J]. J. Atmos. Sci., 2013, 70: 1977—1992, doi: 10.1175/jas-d-12-0330.1
- [2] Bony S, Stevens B, Frierson D M W, et al. Clouds, circulation and climate sensitivity [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(4): 261—268
- [3] Golaz J C, Larson V E, Cotton W R. A PDF-based model for boundary layer clouds. Part I: Method and model description [J]. J. Atmos. Sci., 2002, 59: 3540—3551
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), Chapter 7 of the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. [Available at [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5\\_WGI-12Doc2b\\_FinalDraft\\_Chapter07.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_Chapter07.pdf).]
- [5] Park S. A unified convection scheme (UNICON). Part I: Formulation [J]. J. Atmos. Sci., 2014, 71: 3902—3930
- [6] Plant R S, Craig G C. A Stochastic Parameterization for Deep Convection Based on Equilibrium Statistics [J]. J. Atmos. Sci., 2008, 65(1): 87—105
- [7] Sherwood S C, Bony S, Dufresne J L. Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing [J]. Nature, 2014, 505(7481): 37—42
- [8] Stevens B, Bony S. What are climate models missing? [J]. Science, 2013, 340(6136): 1053—1054
- [9] Su H, Jiang J H, Zhai C, et al. Weakening and strengthening structures in the Hadley Circulation change under global warming and implications for cloud response and climate sensitivity [J]. J. Geophys. Res.: Atmospheres, 2014, 119(10): 5787—5805
- [10] Xiao H, Gustafson W I, Hagos S M, et al. Resolution-dependent behavior of subgrid-scale vertical transport in Zhang-McFarlane convection parameterization [J]. J. of Adv. Mod. Ear. Sys., 2015, 7: 537—550

## Development of Parameterizations of Atmospheric Physical Processes For High Resolution Global Climate Models and Their Applications

Zhang Guangjun<sup>1</sup>, Wang Minghui<sup>2</sup>,  
Lu Chunsong<sup>3</sup>, Bao Qing<sup>4</sup>, Wang Yong<sup>1</sup>

1. Department of Earth System Science,  
Tsinghua University, Beijing 100084;

2. School of Atmospheric Sciences,  
Nanjing University, Nanjing 210023;

3. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation  
of China Meteorological Administration,  
Nanjing University of Information Science  
and Technology, Nanjing 210044;

4. State Key Laboratory of Numerical Modeling for  
Atmospheric Sciences and Geophysical  
Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric  
Physics, Beijing 100029

This work aims to develop a suite of state-of-the-art parameterizations of atmospheric physical processes using observations, reanalysis data and numerical models (including large-eddy simulation, cloud-resolving model, single-column model and climate models). Based on comprehensive analyses of observational datasets and model simulations, the developed parameterizations will better represent processes of cloud macrophysics and microphysics, convection and their interactions with the planetary boundary layer and aerosols. Diagnostic metrics and tools will be used to evaluate and improve the new parameterizations to reduce long-standing model biases and advance the development of the global climate models (GCMs) in China.

**Keywords:** high resolution GCMs; parameterizing atmospheric physical processes; physically self-consistent; scale-aware parameterizations