

肖洒,魏敏,邓帅,等,2019. 基于 GPU-OpenACC 的气候模式加速优化研究[J]. 气象,45(7):1001-1008. Xiao S, Wei M, Deng S, et al, 2019. Research on accelerated optimization of climate models based on GPU-OpenACC[J]. Meteor Mon, 45(7):1001-1008(in Chinese).

基于 GPU-OpenACC 的气候模式加速优化研究*

肖洒¹ 魏敏¹ 邓帅¹ 徐达¹ 张晨琛²

1 国家气象信息中心,北京 100081

2 吉林省气候中心,长春 130062

提 要: 为使数值模式适应异构架构在高性能计算领域的快速发展趋势,本文基于 OpenACC 语言,对气候模式 BCC_AGCM3.0 中动力框架三段程序段进行 GPU 加速优化试验。通过异步执行设置、循环内移、数据管理及向量参数化配置等方式,对模式中计算密集部分程序段进行 GPU 加速并行化,并进行了优化运行效率对比及正确性验证。试验结果表明,BCC_AGCM3.0 模式中三段程序段 GPU 加速后效率提升均在 3 倍以上,BCC_AGCM 气候模式全球涡度均方根相对误差控制在一定范围之内。加速方法及策略对于数值天气气候模式在异构环境下的移植与优化具有一定参考价值。

关键词: BCC_AGCM, GPU, OpenACC, 异构

中图分类号: P409

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.010

Research on Accelerated Optimization of Climate Models Based on GPU-OpenACC

XIAO Sa¹ WEI Min¹ DENG Shuai¹ XU Da¹ ZHANG Chenchen²

1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

2 Jilin Climate Center, Changchun 130062

Abstract: In order to make the numerical model adapt to the fast development trend of high performance computing with hybrid architecture, based on the OpenACC, this paper presents the GPU accelerated optimization test for the three-segment procedure which is Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model version 3.0 (BCC_AGCM3.0) in dynamic part. By means of asynchronous execution settings, cyclic inward migration, data management and vector parameterized configuration, we parallel the GPU acceleration of the computationally intensive part of the program segments in model, compare the optimization efficiency and validate the correctness. The experimental results show that the efficiency of the three-stage GPU acceleration in BCC_AGCM climate model, is increased by more than three times and the relative error of global vorticity root mean square (RMS) is controlled within a certain range. The acceleration methods and strategies are valuable for transplanting and optimizing numerical weather and climate models in heterogeneous environments.

Key words: BCC_AGCM (Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model), GPU, OpenACC, hybrid architecture

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306062)和国家重点研发计划(2016YFA0602102)共同资助

2018 年 10 月 30 日收稿; 2019 年 2 月 3 日收修定稿

第一作者:肖洒,主要从事气象高性能计算应用研究. Email: xiaos@cma.gov.cn

引言

近年来,随着我国天气气候数值模式分辨率的不断提高(许晨璐等,2017;宫宇等,2018;牛嫣静等,2018),对于计算机计算能力要求也日渐增长。为了满足模式运行时效,需要加强气象高性能计算能力建设(魏敏,2015a;2015b),但目前由于通用 CPU 在降低功耗、提高主频上遇到瓶颈,而作为加速部件的 GPU 则表现出出色的浮点计算能力、低能耗高带宽、可靠的并行架构等方面的特点(Yang et al, 2014),并具备 CPU 相同种类的并行性,如能够采用合适的优化方法,将数值模式程序以 CPU 为主体执行逻辑运算部分、GPU 执行并行运算部分的方式进行改写,可大大提升数值模式运行效率(王明清等,2017;桂彦等,2016)。2018 年 6 月全球超算 top500 榜单中,越来越多的超算中心采用了异构架构,其中绝大部分使用的是 CPU+GPU 异构体系,充分展现了异构架构在高性能计算领域强劲的发展势头。因此,通用 CPU 中运行的模式程序如何能够适应异构架构系统,做好异构系统下模式优化,提升运行效率,已成为天气气候数值模式未来发展的重要课题。

BCC_AGCM3.0 是国家气候中心开发的第三代大气环流模式,模式框架是在美国通用大气模式 CAM3.0 基础上发展而来的(顾聪等,2015;方宝辉等,2015),引入质量通量型积云对流参数化方案、整层位温守恒干绝热调整方案、积雪面积覆盖参数化方案,并调整洋面感热和潜热通量参数化方案(Wu et al,2008;2010;吴捷等,2017),支持共享内存及分布式并行架构,内部通过物理-动力耦合实现并行策略,是气候应用研究及气候预测的重要参考工具(顾卫华和吴统文,2010;段春锋等,2017;卢国阳等,2017)。本文在 BCC_AGCM3.0 原有并行程序基础上,选取计算量占比较大的程序段展开优化研究,针对 GPU 架构调整程序结构,改写优化程序段部分代码,达到提升程序段运行效率的目的。

1 研究环境简介

1.1 试验环境

GPU 出色的计算能力,来源于其芯片架构组

成。GPU 芯片中的绝大部分为算术逻辑单元 ALU,逻辑控制单元仅占一小部分。同样芯片面积的 CPU,不仅包括占用面积较大的缓存区,还有大量的逻辑控制单元,承担计算任务的 ALU 只占小部分面积,因此通用 CPU 能够较好地处理复杂逻辑控制的程序,但在处理大规模科学计算程序时受其硬件条件限制,无法发挥优势。如果 GPU 中运行的程序能够做到取消分支预测、乱序执行等逻辑判断,充分进行大批量的计算,则相比 CPU 能够获得较好的性能提升(蒋华等,2016)。

本文选取 NVIDIA Tesla K20 m 作为 GPU 加速设备。优化试验环境的设备、硬件型号及配置信息如表 1 所示。

表 1 加速试验环境配置

Table 1 Environment configuration of accelerated test

设备	硬件型号	配置信息
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	8 核心 16 线程,主频 2.60 GHz
试验环境	GPU NVIDIA Tesla K20 m	CUDA 核心数量:2496 单精度浮点性能:3.52 Tflops 专用存储器总容量:5 GB

1.2 OpenACC

OpenACC 是一种编译器导语,它可以向编译器提供如何进行编译、如何优化代码的相关信息(孙晨等,2018),在不同的高性能计算架构中具有高度的简便性、高性能和良好的可移植性(顾文静等,2018)。OpenACC 的核心功能是能够把计算部分和数据从主机设备卸载到加速部件上,CPU(主机设备)与 GPU(加速部件)都拥有各自的内存空间(江霞等,2016;曾文权等,2013),在此种情形下,编译器在 OpenACC 导语编译运行时会分析导语意图并对主机设备及加速部件之间的数据部分进行管理,加速部件获得计算所需初始数据后进行计算,计算完成后结果数据返回主机设备中,并准备进行下一次计算(何沧平,2016)。

GPU 加速器架构具有多个并行层次,以 NVIDIA GPU 为例,其内部拥有多个流处理器,每个流处理器各自包含了相应的线程块,线程块则由 32 位 SIMD(单指令多数据)线程组构成。OpenACC 中设计了 gang、worker、和 vector 指导语句,它们分别对应了上述三层并行结构,能够把程序

代码中的循环迭代映射到对应层次上。gang 语句指示循环迭代部分将分成多块并行执行,worker 语句指示在每个 gang 内使用多个 worker 并行执行,而 vector 语句则对应线程块内的 SIMD 线程组指定向量宽度,一般 SIMD 线程组的宽度为 32,可设置 vector 的典型向量宽度为 32 的整数倍(罗布·法伯,2017)。

1.3 优化程序段选取

为了能够体现加速优化后的程序段对提高气候模式整体运行效率的促进作用,一般采用模式中运行耗时占比较大的程序段进行相关工作(肖洒和魏敏,2018)。BCC_AGCM3.0 大气环流模式结构中主要依赖动力框架及物理过程部分的计算,且动力框架部分为模式核心部分,更适合进行程序移植,因此本文集中对模式动力框架中的程序段进行优化改写。通过对模式积分 3 d 后,统计出模式部分相关程序段耗时占比情况如表 2 所示。

表 2 BCC_AGCM 程序段运行时间统计表

Table 2 Runtime statistics of BCC_AGCM program

代码段名称	所属模式结构	程序段运行耗时/s	运行时间占比/%
GW_DRAG_PROF. in. GW_DRAG	物理过程	1283.58	23.09
grcalcs_	动力框架	286.54	5.15
grcalca_	动力框架	263.98	4.75
radcswmx_	物理过程	73.33	1.32
quad_	动力框架	72.09	1.3

基于上述分析,按照模式内部运行时间占比排序,选取动力框架部分的 grcalcs、grcalca 及 quad 进行 GPU 加速优化,三段动力框架程序段的功能分别为通过逆勒让德变换,使用对称与反对称方法,将谱空间转换为格点空间和通过高斯积分完成波数至谱系数的转换。三段程序段中,逻辑判断内容较少,与计算相关的多重循环数量较多,循环次数较大,适于进行 GPU 加速优化。

2 优化方法

气候模式的运行加速效果主要来自于其计算密集部分的 GPU 并行化,通过采用 OpenACC 语言向编译器提供编译指令信息,指示编译器对模式代码进行并行化、数据传输、指定运行先后次序等操作,使模式代码在运行时达到性能提升目的。

要保证 GPU 能够正确计算出模式结果,需要将模式计算中所需的相关数据及时更新至 GPU 上,而此过程需要耗费一定时间,所以在 CPU 与 GPU 协同运行情况下,如何处理主机和加速设备之间的数据传输是能否提升模式程序段运行效率的关键问题。从宏观上看,加速设备数据采用由上而下、计算采用从下往上的管理方式是最好的,即在模式程序段外层的高级别位置创建和删除设备数据,在内层低级别位置进行计算并行化,这需要熟悉模式中过程间的调用流程和计算位置,保证模式计算结果正确前提下修改代码。图 1 为加速设备端与主机计算在模式程序段内的生命周期。

2.1 异步执行策略

在 CPU 与 GPU 协同运行模式下,模式内程序的执行次序默认为串行执行,即加速设备→主机→加速设备→主机。在此执行次序下,加速设备与主机均需等待对方计算完成后方能开始计算,此种执行方式在模式内程序存在数据前后依赖时能够确保计算结果的正确性。但对于相互之间独立的模式程序段,通过使用异步执行方式,使加速设备与主机端同时进行计算,既能保证计算结果的正确,又能提升程序运行效率。

以 BCC_AGCM 大气环流模式动力框架部分 grcalcs 程序段为例,其内部包含 4 个主要循环段,其中循环段 1 与循环段 2 无数据依赖,循环段 3、4 之间有数据依赖,且循环段 3 依赖循环段 1 和 2 的计算结果。若按照任务串行方式执行,则为循环段 1→循环段 2→循环段 3→循环段 4 流程运行。而将无数据依赖的循环段 1 和 2 设置为异步执行方式后,执行方式则如图 2 所示,循环段 1 和 2 同时执

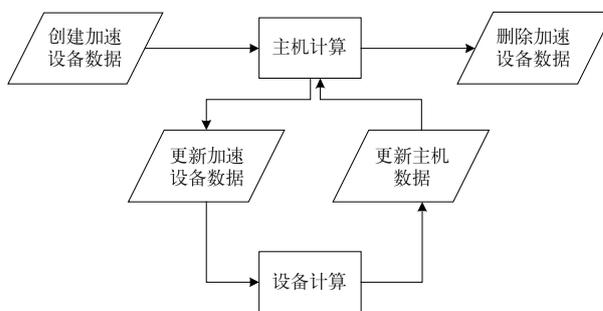


图 1 模式程序内加速设备与主机计算的生命周期

Fig. 1 The life cycle of accelerating device and host computing for program in model

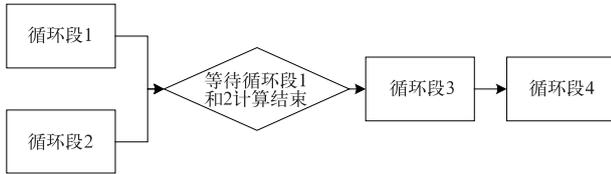


图 2 异步执行任务示意图
Fig. 2 Schematic diagram of asynchronous execution tasks

行,相比前一种方式减少了运行时间。

2.2 循环内移

在优化过程中,需要将模式程序中计算量较大的部分放到 GPU 上进行并行化展开,利用 GPU 强大的浮点计算能力将计算耗时降至最低,同时尽量减少主机端与加速设备端的数据传输次数,避免不必要的时间损耗,程序的加速效果方能最佳。但分析动力框架格点空间转换部分 `gcalc`s 和 `gcalc`a 函数段,存在外层函数多次循环调用情况,当对 `gcalc`s 和 `gcalc`a 函数段内部计算循环段进行 GPU 并行化展开后,测试显示,由于外层循环调用次数较多,在每次调用时均会对 GPU 进行内核启动、数据同步等一系列操作,而这些操作耗时严重。

为了缩减这部分耗时,扩大计算并行度,采用循

环内移方法,将外层函数调用的循环移至函数调用内部,并针对函数内程序内容,分别进行数组扩维、修改传递参数、精简数据传递、优化循环计算方式等操作,修改循环层及计算相关部分数组(图 3)。

2.3 OpenACC 并行化

在循环内移后,对各个计算密集部分的多层循环段进行 OpenACC 加速试验。如果直接对各个循环段并行化,运行时会导致模式程序段性能下降,这是由于模式程序段中缺少数据管理导致。在每个 OpenACC 并行化计算开始时,编译器会默认将计算时所需数组变量从 CPU 拷贝至 GPU 中,在计算结束后将相关变量从 GPU 拷贝回 CPU,这导致大量时间损耗在传输过程。为减少传输过程的时间损耗,在循环段计算开始前,设置加速数据区域,将循环计算所需要的数组通过 `!$acc data create` 语句在 GPU 加速器上初始化并分配空间,之后传输相应数据至 GPU 中,为计算做好准备。计算完成后将所需要的结果数据从 GPU 传回 CPU 中,便于 CPU 得到结果进行下一步运算,确保数据的完整性,避免数据的重复传输(图 4)。

对计算密集部分循环段进行加速,使用 `!$acc kernels/end kernels`(莫德林等,2014)添加并行区

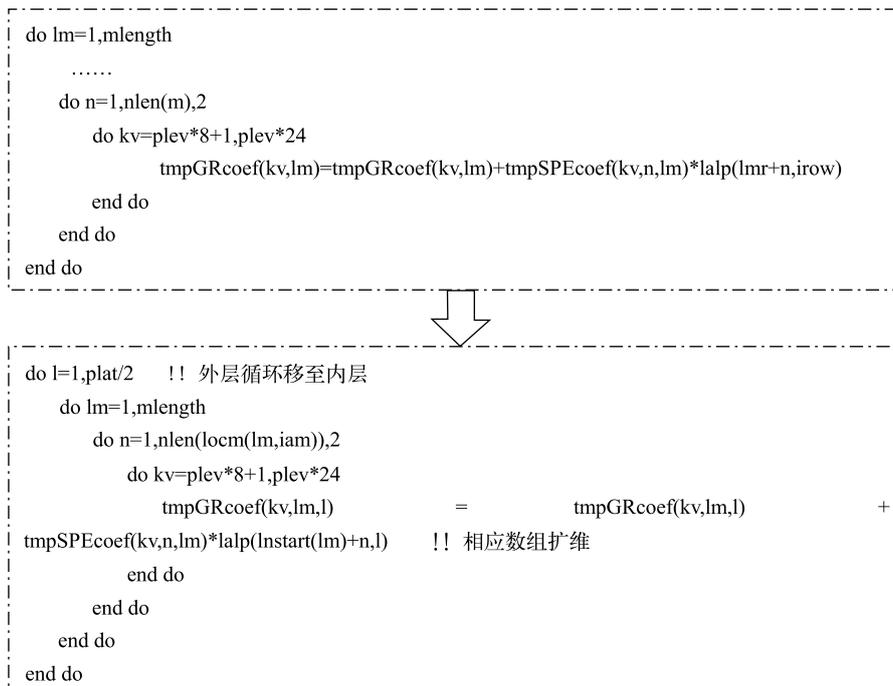


图 3 循环内移及数组扩维
Fig. 3 The cyclic shift and array dimension extension

```

!$acc enter data create(tmpGRcoef)
!$acc data create (tmpSPEcoef,grts,grths,grds,grzs,grus,gruhs,grvs,grvhs)
copyin(rsq,nlen(:),locm(1:mlength,iam),lnstart(1:mlength))
copyout(grts,grths,grds,grzs,grus,gruhs,grvs,grvhs)  !!创建数据区域并初始化, 设置传输内容
call prepGRcalc(tmpSPEcoef)
!$acc update device(tmpSPEcoef)  !!更新CPU中的数据至GPU
call grealcs (ztdt, grts, grths, grds, grzs, grus, gruhs, grvs, grvhs, &
             grps, grdpss, grpms, grpls, tmpSPEcoef,tmpGRcoef)
.....
!$acc end data
!$acc exit data delete(tmpGRcoef)

```

图 4 加速数据区域设置

Fig. 4 Setting area of accelerated data

域指示编译器并行化指定区域代码,为了减少 CPU 与 GPU 之间不必要的数据传输,使用 present 子句指定相应数组已存在于 GPU 中,无需再次重复传输。对内部每层循环进行向量化参数配置,循环段中 gang、worker、vector 根据实际试验调整为线程块数与每个线程块内线程数的最优组合,其中 vector 参数根据循环层中变量 $plev \times 8$ 的值来确定, GPU 在每次运行时向量长度包含循环迭代次数且尽可能减少向量浪费,运行效率为最佳,此处设置 vector 为 256 综合考虑了 GPU 中向量总量及运行效率情况(图 5)。

3 试验结果及分析

将优化后的模式程序段编译运行,测试使用 16tasks,积分 1 d,得到三段程序段的运行时间,与优化前相对比,效率分别提升 3.3、5.8、3.1 倍(图 6)。对模式进行结果正确性验证,测试运行 1 月,选取 1985 年 1 月 7 日的 2 m 温度做比较,quad 程序段与标准结果完全一致,grealcs 与 grealca 程序段存在细微误差(图 7)。使用模式输出中的全球涡度均方根数值进行误差对比,设相对误差=(测试

```

!$acc kernels
present(ldalp,rsq,tmpSPEcoef,tmpGRcoef,nlen(:),locm(1:mlength,iam),lnstart(1:mlength))
async(4)  !!添加并行区域, 避免不必要的数据传输并设置异步队列
!$acc loop gang worker(2)  !!向量参数化配置
do l=1,platt/2
!$acc loop gang(2)  !!向量参数化配置
do lm=1,mlength
!$acc loop independent  !!判断此处循环无依赖, 强制并行化
do n=2,nlen(locm(lm,iam)),2
!$acc loop independent vector(256)  !!向量参数化配置
do kv=1,plev*8
zc =ldalp(lnstart(lm)+n,l)*rsq(locm(lm,iam)+n-1)*ra
tmpGRcoef(kv,lm,l) = tmpGRcoef(kv,lm,l) + tmpSPEcoef(kv,n,lm)*zc
end do
end do
end do
end do
!$acc end kernels

```

图 5 循环并行化及向量化参数配置

Fig. 5 Loop parallelization and parameterization of vectorization

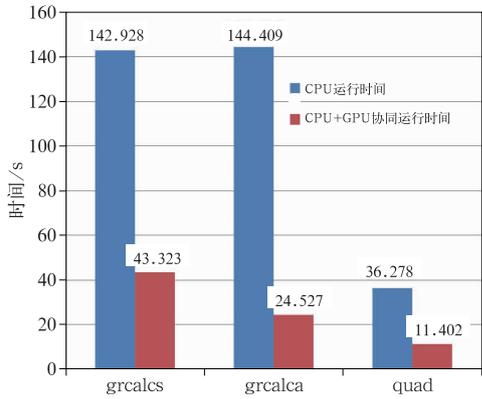


图 6 BCC_AGCM 程序段优化后运行效果对比

Fig. 6 Comparison of operation effect after optimization of BCC_AGCM program

试验结果 - 控制试验结果) / 控制试验结果 $\times 100\%$ (魏敏, 2015a; 2015b), 计算后的相对误差如表 3 所示, 三段程序段结果误差的绝对值均小于 0.5%。

4 结论与讨论

(1) 结合数值模式适应未来异构计算系统的需求, 本文对气候模式 BCC_AGCM3.0 中动力框架部分耗时占比较大的三段程序段进行 GPU 加速优化试验, 在优化过程中, 采取 CPU 与 GPU 协同运行的优化策略, 选取程序段中计算密集部分进行 GPU 加速优化, 通过采用循环内移、OpenACC 并行化展开、数据管理、异步设置及向量参数化配置等方法改写, 使得模式程序段能够获得一定加速效果。

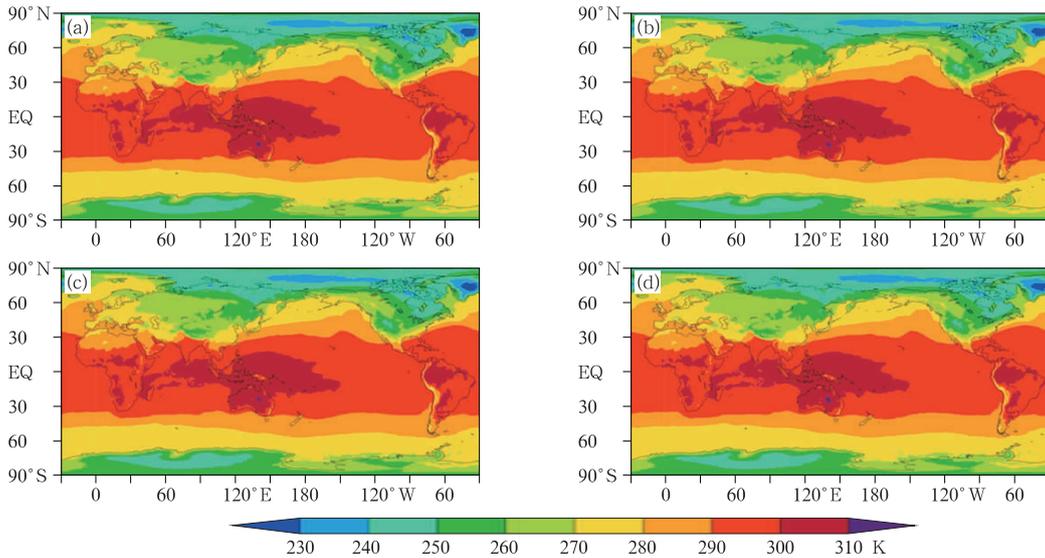


图 7 1985 年 1 月 7 日优化前控制试验(a)和 Quad(b), Grcalcs(c), Grcalca(d)程序段优化后 2 m 温度比较

Fig. 7 The 2 m temperature comparison of control test (a) before optimization and Quad (b), Grcalcs (c), Grcalca (d) after optimization on 7 January 1985

表 3 全球涡度均方根相对误差

Table 3 Relative errors of global RMS Vorticity

程序段	全球涡度均方根		相对误差/%
	测试试验/ 10^{-4}	控制试验/ 10^{-4}	
grcalcs	1.138980091647521		-0.00317
grcalca	1.143910420635660	1.139016159558928	0.439
quad	1.139016159558928		0

(2) 运行结果显示, BCC_AGCM 动力框架部分程序段优化后计算结果与 CPU 版本存在一定误差, 其中包含众多因素导致, CPU 与 GPU 的计算架

构不同是一方面, 程序优化过程中出现的数组计算精度损失亦是一方面。由于气候模式是中长期积分, 对精度要求较高, 因此下一步工作计划在对模式

深入优化的同时考虑保证尽量减少积分过程中的计算精度损失,尽可能提高气候模式预报结果的准确性。

(3) 在模式优化中,由于试验环境限制,未能进行大规模任务的模式运行试验,未来中国气象局建成的“派”曙光高性能计算机集群包含了配置 GPU 与 KNL(众核 CPU)的试验子系统,可为异构架构下模式移植与优化提供计算性能更佳、运行更稳定的试验环境。本项研究将依托新的 GPU 集群,进一步深入气候模式内部算法,使用多线程、OpenMP 调用 GPU 等方式(洪向共等,2016),改进优化策略,提升气候模式的预报时效性。

参考文献

- 段春锋,徐敏,程智,等,2017. DERF2.0 模式对月尺度西太平洋副热带高压预测能力评估[J]. 气象,43(10):1267-1277. Duan C F, Xu M, Cheng Z, et al, 2017. Evaluation on monthly prediction of western pacific subtropical high by DERF2.0 model[J]. Meteor Mon, 43(10):1267-1277(in Chinese).
- 方宝辉,徐金秀,魏敏,等,2015. BCC_AGCM_T106 在 Intel 众核上混合异构编程与优化研究[J]. 计算机科学与探索,9(9):1093-1099. Fang B H, Xu J X, Wei M, et al, 2015. Research on hybrid programming and optimization of BCC_AGCM_T106 on Intel many integrated core[J]. J Front Comput Sci Technol, 9(9):1093-1099(in Chinese).
- 宫宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象,44(9):1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast[J]. Meteor Mon, 44(9):1148-1159(in Chinese).
- 顾聪,朱伟军,周星妍,2015. BCC_CSM 气候模式对风暴轴的模拟能力评估[J]. 气象,41(3):304-310. Gu C, Zhu W J, Zhou X Y, 2015. Evaluation on simulation capability of storm track with BCC_CSM model[J]. Meteor Mon, 41(3):304-310(in Chinese).
- 顾文静,孙晨,王彬,2018. 基于 OpenACC 的高性能计算并行优化研究与应用[J]. 计算机技术与发展,28(4):65-70. Gu W J, Sun C, Wang B, 2018. Research and application of parallel optimization in high performance computing based on OpenACC[J]. Comput Technol Dev, 28(4):65-70(in Chinese).
- 桂彦,王培玉,李峰,等,2016. 基于 GPU 加速的几何纹理合成方法[J]. 浙江大学学报(理学版),43(6):638-646. Gui Y, Wang P Y, Li F, et al, 2016. GPU-based geometry texture synthesis[J]. J Zhejiang Univ (Sci Ed), 43(6):638-646(in Chinese).
- 何沧平,2016. OpenACC 并行编程实战[M]. 北京:机械工业出版社:1-265. He C P, 2016. OpenACC Parallel Programming[M]. Beijing: Mechanical Industry Press:1-265(in Chinese).
- 洪向共,陈威,熊镛,2016. 基于 CPU_MIC_GPU 异构架构的 Roberts 算法优化探究[J]. 科学技术与工程,16(36):217-222. Hong X G, Chen W, Xiong D, 2016. The research of optimized Roberts algorithm based on heterogeneous CPU/MIC/GPU architecture [J]. Sci Technol Eng, 16(36):217-222(in Chinese).
- 蒋华,董刚,陈霄,2016. 激波与火焰面相互作用数值模拟的 GPU 加速[J]. 计算物理,33(1):23-29. Jiang H, Dong G, Chen X, 2016. A numerical study of interactions between shock waves and flame with GPU acceleration[J]. Chin J Comput Phys, 33(1):23-29(in Chinese).
- 江霞,安虹,梁伟浩,等,2016. OpenACC 到 MIC 平台上并行程序的自动翻译及优化[J]. 小型微型计算机系统,37(4):824-829. Jiang X, An H, Liang W H, et al, 2016. Automatic OpenACC to Intel offload and optimization for MIC[J]. J Chin Comput Syst, 37(4):824-829(in Chinese).
- 颀卫华,吴统文,2010. 全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 对 1998 年夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究[J]. 大气科学,34(5):962-978. Jie W H, Wu T W, 2010. Hindcast for the 1998 summer heavy precipitation in the Yangtze and Huaihe River valley using AGCM BCC_AGCM2.0.1 model[J]. Chin J Atmos Sci, 34(5):962-978(in Chinese).
- 卢国阳,任保华,马鹏里,等,2017. CMIP5 模式对 EU、WP 遥相关型的模拟评估和预估[J]. 大气科学,41(4):752-766. Lu G Y, Ren B H, Ma P L, et al, 2017. Evaluation and estimation of Eurasian and West Pacific teleconnection pattern in CMIP5 [J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):752-766(in Chinese).
- 罗布·法伯,2017. OpenACC 并行程序设计:性能优化实践指南[M]. 吴长江,阙光远,译. 北京:机械工业出版社:1-243. Farber R, 2017. Parallel Programming with OpenACC[M]. Wu C J, Kan G Y, trans. Beijing: Mechanical Industry Press:1-243 (in Chinese).
- 莫德林,戴晨光,张振超,等,2014. 一种基于 OpenACC 的遥感影像正射纠正快速实现方法[J]. 影像技术,26(2):47-49, 27. Mo D L, Dai C G, Zhang Z C, et al, 2014. A fast implementation method of remote sensing image ortho-rectification based on OpenACC[J]. Image Technol, 26(2):47-49, 27(in Chinese).
- 牛嫣静,彭新东,范广洲,2018. GRAPES 模式中三维科氏力计算及其效果评估[J]. 气象学报,76(3):473-484. Niu Y J, Peng X D, Fan G Z, 2018. Impact of the three-dimensional Coriolis force in GRAPES model[J]. Acta Meteor Sin, 76(3):473-484 (in Chinese).
- 孙晨,王彬,顾文静,等,2018. 基于 OpenACC 的 GRAPES_GLOBAL 模式长波辐射异构并行化研究[J]. 气象科技进展,8(1):197-202. Sun C, Wang B, Gu W J, et al, 2018. A research about hybrid programming and parallelization of GRAPES_GLOBAL based on OpenACC[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):197-202 (in Chinese).
- 王明清,李明,张清,等,2017. 基于 MIC 集群平台的 GMRES 算法并行加速[J]. 计算机科学,44(4):197-201, 240. Wang M Q, Li M, Zhang Q, et al, 2017. Speedup of GMRES based on MIC heterogeneous cluster platform[J]. Comput Sci, 44(4):197-201, 240 (in Chinese).
- 魏敏,2015a. 气象高性能计算应用服务环境适应性研究[J]. 气象,41

- (1):92-97. Wei M, 2015a. Study on adaptability of meteorological high performance computing application services environment[J]. Meteor Mon, 41(1):92-97(in Chinese).
- 魏敏, 2015b. BCC_CSM 气候系统模式移植优化及其气候模拟验证[J]. 气象与环境学报, 31(1):101-105. Wei M, 2015b. BCC_CSM climate system model tuning and climate simulation verification[J]. J Meteor Environ, 31(1):101-105(in Chinese).
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等, 2017. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. 大气科学, 41(6):1300-1315. Wu J, Ren H L, Zhang S, et al, 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1300-1315(in Chinese).
- 肖洒, 魏敏, 2018. BCC_AGCM 大气环流模式异构众核加速技术[J]. 气象科技, 46(2):245-249, 417. Xiao S, Wei M, 2018. Many-core acceleration of BCC_AGCM model in hybrid architecture[J]. Meteor Sci Technol, 46(2):245-249, 417(in Chinese).
- 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍, 2017. 千米尺度分辨率下 GRAPES-Meso4.0 模式定量降水预报性能评估[J]. 气象学报, 75(6):851-876. Xu C L, Wang J J, Huang L P, 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution[J]. Acta Meteor Sin, 75(6):851-876(in Chinese).
- 曾文权, 胡玉贵, 何拥军, 等, 2013. 一种基于 OPENACC 的 GPU 加速实现高斯模糊算法[J]. 计算机技术与发展, 23(7):147-150. Zeng W Q, Hu Y G, He Y J, et al, 2013. Implementation of a Gaussian blur algorithm based on GPU accelerated by OPENACC[J]. Comput Technol Dev, 23(7):147-150(in Chinese).
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al, 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application[J]. J Atmos Sci, 65(7):2235-2253.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al, 2010. The Beijing climate center atmospheric general circulation model: description and its performance for the present-day climate[J]. Climate Dyn, 34(1):123-147. DOI:10.1007/s00382-008-0487-2.
- Yang X, Li X Y, Li J G, et al, 2014. Research on fast Fourier transforms algorithm of huge remote sensing image technology with GPU and partitioning technology[J]. Spectrosc Spectr Anal, 34(2):498-504.