



基于高性能平面二维水流数学模型的 计算效率研究

蒋 波，岳志远，雷国平，尹书冉

(长江航道规划设计研究院，国家内河航道整治工程技术研究中心，湖北 武汉 430011)

摘要：针对高性能平面二维水流数学模型，分别开展了基于单机多核处理器（CPU）和显卡（GPU）的并行化研究，旨在提高模型计算效率。以长江下游福姜沙水道为例，对并行后模型的可靠性和计算效率进行评估，结果表明：采用两种并行模式后，模型计算结果与串行结果一致，可靠性好，且计算效率有所提高，特别是采用 GPU 并行模式后，模型计算效率提高 6.7 倍以上，大大缩短了模型计算周期。

关键词：二维水流数学模型；高性能；计算效率；可靠性

中图分类号：TV 143 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)11-0115-06

Computational efficiency of high-performance shallow water flow model

JIANG Bo, YUE Zhi-yuan, LEI Guo-ping, YIN Shu-ran

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: A shallow water flow model is parallelized with OpenMP and OpenACC to improve the computational efficiency. The Fujiangsha reach is used to validate the validity of the present model. Results of the numerical simulation indicate that the calculated results are in good agreement with the measured ones and there's no obvious differences compared with the results of sequential program. The two modes of parallel processing can reduce largely the calculating time without losing accuracy. Moreover, the speed-up ratio of GPU parallel program reaches more than 6.7 times.

Keywords: 2D model; high-performance; computational efficiency; reliability

近 20 年来，基于 Godunov 型高性能有限体积方法、能够精确捕捉急变流甚至激波的平面二维水动力模型，已被国内外水动力学领域的相关科学研究所广泛采用^[1-7]。但是，由于大部分模型为显式格式，受 CFL 条件的约束，时间步长小、计算量大，模型目前还只能用于溃坝洪水等计算周期较短的工程实际问题^[2-5,7]。即便是采用隐式算法，相对于长河段、长时间的工程模拟，计算量仍是一个制约模型发展运用的瓶颈。因此，有必要对平面二维水动力学模型进行并行化处理，以此大幅提升数学模型的计算效率。

随着计算机性能的不断提高，并行技术也相应取得很大进展，并形成了能够比较方便实现并行化的编程语言，如，用于 CPU 并行的 OpenMP、MPI 编程语言^[8-12]，用于 GPU 并行的 CUDA、OpenACC^[13-15] 编程语言等。其中，基于 CPU 的并行语言相对简单且容易入手，但其成本大、耗能高，在工程界中配备较少。同时，个人计算机 CPU 的核心数量有限，模型计算效率的提升空间不大。相比之下，在同等计算性能的条件下，GPU 价格远低于 CPU 并行机群，能耗较小，且新推出的 OpenACC 编程标准具有不破坏原始代码、

开发工作量小、性价比高、支持多种加速器设备等多种优势，具有很广阔的发展前景。

本文针对高性能平面二维水流数学模型，分别开展了基于单机多核处理器（CPU）和显卡（GPU）的并行化研究，旨在提高数学模型的计算效率。以长江下游福姜沙水道为例，采用原型观测资料对并行后模型的精度、可靠性和计算效率进行评估。

1 模型方程及数值方法

1.1 基本控制方程及封闭模式

数学模型的基本控制方程为浅水二维水动力学方程组，包括质量守恒方程和动量守恒方程^[16]，其采用正交直角坐标系，守恒向量形式具体如下：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \tag{1}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{bx} \\ ghS_{by} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中： t 为时间； x 和 y 为空间坐标； h 为水深； u 、 v 为 x 、 y 方向的水流流速； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； $\mathbf{U}$ 为守恒量向量； $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 为 x 和 y 方向的通量向量； $\mathbf{S}$ 为源项向量； $S_{bx} = \partial z_b / \partial x$ ， $S_{by} = \partial z_b / \partial y$ 分别为 x 和 y 方向的地形坡度， z_b 为河床高程； S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的阻力坡度。

方程(1)中除包含基本未知量外，还包含 S_{fx} 和 S_{fy} 两个未知数，为了使方程封闭，需引入以下经验关系：

$$\begin{cases} S_{fx} = n^2 u / \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3} \\ S_{fy} = n^2 v / \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3} \end{cases} \tag{6}$$

式中： n 为 Manning 糙率系数。

1.2 模型数值方法

本文数学模型采用非结构三角网格剖分计算区域，通过局部坐标变换，方程(1)的离散形式如下^[6]：

$$\frac{d\mathbf{U}_i}{dt} = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{E}_{i,j}^* \times \mathbf{n}_{i,j} \Delta L_{i,j} + \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{S}_{b\ i,j}^* \Delta L_{i,j} + \mathbf{S}_{fi} \tag{7}$$

式中： $\mathbf{U}_i$ 和 $\mathbf{S}_{fi}$ 为体积平均值，存储在网格中心； $\mathbf{E}^*$ 为单元界面的法向通量， $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ 为界面法向单位向量； $\Delta L_{i,j}$ 为第 i 个单元对应的第 j 条边的长度。

采用 Toro^[17] 的 HLLC 近似黎曼算子计算界面通量，通过空间上的构造及预测-校正步实现模型的二阶精度。底坡项采用 Valiani 和 Begnudelli 提出的遵循严格物理意义的 DFB 方法^[6,18] 以保证模型的和谐性，采用全隐式方法处理阻力项以保证模型的稳定性。由于所采用的数值格式是显式的，需遵循 CFL 线性稳定条件，柯朗数 Cr 统一取值为 0.95。关于模型数值离散详细描述可参考文献[6]，这里不做赘述。

2 模型并行化研究

本文分别进行基于单机多 CPU 和单机 GPU 并行化研究。采用应用编程接口标准 OpenMP 实现单机多 CPU 并行，采用应用编程接口标准 OpenACC 实现单机 GPU 并行。

2.1 OpenMP

OpenMP 是由 Architecture Review Board 牵头提出的，并已被广泛接受的、用于共享内存并行系统的多线程程序设计的一套指导性的编译处理方案（Compiler Directive）。OpenMP 支持的编程语言包括 C 语言、C++ 和 Fortran 语言，支持 OpenMP 的编译器包括 Sun Compiler、GNU Compiler、Intel Compiler 和 PGI Compiler 等。

OpenMP 提供了对并行算法的高层的抽象描述，程序员通过在源代码中加入专用的 pragma 来指明自己的意图，由此编译器可以自动将程序进行并行化，并在必要之处加入同步互斥以及通信

(图 1)。当选择忽略这些 pragma, 或者编译器不支持 OpenMP 时, 程序又可退化为通常的程序 (一般为串行), 代码仍然可以正常运作, 只是不能利用多线程来加速程序执行^[8-9]。

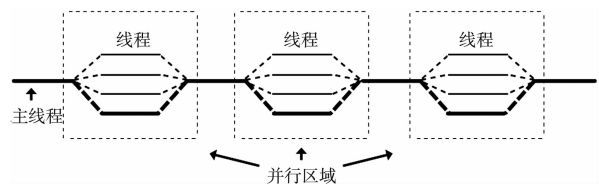


图 1 OpenMP 并行执行过程

OpenMP 在 Fortran 中的语法 (自由格式) 为:
`!$OMPdirective-name[ clause[, ]clause]...`
directive-name 为导语名称, 告诉编译器哪些代码需要并行、需要怎样并行; *clause* 是导语的修饰部分, 更详细地表明导语的意图。具体的导语、字句的含义和用法见文献 [9]。

2.2 OpenACC

OpenACC 是一个开放的加速器应用编程接口标准, 于 2011 年 11 月的 SC11 大会上发布 1.0 版^[15]。OpenACC1.0 提供了类似 OpenMP 的编译制导语句、环境变量和函数, 将 CPU 作为主机 (Host), GPU 作为协处理器 (Co-processor) 或设备, 在一个系统中可以存在一个主机和多个设备。OpenACC 支持的编程语言主要包括 C、C++ 语言和 Fortran 语言, 目前支持 OpenACC 的编译器只有 PGI Compiler 和 CAPS Compiler。程序员可通过添加一些导语, 告诉编译器将适合并行的代码卸载到 GPU 上运行、如何在主机和 GPU 中传输数据, 以此大幅提升程序的计算速度 (图 2)。

与 OpenMP 的语法类似, OpenACC 在 Fortran 中的语法为:

`!$ACC directive-name[ clause[, ]clause]...`
directive-name 为导语名称, 告诉编译器哪些代码需要并行、需要怎样并行, 哪些数据需要在 CPU 和 GPU 之间相互传输; *clause* 是导语的修饰部分, 更详细地表明导语的意图。具体的导语、字句的含义和用法见文献 [15]。

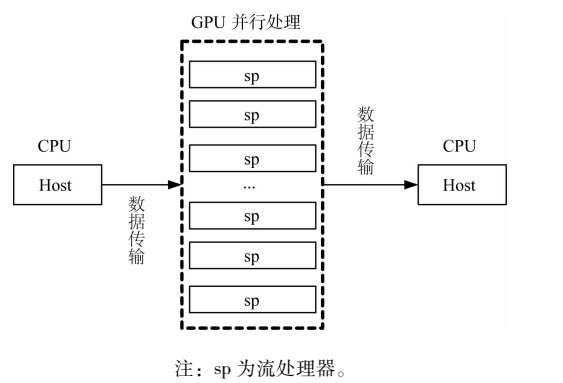


图 2 OpenACC 并行执行过程

本文模型基于 PGI Compiler 平台, 编译模式为 release, OpenMP 并行计算时使用 3 个 CPU 线程。计算机配置: CPU 为 i3-2120, 共 4 个线程, 主频为 3.30 GHz; 显卡 (GPU) 为 NVIDIA GeForce GTX 650, 共 384 个流处理器数量, 理论计算能力为 1.28 TFLOPs。

3 计算结果与效率评估

以长江下游福姜沙水道为例, 对并行后计算结果及效率进行评估。福姜沙水道包括福姜沙汉道段和如皋沙群段, 河道地形见图 3。

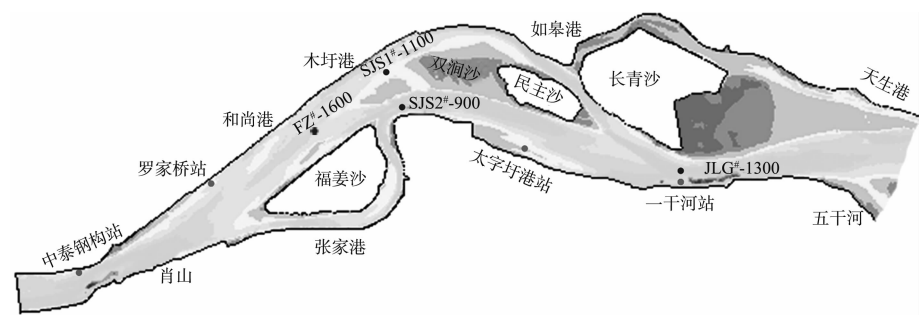


图 3 福姜沙水道

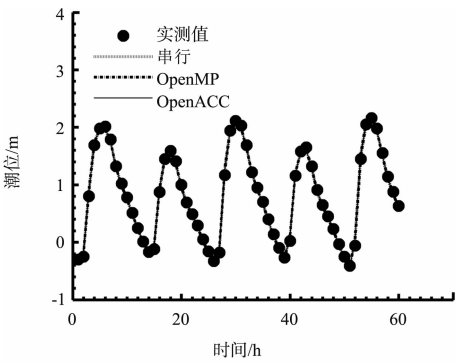
福姜沙汉道上起江阴鹅鼻嘴，下至护漕港。福姜沙北汉为主汉，长约 11 km，河床宽浅，外形顺直；右汉福南水道为支汉，长 16 km，河床窄深，外形向南弯曲。如皋沙群段上起护漕港，下至十三圩，为多分汉河道。河道内沙洲罗列，水流分散，目前分布有双涧沙、民主沙、长青沙、泓北沙及横港沙，江面宽达 6 km 以上。

本文采用非结构三角形网格对计算区进行剖分，网格单元数为 94 777，网格边长为 50 ~ 160 m。采用 2011 年 1 月枯水大潮全潮水文测验资料进行模型验证。

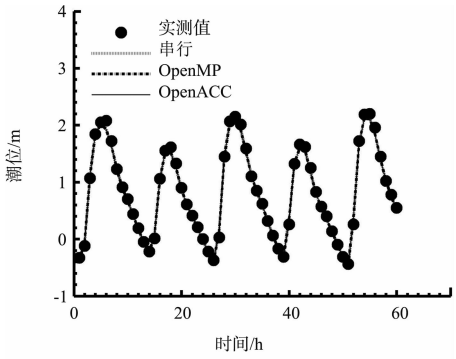
3.1 计算结果评估

1) 潮位验证。

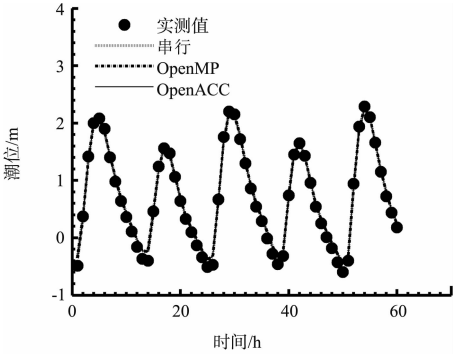
本文选取具有代表性的 4 个潮位站进行潮位验证（图 4）。由图 4 可知，模型计算结果与实测潮位比较符合，采用 OpenMP 和 OpenACC 两个并行模式的计算结果与串行模式基本无差异，表明不论在何种模式下，本文模型都能够准确地模拟该河段潮位变化过程。



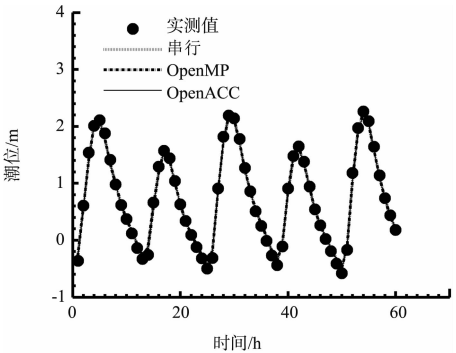
a) 中泰钢构站



b) 罗家桥站



c) 太字圩站

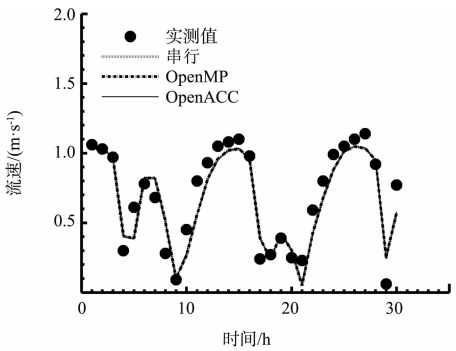


d) 一干河站

图 4 潮位验证

2) 流速流向验证。

本文选取具有代表性的 4 个测点进行流速流向验证（图 5、6）。表明计算流速与实测流速大小比较符合，计算流向与实测流向基本一致，采用 OpenMP 和 OpenACC 两个并行模式的计算结果与串行模式基本无差异。可见不论在何种模式下，本文模型均能够合理模拟本河段段水流流速变化过程。



a) FZ[#]-1600

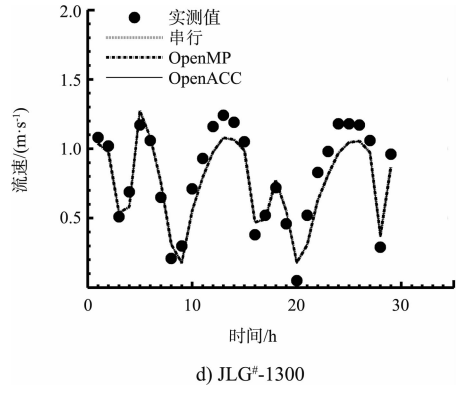
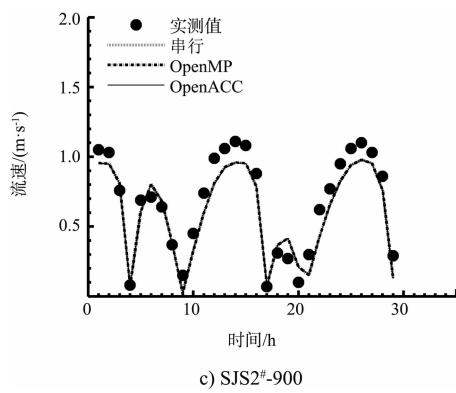
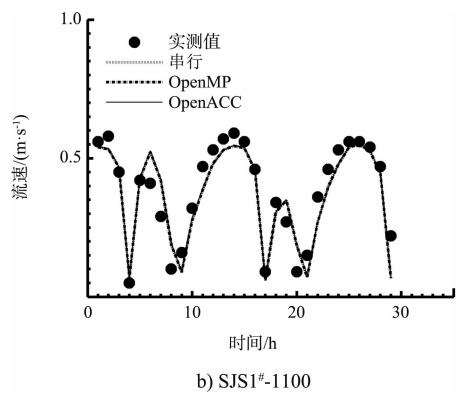


图 5 流速验证

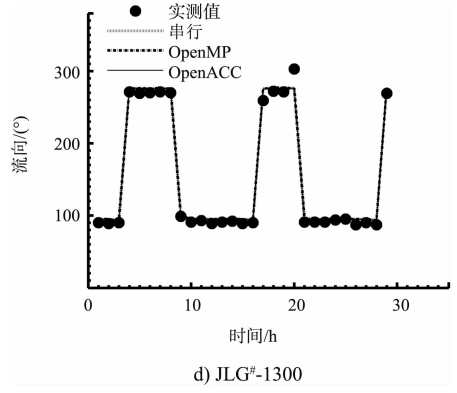
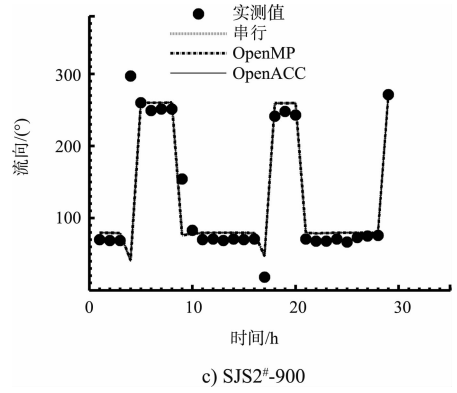
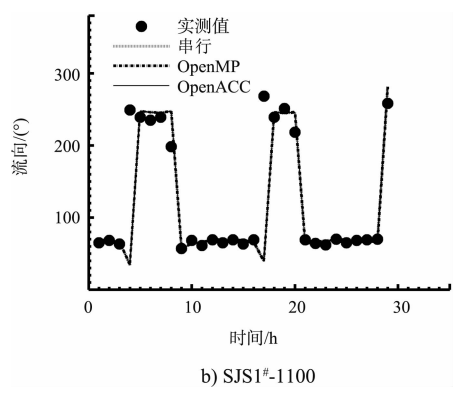
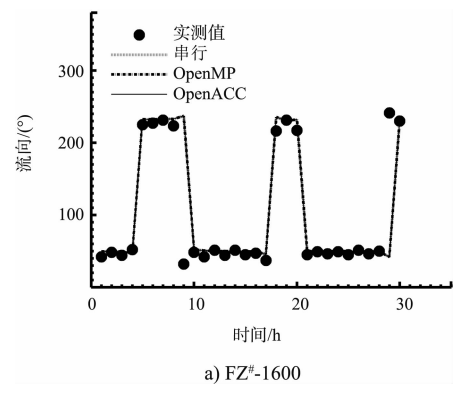


图 6 流向验证

3.2 计算效率评估

表 1 给出了采用不同并行模式下的加速比, 可知使用 3 个 CPU 进行简单的并行计算 (OpenMP) 的加速比仅为 1.20, 而采用 GPU 并行化 (OpenACC) 计算的加速比为 6.77。因此, 在常用的 PC 机上, 采用显卡并行 (OpenACC) 是提升数学模型计算效率的最佳并行模式, 能大幅提升数学模型的计算效率。

表 1 加速比

并行模式	加速比
OpenMP	1. 20
OpenACC	6. 77

4 结论

- 1) 对基于中央处理器（OpenMP）和显卡（OpenACC）的并行化模式做了简要介绍，并分别开展了相应的并行化研究，开发了相应的并行计算程序；
- 2) 以长江下游福姜沙水道为例，两种并行化模式不会改变模型计算精度，可靠性好；
- 3) 在常用的 PC 机上，采用 OpenMP 模型的加速比为 1. 2，而采用 OpenACC 模型的加速比为 6. 77；
- 4) 基于 OpenMP 和 OpenACC 的并行化处理均是解决高性能平面二维数学模型计算效率瓶颈的有效手段，且后者明显优于前者。

参考文献：

[1] Sleight P A, Gaskell P H, Berzins M, et al. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries [J]. Computers and Fluids, 1998, 27 (2) : 479-508.

[2] 王鑫, 曹志先, 岳志远. 强不规则地形上浅水二维流动的数值计算研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(1): 56-62.

[3] 岳志远, 曹志先, 闫军. 滑坡体溃决洪水数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(5): 492-500.

[4] Cao Z X, Pender G, Wallis S, et al. Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2004, 130(7): 689-703.

[5] Song L X, Zhou J Z, Li Q Q, et al. An unstructured finite volume model for dam-break floods with wet/dry fronts over complex topography[J]. International Journal For Numerical Methods In Fluids, 2011, 67: 960-980.

[6] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(3): 359-367.

[7] Yue Zhiyuan, Fu Zhongmin, Liu Huaihan, et al. Two-dimensional coupled dam-break flood mathematical model based on unstructured grid[C]. The 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 2011.

[8] 于守兵. 平面二维非均匀泥沙 OpenMP 并行计算模型[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 11-14.

[9] OpenMP Language Committee. OpenMP Application Program Interface [DB/CD]. (2013-07-01) [2013-11-01] <http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.0.pdf>.

[10] 江春波, 安晓谧. 二维非恒定渗流的有限元并行计算[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 454-457.

[11] 黄林显, 邵景力, 崔亚莉, 等. 基于 MPI 的地下水数值模拟并行算法研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12) : 7 356-7 358.

[12] Message Passing Interface Forum. MPI: A Message-Passing Interface Standard [DB/CD]. (2012-09-02) [2014-02-02] <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.0/mpi30-report.pdf>.

[13] 董莘, 葛万成, 陈康力. CUDA 并行计算的应用研究[J]. 信息技术, 2010(4): 11-15.

[14] OpenCL Working Group OpenCL Reference Pages[DB/CD]. [2014-02-02]. <http://www.khronos.org/registry/cl/sdk/1.2/docs/man/xhtml/>.

[15] OpenACC Working Group The OpenACC™ Application Programming Interface [DB/CD]. (2011-10-01) [2013-10-01], http://www.openacc.org/sites/default/files/OpenACC.1.0_0.pdf.

[16] Wu W M. Computational river dynamics [M]. London: Taylor & Francis, 2007.

[17] Toro E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows [M]. USA: John Wiley, 2001.

[18] Valiani, Begnudelli L. Divergence form for bed slope source term in shallow water equations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 652-665.

(本文编辑 武亚庆)