

# 分布式水文模型的 GPU 并行化及快速模拟技术

刘永和<sup>1</sup>,冯锦明<sup>2</sup>,徐文鹏<sup>3</sup>

(1.河南理工大学资源环境学院,河南 焦作 454000;2.中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室,全球变化东亚区域研究中心,中国科学院大气物理研究所,北京 100029;  
3.河南理工大学计算机科学与技术学院,河南 焦作 454000)

**摘要:**分布式水文模型对流域水文过程的应用深度及广度不断加深,常与数值天气及气候预报相结合,面临巨大的计算量。近年来 GPU 技术的进步使普通电脑能够实现高效而又廉价的并行计算。提出了资料插值、单元产流以及单元汇流采用 GPU 并行计算,马斯京根法河道汇流采用一种非并行的递归方法。基于笔记本电脑和 NVIDIA GPU/CUDA 结合 C# 语言,由分布式新安江模型在沂河流域的模拟应用表明,降水量空间插值及新安江产流的并行执行效率为普通 CPU 上 C# 的 8~9 倍。使用直接递归法实现马斯京根汇流演算比以往采用汇流次序表的执行效率提升 0.5~0.9 倍。

**关键词:**分布式水文模型;新安江模型;CUDA;并行计算;汇流

**中图分类号:**P338      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0852(2015)04-0020-07

## 1 引言

水文模型的应用目的已从以往单纯的河流径流预报扩展到农业、环境、生态等领域的模拟分析。近年来,在模拟地球大气系统的数值模式的持续发展中生成了陆面过程模式,这是一种从能量和质量两方面精细考虑地表能量流动和物质迁移的模型。近年来水文模拟机制正在成为陆面过程模式的一部分,可借助于气候模式的输出实现气候水文预报。但气候模拟的时间跨度很长,直接用其模拟结果驱动流域分布式水文模型需要极大的计算量,尤其是用于多成员集合模拟预报。

提高水文模型执行效率是一个亟待解决的问题,使用 GPU 并行技术是一种新途径。目前 GPU 计算能力有很大提高,它正在转向通用计算领域。NVIDIA 公司提出了统一计算设备架构(CUDA),实现了对 GPU 的程序开发支持。GPU 具有很高的性价比,其计算能力的不断提高将使它成为未来并行计算的主流。

本文提出在分布式水文模型中用 CUDA 实现产

流计算的并行化方法,并提出一种适合于与并行产流模块相结合的非并行的递归汇流执行方法,并以新安江模型为例进行试验模拟。

## 2 分布式水文模型

分布式水文模型(DHM)能为模拟现实世界的流域降雨径流物理过程提供有力工具<sup>[1]</sup>。早期的一些考虑流域空间变异的水文模型被认为是半分布式的,如 TopModel、新安江模型等。SHE 是第一个真正意义上的 DHM<sup>[2]</sup>,它以水动力学为基础。以水文学为基础的 DHM 有 DBSIM<sup>[3]</sup>和 TOPKAPI<sup>[4]</sup>。杨大文<sup>[5]</sup>等设计了基于等值线分割的坡面离散方案和山坡水文响应的 DHM。夏军等建立了基于非线性理论的时变增益 DHM<sup>[6]</sup>。刘昌明等建立了基于模块结构的不同尺度和结构的 DHM 系统 HIMS<sup>[7]</sup>。张东和张万昌建立了基于动态产流机制的水文模型 ESS1<sup>[8]</sup>。

DHM 还可以用来对土壤、植被、污染物等环境状况进行模拟研究。SWAT 模型中耦合了大量有关模块,

收稿日期:2013-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41105074, 40975048);中科院数字地球重点实验室开放基金项目(2011LDE010);河南理工大学博士基金项目(B2011-038)

作者简介:刘永和(1976-),男,内蒙古卓资人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事气象资料统计降尺度、分布式水文模型以及地球信息科学研究。E-mail:sucksis@163.com

DeRoos 等设计了基于物理机制的流域水文和土壤侵蚀的模型 LISEM<sup>[9]</sup>。李舟和董增川建立了考虑网格坡向对融雪和蒸散发影响的 DHM<sup>[10]</sup>。

流域单元划分方式是影响 DHM 是否易于实现的重要因素。据文献[7, 11], 目前大多数 DHM 的水文单元划分方法有三类: 第一类是矩形单元格网划分方法, 它在大幅度水文模型和流域水文模型中受到了广泛应用(如文献[12-17])等, 第二类是基于山坡的划分方法, 见文献[5, 18]。不少国外学者研究了不规则三角网流域划分方法, 如文献[19-24], 但这类划分方式需要较复杂的算法, 实际应用不多。

基于规则格网流域划分方式下的水文模型, 一般采用产流计算和汇流计算分离的做法, 较易实现。而产流计算具有天然的并行性, 适合于利用现代 GPU 的并行执行能力。

### 3 栅格型快速新安江模型的设计思路

栅格型新安江模型是基于栅格数字高程模型 (DEM)、以矩形格网划分水文单元的 DHM, 其构建原理是三水源新安江模型。可分为垂向机制和横向机制两部分。其中前者包含三层蒸散发计算、基于蓄水容量曲线的蓄满产流计算、三水源划分计算、单元内汇流等。单元内汇流指栅格单元内直接产流后的汇流, 其流程较短, 可抽象为坡面汇流, 使用串联线性水库的 Nash 瞬时单位线模型。

而横向机制只包括河道汇流问题, 采用马斯京根-康吉法。两种机制的分离有助于垂向机制(即单元格内的执行机制)的并行化实现。因此, 除马斯京根汇流算法外, 其它过程均按垂向过程来对待。

#### 3.1 模型的执行流程

分布式水文模型执行流程如图 1。模型集成了由 DEM 提取流域信息的多种算法, 只需提供指定分辨率的 DEM 即可生成所需的流域信息。在读入 DEM 资料后, 自动执行洼地填充并计算流向。模型也提供了累积流向、汇流次序表、流域边界、子流域划分等功能, 但模拟时只需要流向矩阵即可, 无需计算其它信息。

气象资料常表现为站点数据, 数据量较小, 可在模拟前一次性读入。模拟所需环节包括气象资料内插、产流计算和汇流计算。其中气象资料内插是指将站点观测数据(指降水和潜在蒸散发)内插为与 DEM 分辨率一致的网格资料, 该步可并行执行。本研究中是用反距离权重插值法来完成。

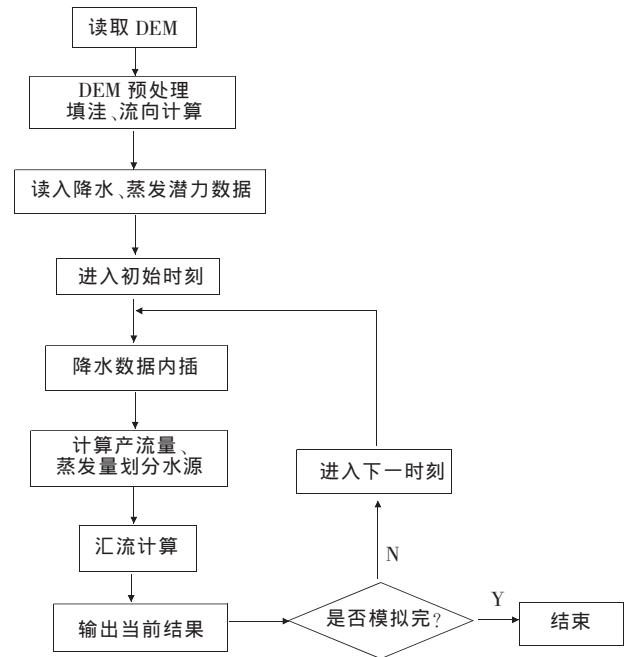


图 1 分布式水文模型的计算流程

Fig.1 The calculation process of the distributed hydrological model

CUDA 的并行编程需按需分配线程数。线程按行列坐标来分配, 因此对栅格单元内的计算只需按行列号交由对应的线程来执行。对 DHM 需要开启与 DEM 行列数相同的 CUDA 线程, 每个线程负责执行与其行列号对应栅格有关的计算。例如下面的代码:

```

int col=blockIdx.x * blockDim.x+threadIdx.x; //获取当前线程的行号
int row=blockIdx.y * blockDim.y+threadIdx.y; //获取当前线程的列号
if(col>=colCount || row>=rowCount) //凡是行列号不在栅格坐标范围内的线程, 则直接退出
    return;
//以下执行与本栅格有关的计算
float EM = PET[row*colCount+col]; //获取当前栅格上的潜在蒸散发量
... //其它计算
  
```

对资料插值、产流和蒸散发等与单个栅格有关的计算均可按类似方式完成。

#### 3.2 新安江产流模型

蒸散发、蓄满产流与水源划分等都属于垂向机制, 即可把各栅格作为水文响应单元, 以类似于集总式模型的方式计算。只需将新安江模型的经典程序代码经过适当改造后交由 CUDA 并行线程来执行。

新安江模型所需的参数在 CUDA 执行时可区分

为公用变量以及线程相关的变量,前者是指对所有线程或整个流域而言,其值是相同且唯一的,而后者对每个线程对应的栅格单元都有特定的取值,即所有栅格单元的取值构成矩阵。显然,站点降水、潜在蒸散发等资料都属于线程相关且时变的矩阵,在每个时次它们需由主机内存传入 CUDA 设备后再插值成网格资料。新安江模型的所有模型参数,如平均蓄水容量  $WM$ 、蓄水容量曲线系数  $B$ 、不透水面积占全网格的比重  $IMP$ 、水力传导度  $K$ 、稳定下渗率  $F_c$  和产流面积比  $FR$  等,理想的要求是不同单元的取值应不同。但现实情形下,不少参数无法获得,则可用全流域统一的取值,或者预先为不同子流域设定不同的参数。CUDA 设备执行完毕后,需要将各种输出网格矩阵传回给主机内存。

### 3.3 单元单位线计算

根据单位线的定义,若有净雨  $I(t)$ ,地表径流  $Q(t)$ ,单位线在任一时刻的值为  $h(t)$ ,则有:

$$Q(t) = \int_0^t h(t-\tau)I(\tau)d\tau = \int_0^t h(\tau)I(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

式中: $\tau$  为汇流时间; $h(\tau)$  为流域汇流曲线,见图 2。

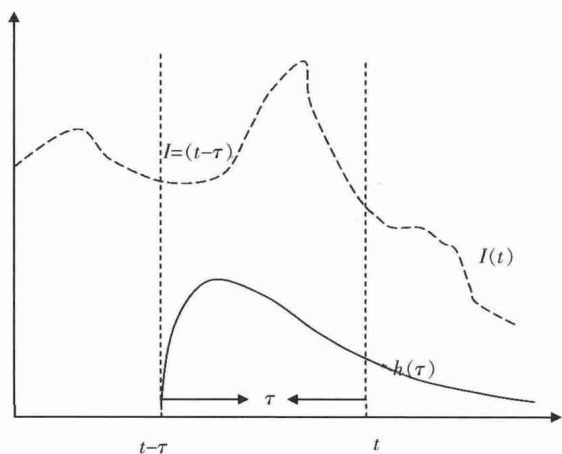


图2 单位线的卷积

Fig.2 The convolution of the unit hydrograph

用离散化方式来改写上述卷积公式,假定  $H(\Delta t)$  为离散化表达的单位线, $I(T-\Delta t)$  为距离  $t$  时刻间隔为  $\Delta t$  前的净雨量,且令  $T$  为单位线函数不为零的时段长度,若将  $T$  用整数离散化,则  $H(\Delta t)$  可离散化为  $H(1)$ 、 $H(2)$ 、 $\dots$ 、 $H(T)$ ,相应的  $I(T-\Delta t)$  离散化为  $I(T-1)$ 、 $I(T-2)$ 、 $\dots$ 、 $I(1)$ 、 $I(0)$ 。这时地表径流可以表达为:

$$Q(T) = \sum_{i=1}^T H(i)I(T-i) = H(1)I(T-1) + H(2)I(T-2) + \dots + H(T-1)I(1) + H(T)I(0) \quad (2)$$

需定义一个数组,它以时间顺序存放最近若干时

次的净雨量  $I(0)$ 、 $I(1)$ 、 $\dots$ 、 $I(T-1)$ ,而  $H(\Delta t)$  以  $\Delta t$  从 1 到  $T$  的时间间隔递增顺序存放。地表径流就是由距当前时刻最近一段时间内的净雨量用单位线作为权重的和,或称净雨向量与单位线向量的内积。计算时次每推进一步,需要用当前时次得到的净雨量更新净雨数组:已有数组的元素值向前挪移,将当前净雨量赋值给数组最末元素,代码如下:

For  $i=1$  to  $T-1$

$I(i)=I(i+1)$

End for

$I(T)$ =新时间点上的净雨量。

每个栅格都要设置一个这样的数组,每次完成该数组元素挪移后即可加权求和作为最终的产流量。不同栅格的该数组及单位线汇流计算相互独立,因而容易实现并行化处理。

### 3.4 马斯京根汇流算法

马斯京根汇流涉及到河网中洪水波的空间位移,每一时刻下游栅格单元上的汇流量可能会受到其上游所有单元的来水影响,不适于并行计算。而在传统串行的算法中,一般以基于汇流次序表的方法来实施,见文献[13-14]。汇流次序表是遵循栅格之间的汇流关系排列的,汇流演算时位于上游的栅格优先计算,位于下游的栅格后面计算,汇流关系同级的栅格顺序任意。汇流次序表需在模拟前由 DEM 提取得到,它本质上是通过从下游出口栅格开始向上递归搜索得到的,其算法与 Jensen<sup>[25]</sup>提出的累积流向矩阵的递归式统计算法类似。

实际上,汇流次序表是隐含在流向矩阵中的,可在递归逆向搜索时完成马斯京根汇流计算。马斯京根法的计算公式可参考众多文献,这里只说明算法。它由栅格在  $t-1$  时刻的入流量  $Q_0$  和出流量  $Q_2$ ,以及  $t$  时刻的入流量  $Q_1$  来递推  $t$  时刻出流量  $Q_4$ 。 $Q_0$  和  $Q_2$  已在  $t-1$  时刻求出,而入流量  $Q_1$  实际上是当前栅格在  $t$  时刻上游栅格的出流量之和。而上游栅格通过进入下一层递归来算出。算法思路为:

- (1) 给定栅格  $t-1$  的入流量  $Q_0$  和出流量  $Q_2$ ;
- (2) 从 8 个邻域中找出流向指向当前栅格的上游栅格;
- (3) 递归执行本例程,计算上游邻域栅格的出流量  $Q_4$ ;
- (4) 将这些上游出流量累加,作为当前栅格的入流量;
- (5) 调用公式(2)计算当前栅格出流量。

其中流向矩阵直接采用递归的例程如表 1。表 2



给出了与表 1 相适应的水文模型总控模块。从理论上讲,直接递归汇流计算在搜索上游邻域栅格的同时将上游栅格的汇流量顺便算出,而使用汇流次序表在统计每个栅格入流量时仍需搜索上游邻域栅格,但其邻域栅格的汇流量却是用汇流次序表来计算。

表1 应用马斯京根法汇流的递归算法

Table1 The recursive calculation algorithm of Muskingum method

```

Function Routing(flux, Q0, Q1, Q2, Q4, M, row, col, Δt, k, x)
Flux:流域产流量矩阵
Q0, Q1 栅格前一时刻的入流量和出流量矩阵, Q2, Q4 栅格当前时刻的入流量和出流量矩阵
row,col 为当前栅格的行列号; Δt, k, x 为马斯京根法的三个参数; M: 流向矩阵
返回值:当前栅格在当前时刻的出流量
InSum=0
//遍历当前栅格的 8 个邻域栅格,计算当前栅格的累积入流量
For dir=1..8
If (第 dir 方向上 M 的栅格流入本栅格)
    I=dir 方向上游邻域栅格的行号; J=dir 方向上游邻域栅格的列号;
//下面计算上游栅格(I,J)当前时刻的出流量 Q4,并累加给 InSum,作为当前栅格当前入流
    Q4[I,J]= Routing(flux, Q0, Q1, Q2, M, I, J, Δt, k, x)
    InSum+=Q4[I, J];
End if
End for
Q2[row, col]=InSum; q3=flux[row, col];
Q4[row, col]=Muskingum(Q4[row,col], Q1[row,col], Q2[row,col], q3,Δt, k, x);
Return Q4[row, col];
End function
    
```

表2 分布式水文模型的主调程序

Table2 The main procedure of the distributed hydrological model

```

Procedure RiverSimulate (Outlet_row, Outlet_col, Δt, k, x)
Outlet_row, Outlet_col:流域出口栅格的行列号
创建并初始化 PreInQ、PreOutQ,CurrInQ, CurrOutQ 矩阵,
分别存放前一时刻和当前时刻的栅格入流和出流量;
For t =1 to n by step 1
调用新安江产流量模块(可并行执行)计算当前时刻的产流量矩阵 flux;
Routing (flux, PreInQ, PreOutQ, CurrInQ, CurrOutQ,M, Outlet_row, Outlet_col, Δt, k, x)
输出 CurrOutQ 矩阵;
将当前时刻的 CurrInQ、CurrOutQ 变为下一时刻的 PreInQ 和 PreOutQ;
(只需令 PreInQ 和 CurrInQ 的变量名对调,PreOutQ 和 CurrOutQ 的变量名对调)
End for
End Procedure
    
```

为最终测验流域内多个水文站处的模拟流量,需按照实际水文站的位置设定多个径流输出。输出的设置直接取对应水文站位置的栅格汇流量即可。可以在流域中任何位置设置监控输出,只需跟踪对应栅格上的输出值即可。

#### 4 应用分析

本水文模型集成在一个自主设计的可视化流域信息处理系统(简称为 VDPS)中。VDPS 还包括了基于栅格 DEM 的流域信息提取模块、GIS 可视化等众多功能,所有上述计算一经完成即可由可视化模块显示出来,并支持屏幕交互浏览和分析。水文模型部分虽只需一个合格流向矩阵即可,但 VDPS 对模拟前的 DEM 填洼正确性、流域出口设置等准备工作提供了不少辅助功能,并将各种模拟变量实时显示。如可获得连续多时次的地表径流汇流动画。某一时次的瞬时汇流状况如图 3。

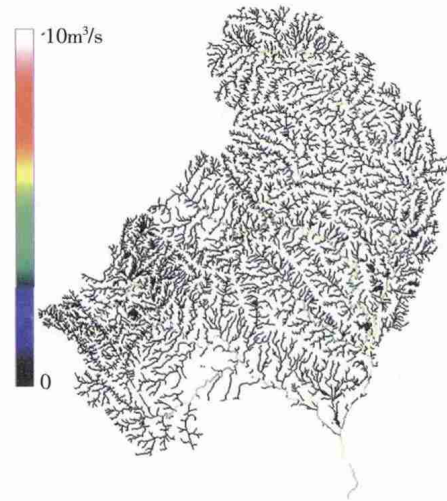


图 3 由马斯京根法计算的流域汇流矩阵  
Fig.3 A river routing simulated using Muskingum-Cunge method

模拟流域为山东省境内的沂河流域,其中 3 个主要水文测站为临沂站、葛沟站和角沂站。选用分辨率为 240m 的美国地质调查局 (USGS)DEM 地形数据提取流域河网信息,结果表明提取的河道与实际河道相差较小。

受资料所限,本次模拟均假定所有模型参数在流域内是相同的。据沂河流域内 2005~2007 年的若干次降水-径流记录进行水文模拟,按照流域地形、植被、土壤状况以经验形式结合对输出结果的观测来率定了模型参数。图 4 中给出了两次较大降水后模拟的临沂

水文站的多种径流量。对 2005 年 9 月 20 日和 2007 年 8 月 10 日的两次降水过程,率定好的参数能使临沂站

的总径流量获得较好的模拟效果,Nash-Suttcliffe 效率系数分别能达到 0.86 和 0.67。

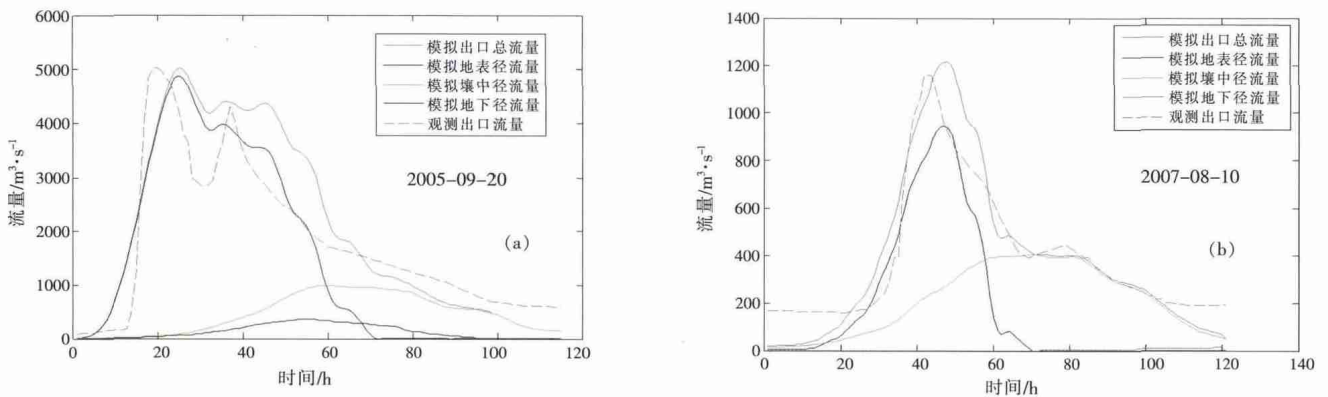


图4 两次降水-径流在临沂水文站的模拟流量及观测流量对比

Fig.4 The comparison of the simulated hydrograph with the observed at the Linyi station

由模拟测验过程表明,该水文模型能够同时实现多个流域出口上的径流输出模拟。但受水文资料所限,不能得到分别针对三个控制水文站的参数值。

水文模型的执行平台为笔记本电脑,配置 Intel i5 (2.53GHZ)的 CPU,NVIDIA 显卡 Geforce M370,操作系统为 WindowsXP。分布式水文模型主界面为 C# 语言,并行部分用 CUDA-C 编写而成,并由 C# 通过驱动 API 执行,其运行平台为 Microsoft.net 3.5、CUDA3.2。

对水文模型的降水量插值模块及新安江产流过程在并行(CPU)和串行执行(CUDA GPU)方式下分别计时运行,模拟 2006 年 8 月 28 日、2005 年 9 月 20 日和 2006 年 6 月 29 日三次历史较大降水产生的径流量。三次模拟的模拟时段长分别为 8d、5.5d 和 6d。获得的 CPU 耗时分别为 47 984ms、30 250ms 和 34 593ms,而用 CUDA 耗时分别为 5 078ms、3 593ms、3 890ms。CPU 对 CUDA 的耗时比分别为 9.45、8.41 和 8.89 倍。

以地表径流量的汇流过程为例,对水文模型的汇流计算过程进行测试,比较使用汇流次序表与直接递归两种计算方法的执行效率。由于这些汇流过程全部由 C# 语言所编程序的串行执行来完成,受内存垃圾回收机制的影响,对同样的任务执行耗时并不固定,但浮动幅度不大。这里只列出随机执行完一趟模拟所需的耗时量。由汇流次序表对上述三次过程的模拟耗时分别为 43 375ms、28 734ms、33 015ms,而用直接递归

耗时则为 31 000ms、15 156ms 和 17 343ms。

## 5 总结与展望

本文提出了以 GPU 实现资料插值和单元产流的并行计算,以及用递归法实现马斯京根法的串行汇流执行的水文模型快速计算方法。由针对沂河流域的模拟应用表明,并行执行的降水量空间插值及新安江产流计算的运行效率为普通 CPU+C# 执行效率的 8~9 倍。使用直接递归法实现的非并行马斯京根汇流演算与以往采用汇流次序表的执行效率相比提升 0.5~0.9 倍。

本文所用的并行计算平台属最低档且只有 16 个内核的 NVIDIA 显卡。目前 NVIDIA tesla 计算卡含接近 450 个处理内核,其对并行处理能力会有 200 倍的效率提升。这有助于实现天气及气候预报模式结合的集合水文预报、基于遗传算法的水文模型参数优化或集合卡尔曼滤波水文模型数据同化等众多应用的潜力巨大。

河道汇流计算涉及单元之间的水量交换问题,它是难以实现并行计算的部分。但当水文模型变得越来越复杂时,其计算量的增加主要体现在对垂向机制的处理上。因此使用对垂向机制的并行计算能够基本解决分布式水文模型计算量较大的问题。但由于河道水流速度有限,某河道栅格的过水量只与其上游一定距离范围内的栅格产流量有关。若能将汇流的空间依赖限定在一定距离内,则也可解决汇流的并行计算问题,仍需深入研究。

## 参考文献:

- [1] 芮孝芳,黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004,24(2):55-58. (RUI Xiaofang, HUANG Guoru. Current situation of distributed hydrological model and its future development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(2):55-58. (in Chinese))
- [2] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen, SHE .1. History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986,87:45-59.
- [3] Garrote L, Bras R L. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models [J]. Journal of Hydrology, 1995,167:279-306.
- [4] Ciarpapica L, Todini E. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at differ entscales [J]. Hydrological Processes, 2002,16(2):207-229.
- [5] Yang D, Herath S, Musiak K. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2002,47(1):49-65.
- [6] 夏军,叶爱中,王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型( )——模型的原理与结构[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005,38(6):10-15. (XIA Jun, YE Aizhong, WANG Gangsheng. A distributed time-variant gain model applied to Yellow river (I): model theories and structures [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(6):10-15. (in Chinese))
- [7] 刘昌明,郑红星,王中根. 流域水循环分布式模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. (LIU Changming, ZHENG Hongxing, WANG Zhonggen. Distributed Hydrological Modelling of River Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 张东. 基于渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2006. (A Study on Distributed Infiltration Excess and Saturation Excess Soil-water Integration Model for Hydrology[D]. Nanjing: Nanjing University, 2006. (in Chinese))
- [9] Deroo A, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: theory, input and output [J]. Hydrological Processes, 1996,10(8):1107-1117.
- [10] 李舟,董增川. 基于网格坡向判断的分布式水文模型研究应用[J]. 水利水电技术, 2007,38(9):1-4. (LI Zhou, DONG Zengchuan. An application study on distributed hydrological model based on aspect estimation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007,38(9):1-4. (in Chinese))
- [11] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展 [J]. 水利学报, 2010,(9):1009-1017. (XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,(9):1009-1017. (in Chinese))
- [12] 李致家,张珂,姚成. 基于 GIS 的 DEM 和分布式水文模型的应用比较[J]. 水利学报, 2006,37(8):1022-1028. (LI Zhijia, ZHANG Ke, YAO Cheng. Comparison of distributed geological models based on GIS technology and DEM [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(8):1022-1028. (in Chinese))
- [13] 李致家,姚成,汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007,35(2):131-134. (LI Zhijia, YAO Cheng, WANG Zhonghua. Development and application of grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007,35(2):131-134. (in Chinese))
- [14] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报, 2009,28(2):25-34. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Yuxia, et al. Study on grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(2):25-34. (in Chinese))
- [15] 王莉莉,李致家,包红军. 基于 DEM 栅格的水文模型在沂河流域的应用 [J]. 水利学报, 2007,(S1). (WANG Lili, LI Zhijia, BAO Hongjun. Application of hydrological models based on DEM in the Yihe basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,(S1). (in Chinese))
- [16] 王莉莉,李致家,包红军. 基于栅格的分布式超渗产流水文模型构建及比较 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2010,38 (2):123-128. (WANG Lili, LI Zhijia, BAO Hongjun. Development and comparison of grid-based distributed hydrological models for excess-infiltration runoffs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(2):123-128. (in Chinese))
- [17] 许继军,杨大文,刘志雨,等. 长江上游大尺度分布式水文模型的构建及应用[J]. 水利学报, 2007,38(2):182-190. (XU Jijun, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Large scale distributed hydrological model and its application to the upstream of Yangtze river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(2):182-190. (in Chinese))
- [18] 王中根,左其亨,. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002,21(5):430-439. (WANG Zhonggen, ZUO Qiting. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM [J]. Progress in Geography. 2002,21(5):430-439. (in Chinese))
- [19] Tachikawa Y, Shiiba M, Takasao T. Development of a basin geomorphic information-system using a tin-dem data structure [J]. Water Resources Bulletin, 1994,30(1):9-17.
- [20] Goodrich D C, Woolhiser D A, Keefer T O. Kinematic routing using finite-elements on a triangular irregular network [J]. Water Resources Research, 1991,27:995-1003.
- [21] Palaciosvelez O L, Cuevasrenaud B. SHIFT - a distributed runoff model using irregular triangular facets [J]. Journal of Hydrology, 1992,134(1-4):35-55.
- [22] Tucker G E, Lancaster S T, Gasparini N M, et al. An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modeling using triangulated irregular networks [J]. Computers & Geosciences, 2001,27(8):959-973.
- [23] Ivanov V Y, Vivoni E R, Bras R L, et al. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model[J]. Water Resources Research. 2004,40(11).
- [24] Ivanov V Y, Vivoni E R, Bras R L, et al. Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin

- hydrology: a fully -distributed physically -based approach [J].  
Journal of Hydrology, 2004,298(1-4):80-111.
- [25] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from  
digital elevation data for geographic information -system analysis [J].  
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988,54 (11):  
1593-1600.

## GPU Parallel Computing and Fast Simulation of Distributed Hydrological Models

LIU Yonghe<sup>1</sup>, FENG Jinming<sup>2</sup>, XU Wenpeng<sup>3</sup>

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institute of Computer Science and Technologies, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Distributed hydrological models have been applied in various watershed hydrological processes. They are often combined with numerical weather and climate prediction, which make them need enormous calculation. In recent years, the progress of GPU technology makes the ordinary computer to perform efficient and inexpensive parallel computing. This paper presented the GPU implementation of data interpolation, runoff generation and unit hydrograph calculation in parallel computation. A recursive non-parallel implementation of Muskingum river-routing method was also presented. Based on the common notebook computer with NVIDIA GPU/CUDA and C# language, the parallel simulation of rainfall-runoff process in the Yihe River Basin by the Xinanjiang Model based distributed hydrological model indicates that the performance of parallel execution of precipitation spatial interpolation and Xinanjiang discharge calculation has a speed of 8~9 times of that from a common CPU based C # execution. The recursive Muskingum method was also 0.5~0.9 times faster than the traditional calculation using a routing order table.

**Key words:** distributed hydrological model; Xinanjiang model; CUDA; parallel calculation; flow concentration

(上接第 13 页)

- [41] Deng Z, Priestley S C, et al. Canopy enhanced chloride deposition in coastal South Australia and its application for the chloride mass balance method[J]. Journal of Hydrology, 2013,497: 62-70.
- [42] Edmunds W M, Fellman E, Goni I B, Prudhomme C. Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigeria [J]. Hydrogeology Journal, 2002,10(1):205-215.
- [43] Guan H, Love A, Simmons C, et al. Factors influencing chloride deposition in a coastal hilly area and application to chloride deposition mapping [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14:801-813.
- [44] Edmunds W M, Tyler S W. Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions [J]. Hydrogeology Journal, 2002,10(1):216-228.

## Discussion on Application of Chloride Mass Balance Method

YUAN Ruiqiang<sup>1</sup>, LONG Xiting<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, SONG Xianfang<sup>4</sup>

(1. School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. 402 team, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Hunan Province, Changsha 410014, China; 3. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Chloride is used as the inert tracer in the chloride mass balance method (CMB) to discover the variances of groundwater recharge rates and to offer reliable information about environment and climate changes. The method is simple and valid gaining a wide range of applications, although the limits are also obvious. In this paper, research based on CMB and evolutions of the method were widely reviewed. Hypotheses and limits were discussed. Future works were emphasized. Dry depositions of chloride need to be observed, and spatial variance of the depositions should be studied well. Multi-tracers, soil properties and duplicated borehole should be employed to enhance cross validations. The need of studies on the budget of chloride and the related natural processes and anthropogenic activities was highlighted. Our work contributes to promote the applications and developments of the method in groundwater hydrology.

**Key words:** chloride mass balance; arid and semi-arid areas; groundwater recharge; tracers; unsaturated zone