基于水动力学模型的城市洪涝灾害模拟

汇报人： 张尚弘

华北电力大学 水利与水电工程学院

2021年10月

中国防汛抗旱管理杂志
仅供个人学习
版权归原作者所有

汇报提纲

一、研究背景

二、主要研究工作

三、几点认识

中国防汛抗旱管理发布
仅个人学习
版权归作者所有

一、研究背景

◆ 城市洪涝是当今世界范围内广泛面临的难题，既影响城市正常的生产生活秩序，更造成了巨大的生命和财产损失。

- ❑ 2012.7.21 北京暴雨，死亡79人
- ❑ 2019.4.11 深圳暴雨，11人死亡
- ❑ 2020.5.21 广州暴雨，4人死亡
- ❑ 2021.7.20 郑州特大暴雨，292人死亡，47人失踪
- ❑ 2021.10.5 山西暴雨。。。

中国防洪抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

一、研究背景

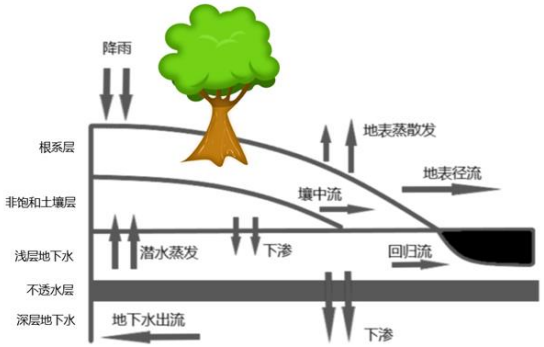
◆ **及时准确的洪涝预报可以有效降低洪涝灾害对城市居民的危害**

按洪水来源：

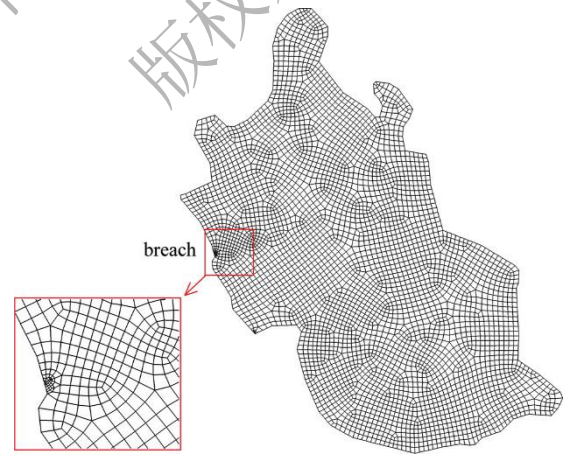
◆ 外部入侵洪水（如山洪入侵、溃堤洪水）

◆ 暴雨内涝洪水

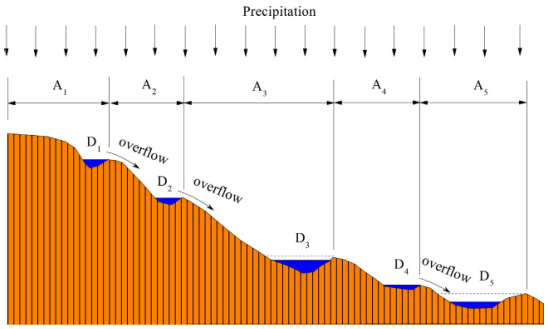
按计算方法：



◆ 水文模型



◆ 水动力模型



◆ 简化模型

中国防汛抗旱科技发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

一、研究背景

◆ 模型选择受资料、精度、过程、速度、洪水类型等因素的影响

Table 1
Comparison of representative simplified inundation model, hydrologic model and hydrodynamic model with the new approach presented in this paper.

Type/name of model and the authors	Discretization unit	Runoff generation calculation	Flow spreading algorithm	Model input	Model output	Flood type in the application
RFIM (Krupka et al., 2007)	Flood storage cells obtained with DEM	None	Flood inundation searching based on storage cells. Spreading the flood volumes by filling the cells adjacent to the input points and spilling the excess to the neighbor cells	DEM; Total volume of floodwater; Entry point of the flood	Final inundation extent	Fluvial flood
RFSM (Gouldby et al., 2008; Lhomme et al., 2008), ISIS FAST (CH2M HILL, 2013)	Impact Zones (IZs) which represent topographic depressions	None	Flood inundation searching based on IZs. Spreading the flood volumes by filling the IZs adjacent to the input points and spilling the excess to the neighbor IZs	DEM; Total volume of floodwater; Entry point of the flood	Final inundation extent	Fluvial flood
FCDC (Zhang et al., 2014a)	Terrain triangle network	None	Flood inundation searching based on water level, topography and the flow continuity	DEM; Water level or flood volume; Entry point of the flood	Final inundation extent	Fluvial flood
USISM (Zhang and Pan, this paper)	Subcatchment with the outlet of depression	Calculated with generalized equation and average drainage velocity	Flow spreading based on flow accumulation order of a watershed	DEM; Rainfall; Percentage of impervious area; Average drainage velocity	Final inundation extent	Pluvial flood
GUFIM (Chen et al., 2009)	Independent catchment	Calculated with rainfall, Green-Ampt infiltration model and average drainage velocity	Flood inundation searching based on catchment A collection of routing-start-points is used to begin simulation	DEM; Storm intensity and duration; Soil properties; Initial status of soil moisture; Sewer system conveyance rate	Final inundation extent	Pluvial flood
CA approach (Ghimire et al., 2013)	DEM grid	Using rainfall as runoff and hydrological losses are not considered	Flow is driven by the slopes between cells and limited by the transferrable volume and the hydraulic equations	DEM; Rainfall; Initial water surface elevation; Time step	Spatio-temporal evolution of runoff	Pluvial flood
LISFLOOD-FP (Bates and De Roo, 2000)	DEM grid	None	Flow is calculated using simplified Saint Venant equation	DEM; Inflow discharge hydrograph; Channel and floodplain parameters; Time step	Spatio-temporal evolution of runoff	Fluvial flood
SWMM (Rossman, 2004)	Subcatchments; conduits; junctions; outfall	The runoff generation considers detailed rainfall, infiltration and meteorological data	Flow is calculated using generalized Saint Venant equation	DEM; Storm intensity and duration; Soil properties; Land use; Detailed sewer system data; Meteorological data	Spatio-temporal evolution of runoff	Pluvial flood
2D hydrodynamic model (Xie et al., 2005)	Unstructured grids; conduits	Generalized rainfall–runoff equation and sewer system discharge	Flow is calculated using Saint Venant equation	DEM; Storm intensity and duration; Land use; Detailed sewer system data	Spatio-temporal evolution of runoff	Pluvial flood

中国防洪抗旱减灾工程技术研究中心
仅供个人学习
版权归原作者所有

二、主要研究工作

1、基于简化算法的城市洪涝模拟

- 城市暴雨淹没模拟模型(USISM)
- 洪水连通域计算法（FCDC)

2、基于水动力学模型的城市洪涝模拟

- 非对称溃堤算例
- 非平底溃坝水流算例
- 哈尔滨胖头泡算例
- 哈尔滨南岗区雨洪模型结果

高精度地形的获取方式

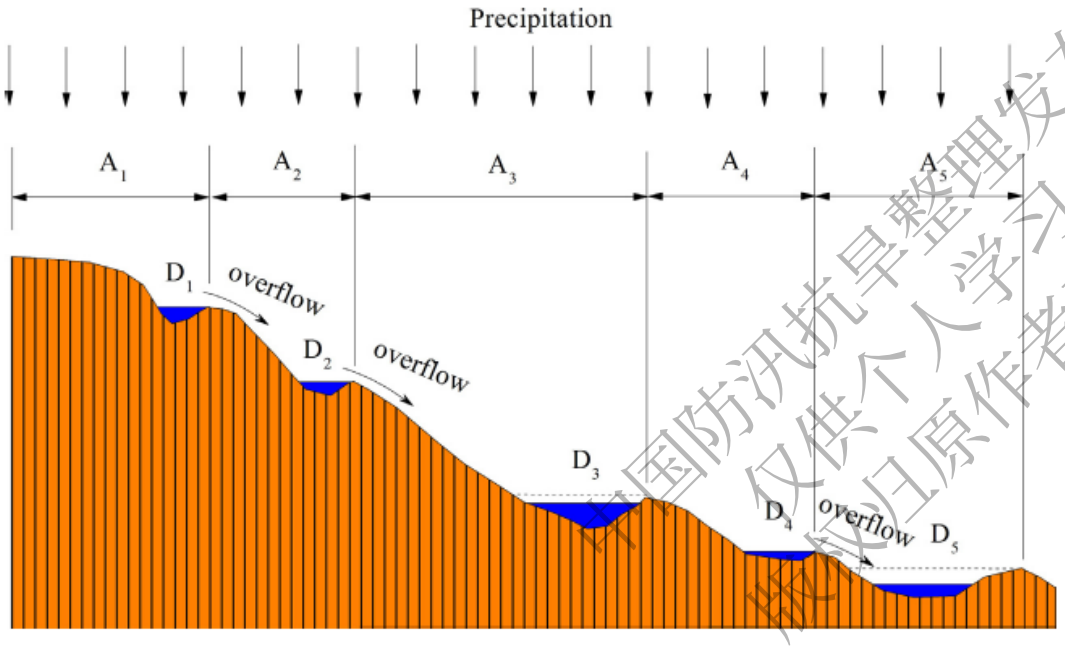
采用Roe格式的求解方法

提高计算效率的加速算法

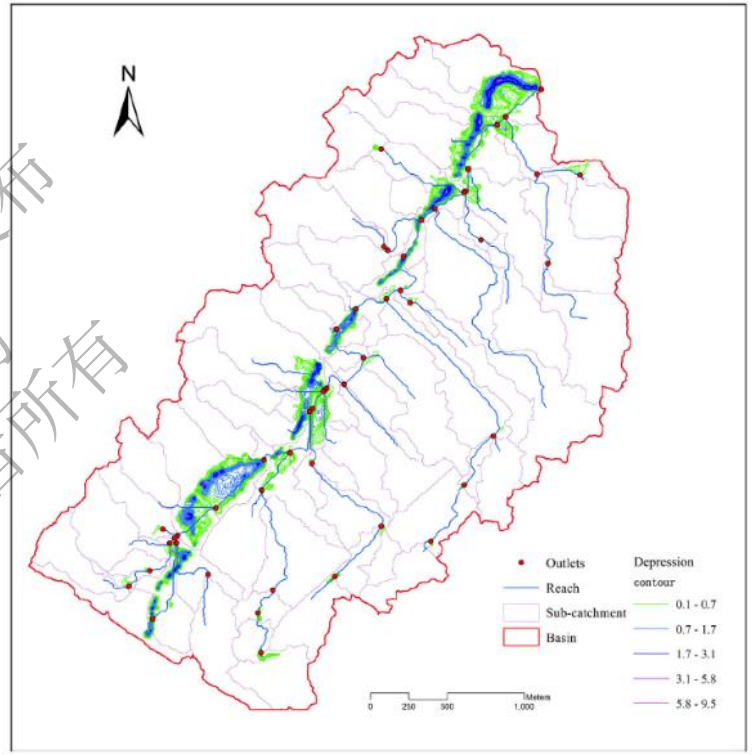
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.1 基于简化算法的城市洪涝模拟

城市暴雨淹没模拟模型(USISM)



降雨径流转移过程示意图



哈尔滨市南岗区内涝研究区

防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

◆ 根据DEM计算洼地蓄水参数 ->计算各洼地集水区域 ->根据洼地间的水流联系依次计算淹没量。

Zhang S, Pan B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. Journal of hydrology, 2014, 517: 260-268.

2.1 基于简化算法的城市洪涝模拟

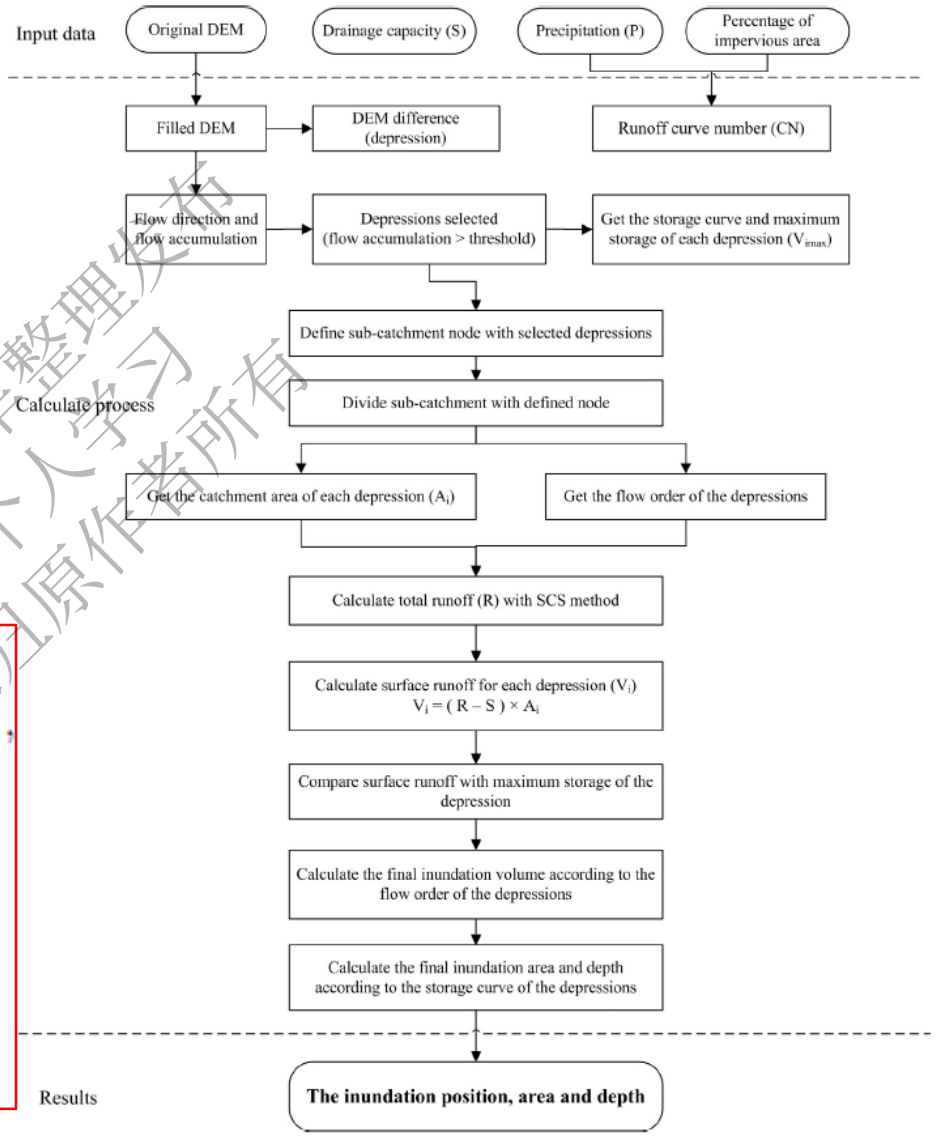
城市暴雨淹没模拟模型(USISM)

- 高精度DEM
- SCS产流计算
- 区域平均排水速度
- 根据洼地间的水流联系
- 依据水量平衡计算静态淹没量

$$R = \begin{cases} (P - 0.05Sr)^2/(P + 0.95Sr), & P \geqslant 0.05Sr \\ 0, & P < 0.05Sr \end{cases},$$

$$Rs = R - S.$$

$$V_i = Rs \times A_i = (R - S) \times A_i,$$



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.1 基于简化算法的城市洪涝模拟

城市暴雨淹没模拟模型(USISM)

Comparison of simulated and measured inundation data of rainfall on 6/4/2009.

Inundation position	Measured depth (cm)	Simulated depth (cm)	Relative error of depth (%)	Measured area (m^2)	Simulated area (m^2)	Relative error of area (%)	Measured volume (m^3)	Simulated volume (m^3)	Relative error of volume (%)
Guogeli street	20	13	−35	300	344	15	60	45	−25
Renhe street	20	26	30	2500	2246	−10	500	597	19
Dacheng street	20	18	−10	2000	2580	29	400	462	16
Wenhua street	30	31	3	60	190	217	18	58	222
Jianshe street	20	26	30	500	645	29	100	169	69
Lianbu street	20	29	45	60	82	37	12	24	100
Fanrong street	20	12	−40	600	755	26	120	90	−25

模型特点：

- （1）**数据要求低**：输入数据少，特别是管网数据，采用设计的平均排水速度代替。
- （2）**建模简单**：根据DEM划分子流域，考虑洼地间的水流传播。
- （3）**计算速度快**：不考虑水动力过程，快速判断淹没区域。

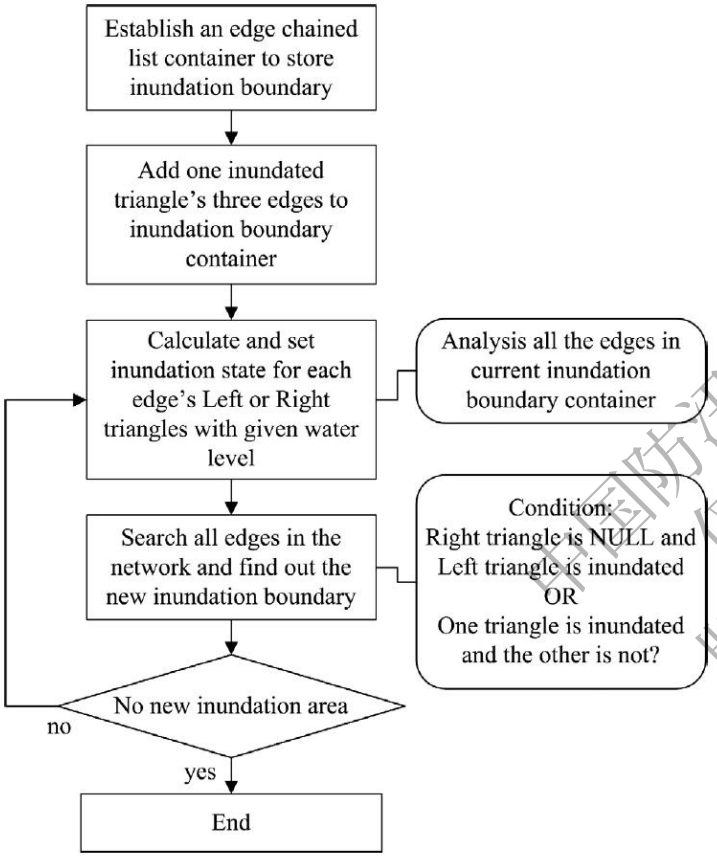
局限性：

- （1）基于水量平衡方程，不考虑水动力过程，因此只能计算暴雨的最终淹没状况，不能确定淹没过程；
- （2）模拟中简化了许多参数，模拟精度受到一定的影响。

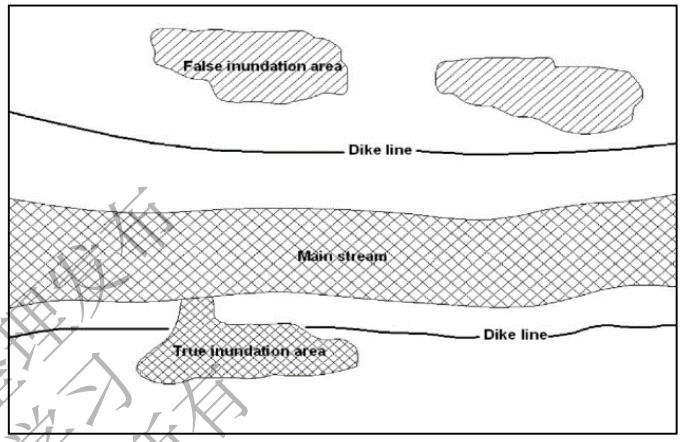
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.1 基于简化算法的城市洪涝模拟

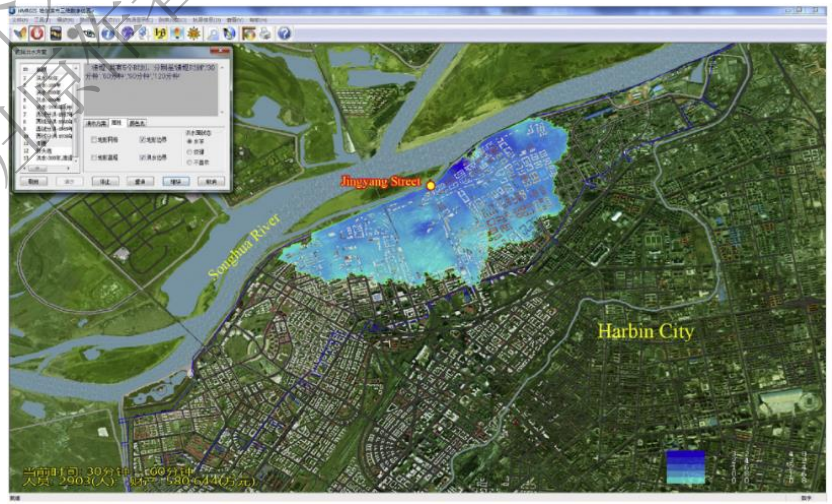
洪水连通域计算法（FCDC）



FCDC洪水淹没模拟算法流程图



有"源"淹没示意图



哈尔滨城区3D淹没图

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

Zhang S, Wang T, Zhao B. Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network. Journal of hydrology, 2014, 509: 406-415.

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

◆ 二维水动力学模型在城市洪涝模拟方面具有精度高、模拟过程详细等优点，但也存在以下几方面的技术难点：

①资料要求高

需要高精度的地形地貌数据和工程数据

②计算稳定性要求高

需要健壮的计算格式以求解各种特殊的水流条件

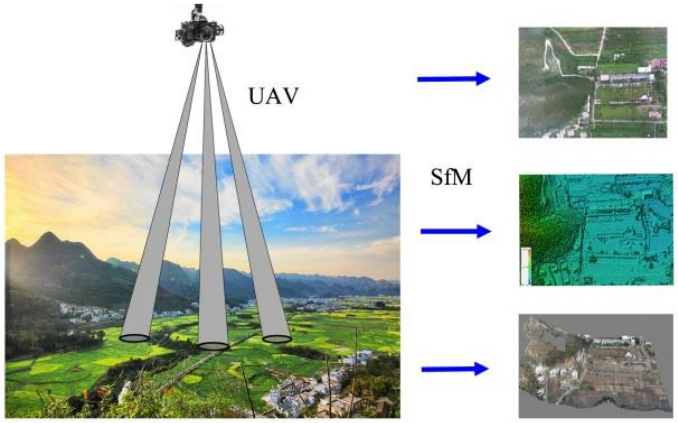
③计算速度慢

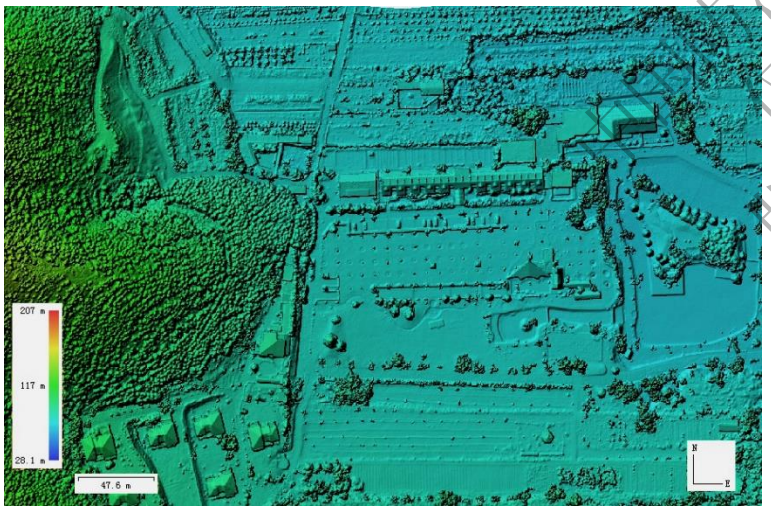
对大范围高精度网格的模拟耗时巨大

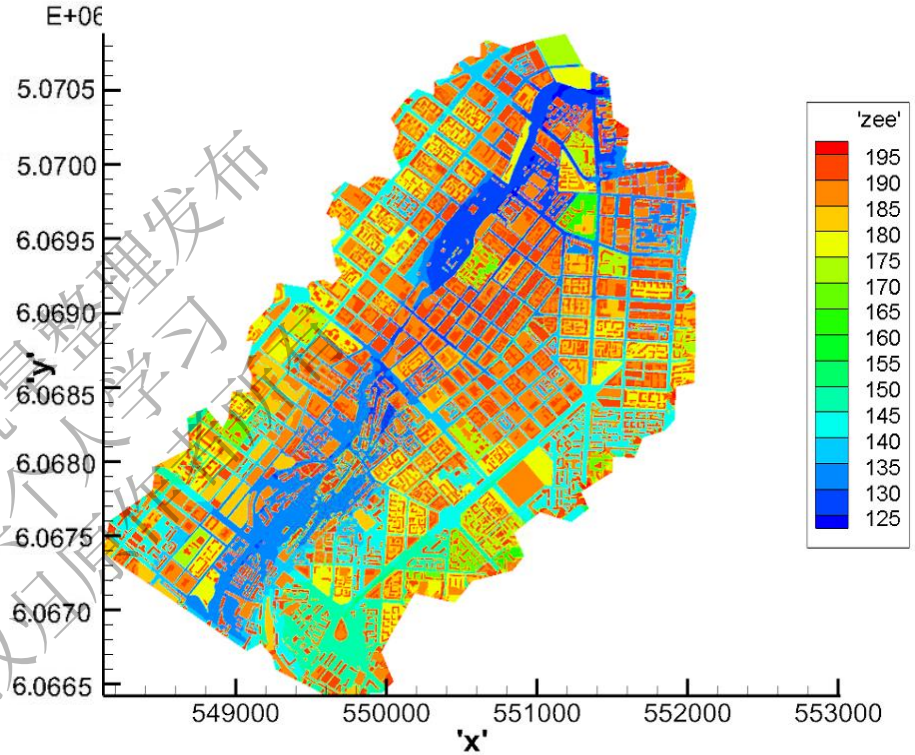
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

高精度地形的获取方式







拍摄高度（m）	分辨率（cm）	水平误差（cm）	垂直误差（cm）
120	2.6	10	9

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

李文达,闫启明,张尚弘,等. 基于无人机和SfM的地貌数据采集精度影响研究. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(06): 1225-1234.

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

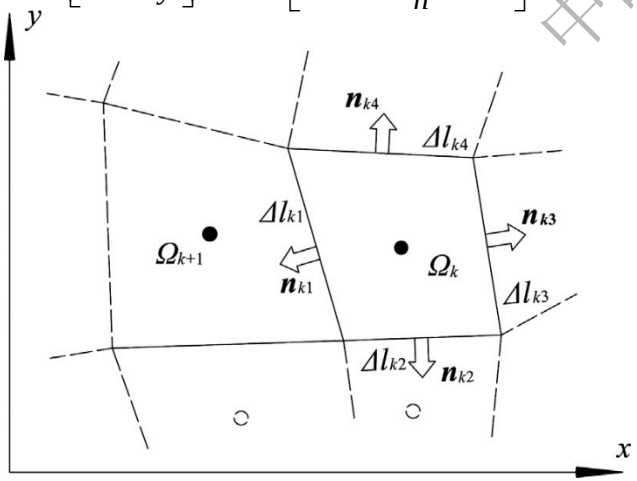
采用Roe格式的求解方法

采用二维浅水方程守恒形式：

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F(U)}{\partial x}+\frac{\partial G(U)}{\partial y}=S_0(U,x,y)+S_f(U,x,y)$$

$$U=\begin{bmatrix}h\\hu\\hv\end{bmatrix},\quad F(U)=\begin{bmatrix}hu\\hu^2+\frac{1}{2}gh^2\\huv\end{bmatrix},\quad G(U)=\begin{bmatrix}hv\\huv\\hv^2+\frac{1}{2}gh^2\end{bmatrix}$$

$$S_0=\begin{bmatrix}0\\-gh\frac{\partial z_b}{\partial x}\\-gh\frac{\partial z_b}{\partial y}\end{bmatrix},\quad S_f=\begin{bmatrix}0\\-gh\frac{n^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}\\-gh\frac{n^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}\end{bmatrix}$$



二维模型有限体积法求解示意图

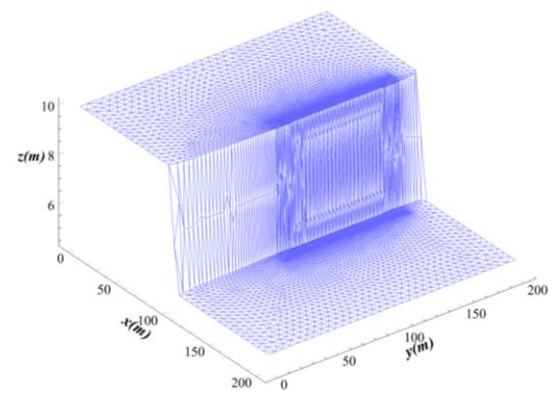
- Ⅰ 非结构网格剖分计算域
- Ⅱ 有限体积法离散控制方程
- Ⅳ Roe格式计算控制单元界面数值通量
- Ⅴ 底坡特征分解法处理底坡源项
- Ⅵ 最小水深法处理动边界

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

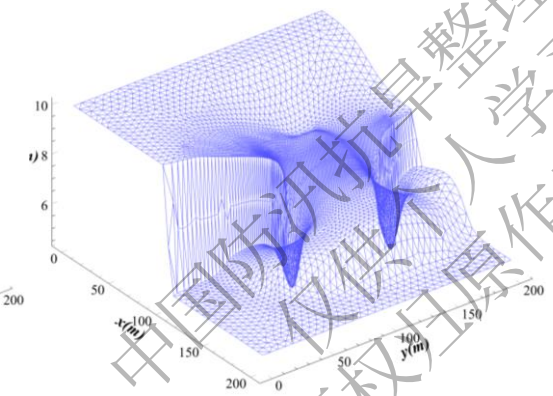
2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

非对称溃堤算例

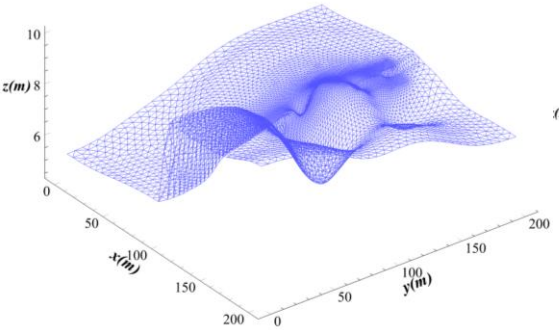
- 在长 200m、宽 200m 且坡度为零的矩形区域中间设有一坝，初始时刻上游水位 10.0m，坝下游水位 5.0m，某一时刻大坝突然开有一宽度为 75m 的非对称缺口。
- 划分网格13338个，网格内地底高程均为 0，底坡糙率为 0.04，模拟时间160秒。



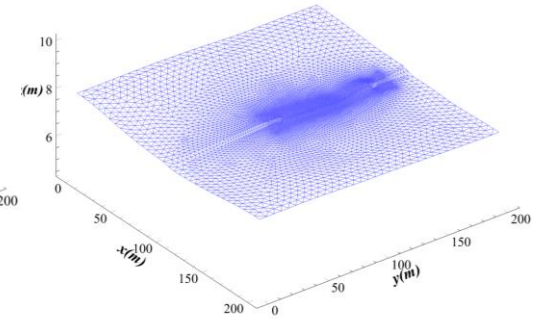
t=0 s



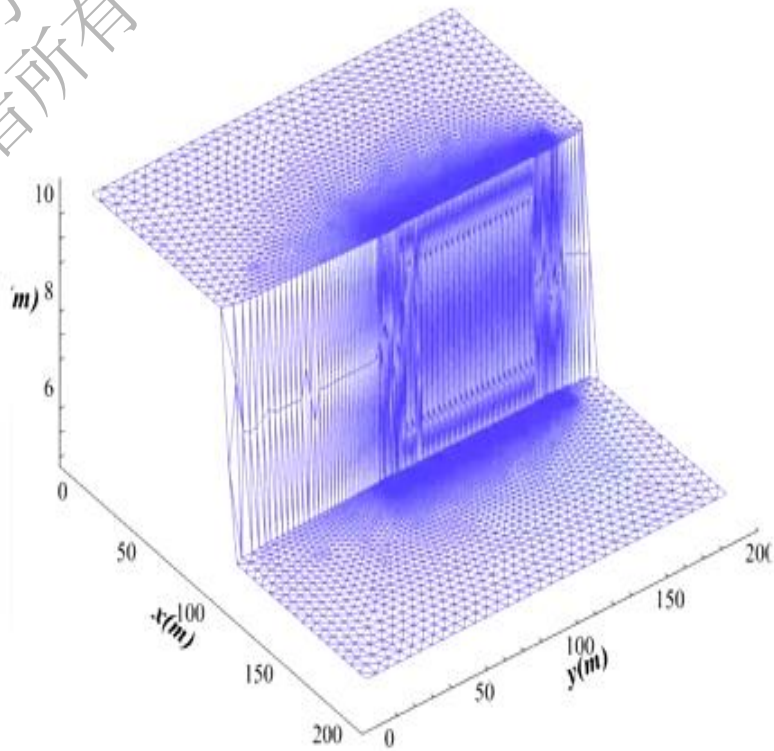
t=7.2 s



t=40 s



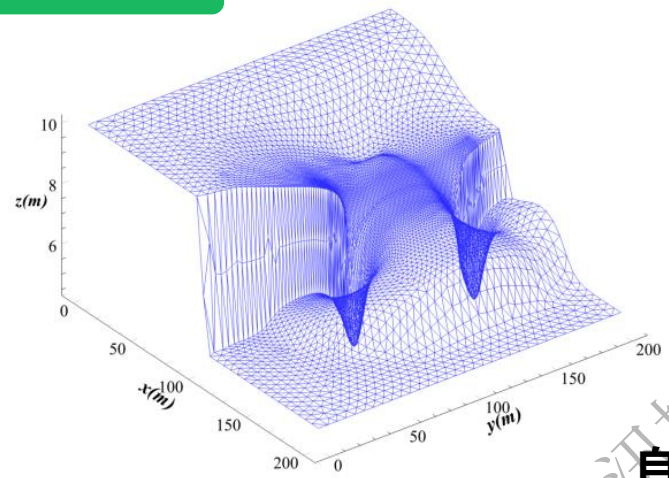
t=160s

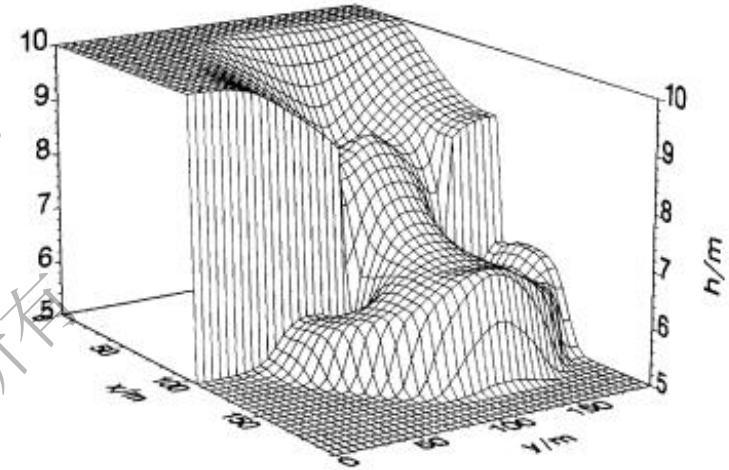


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

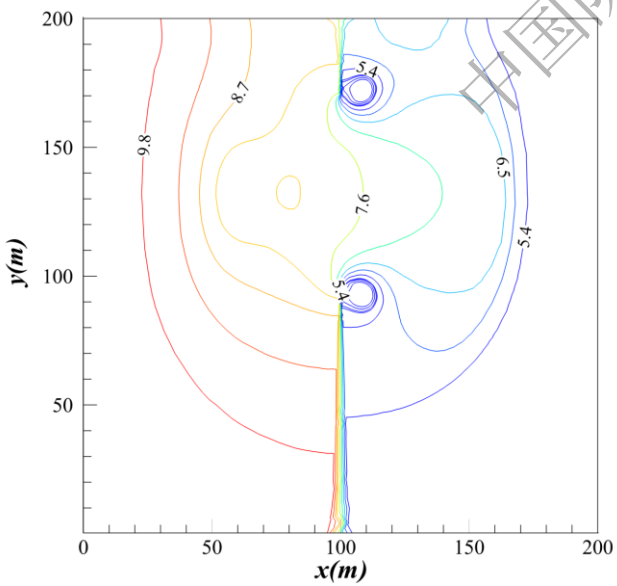
2.2基于水动力学模型的城市洪涝模拟

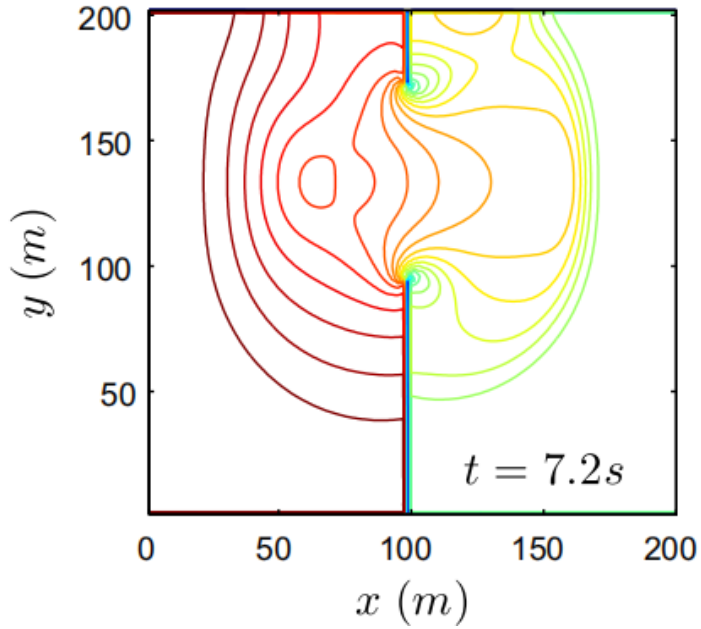
非对称溃堤算例





自由水面分布对比





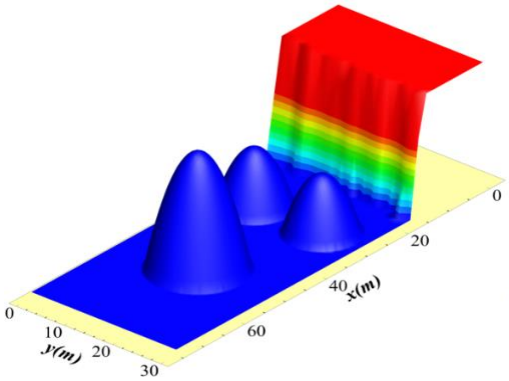
等水位对比

中国防汛抗旱整理发布
仅供人人学习
版权归原作者所有

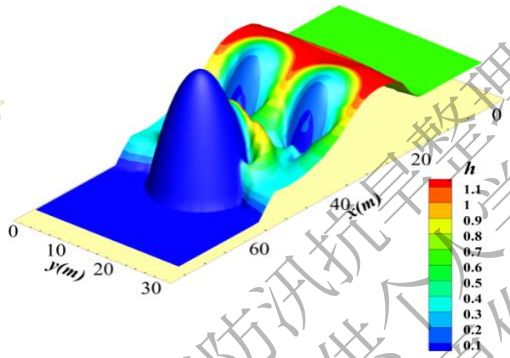
2.2基于水动力学模型的城市洪涝模拟

非平底溃坝水流算例

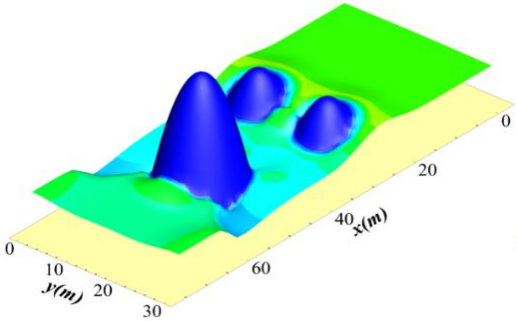
◆ **矩形试验区域：长80m、宽30m，在矩形底部有两个半径6.5m、高1m和一个半径8.6m、高2m的挡水建筑物。**



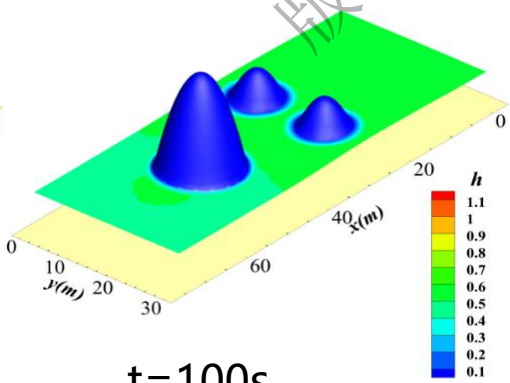
初始时刻



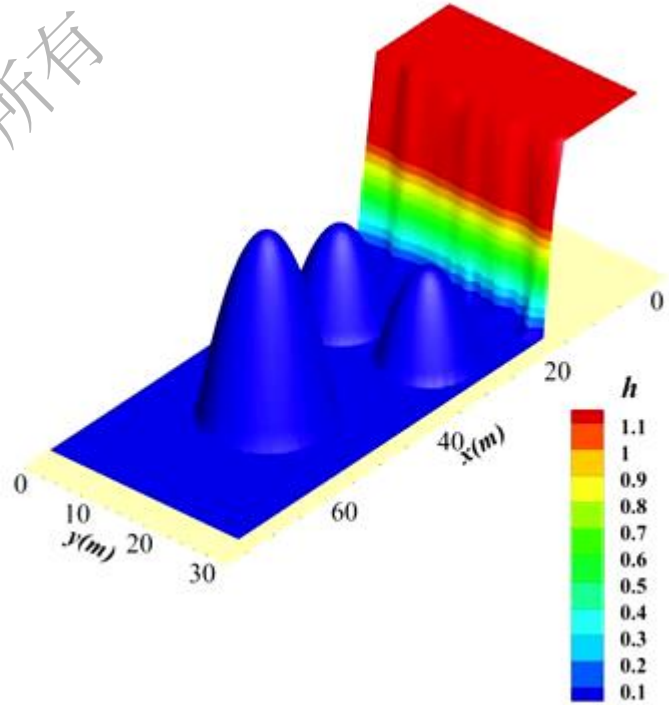
t=10s



t=30s



t=100s



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法

- 模拟精度与广度要求的不断提高
- 模拟**网格数量**、**模拟精度**与**计算时间**间的矛盾越来越凸显

网格划分方式

- 局部时间步长

计算机技术

- 共享存储并行编程（OpenMP）
- 信息传递接口（MPI）
- GPU并行方法

公国防抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—局部时间步长算法

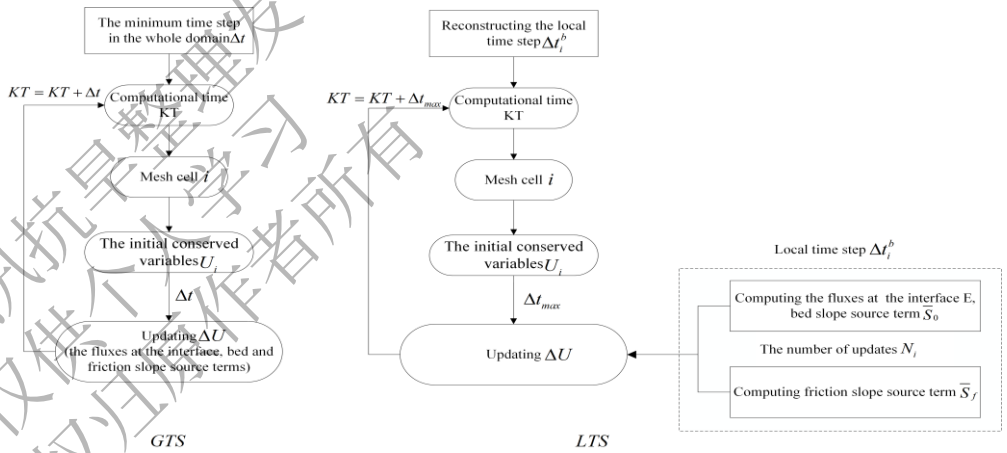
◆ **局部时间步长算法对每个单元可尽可能采用满足CFL稳定条件的时间步长。**

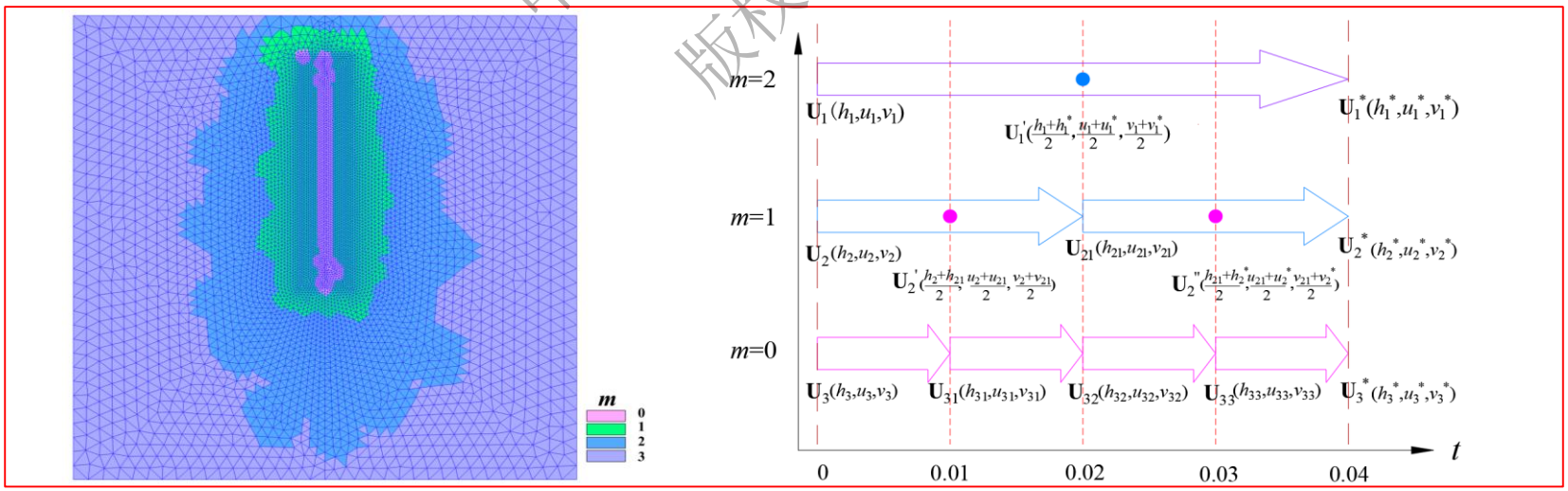
➢重构各单元局部时间步长：

计算初始时间步长->分配->矫正

➢交界面处单元变量计算：

近似估算->循环更新至同一时间层





中国防汛抗旱管理学会
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—OpenMP

◆ **隐式并行、共享存储、CPU 线程粒度并行**

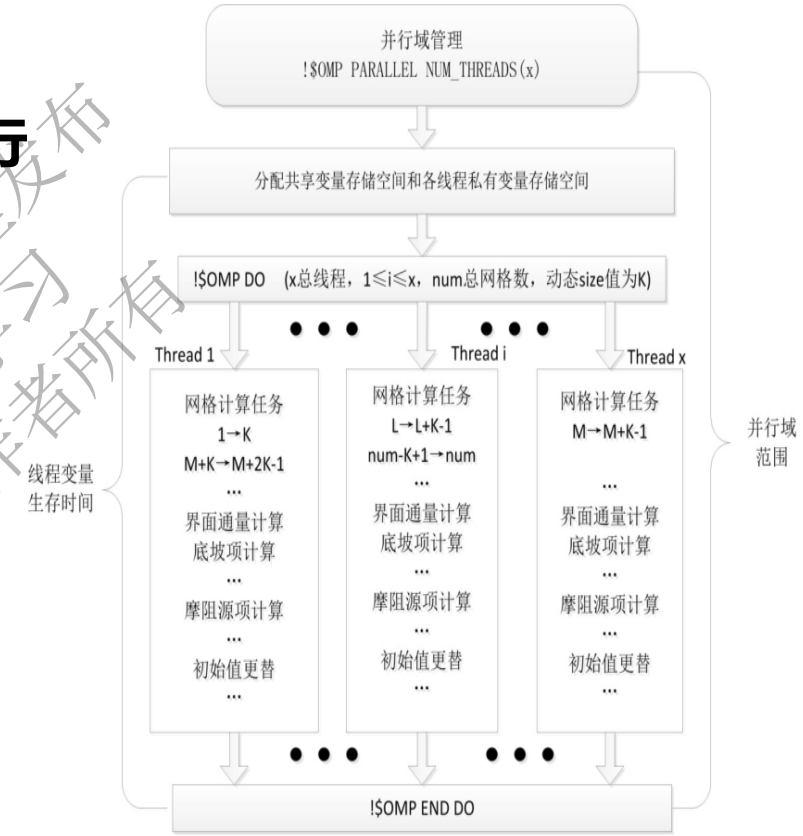
流程步骤：

① **确定并行域范围**

② **设置并行域内数据访问类型及开启线程数**

③ **模型任务分割**

④ **并行保护措施及优化**



OpenMP加速实现

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

Zhang S , Xia Z , Yuan R , et al. Parallel computation of a dam-break flow model using OpenMP on a multi-core computer. Journal of Hydrology, 2014, 512:126-133.

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—MPI

- ◆ 显示并行、分布式存储、
- ◆ CPU 进程粒度并行

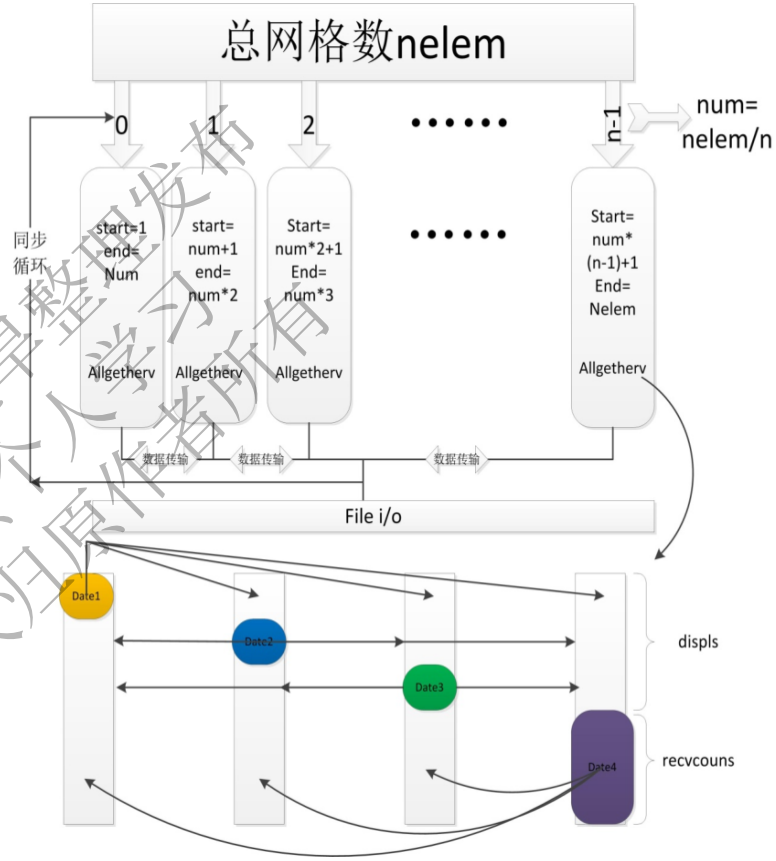
流程步骤：

① MPI 初始化及环境识别

② 推求偏移数组及接收量数组

③ 任务切割

④ 数据通信与同步



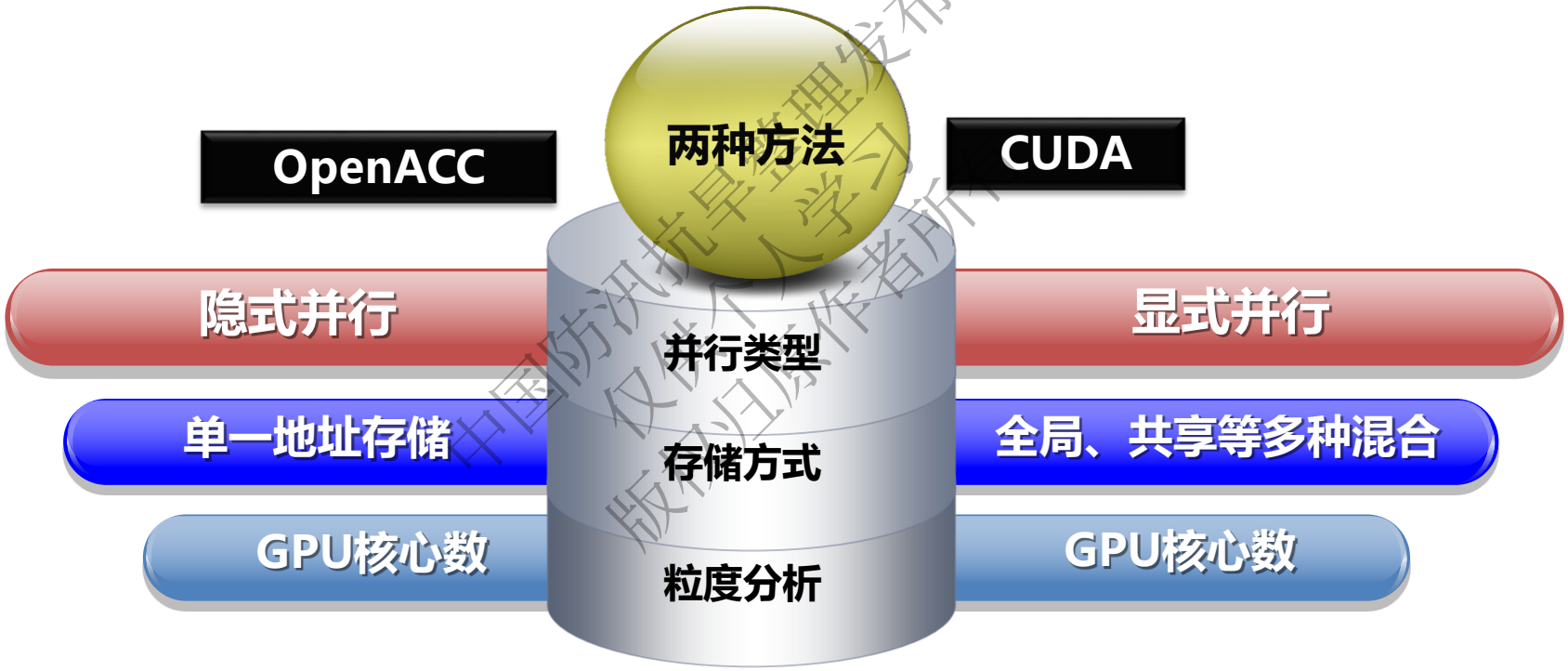
MPI加速实现

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

Zhang S , Li W , Jing Z , et al. Comparison of Three Different Parallel Computation Methods for a Two-Dimensional Dam-Break Model. Mathematical Problems in Engineering, 2017(pt.9):1970628.1-12.

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—GPU并行



中国防汛抗旱管理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—OpenACC

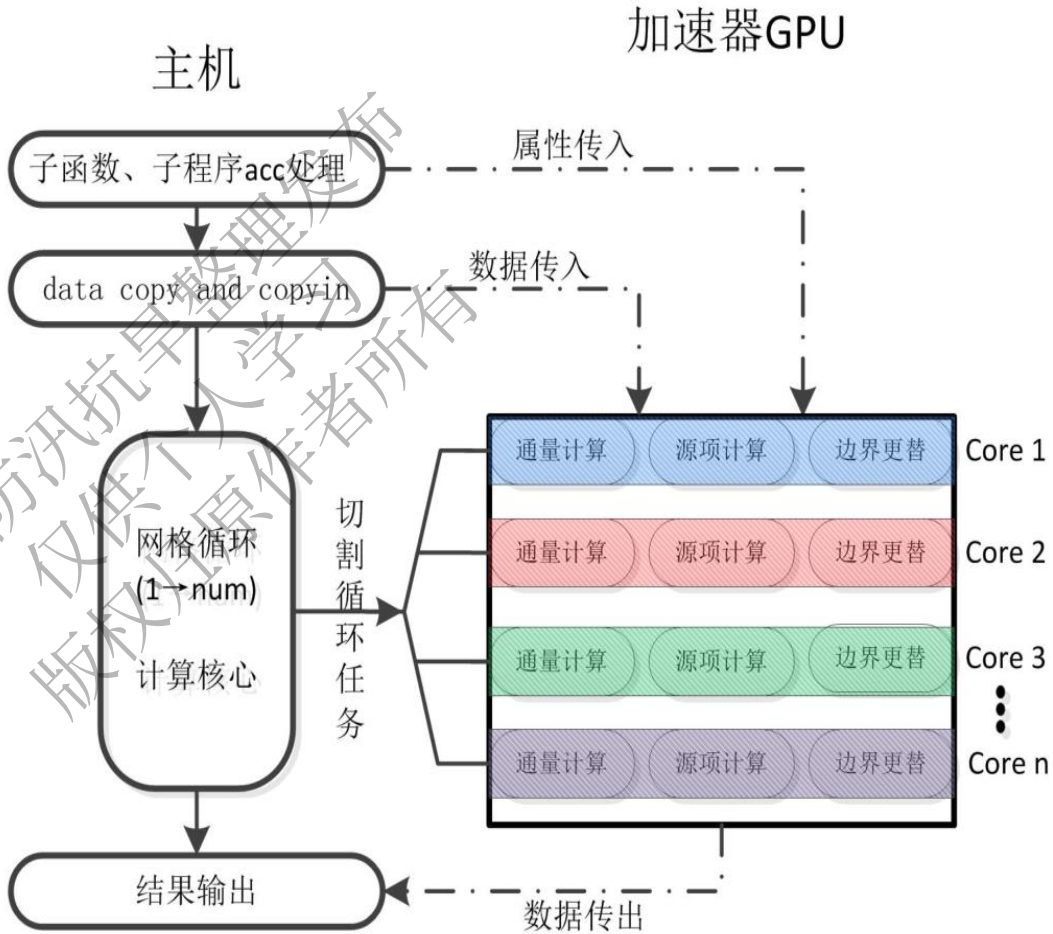
流程步骤：

① **子程序与子函数的处理**

② **OpenACC 环境设置**

③ **数据拷贝**

④ **模型任务分割**



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

Zhang S., Yuan R., Wu Y., Yi Y. Parallel Computation of a Dam-Break Flow Model Using OpenACC Applications, Journal of Hydraulic Engineering, 2016(04016070):1-10.

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—CUDA

流程步骤：

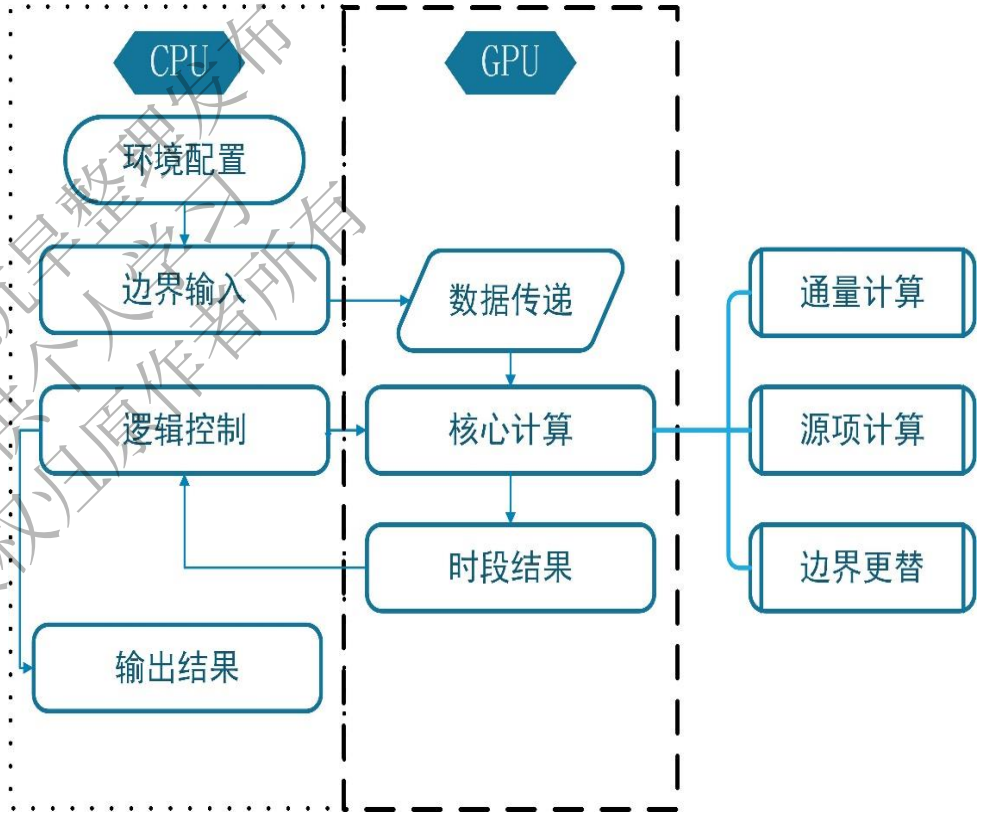
① 初始化环境、条件输入

② 变量类型的认定、变量传入

③ 任务分配、参数设计

④ 模型模拟、结果输出

⑤ 模型优化



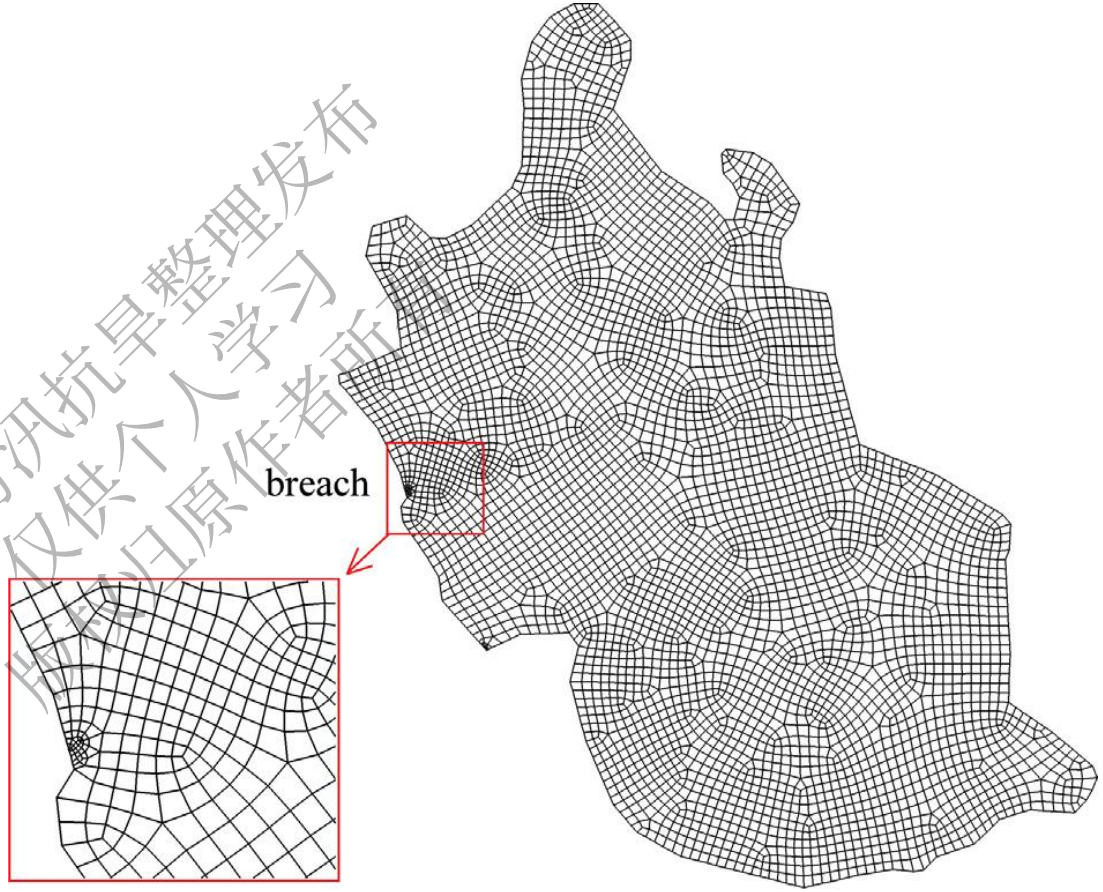
CUDA实现

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

哈尔滨胖头泡算例

- 采用胖头泡蓄滞洪区10m 分辨率 DEM .
- 共34万个四边形非结构网格，平均边长为80m。
- 研究区域的曼宁糙率值是0.055。
- 模拟时长为320h，时间步长为0.5s。

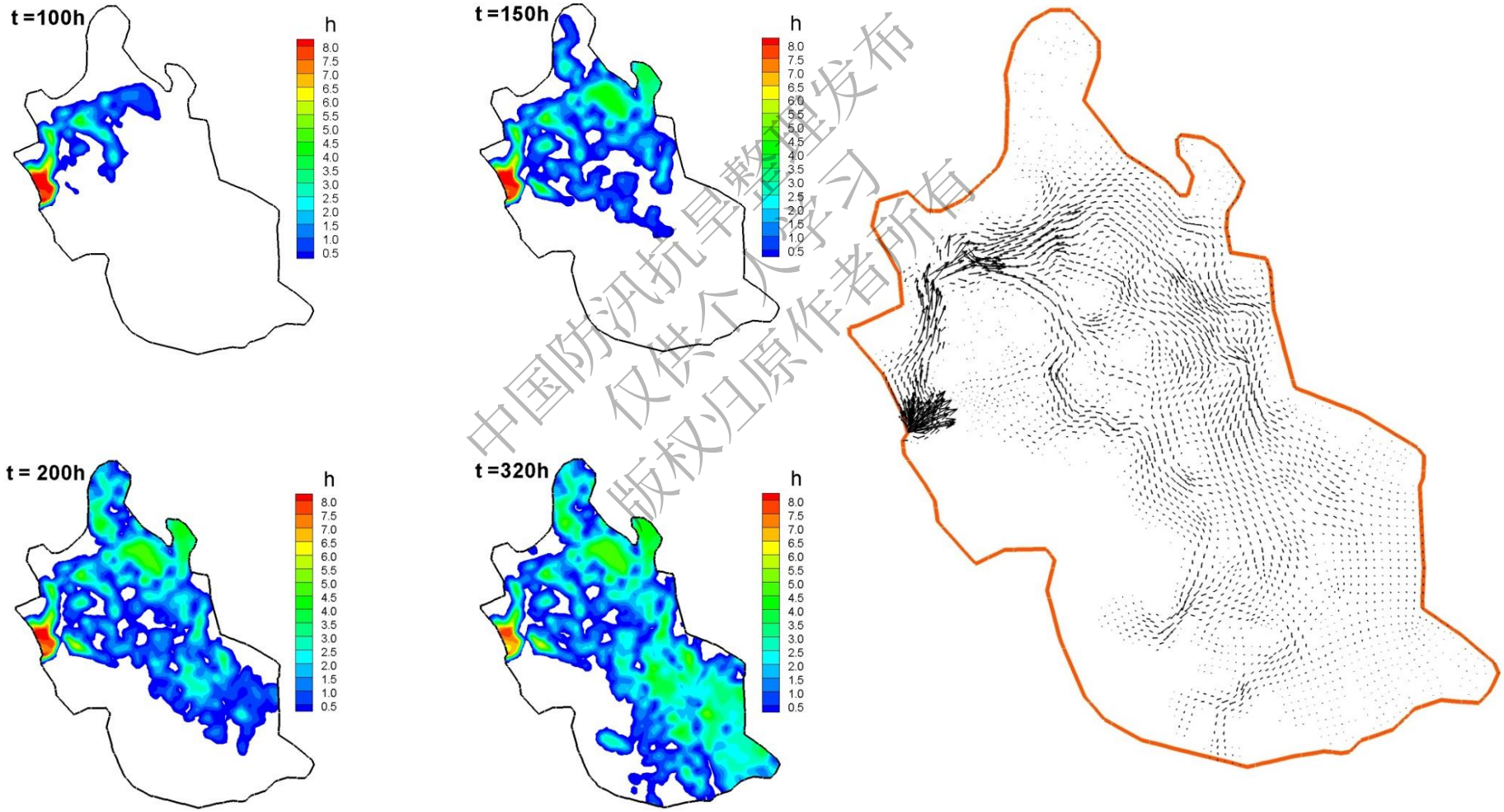


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

哈尔滨胖头泡算例

◆ **模型最终计算结果得出最大淹没面积 1180km^2，与实测值 1160km^2 接近**



胖头泡蓄滞洪区洪水淹没过程

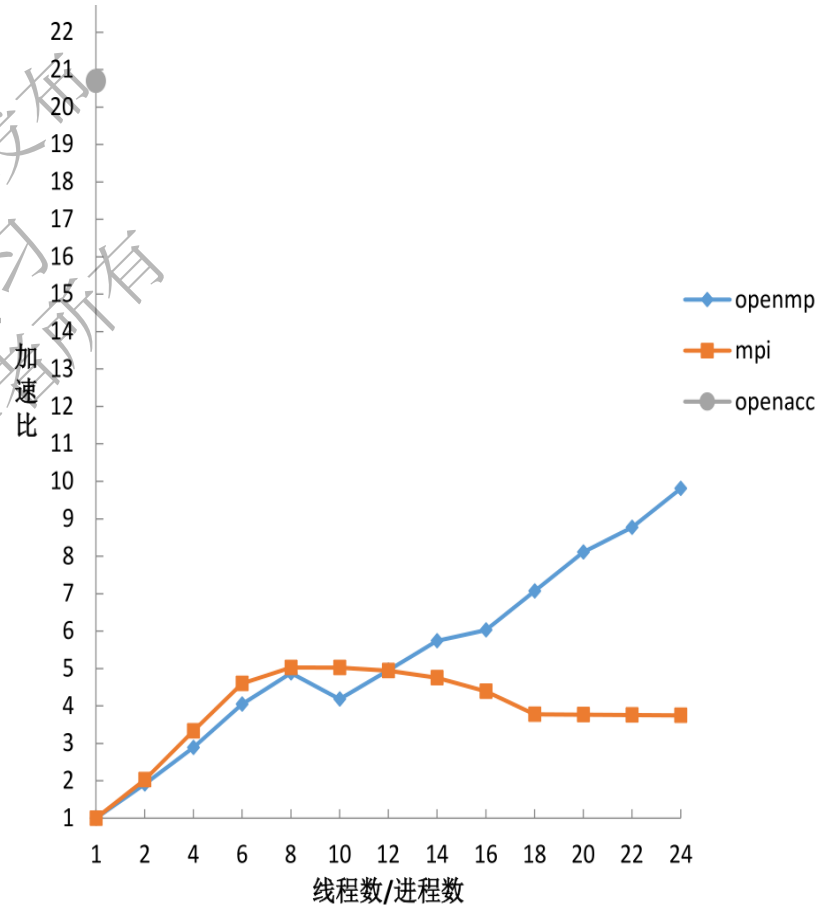
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—计算效率对比

◆ 在34万网格的哈尔滨胖头泡算例上对比了OpenMP、MPI、OpenACC三种并行方法。

	最短时长(s)	加速比	节约时间比例(%)	绝对时间预估(d)
串行	1638.94	1	0	10
OpenACC	79.37	20.6	95.16	0.5
OpenMP	168.21	9.7	89.74	1
MPI	323.79	5.1	80.24	2

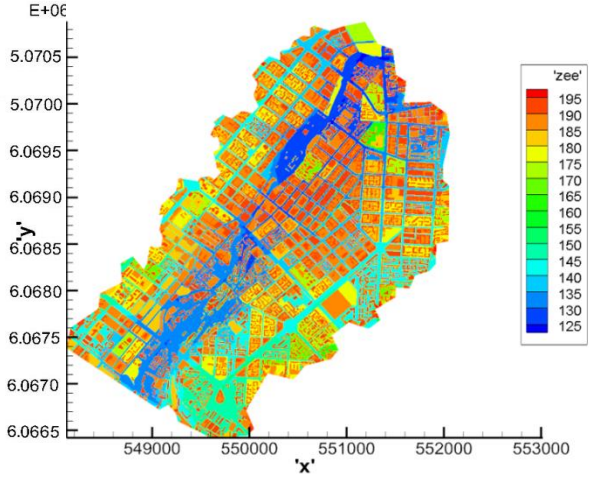


并行实测结果

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

哈尔滨南岗区算例



哈尔滨南岗区地形

- 研究区域为哈尔滨南岗区，研究范围为 9.1km^2。
- 共划分网格 200万个，网格边长平均为 4m。
- 模型时间为 2009 年 6 月 4 日，降雨维持3小时。

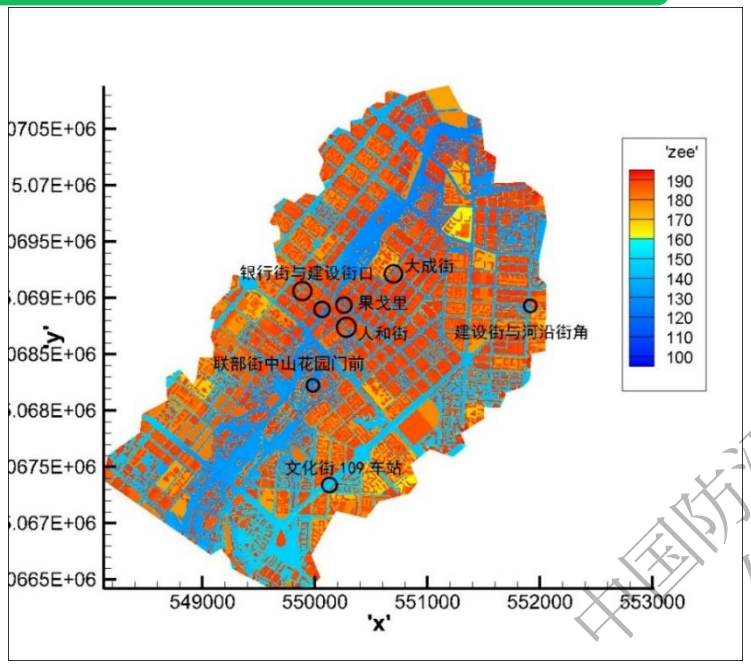
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

- **管网排水方式：**

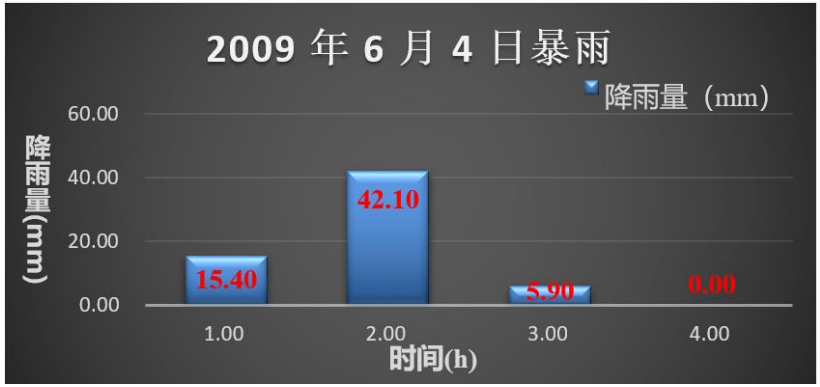
- 按网格平均分配定额排水量
- 在管网口处按照水深分别计算排水量

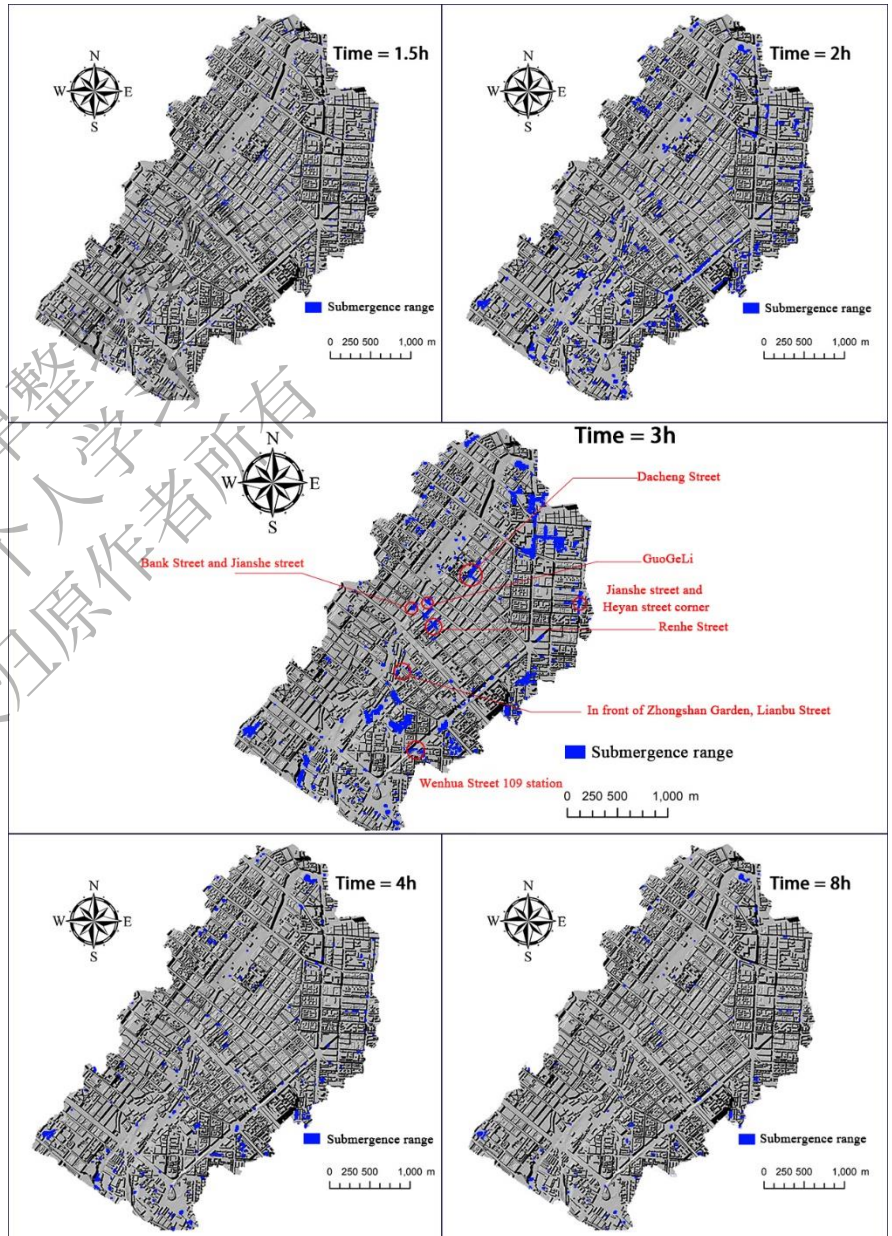
2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

哈尔滨南岗区算例—模拟结果



南岗区实测淹没点



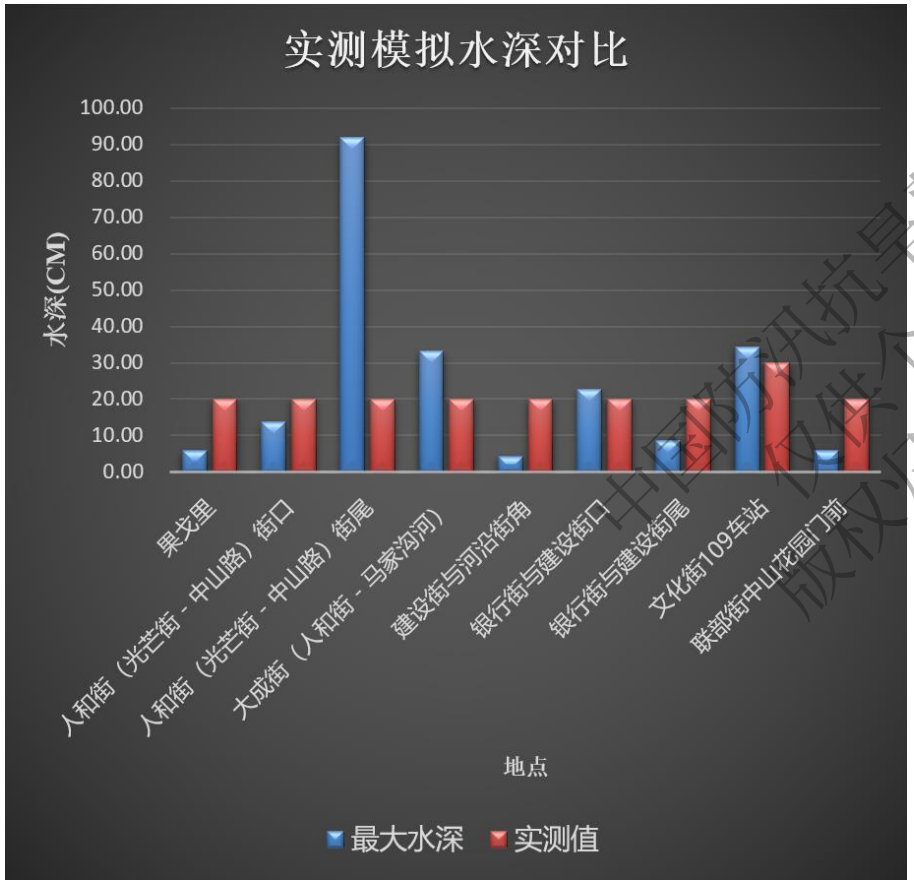


中国防汛抗旱整理
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

哈尔滨南岗区算例

计算精度



模拟四小时统计最大水深并与实测值进行比较

计算速度

- 网格边长4m，时间步长0.5s。
- 串行方法：33h。
- OpenMP、MPI联合并行模型：7h。
- CUDA算法：0.8h。
- 应用CUDA方法可以使模型达到实时模拟的能力。

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

2.2 基于水动力学模型的城市洪涝模拟

计算效率的加速算法—计算效率对比

- 哈尔滨南岗区降雨算例的网格数量为200万，单独使用OpenMP与MPI的加速效果不超过2.5倍，联合应用OpenMP与MPI的加速比最高为4倍左右。

- OpenACC相比CUDA或OPENCL等底层API的并行效率较低，因此南岗区的降雨案例采用了CUDA并行算法进行实现，最终加速比为42倍。

- 在百万网格下，OpenMP、MPI、OpenACC模型在同线程数、同进程数、同GPU核心数的条件下，加速比随着网格数量的提升而提升。在分别达到一定的网格计算量后，加速效果明显回落。CUDA算法加速效果稳定。

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

三、几点认识

1

- 水动模型具有精细化模拟的优势，适宜对入侵洪水和局部流动性强的洪水进行模拟。

2

- 数据资料仍是瓶颈，包括管网资料，尤其是实测淹没资料；对模型的验证和改进带来了很多困难

3

- 并行计算（云计算）技术成为水动模型大范围应用的技术保障。

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

敬请各位专家批评指正！

谢谢！

中国防汛抗旱管理发布
版权个人学习
版权所有作者所有