第四届城市水安全与水管理学术研讨会
暨第五届城市防洪排涝学术研讨会

城市洪涝模拟的现状与未来发展趋势

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

华南理工大学黄国如教授

2021年10月西安

一、城市暴雨洪涝模拟现状

1、数值模拟方法

（1）水文学方法：根据水量平衡原理，具有一定的物理意义，结构简单，效率高，无法给出特定位置水力特征要素

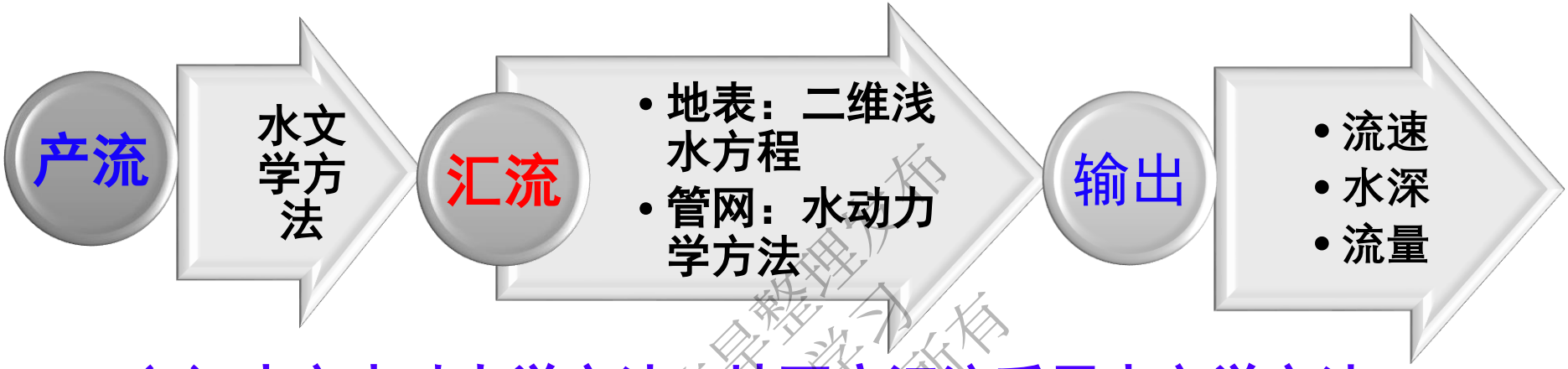
产流
- 蓄满产流
- 超渗产流
- 径流系数法

汇流
- 等流时线法
- 单位线法
- 线性水库法

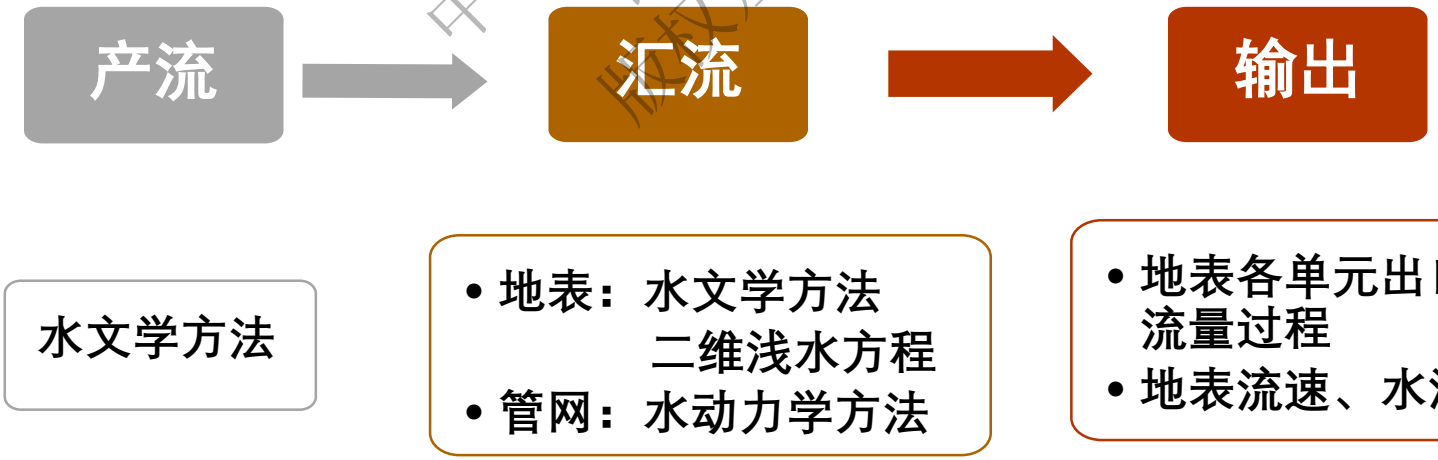
输出
- 仅能提供计算单元出口处流量过程

中国防汛抗旱管理杂志
仅供个人学习
版权归原作者所有

（2）水动力学方法：具有明确的物理意义，求解浅水方程，精度高，但计算效率相对较低，基础资料要求高

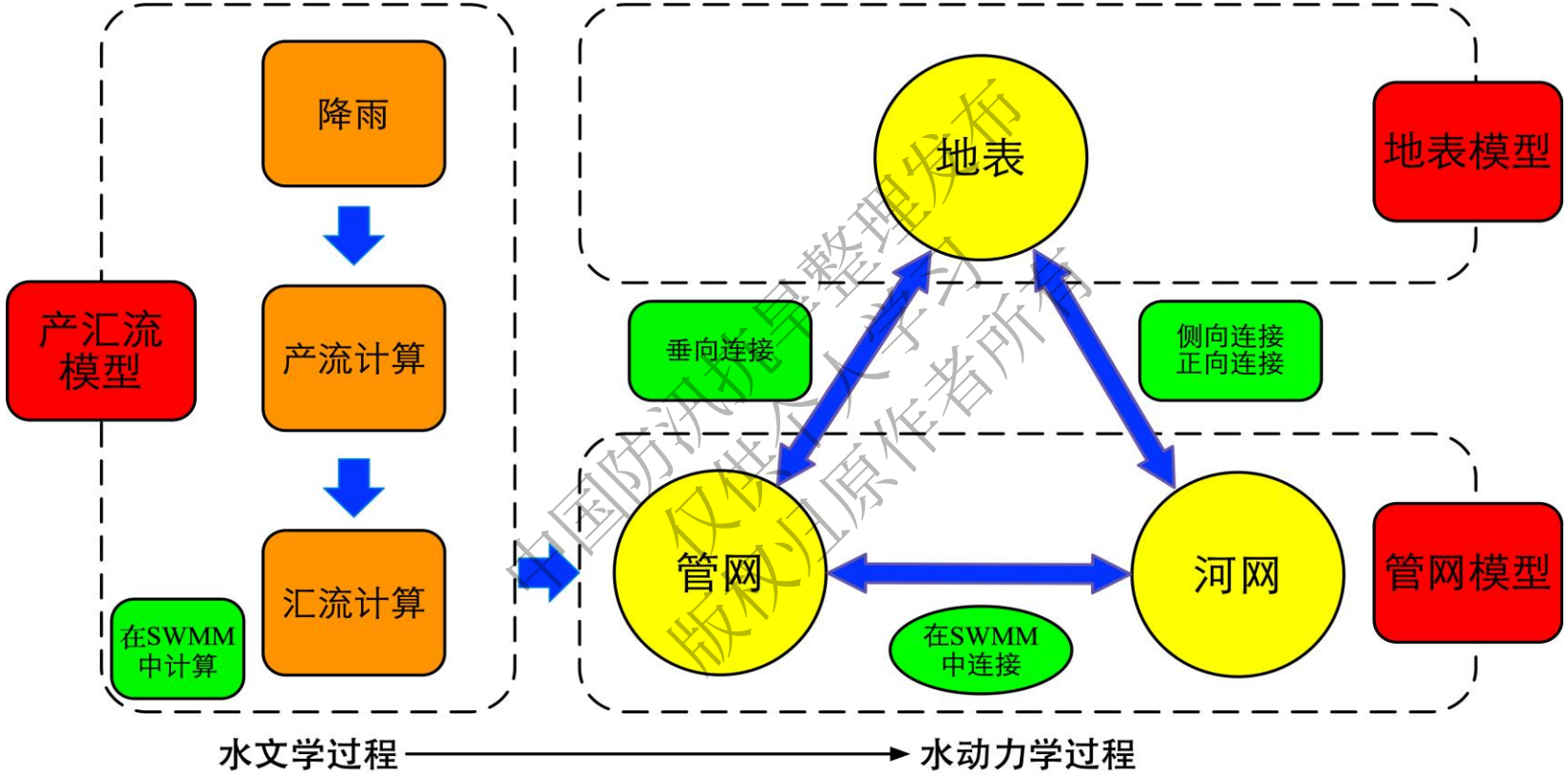


（3）水文水动力学方法：地面产汇流采用水文学方法，地下管网采用水动力学方法，运行效率较高



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、城市洪涝水文水动力耦合模型

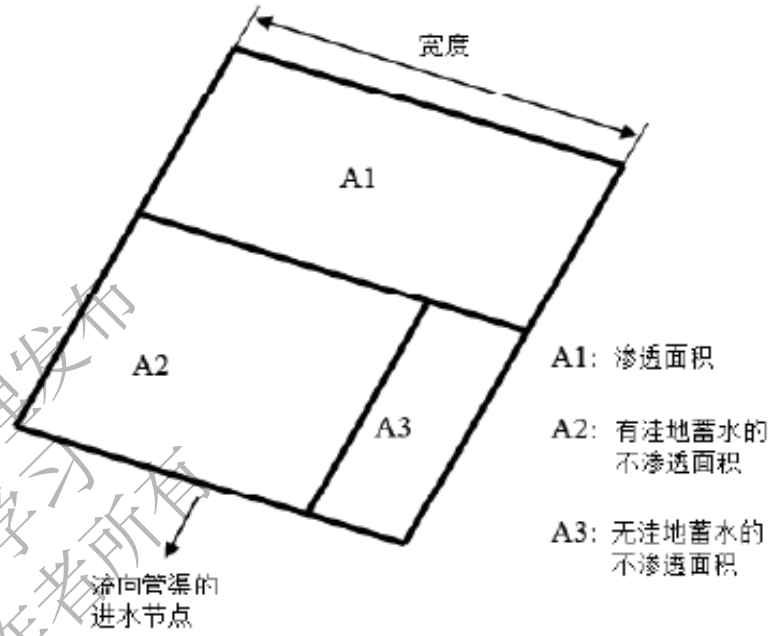


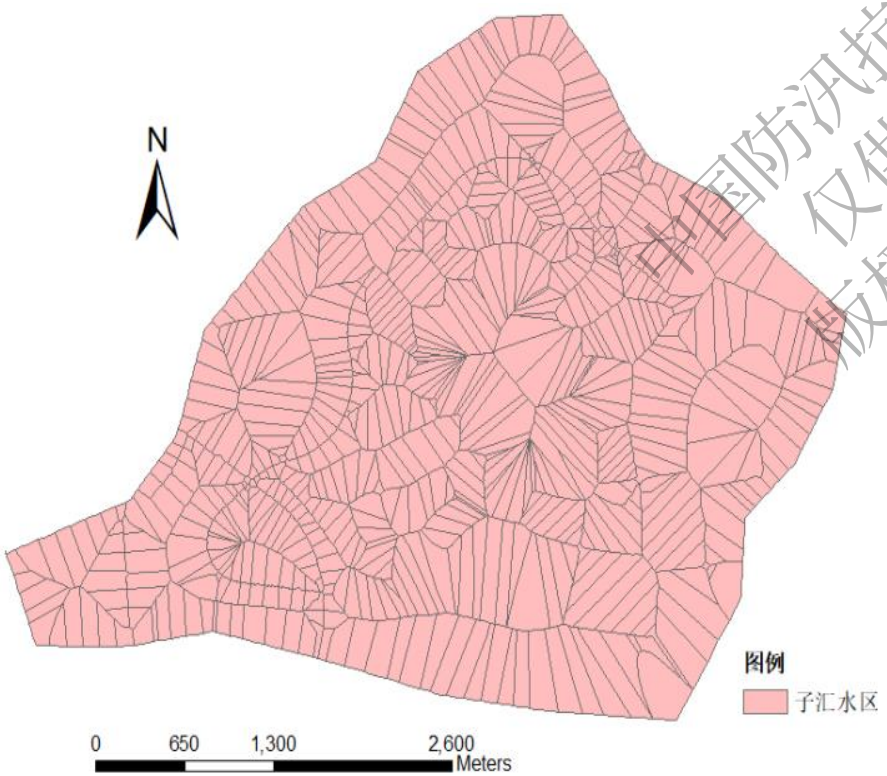
中国防汛抗旱整理发布
仅供大学习
版权归原作者所有

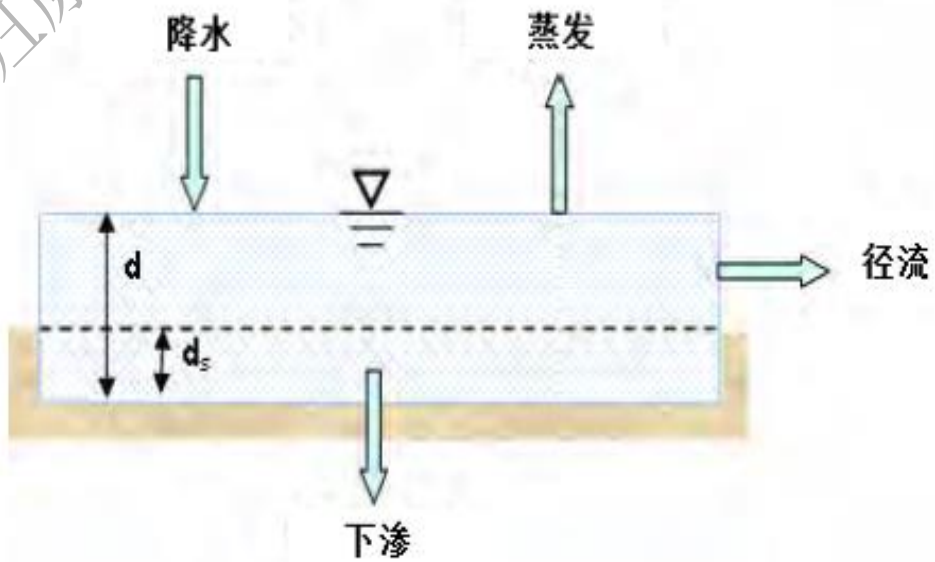
IHUM （ Integrated Hydrology and Hydrodynamics Urban Flood Model）

产汇流模型

产汇流过程是基于SWMM模型计算的，以检查井为单元划分子划分区，假定每个子汇水区的水均汇集到该检查井，每个子汇水区作为基本单元，通过非线性水库模型估计产生的地表径流







中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

地表二维水流运动

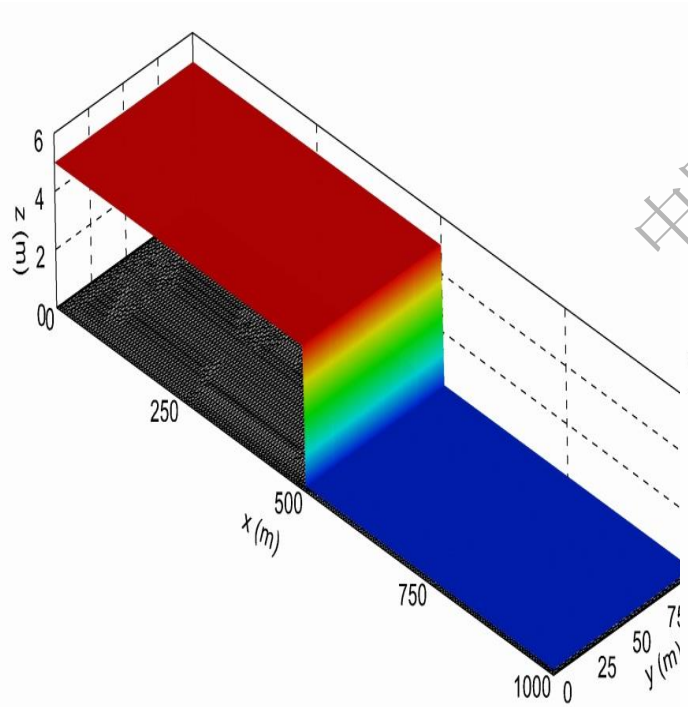
- 二维模型控制方程
- 采用改进形式的二维浅水方程：

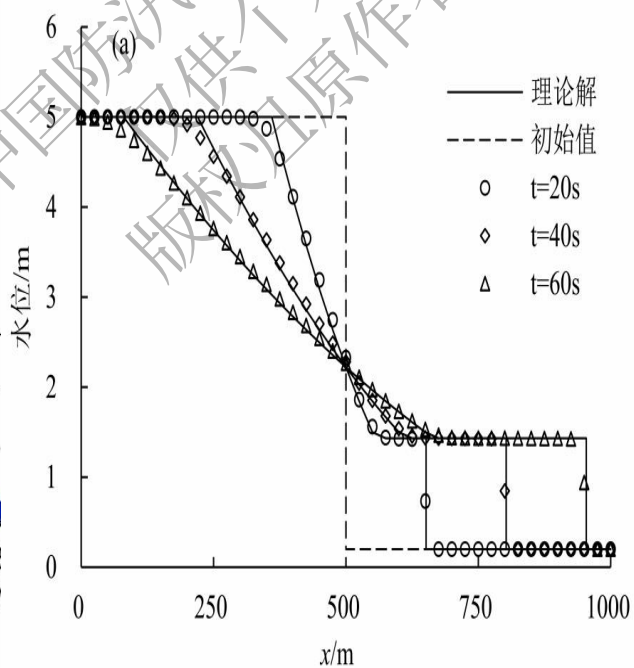
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}=\mathbf{S}$$

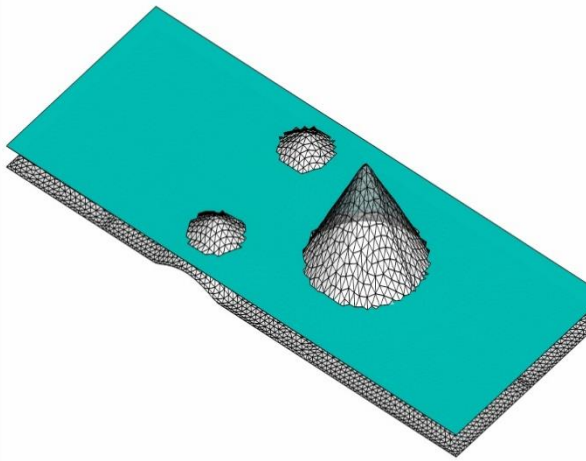
$$\mathbf{U}=\begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}=\begin{bmatrix} hu \\ hu^2+g(h^2-b^2)/2 \\ huv \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}=\begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2+g(h^2-b^2)/2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}=\mathbf{S}_b+\mathbf{S}_f=\begin{bmatrix} 0 \\ g(h+b)S_{ox}-ghS_{fx} \\ g(h+b)S_{oy}-ghS_{fy} \end{bmatrix}$$

采用有限体积法，非结构网格离散控制方程，时间步上采用隐式双时间步法，模型无条件稳定

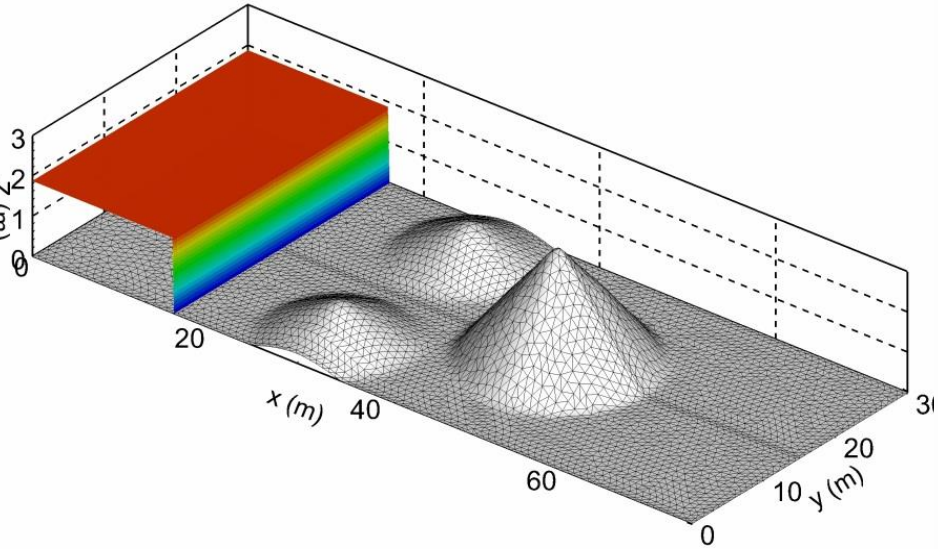
采用经典理论、室内溃坝和实际算例对模型精度和稳定性进行分析和验证

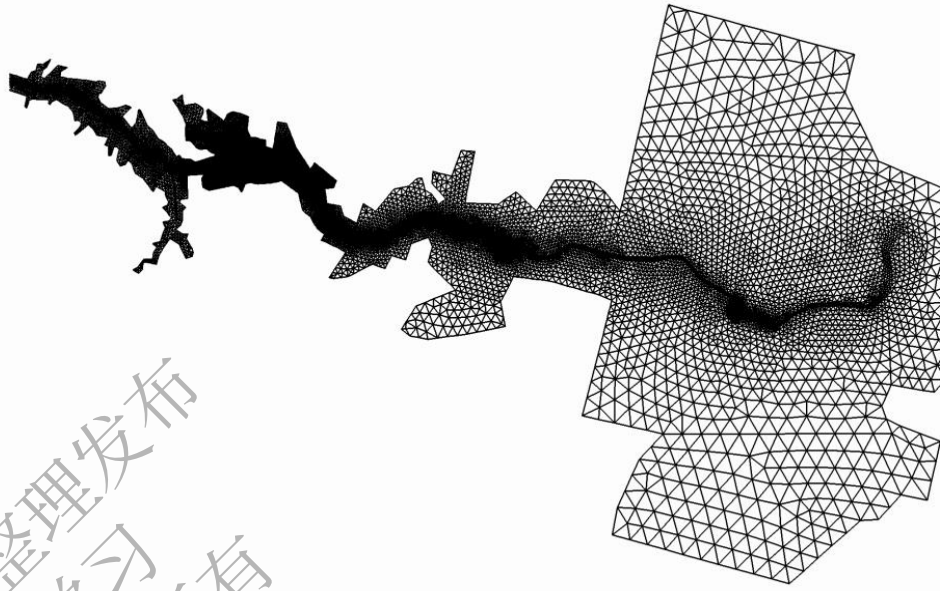


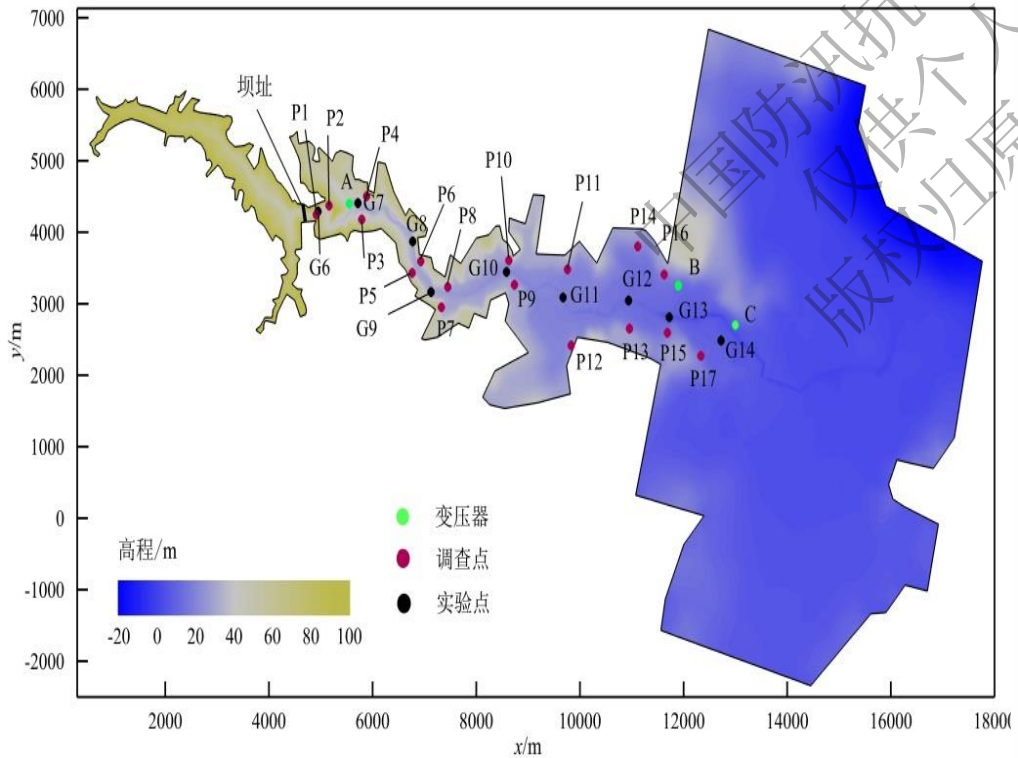


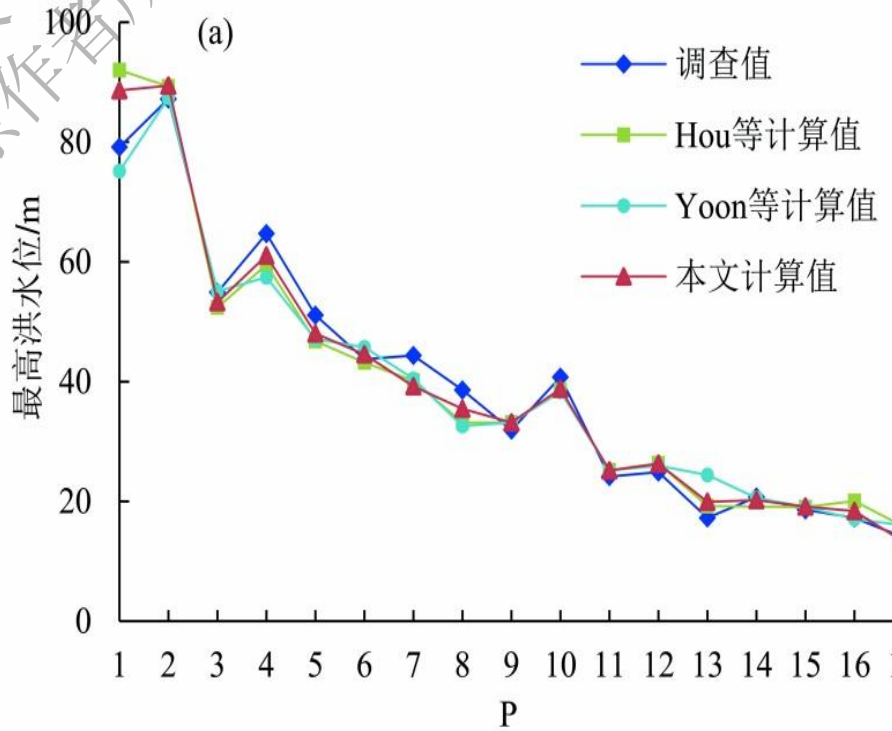


中国防汛抗旱管理发展
仅供个人学习
版权归原作者所有









中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

地下排水管网和河道水流运动

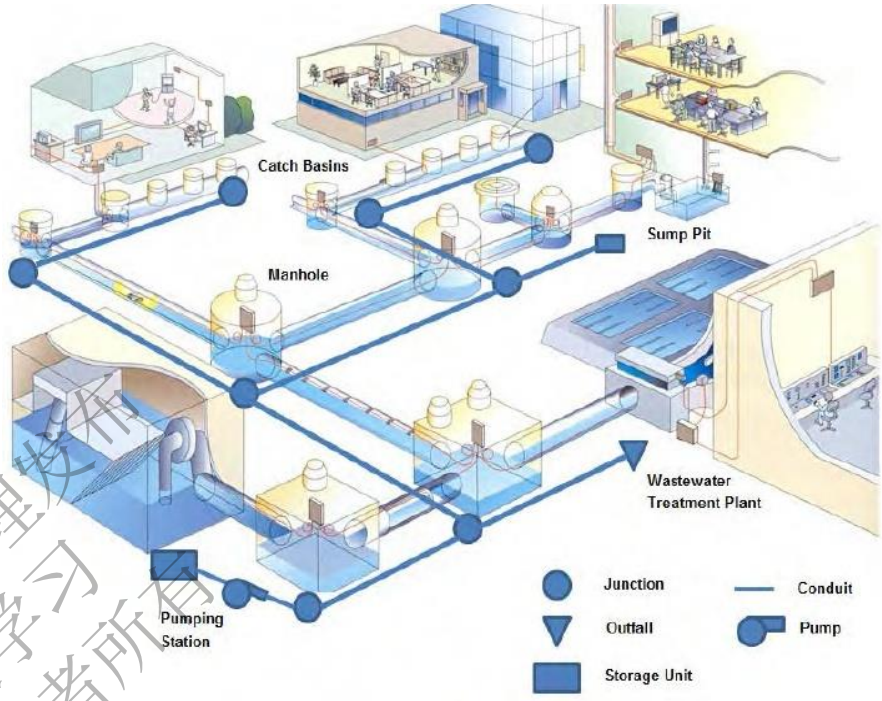
采用SWMM模型模拟

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial x}+\dfrac{\partial A}{\partial t}=0 \\ gA\dfrac{\partial H}{\partial x}+\dfrac{\partial\left(Q^2/A\right)}{\partial x}+\dfrac{\partial Q}{\partial t}+gAS_f=0 \end{cases}$$

圣维南方程组

$$\frac{\partial H}{\partial t}=\frac{\sum Q_t}{A_{sk}}$$

节点连续性方程



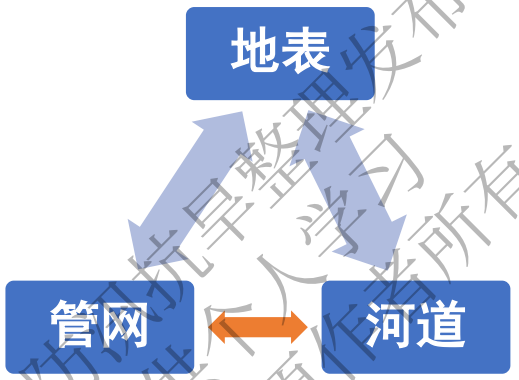
- 隐式欧拉向后差分方法离散方程组
- Picard逐次逼近方法求解

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

一维和二维模型耦合研究

城市区域复杂的水流交换

管网水流溢出

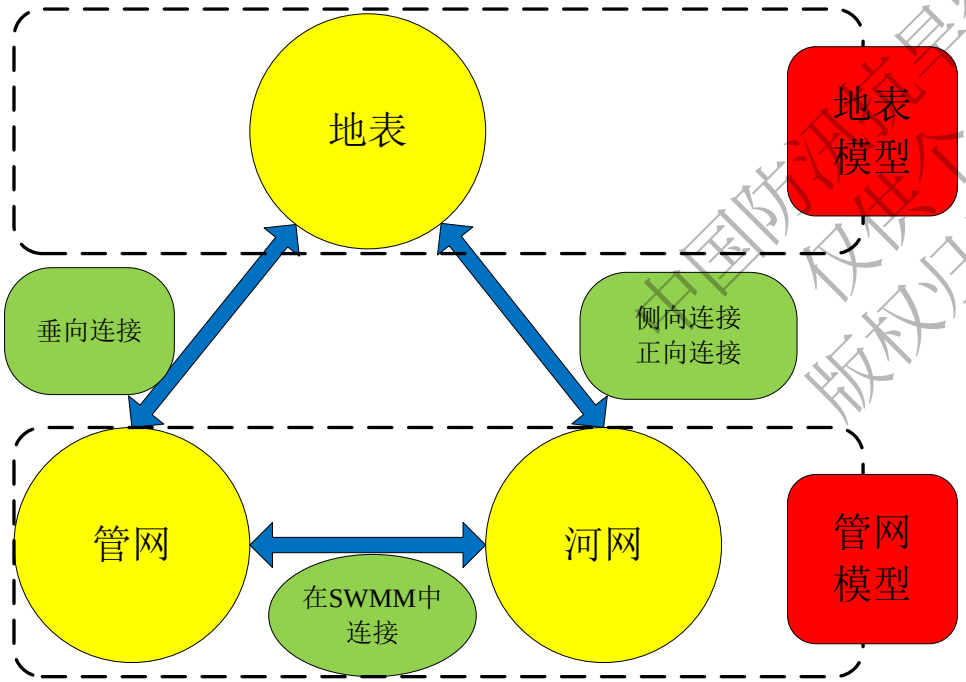


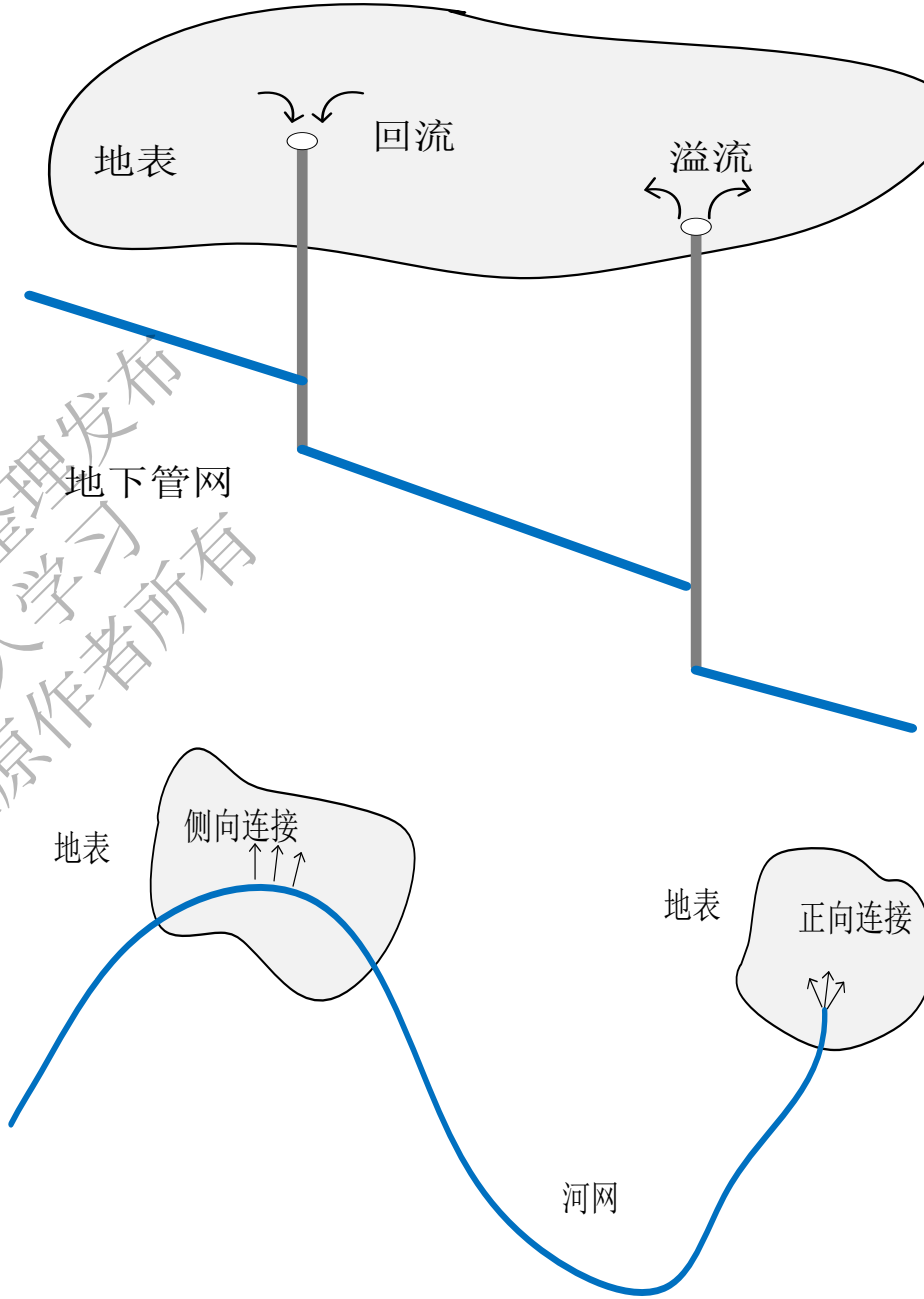
外江洪水漫堤

管网水流进入河道

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

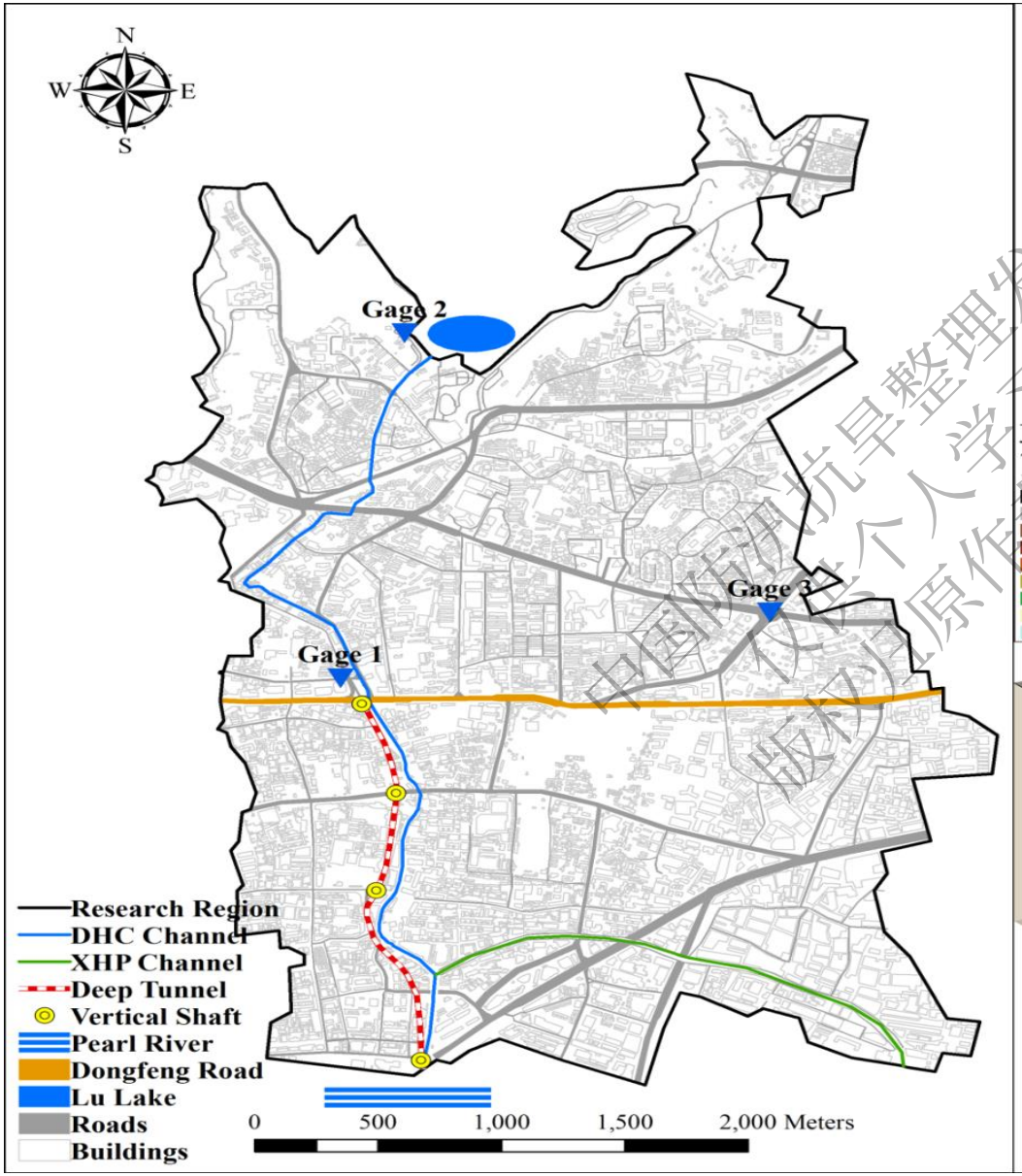
地表排水管网耦合模型

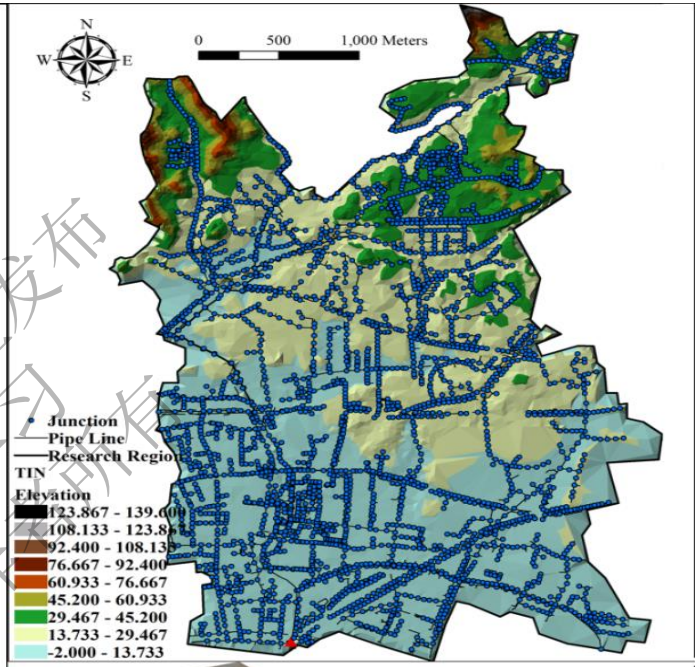


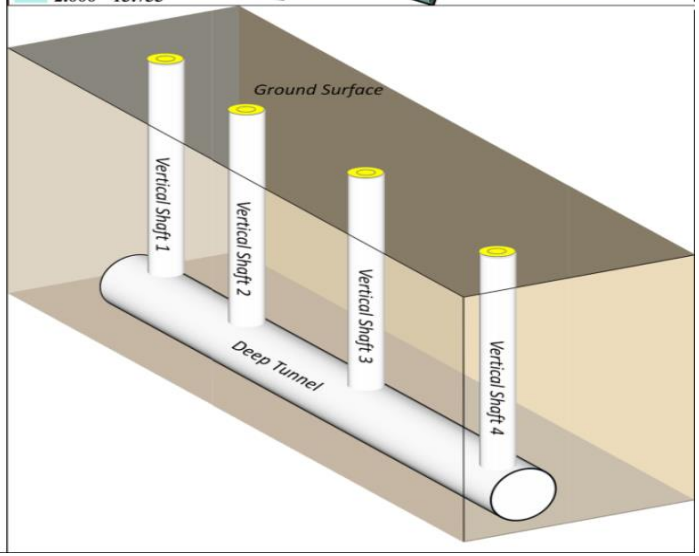


中国防洪信息整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

东濠涌流域验证



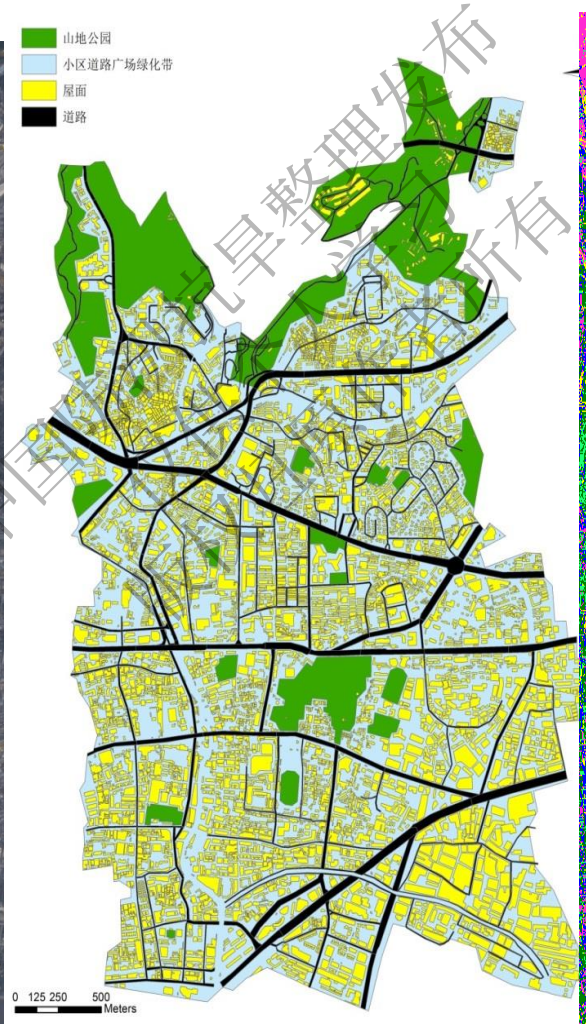


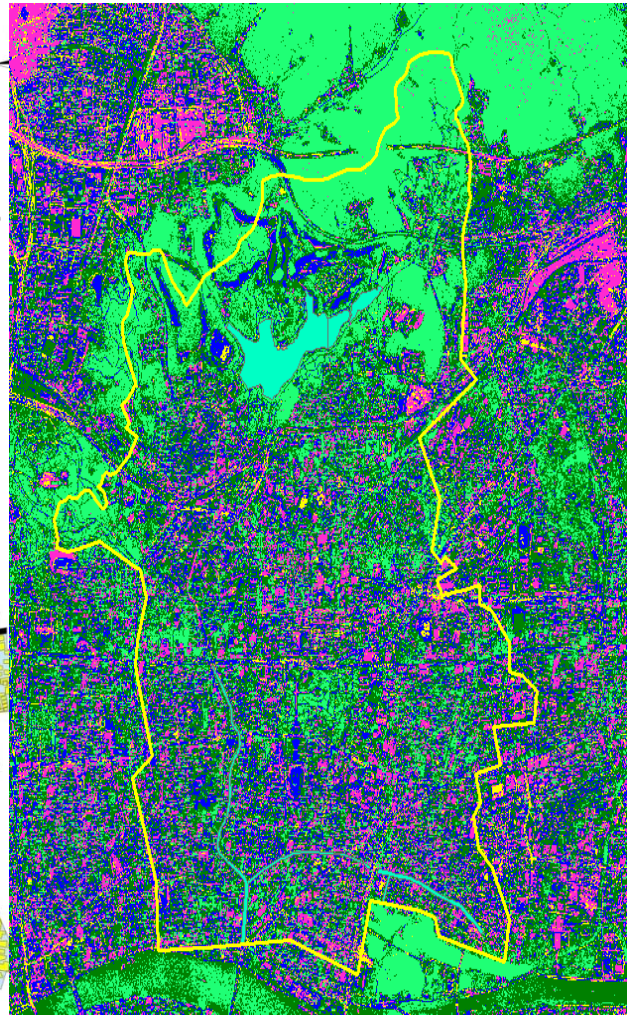


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

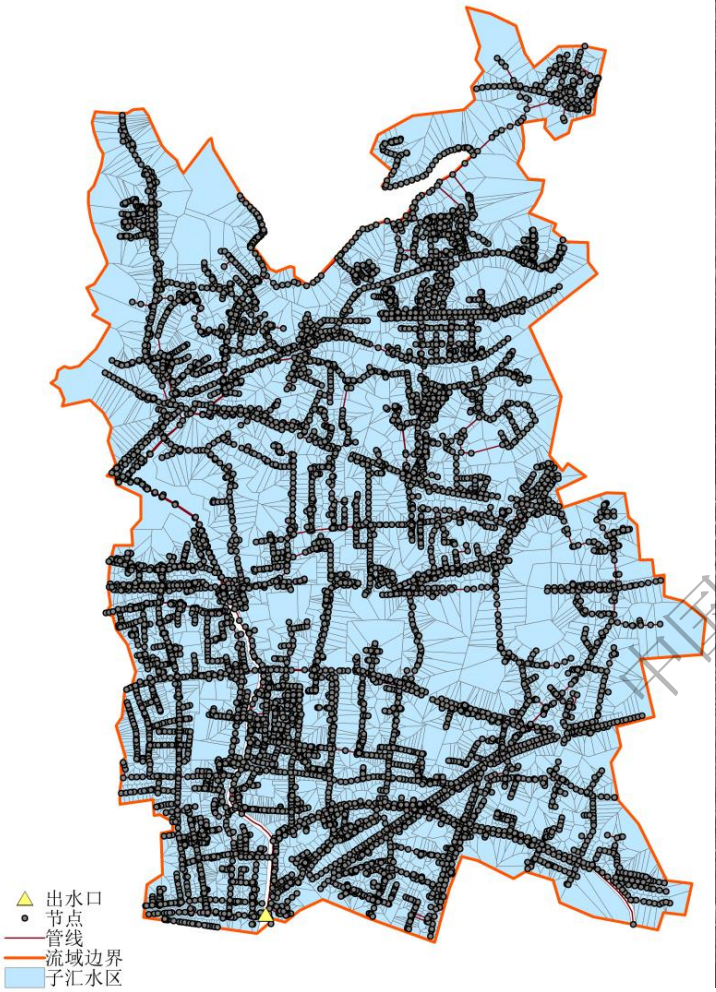
流域边界
闸门及泵站
河道
白 云 山
N
麓湖
泄洪闸
越秀公园
东濠涌
东濠涌截污闸
净水厂
东
风
新河浦涌
补水泵站
挡潮闸
珠 江
东濠涌排涝泵站
新河浦-东山湖水闸
0 125 250 500
Meters

- 以东濠涌干流为控制河道，利用GIS进行水文分析得到分水岭
- 结合现状排水管道走向，在1：1000的地形图上量算



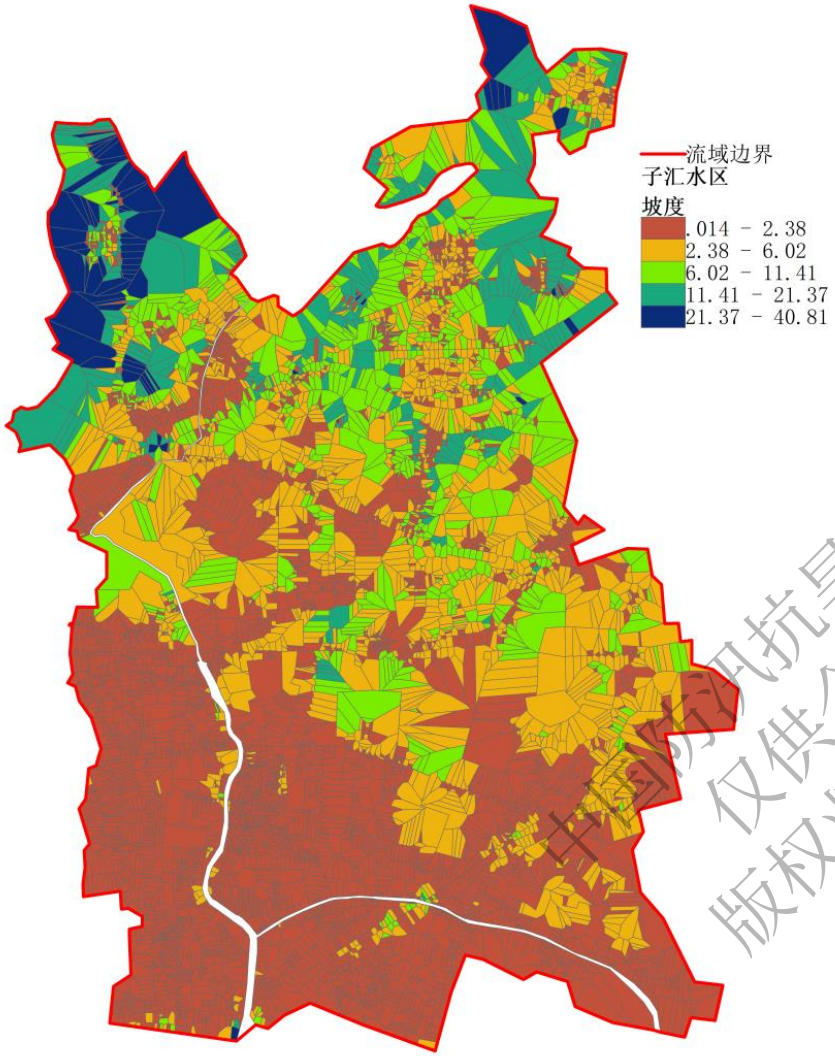


管网模型构建

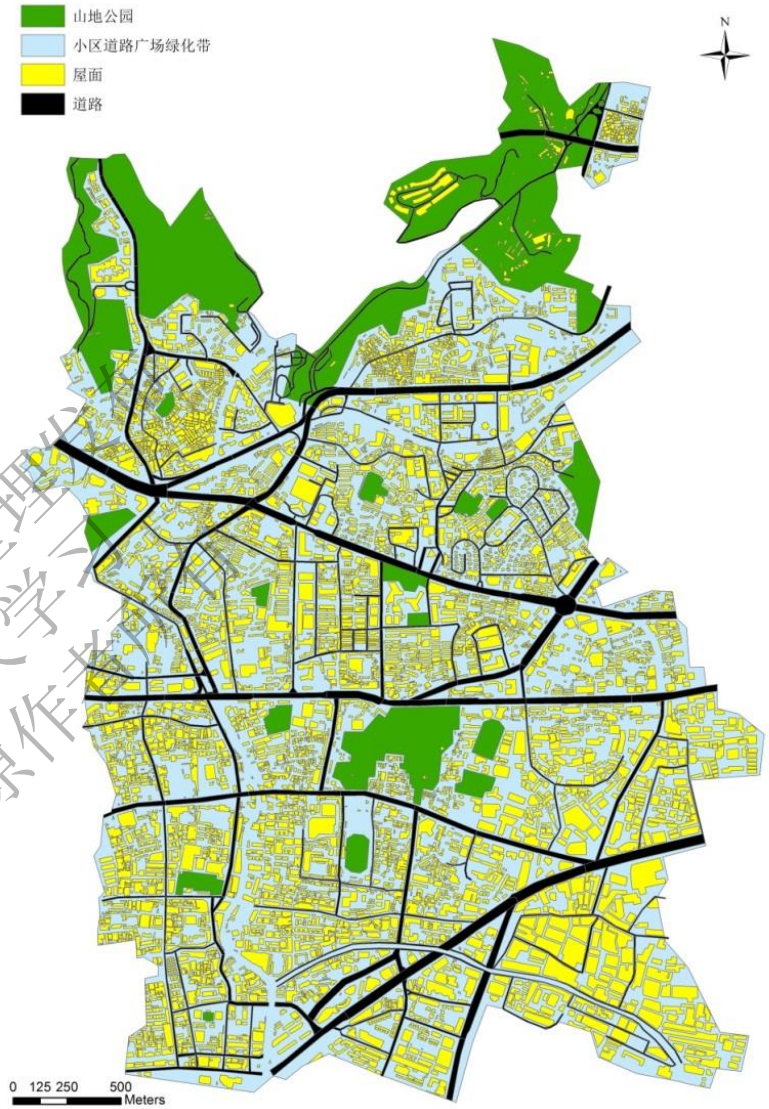


该区排水管网中有节点3470个、管线3958根、出水口4个，划分出来的子汇水区有7700个

管网分布及子汇水区划分



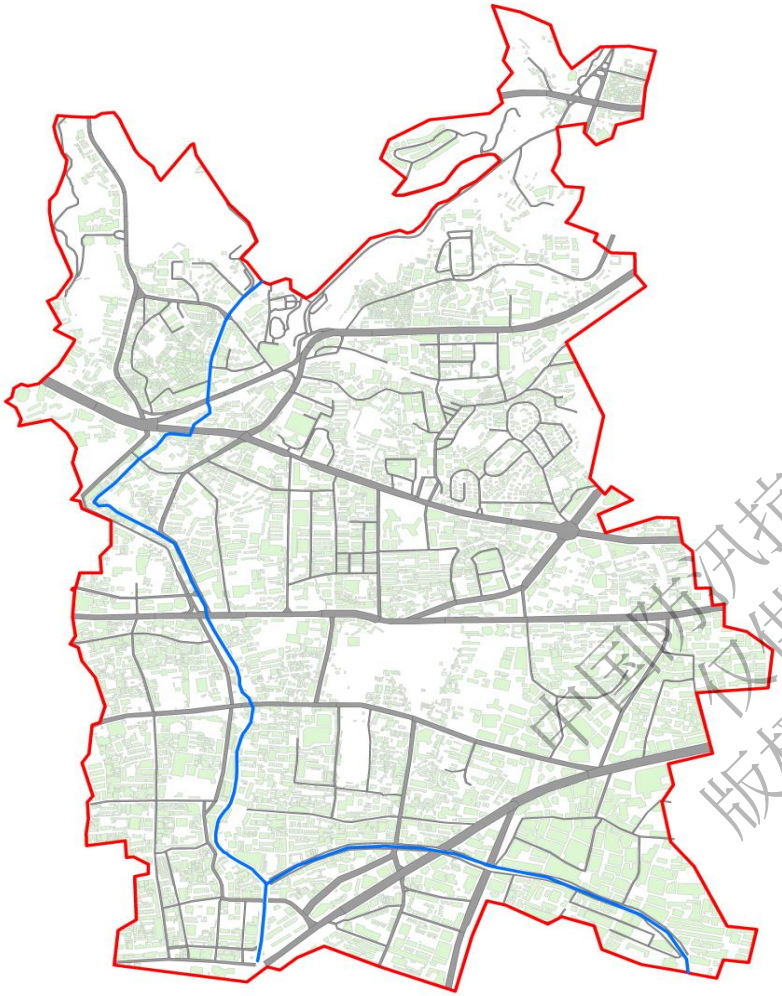
坡度分析

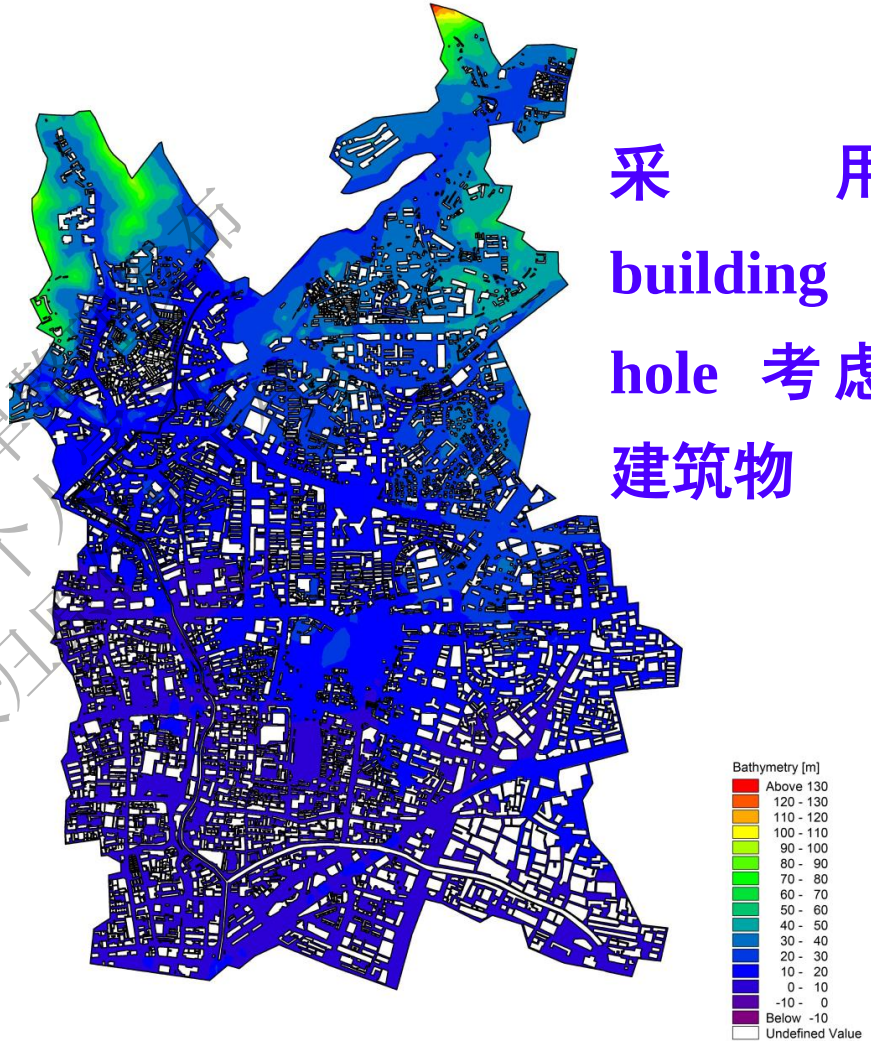


土地利用类型

中国防汛抗旱整理
仅供个人学习
版权归原作者所有

地表模型构建





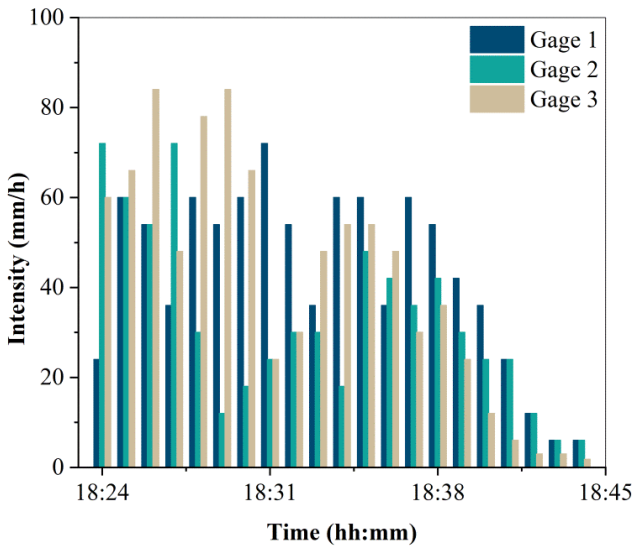
采用 building hole 考虑建筑物

中国防汛抗旱杂志社
仅供个人阅读
版权归原作者

建筑物及道路识别

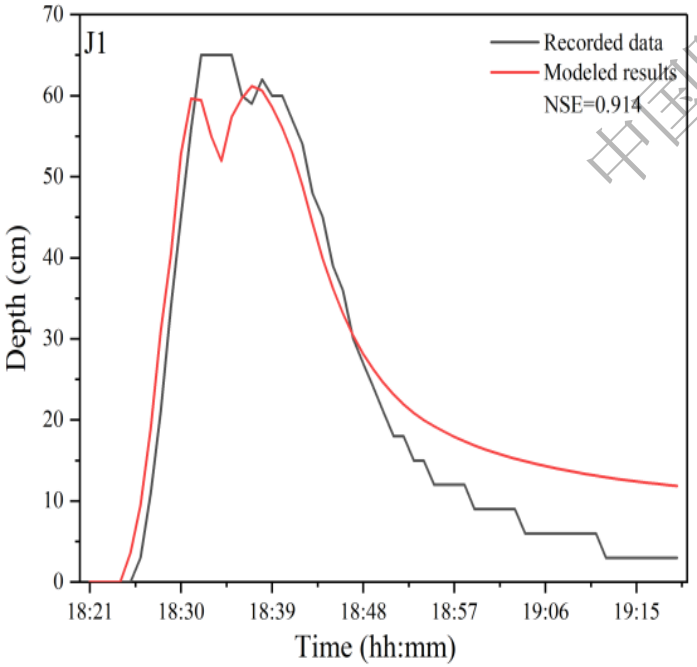
地表模型

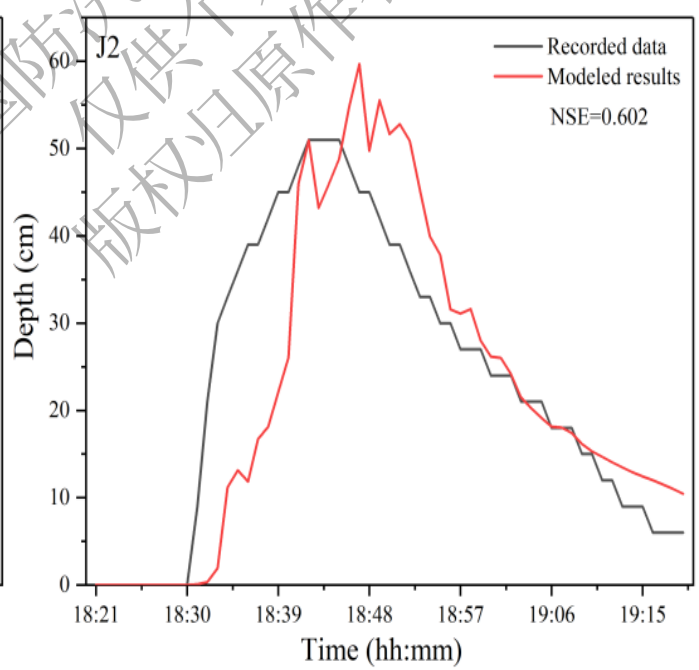
模型率定与验证



站点	S1	S2	S3	S4	S5	S6		M	R
率定	△	○	△	△	△	△	○	F	F
校核	○	○	○	◇	○	○	△	NF	NF
站点	S7	S8	S9	S10	S11	S12	□	F	NF
率定	△	△	△	△	△	△	◇	NF	F
校核	○	○	○	○	○	○	-	-	-

M: 模拟; R: 实测; F: 内涝; NF: 没有内涝

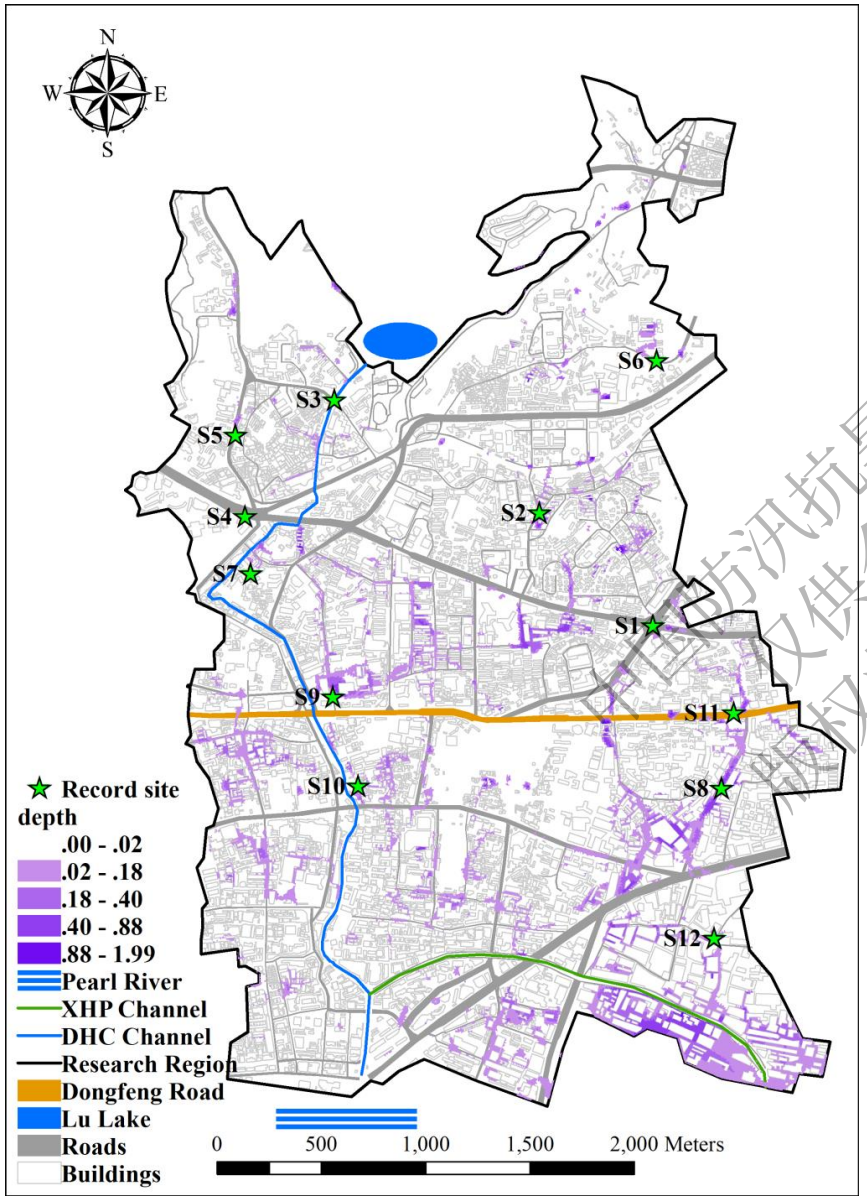


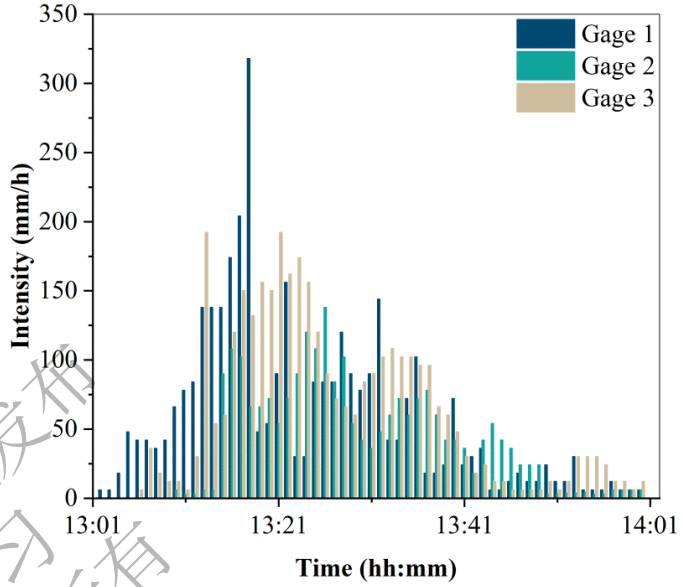


检查井水位变化过程与监测点是否内涝作为判断标准

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

模型率定与验证





站点	实测值 (m)	模拟值 (m)	误差 (m)	相对误差 (%)
S1	0.4	0.402	0.002	0.5
S2	0.8	0.671	-0.129	-16.1
S3	0.4	0.208	-0.192	-48.0
S4	0.2	0	-0.200	-100.0
S5	0.35	0.249	-0.101	-28.9
S6	0.3	0.391	0.091	30.3
S7	0.3	0.297	-0.003	-1.0
S8	0.5	0.632	0.132	26.4
S9	0.2	0.213	0.013	6.5
S10	0.2	0.246	0.046	23.0
S11	0.5	0.606	0.106	21.2
S12	0.5	0.527	0.027	5.4

中信防汛抗旱整理发布
版权归原作者所有
仅供个人学习

3、城市洪涝水动力模型

降雨径流过程直接基于二维浅水方程

离散方案划分的网格进行计算

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{U}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y}=\boldsymbol{S}_b+\boldsymbol{S}_f+\boldsymbol{R}$$

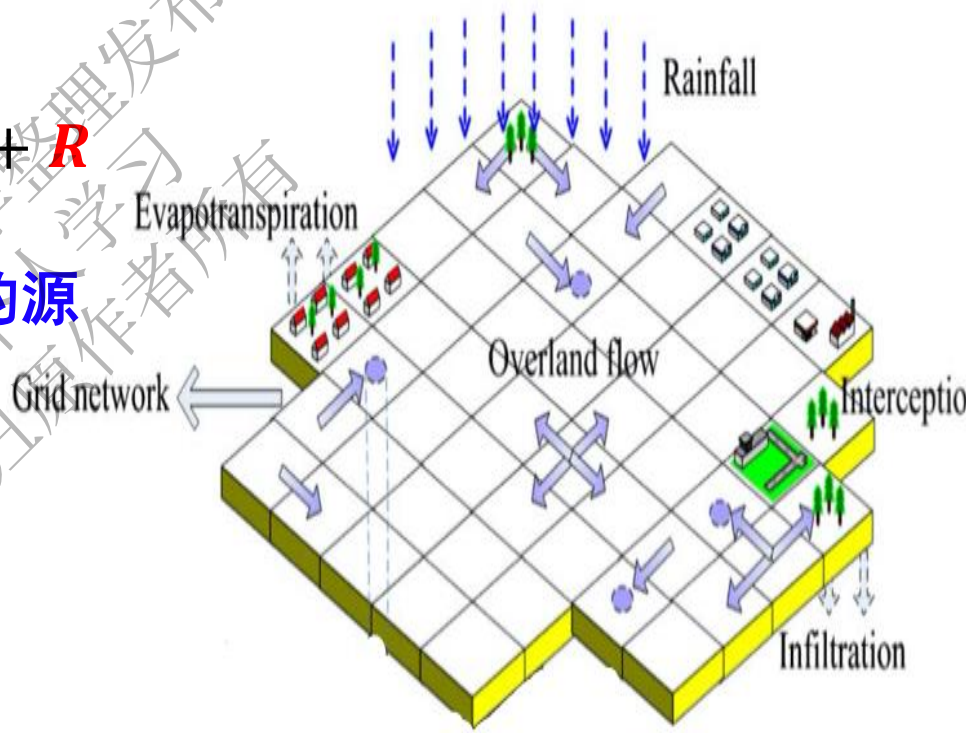
将降雨-下渗过程用控制方程中的源项R表示

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_r-\boldsymbol{R}_i$$

其中，下渗计算采用霍顿方法

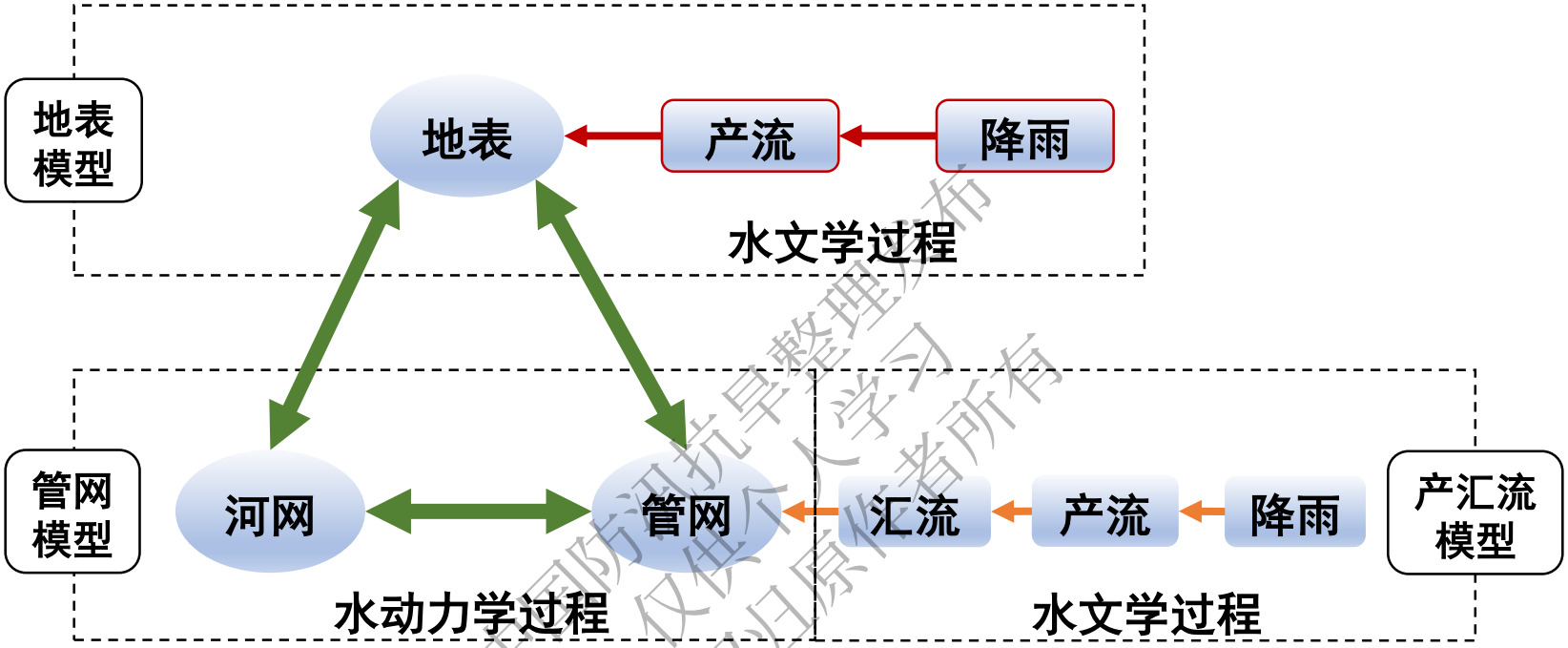
$$f_p=f_\infty+(f_0-f_\infty)\mathrm{e}^{-k_d t}$$

每一时间步的下渗能力由计算网格内最大下渗能力及最小下渗能力估计



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

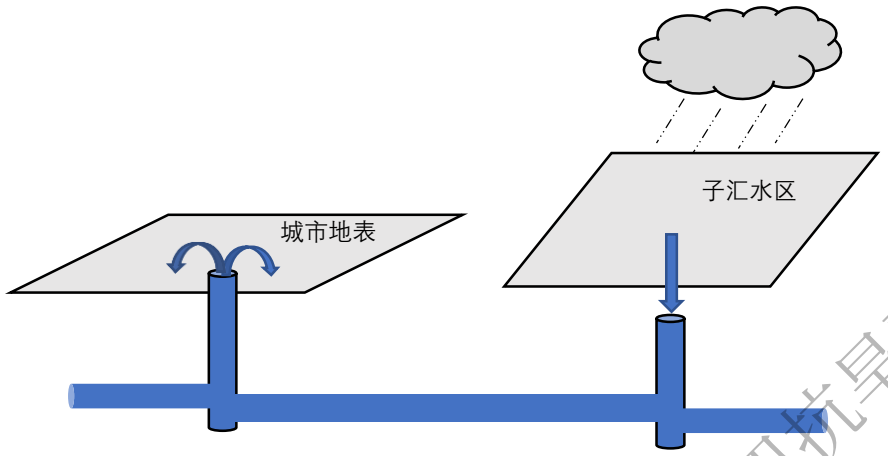
两种城市洪涝模型路径

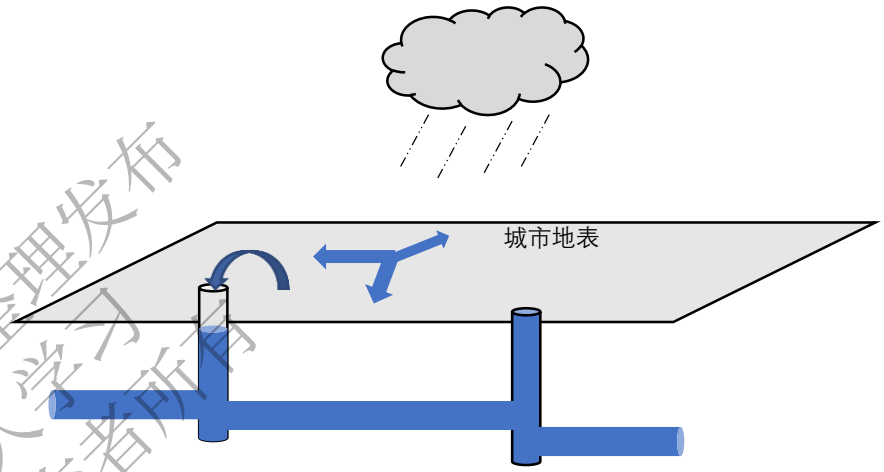


中国防汛抗旱整理分布
仅供个人学习
版权归原作者所有

- ✓ 关键不同之处在于汇流过程的计算方式
- ✓ 水文水动力模型通过水文学概化方式，基于划分的子汇水区进行汇流计算，并直接将雨水汇入管网模型
- ✓ 水动力模型无传统意义上的汇流计算过程，直接将产流计算得到的结果作为SWE源项，进行地表洪水演进计算

两种城市洪涝模型物理过程





水文水动力城市洪涝模型模拟的地表积水，主要是由于雨水无法及时地从排水系统中排出，从而溢流至城市地表

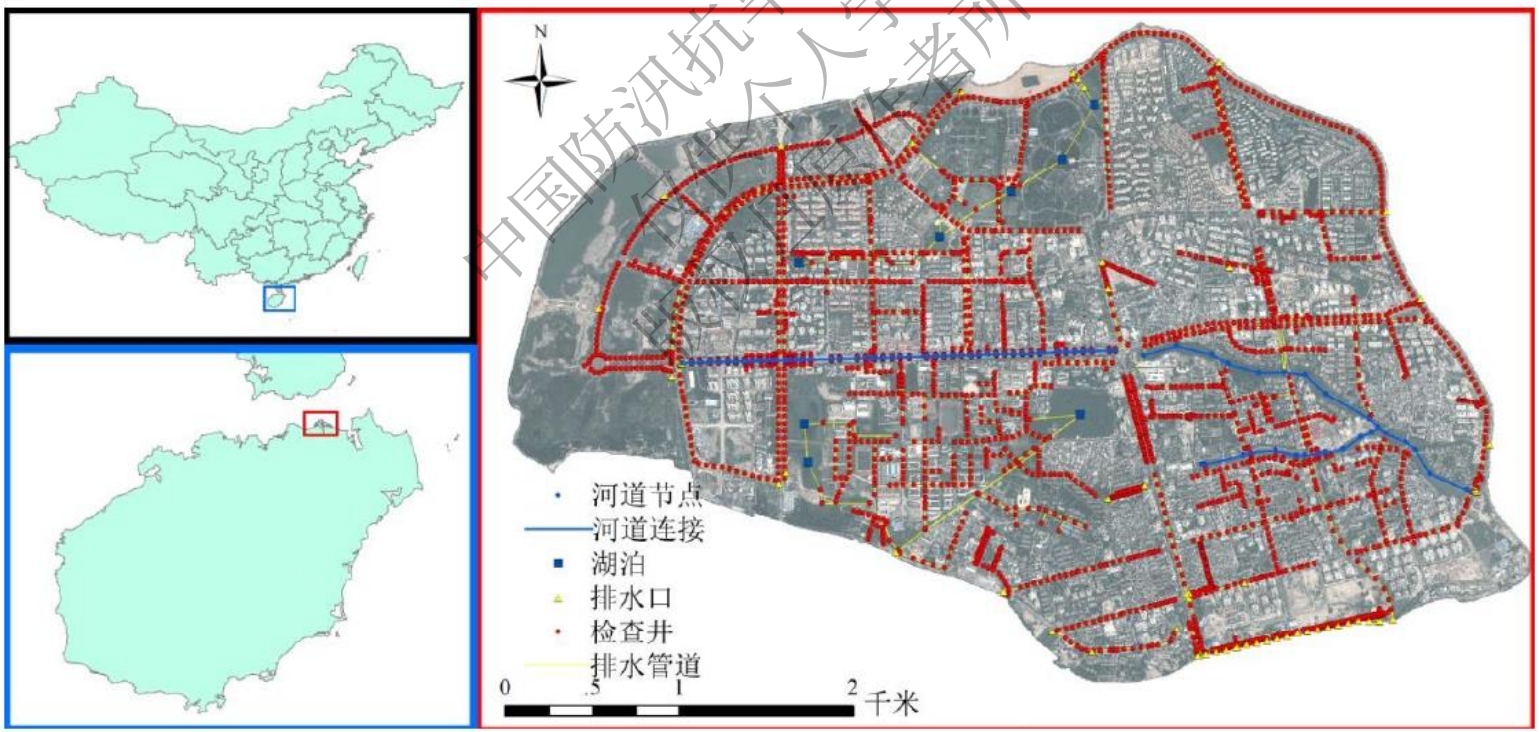
水动力城市洪涝模型模拟的地表积水，主要是受降雨影响形成的地表漫流无法及时地通过附近的检查井汇入排水管网而产生的

在两种城市洪涝模型表述的物理意义中，城市内涝现象的主要原因都是排水能力不足所致，水动力模型描述的物理过程更加贴合现实情况，但对城市地表建模的精度要求显然更高

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

城市洪涝水动力模型验证

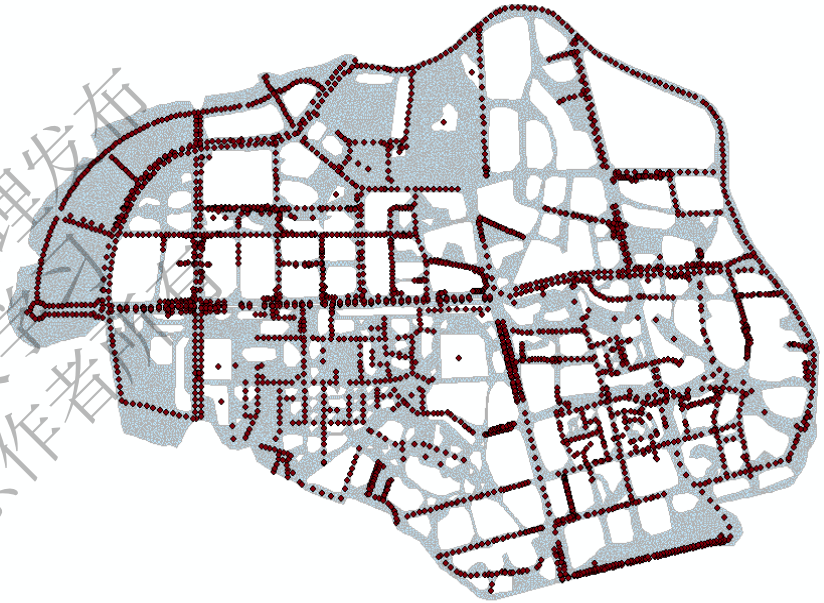
以海甸岛为研究区域，面积为13.8km^2，土地利用类型以商业区、学校校园和住宅区为主，是一个新发展且高度城市化的区域，不透水区域面积占比达70%左右



中国防汛抗旱整理发布
供个人学习
版权归原作者所有

SWMM建模

二维建模及耦合

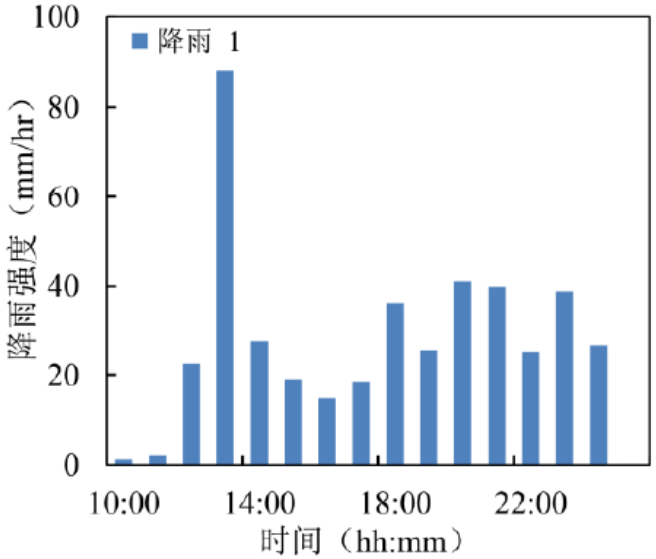


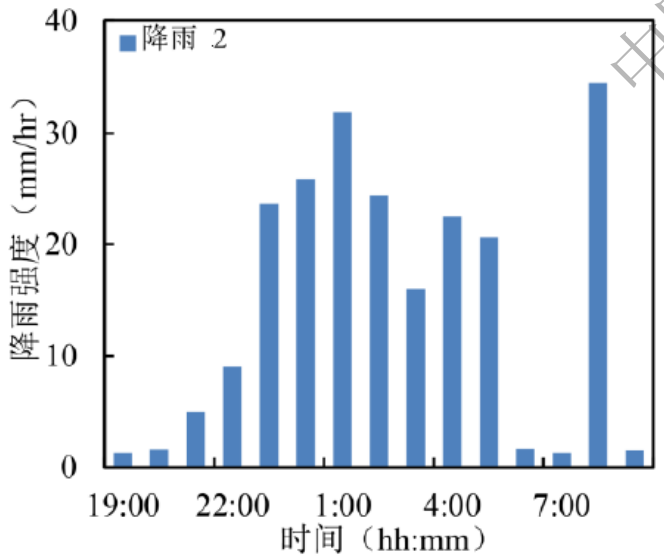
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

与水文水动力模型中SWMM建模过程不同，水动力模型不需要进行子汇水区划分，也无需率定子汇水区中复杂的水文参数

二维建模及一二维耦合部分完全一致，其中不透水建筑物由于不打网格，将其收集的雨水分配给与其相邻的网格单元

实测降雨



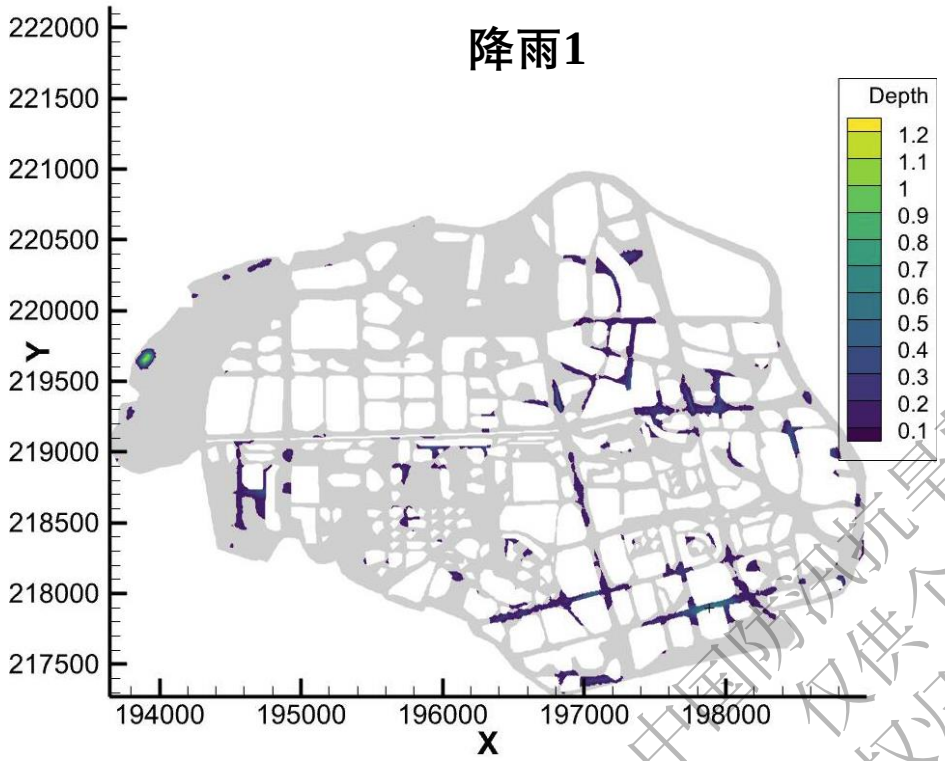


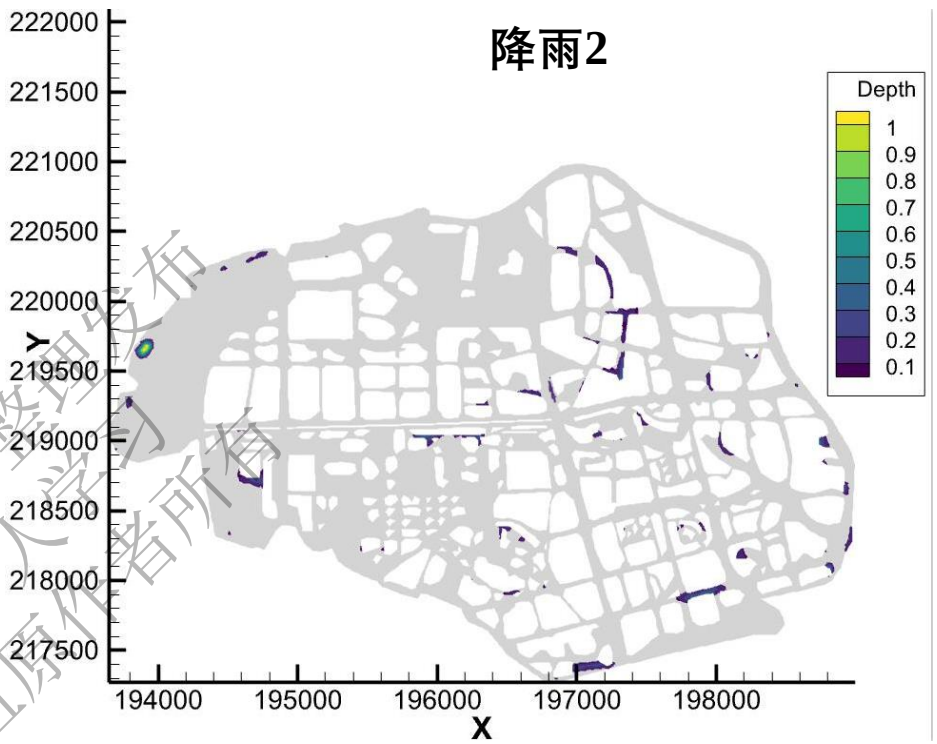
内涝点资料

- ✓ 两次降雨导致的城市内涝信息通过监测位置附近摄像头拍到的照片采用人工识别方式读取
- ✓ 潮位也会对排水造成影响，也获取到了降雨期间的潮位过程，以此作为排水系统的下边界条件
- ✓ 降雨1和降雨2用作城市洪涝模型验证

中国防汛抗旱杂志社
仅供个人学习
版权归原作者所有

模型率定及验证情况





验证变量	位置	实测值	模拟值	绝对误差
最大水深（m）	五西路	0.5	0.48	-0.02
	人民大道	0.5	0.51	0.01
	和平大道	0.5	0.42	-0.08
	二东路	0.5	0.59	0.09
	三西路	0.4	0.45	0.05

验证变量	位置	实测值	模拟值	绝对误差
最大水深（m）	五西路	0.4	0.42	0.02
	人民大道	0.2	0.19	-0.01
	和平大道	0	0	0
	二东路	0.3	0.36	0.06
	三西路	0	0	0

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

相较于水文水动力模型，水动力模型特点如下

- ✓ 从物理意义上考虑，水动力模型能更准确地反映出由降雨到产生内涝的真实过程
- ✓ 水动力模型需要率定的参数较少，但其对地形数据敏感性更高，即需要较高分辨率的DEM数据才能体现其优势
- ✓ 与水文水动力模型相比，由于全域所有单元参与数值通量计算，水动力模型的计算效率较低
- ✓ 需要更为细致的研究工作来分析对比水文水动力模型和水动力模型的差异

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

4、基于简化型浅水方程的城市洪涝模型

连续方程： $$\frac{\partial}{\partial t}h+\frac{\partial}{\partial x}hu+\frac{\partial}{\partial y}hv=0$$

动量方程：

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t}uh}+\boxed{\frac{\partial}{\partial x}hu^2+\frac{\partial}{\partial y}huv}+\boxed{\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}gh^2}+\boxed{gh\frac{\partial}{\partial x}B(x,y)}+\boxed{\tau_{bx}}=0$$

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t}vh}+\boxed{\frac{\partial}{\partial y}hv^2+\frac{\partial}{\partial x}huv}+\boxed{\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial y}gh^2}+\boxed{gh\frac{\partial}{\partial y}B(x,y)}+\boxed{\tau_{by}}=0$$

局部加速度项　　对流加速度项　　附加比降项　　底坡源项及摩擦源项

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

简化形式的二维浅水模型：

扩散波模型、运动波模型、惯性波模型….（研究和应用比较广泛）

局部惯性近似模型（研究较少）

局部惯性近似浅水方程

局部惯性近似模型（Local Inertia Approximation，LIM）：

连续性方程（不变）：

$$\frac{\partial}{\partial t}h+\frac{\partial}{\partial x}hu+\frac{\partial}{\partial y}hv=0$$

动量方程：
（忽略对流加速度项）

$$\frac{\partial}{\partial t}uh+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}gh^2+gh\frac{\partial}{\partial x}B(x,y)+\tau_{bx}=0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}vh+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial y}gh^2+gh\frac{\partial}{\partial y}B(x,y)+\tau_{by}=0$$

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

Paul D. Bates (2010) 首次提出LIM并将其应用在LISFLOOD-ACC计算引擎中，在LISFLOOD 所有计算引擎中，包括完整SWE求解计算引擎、扩散波求解计算引擎和ACC等，ACC计算效率最高，同时模拟精度接近于完整SWE。LISFLOOD-ACC基于栅格单元利用有限差分法进行离散求解，不便于适用复杂的城市地形雨洪建模

局部惯性近似浅水方程求解方案

提出局部惯性近似浅水方程基于Godunov型有限体积法数值求解方案，并基于单元中心式非结构网格进行离散

数值通量项：对于求解数值通量项时单元界面两侧存在的一维黎曼问题，采用Roe格式黎曼求解器，推导出适用于局部惯性近似方程的雅可比矩阵，并求解得到

$$\boldsymbol{\phi}_{PQ}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2}\left(-\Delta h\tilde{c}+(h_L u_L+h_R u_R)\vec{\boldsymbol{n}}_x+(h_L v_L+h_R v_R)\vec{\boldsymbol{n}}_y\right)\\ \frac{1}{2}\left(\frac{g}{2}\left({h_L}^2+{h_R}^2\right)\vec{\boldsymbol{n}}_x+\tilde{c}{\vec{\boldsymbol{n}}_x}^2(h_L u_L-h_R u_R)+\tilde{c}\vec{\boldsymbol{n}}_x\vec{\boldsymbol{n}}_y(h_L v_L-h_R v_R)\right)\\ \frac{1}{2}\left(\frac{g}{2}\left({h_L}^2+{h_R}^2\right)\vec{\boldsymbol{n}}_y+\tilde{c}{\vec{\boldsymbol{n}}_y}^2(h_L v_L-h_R v_R)+\tilde{c}\vec{\boldsymbol{n}}_x\vec{\boldsymbol{n}}_y(h_L u_L-h_R u_R)\right)\end{bmatrix};$$

底坡源项：一种新的水面重构方法，以在极浅水深时保持模型稳定

$$\boldsymbol{S}_{b_P}=\begin{pmatrix}0\\ \frac{1}{A_i}\sum_{k=1}^{3}\frac{1}{2}g(h_P+h_{L,k})(b_P-b_{f,k})\vec{\boldsymbol{n}}_k l_k\end{pmatrix};$$

摩擦源项：采用Xia (2018) 提出的离散方案，时间步长仅被CFL条件严格限制

$$\boldsymbol{u}_x^{j+1}=\begin{cases}m_x, & if\,\Delta t g n^2(h^j)^{-\frac{4}{3}}\sqrt{\left(\frac{m_x}{h^j}\right)^2+\left(\frac{m_y}{h^j}\right)^2}<10^{-3}\\ \dfrac{m_x-m_x\sqrt{1+4\Delta t g n^2(h^j)^{-\frac{4}{3}}\sqrt{\left(\frac{m_x}{h^j}\right)^2+\left(\frac{m_y}{h^j}\right)^2}}}{-2\Delta t g n^2(h^j)^{-\frac{4}{3}}\left(\frac{m_x}{h^j}\right)^2+\left(\frac{m_y}{h^j}\right)^2}, & if\,\Delta t g n^2(h^j)^{-\frac{4}{3}}\sqrt{\left(\frac{m_x}{h^j}\right)^2+\left(\frac{m_y}{h^j}\right)^2}\geq 10^{-3}\end{cases};$$

CFL条件：推导出适用于局部惯性近似方程的CFL条件

$$\Delta t=CFL\frac{d_i}{\sqrt{gh}}$$

中国防汛抗旱管理学会
仅供个人学习
版权归原作者所有

模型集成耦合

耦合方法(堰流公式及孔口流量公式)：

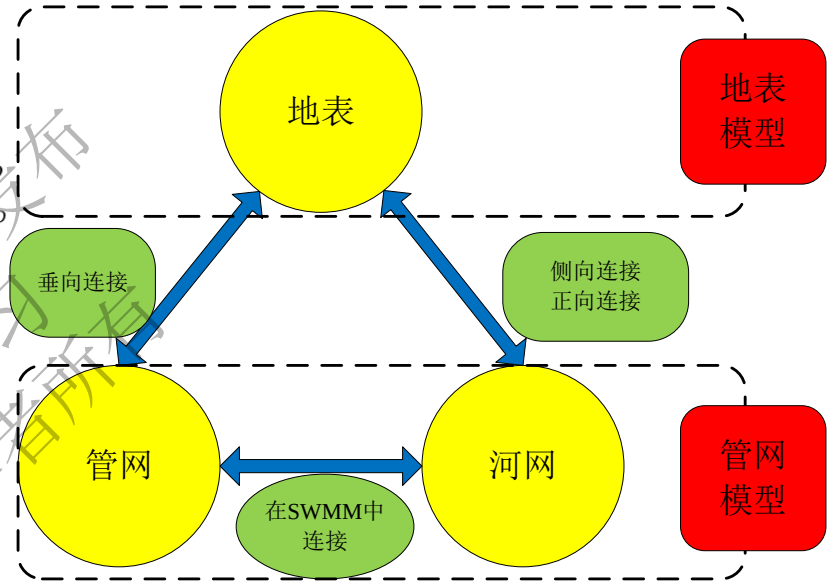
垂向耦合：

$$Q_{n\to s} = c_o A_{mh}\sqrt{2g(H_{1D}-H_{2D})} \qquad Q_{s\to n} = \begin{cases} c_w w h_{2D}\sqrt{2gh_{2D}} & \text{if } H_{1D} \le Z_{2D} < H_{2D} \\ c_o A_{mh}\sqrt{2g(H_{2D}-H_{1D})} & \text{if } Z_{2D} \le H_{1D} < H_{2D} \end{cases}$$

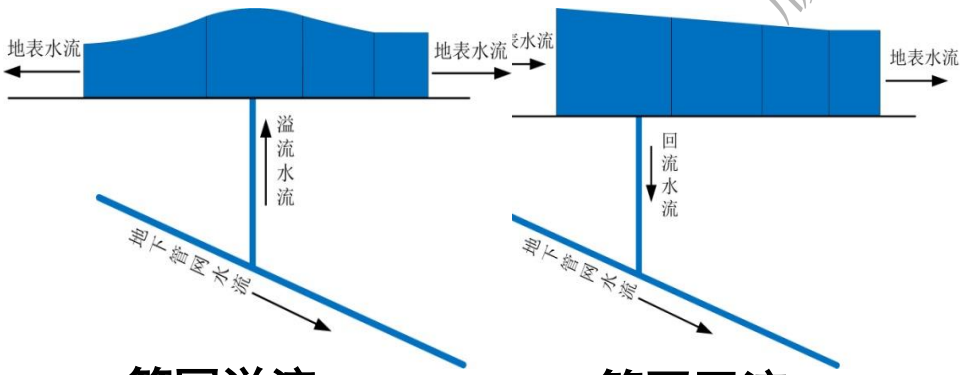
侧向耦合：

$$Q = \begin{cases} 0.35 b_e h_{\max}\sqrt{2gh_{\max}} & \text{if } \dfrac{h_{\min}}{h_{\max}} \le \dfrac{2}{3} \\ 0.91 b_e h_{\min}\sqrt{2g\left(h_{\max}-h_{\min}\right)} & \text{if } \dfrac{2}{3} < \dfrac{h_{\min}}{h_{\max}} \le 1 \end{cases}$$

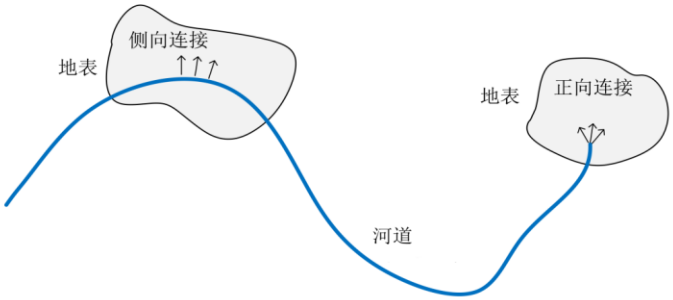
正向耦合：



二维模型以SWMM的下游出流量作为流量边界条件， SWMM以二维模型的水位作为下边界条件



管网溢流　　管网回流

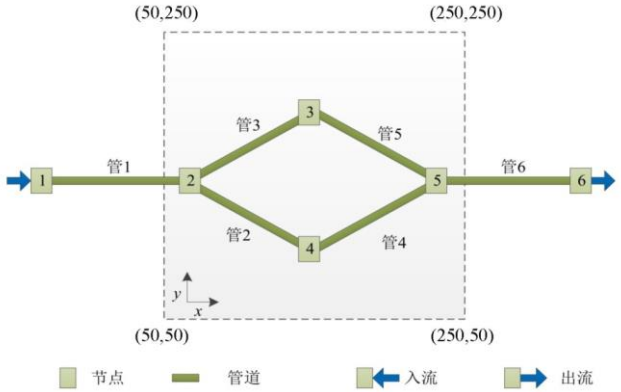


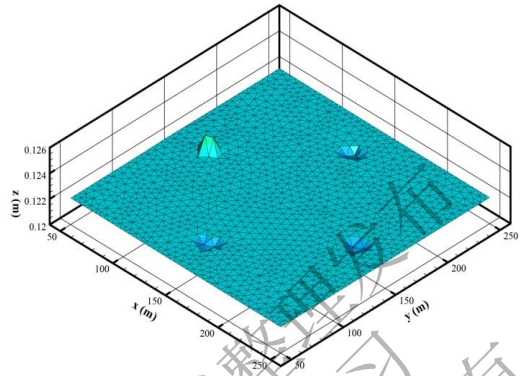
侧向连接及正向连接示意图

中国防汛抗旱整理发布
版权归原作者所有
仅供个人学习

模型集成耦合验证

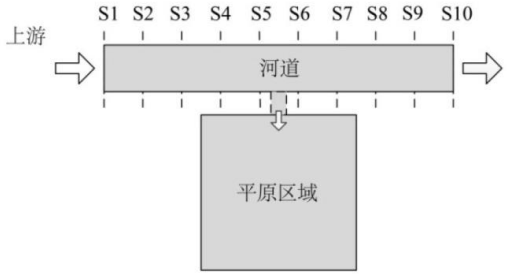
垂向测试：

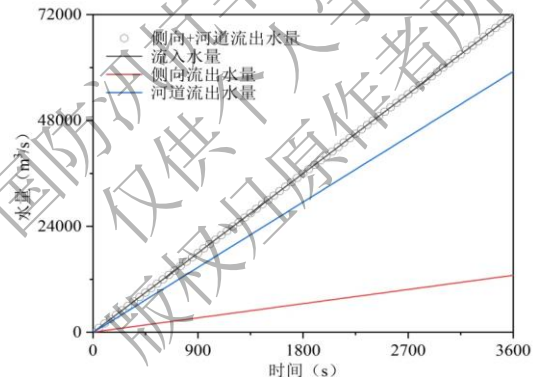


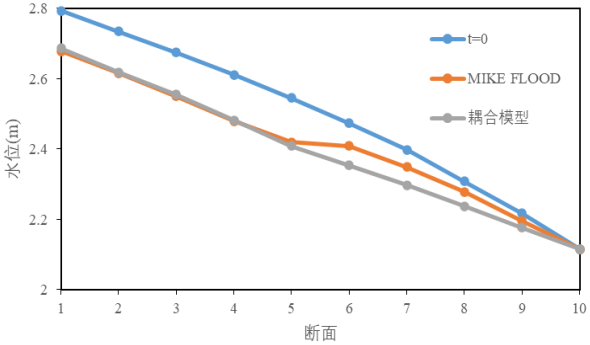


节点编号	LIAM	InfoWorks ICM(m^3/s)	相对差值/(%)	SWE
1	1.466	1.5	-2.27	1.466
2	1.392	1.396	-0.29	1.392
3	0.97	0.991	-2.12	0.97
4	0.97	0.99	-2.12	0.97
5	0.776	0.779	-0.39	0.776
6	0.572	0.574	-0.35	0.572
管道编号	LIAM	InfoWorks ICM(m^3/s)	相对差值/(%)	SWE
1	1	1	0	1
2	0.431	0.413	4.36	0.431
3	0.431	0.413	4.36	0.431
4	0.477	0.471	1.27	0.477
5	0.477	0.472	1.06	0.477
6	1	1	0	1

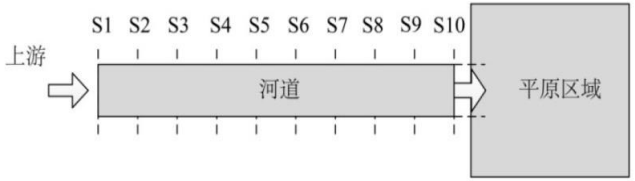
侧向测试：

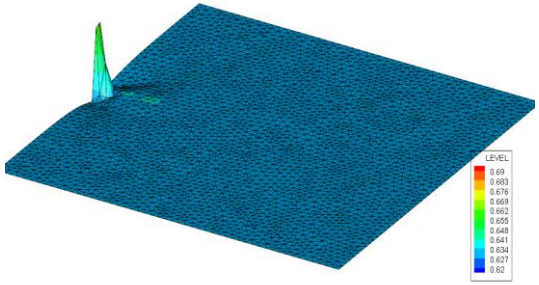


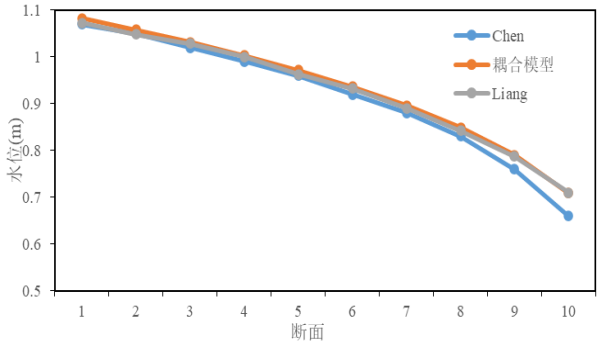




正向测试：







中国防汛抗旱整理发布
仅供广大学习
版权归原作者所有

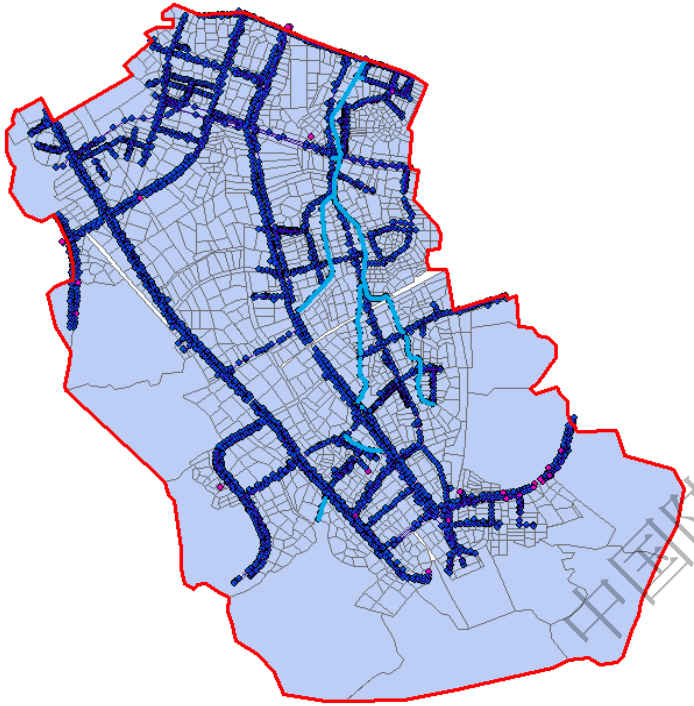
实际案例验证

- ✓ 深圳民治区域面积为25.33km^2，土地利用以住宅用地、道路、工业用地及绿地为主
- ✓ 以基于完整SWE求解方案构建的城市雨洪模型（HH）为标准，分析对比基于LIM的城市雨洪模型(HHS)的内涝模拟能力
- ✓ 设计暴雨采用深圳市设计暴雨公式，包括10、20、50、100年

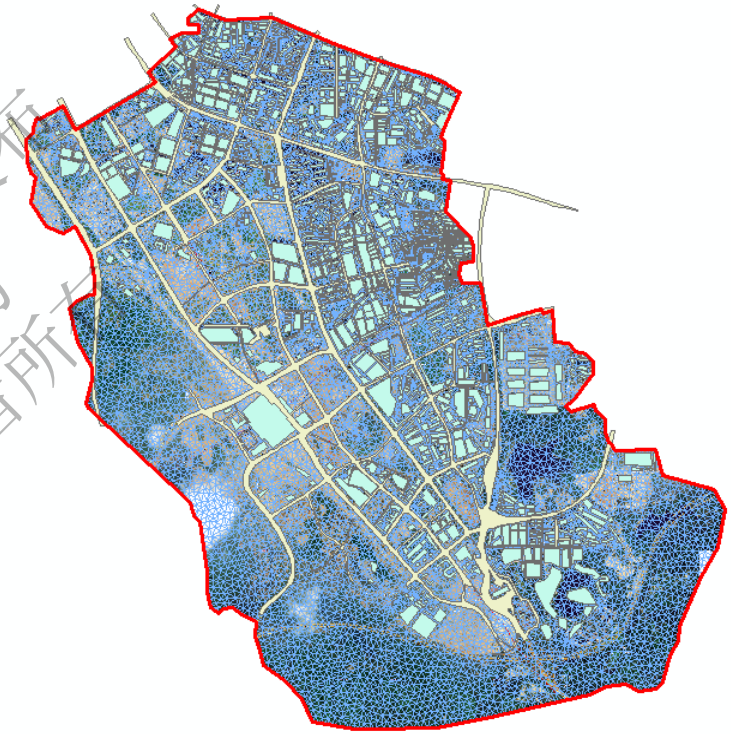
中国防洪抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

研究区域城市雨洪模型构建

1、SWMM模型构建



2、二维地表模型构建

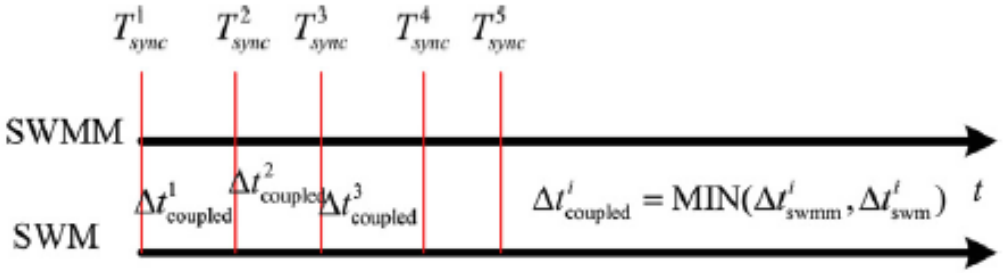


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

3、城市雨洪模型耦合

基于visual studio C++开发环境
通过SWMM提供的动态链接库
增加耦合需要的相应接口函数

基于每个时间步实现实时、动态、双向的水量交换



时间同步方案示意图

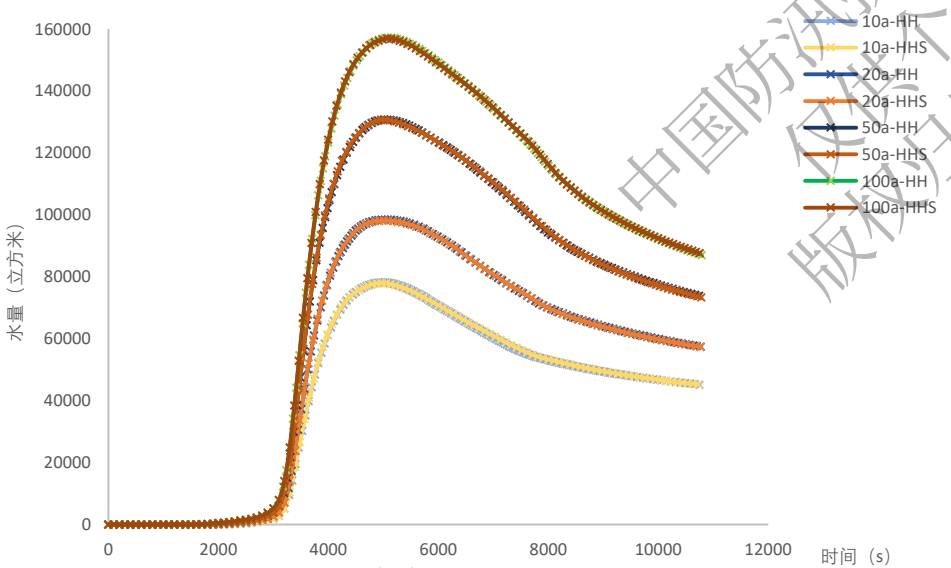
研究区域城市雨洪模拟结果

模型计算时间

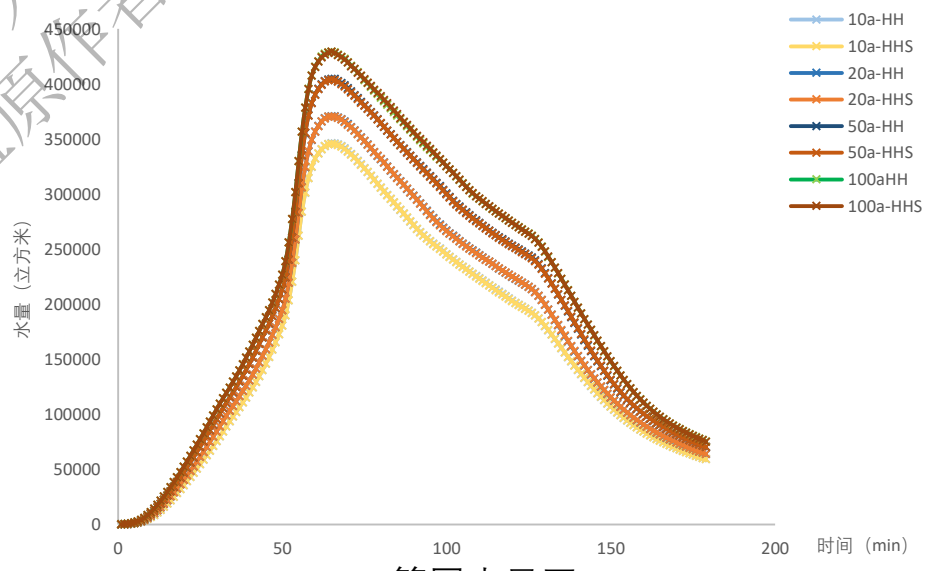
	10a	20a	50a	100a
HH（s）	240.13	256.62	265.58	270.5
HHS（s）	174.82	180.40	182.15	183.69
效率提升	27.2%	29.7%	31.4%	32.1%

相对于HH，HHS由于通量项的计算量大幅减少，同时CFL条件判定标准不同，模型的效率提升在30%左右

研究区域水量分析



地表水量图



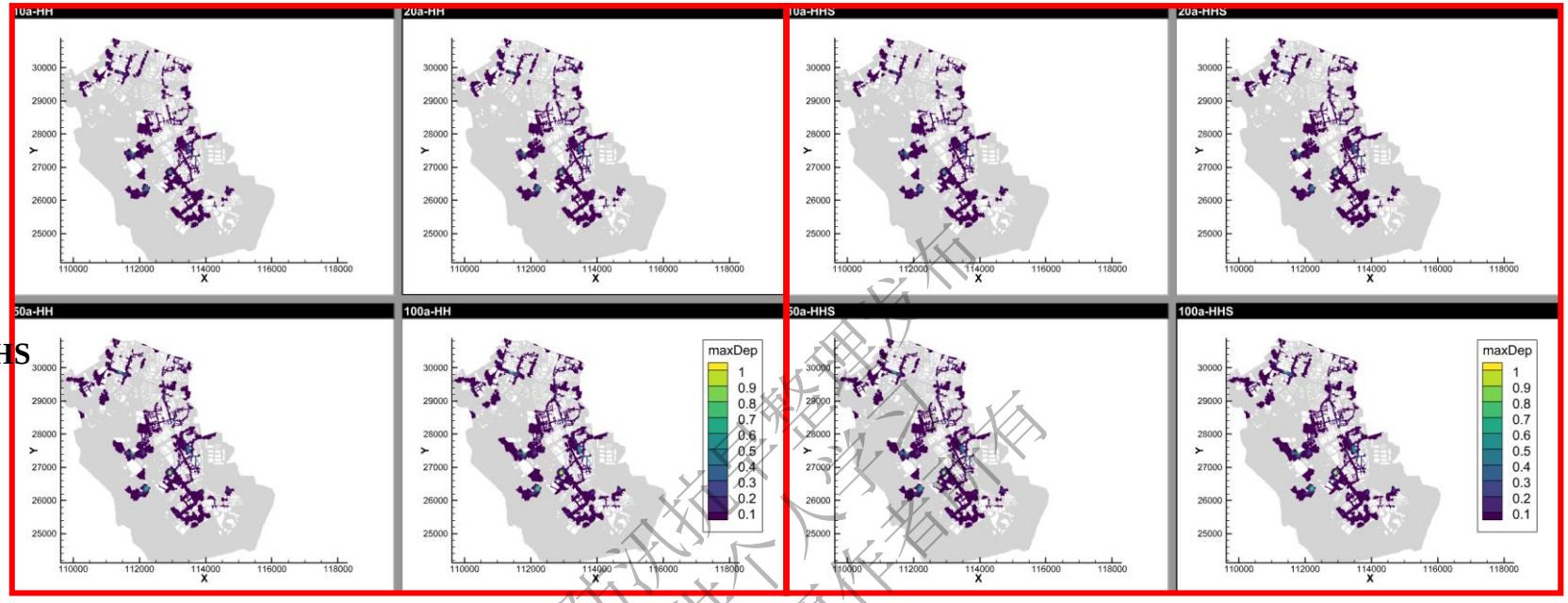
管网水量图

地表径流总量及管网水量峰值误差均在0.5%以内，HHS模型地表水量稍低，退水过程稍慢

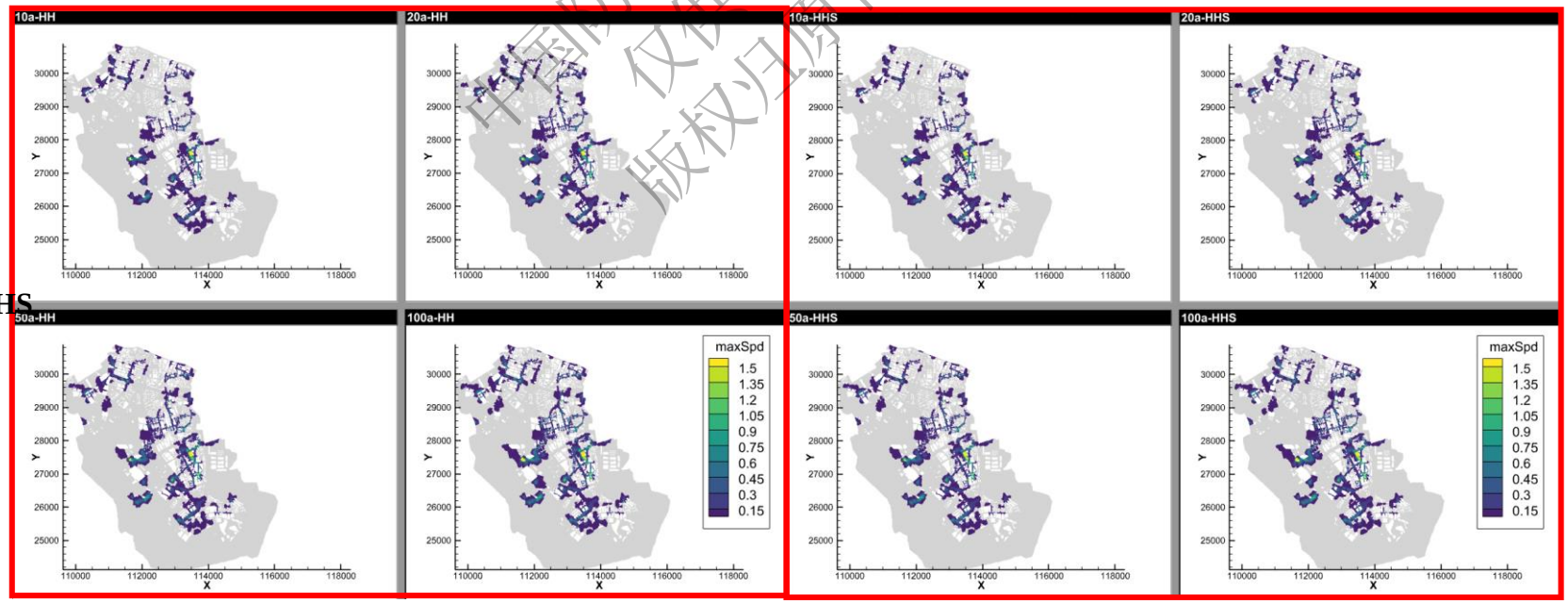
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

研究区域城市雨洪模拟结果

最大水深
HH Vs HHS



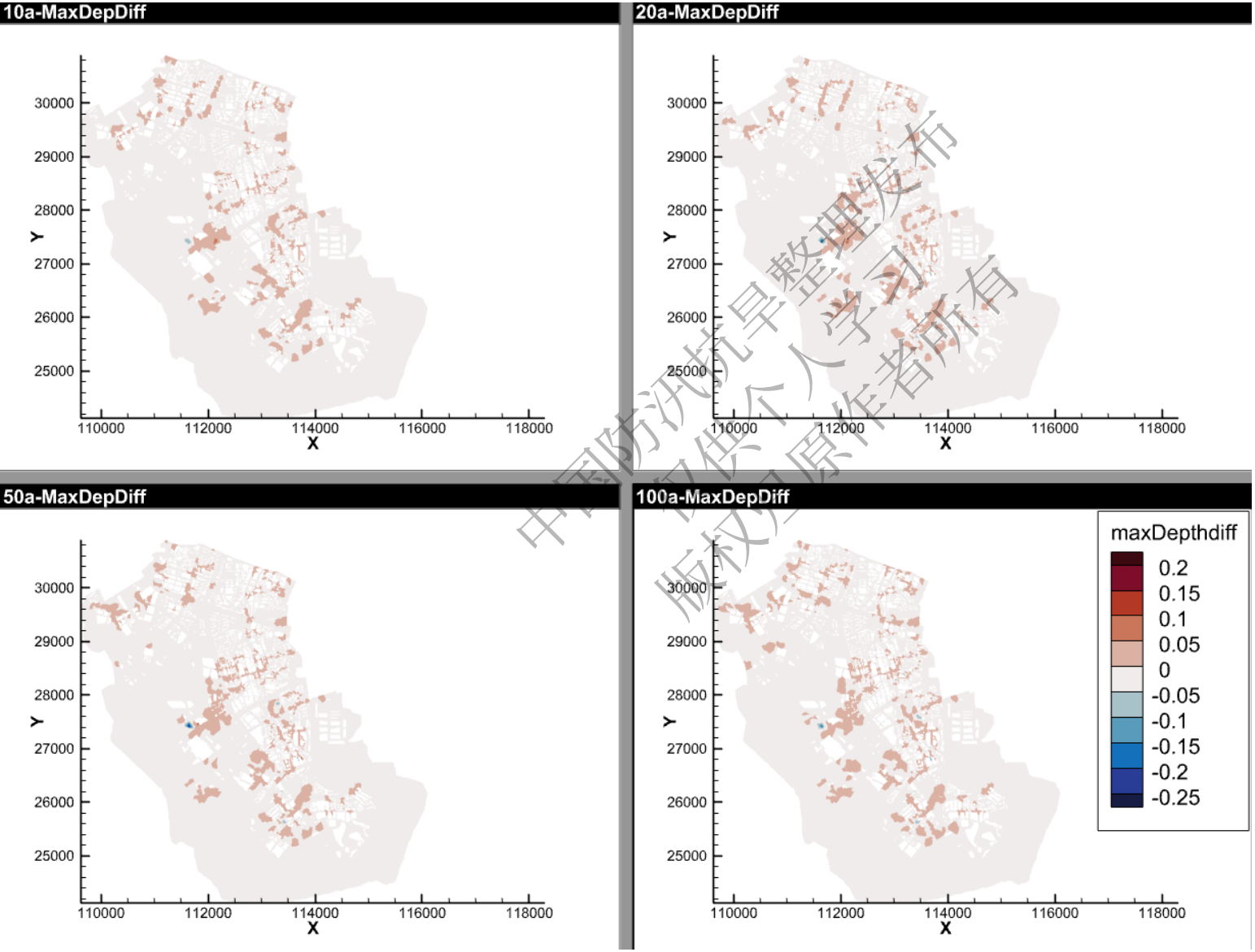
最大流速
HH Vs HHS



中国防洪抗旱减灾工程学会
仅供个人学习
版权归原作者所有

研究区域城市雨洪模拟结果

最大水深差异图（HH-HHS）：

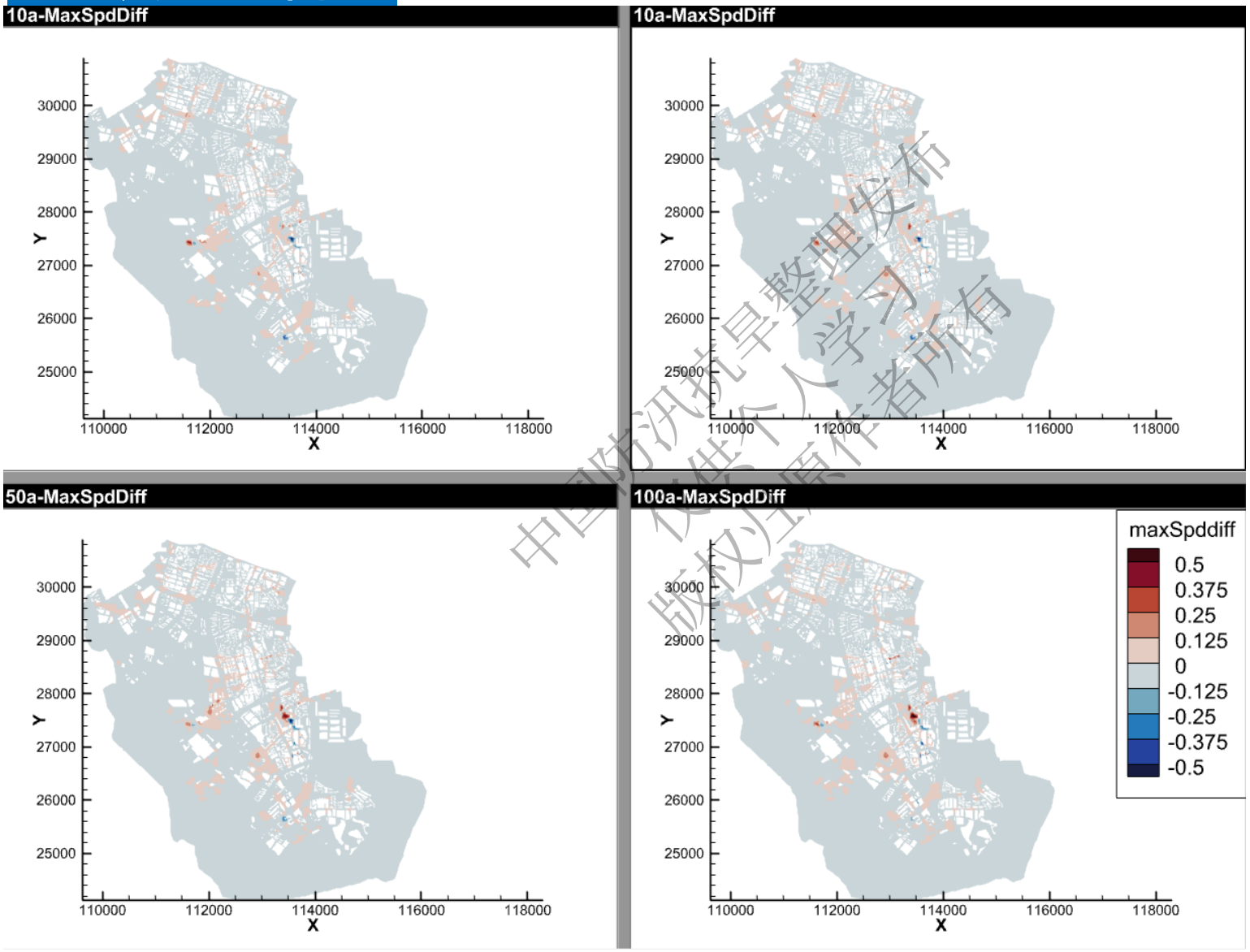


两模型水深差异整体较小，HHS模型模拟地表水深偏小，在极个别单元处出现水深高估

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

研究区域城市雨洪模拟结果

最大流速差异图：

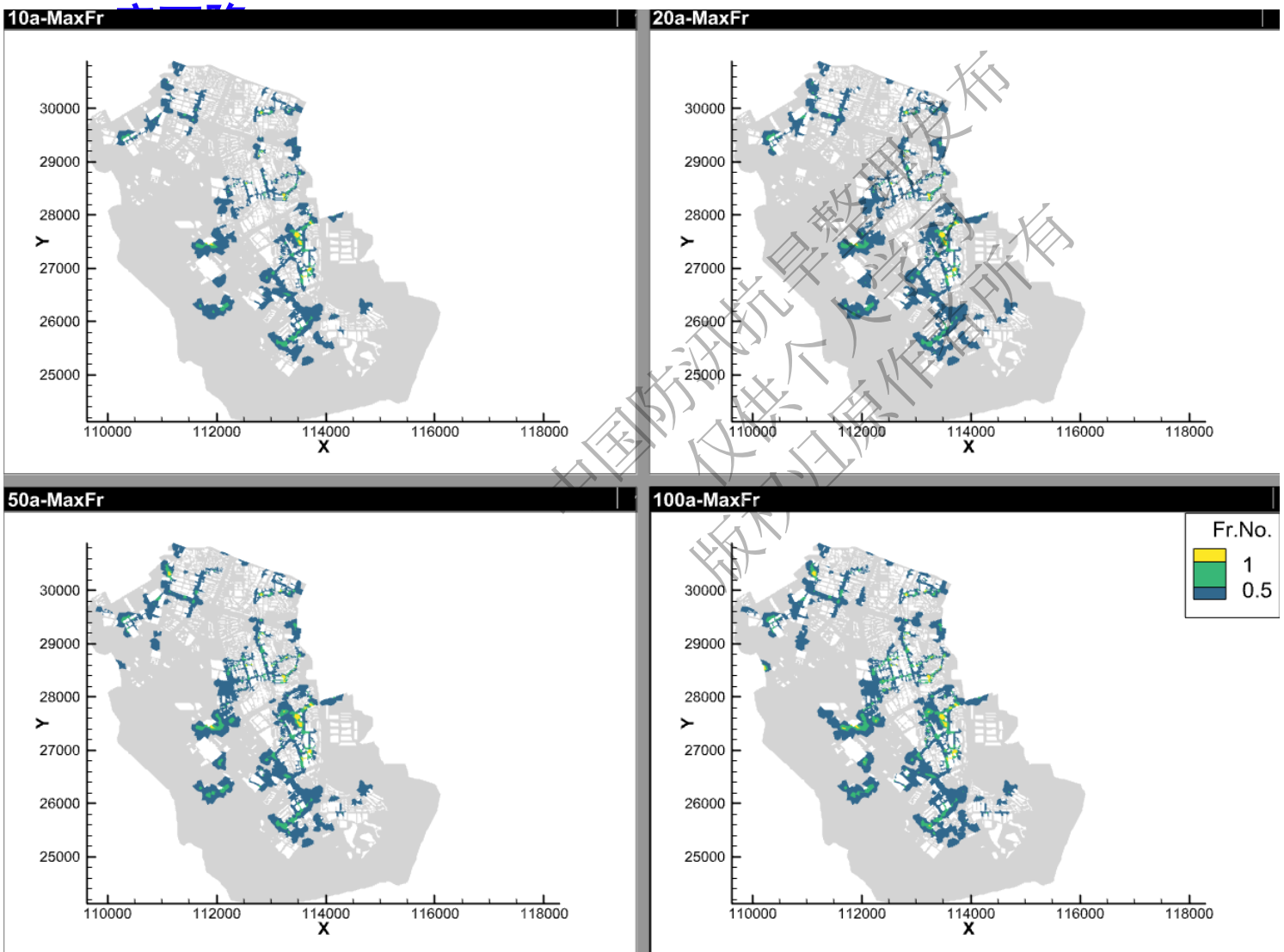


两模型模拟的最大流速差异整体很小，HHS模拟流速也有较低程度的低估，在极个别单元处流速高估

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

研究区域城市雨洪模拟结果

弗劳德数Fr分析：两模型差异主要是由于对流加速度项不同引起，忽略此项导致LIM在模拟急流，即Fr数大于1的情况时LIM模型精



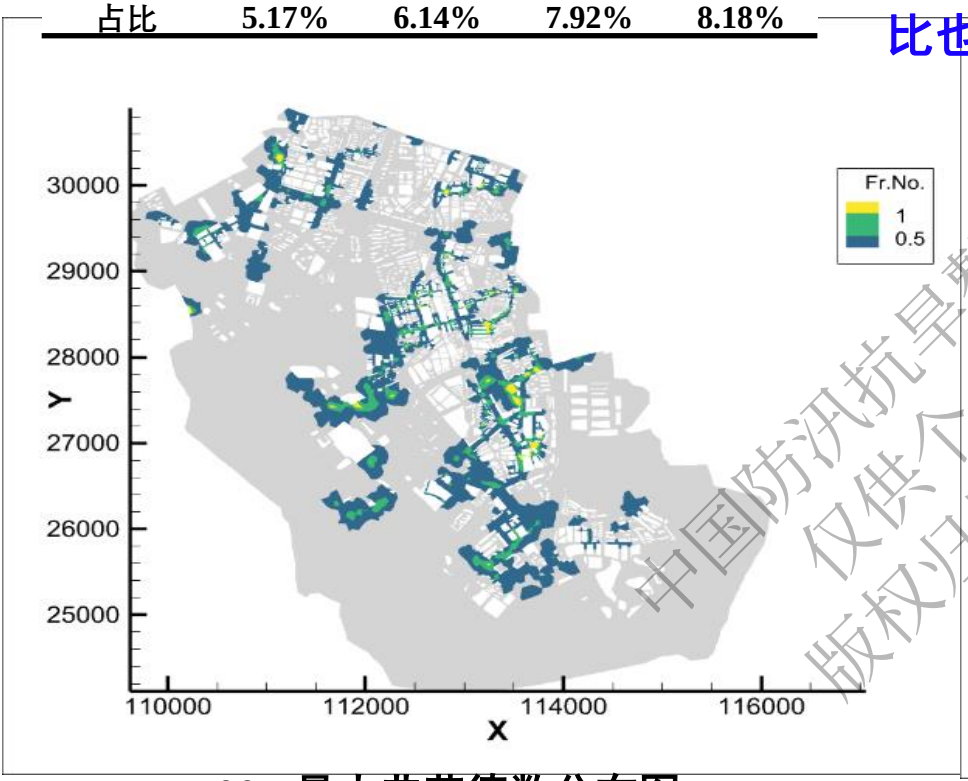
在降雨产生的城市内涝过程中，整个城市区域洪水流动的Fr数大部分在0~0.5之间

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

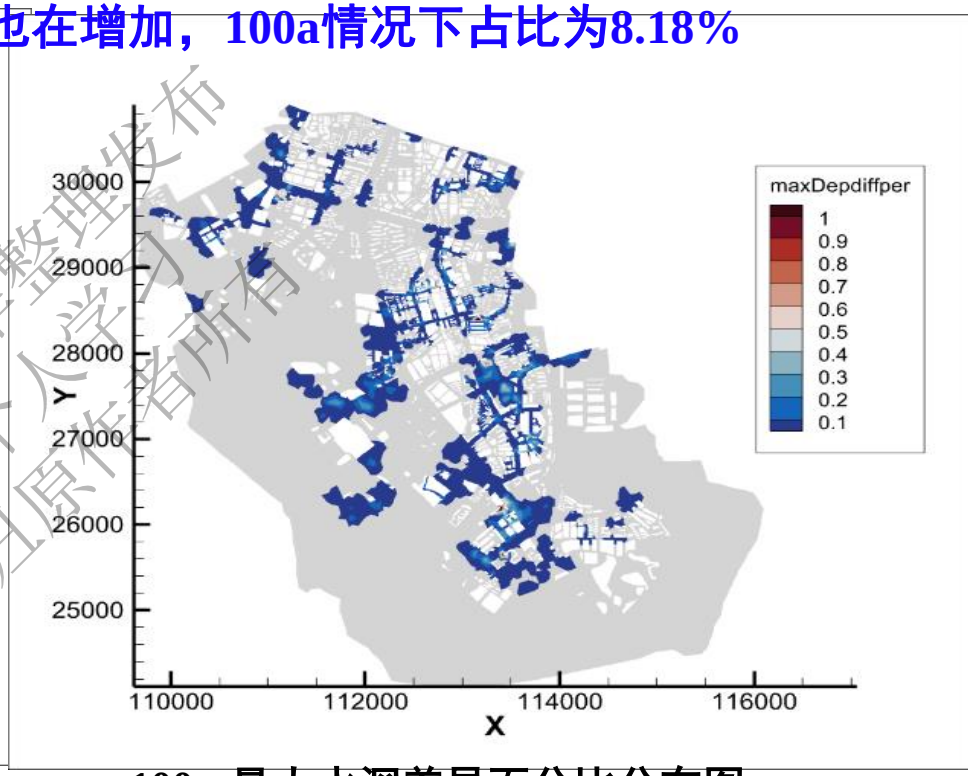
研究区域城市雨洪模拟结果

	10a	20a	50a	100a
Fr>1单元数	137	199	307	380
湿单元数	2645	3242	3878	4327
占比	5.17%	6.14%	7.92%	8.18%

Fr大于1的单元数占比在10%以内，随着降雨重现期增加，Fr大于1的计算单元数增加，同时占比也在增加，100a情况下占比为8.18%



100a-最大弗劳德数分布图



100a-最大水深差异百分比分布图

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

以100年一遇情况下为例，Fr数和最大水深差异百分比图对比可以发现，两者的分布具有较强的一致性，即在耦合了一维管网的城市雨洪模型中，Fr的数仍会是影响LIM模型精度的主要因素

相较于浅水方程模型，LIIM模型特点如下

- 提出的局部惯性近似模型在保证与完整浅水方程数值方案有较强一致性的情况下，计算效率提升30-40%
- 基于局部惯性近似模型构建的一二维耦合的城市雨洪模型同样展现了良好的模拟性能，在保证模拟精度前提下，本模型计算效率提升30%左右
- 影响本模型精度的主要因素仍然是弗劳德数，其中在Fr<1时，模拟精度得到了满意效果，在Fr>1时模拟结果可能会出现较大偏差
- 在由强降雨引起的城市内涝现象中，急流流态的计算单元占比极少（5%~8%），因此本模型用于城市雨洪数值模拟时可靠性较好

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

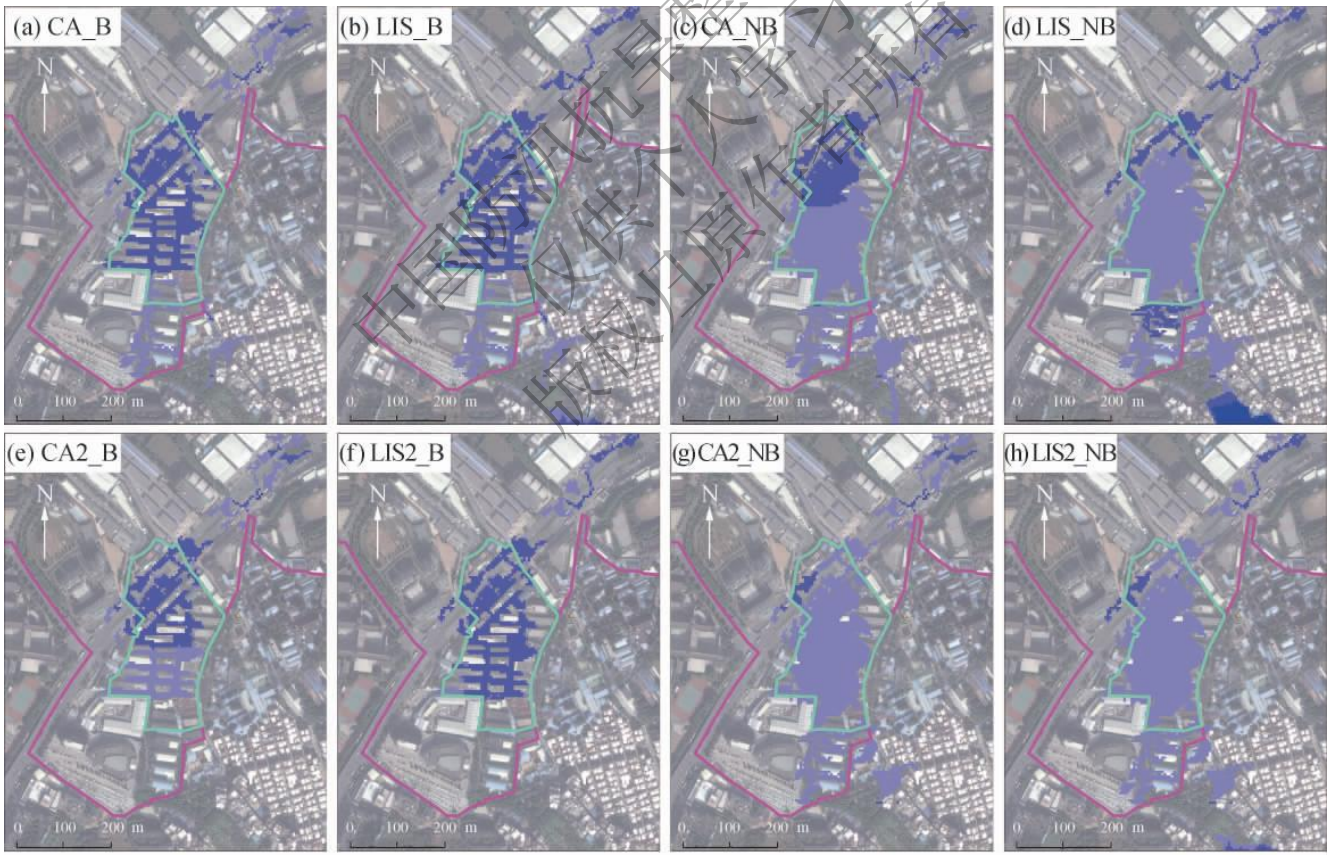
5、基于雨量等效下渗的城市洪涝模拟

- ✓ 利用高精度高分辨率的二维水动力学模型模拟城市地表二维水流运动
- ✓ 对于城市地下排水管网的水流运动采用概化方式进行模拟，应用等效下渗原则进行定量考虑，即将管网排水能力按照实际设计标准，等量等效的计入管网汇流所影响区域处的网格
- ✓ 根据室外排水设计规范和有关研究，结合城市现场调研情况得到城市排水管网实际排水能力，根据暴雨强度公式计算得到该排水标准下的降雨平均雨强
- ✓ 在降雨数据中将小于该平均雨强的部分扣除，视为通过排水管网排走，超过平均雨强的部分降雨落到地面形成地表径流

中国防汛抗旱管理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

6、基于WCA2D与SWMM模型的城市洪涝模型

*WCA2D*模型是由*Guidolin*等开发，与传统二维水动力模型不同，该模型是一种基于权重转换规则的元胞自动机模型。尽管没有考虑惯性项和动量守恒，但具备模拟二维水动力过程能力，并且模拟效率很高。模型能够用来处理多种网格(例如矩形网格、六边形网格或三角形网格)以及不同的元胞邻域类型(例如四元胞的冯-诺依曼邻域或八元胞的摩尔邻域)



二、城市暴雨洪涝模拟所存在的主要问题

1、水文水动力耦合模型、水动力模型等计算效率均较低

2、不考虑管网资料或者对管网进行概化处理，均难以反映地下排水管网系统的动力过程和实际雨洪物理过程

3、利用元胞自动机等方法进行模拟分析缺乏严格的物理意义，难以反映复杂的地表水流特征

4、城市地下排水管网资料缺失和精度较低

5、地形资料精度较低，难以反映微地形作用

6、城市存在地铁、车库等大型地下空间

7、用于模型验证的实际观测资料获取困难

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

排水管网模型自主开发

- ✓ 目前的排水管网模型大多基于SWMM模型，缺乏稳定可靠的自主开发模型
- ✓ 地下排水管网数量十分庞大，严重影响计算效率，目前为了满足实时预报需要，主要通过对管网进行概化处理，以便与地表二维模型运行效率相适应
- ✓ 目前GPU算法均是针对地表二维水动力学模型，还没有基于GPU加速的排水管网模型
- ✓ 为了考虑排水管网的真实水力过程，急需GPU加速算法，以得到完整的城市洪涝模型

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、城市暴雨洪涝模拟未来发展趋势

二维水文/水动力模型已广泛应用于各种水文应用领域，然而由于它们对计算的要求很高，在实践中使用这些基于物理的复杂建模方法进行实时洪水预报往往具有挑战性

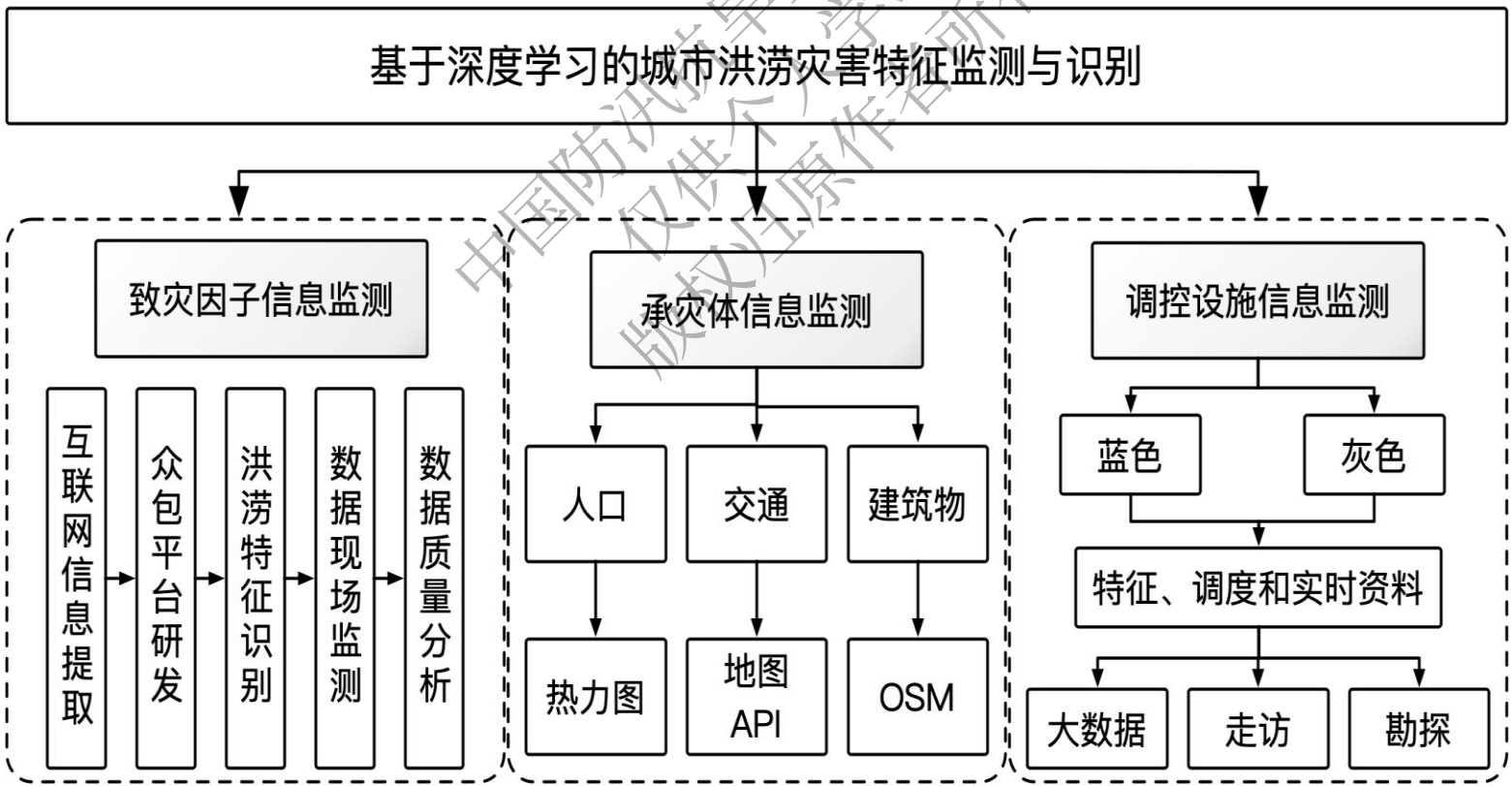
可能的解决方法：

- ✓ 通过实现GPU加速并行计算来同时利用多个处理器来提高模型的计算效率
- × 计算量大，对高性能计算技术的进步和后续计算方法的发展提出挑战
- ✓ GPU加速技术在水动力模型具有很高的应用前景，但是城市雨洪模型中由于需要与一维管网进行耦合，目前城市雨洪模型GPU技术的发展仍受到了一定限制
- ✓ 研发基于GPU加速的城市洪涝水文水动力耦合模型

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

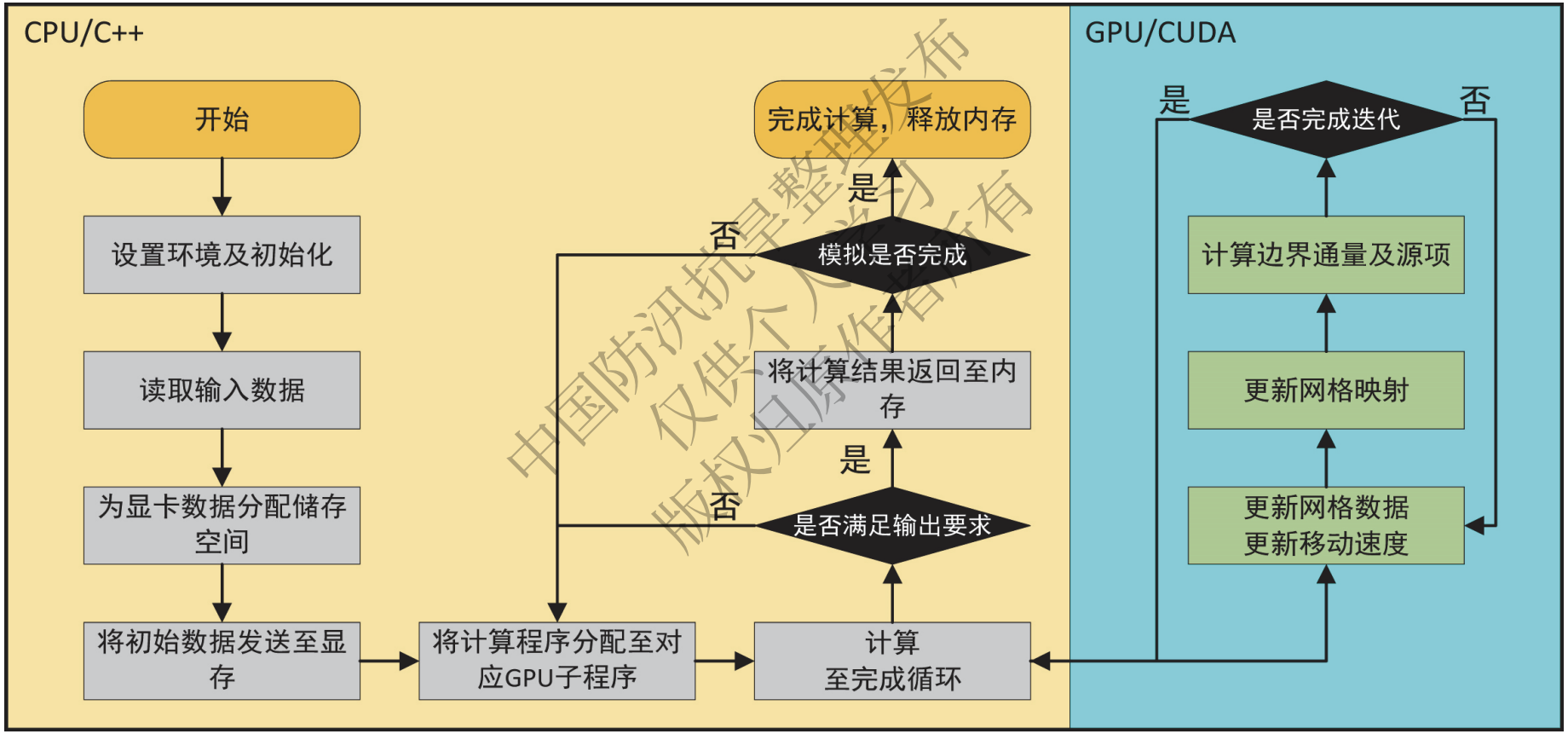
1、基于深度学习的城市洪涝灾害特征监测与识别

针对城市洪涝灾害特征复杂和影响因子种类繁多的特点，通过深度学习等人工智能技术从大数据中筛选出暴雨期间研究区域洪涝灾害致灾因子和承灾体信息，利用图像识别、自然语言处理等深度学习技术提取出洪涝深度、洪涝范围及水位变化等致灾因子的实时动态特征和人口、交通和建筑物等承灾体信息



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、基于GPU加速的城市洪涝模型

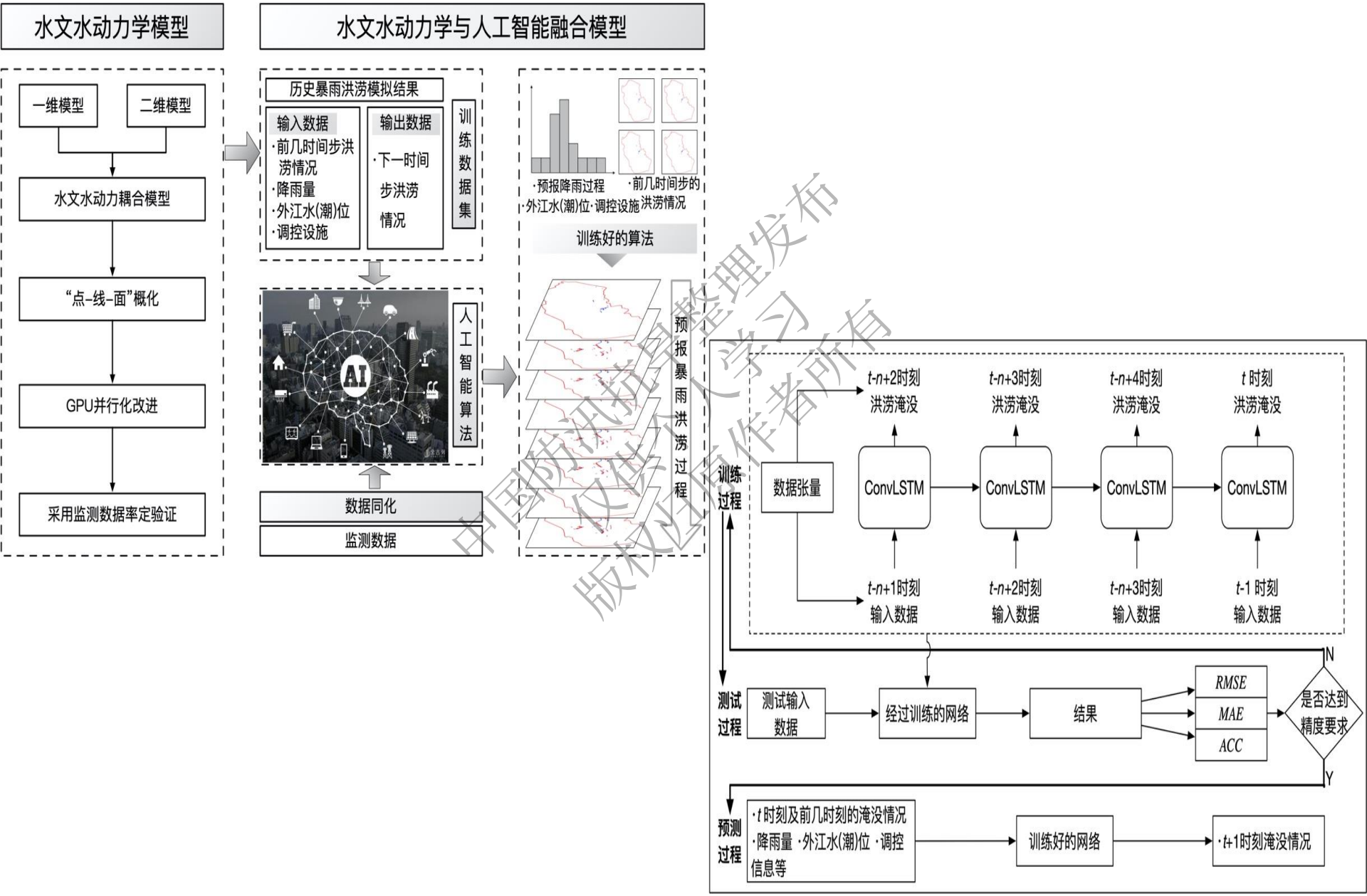


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

3、水文水动力与人工智能融合的城市洪涝模型

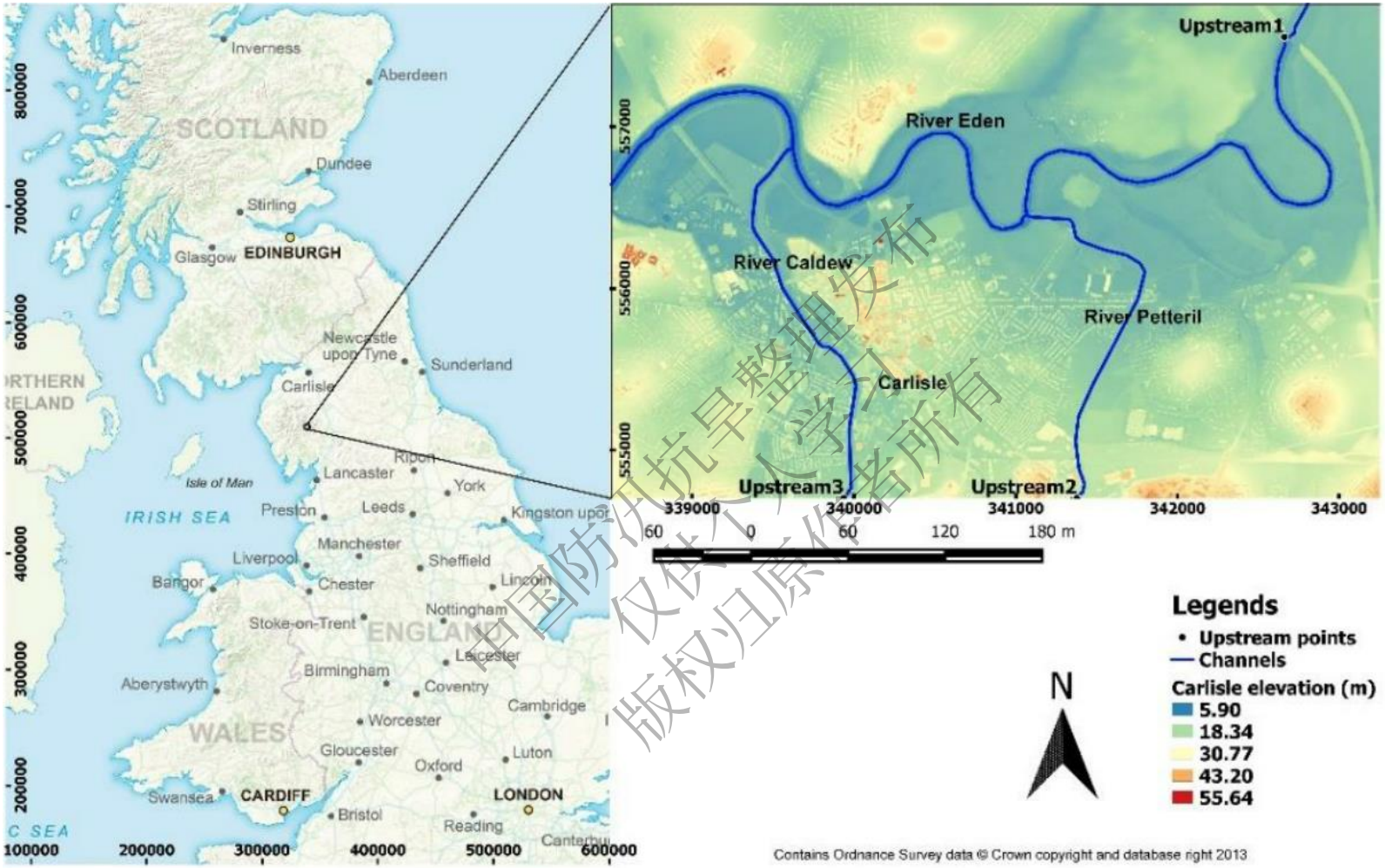
- ✓ 水文水动力学与人工智能融合的城市洪涝模型是一个以城市洪涝水文水动力学模型模拟结果作为训练集，以实时监测数据作为数据同化来源，采用人工智能算法（卷积长短期记忆网络方法等）模拟城市洪涝演进过程的数值模型
- ✓ 模型利用训练集对人工智能算法进行训练，分析不同历史暴雨情景下洪涝演进规律，结合实时监测数据进行数据同化，实时纠正模型的误差，基于现状淹没情况推求和预测未来时段的洪涝淹没情况

中国防汛抗旱管理杂志
仅供个人学习
版权归原作者所有



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

基于深度学习的流域洪水快速模拟方法

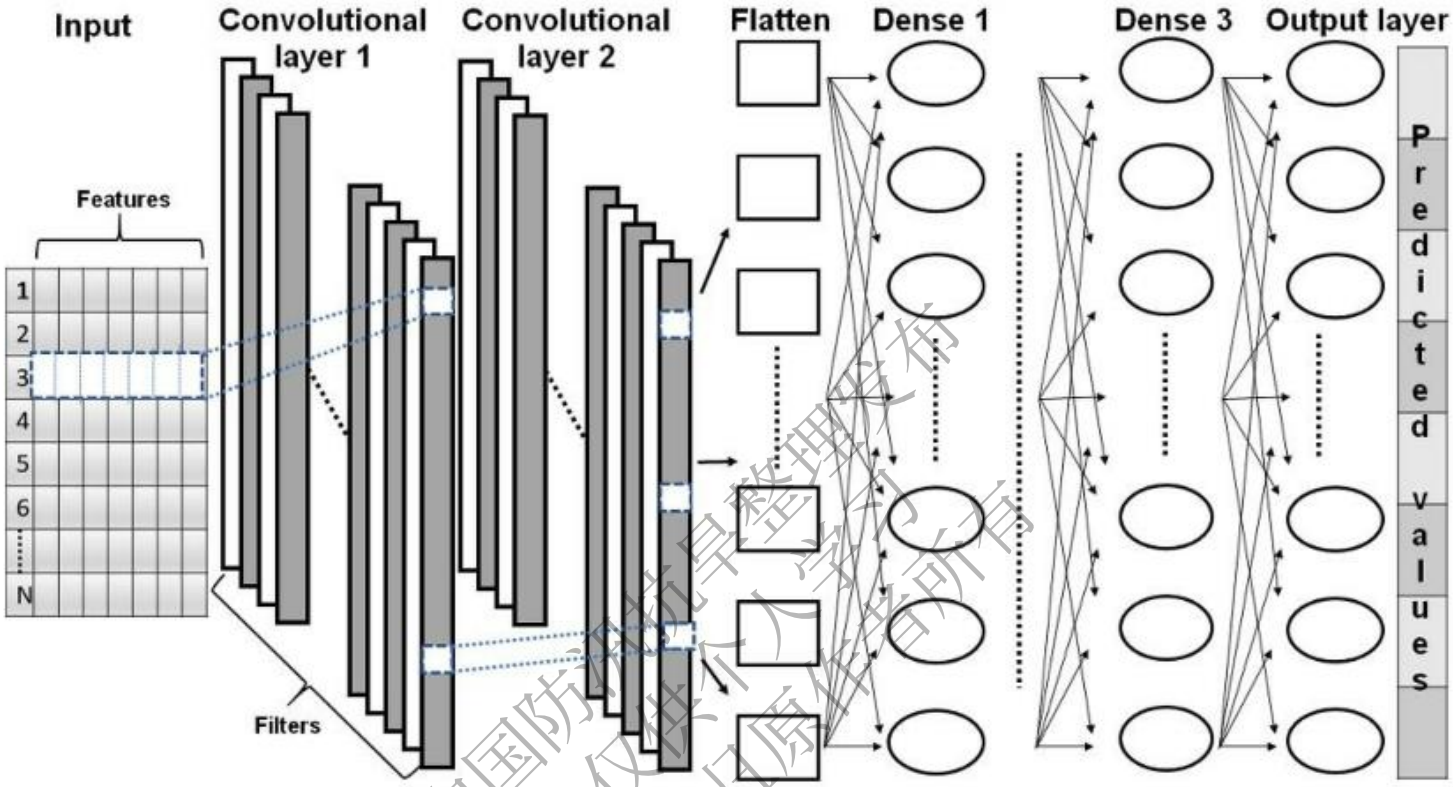


中国防汛抗旱整理发布
仅供人人学习
版权归原作者所有

英国卡莱尔市位于伊甸河下游，研究区域覆盖了城市内约14.5km^{2}面积

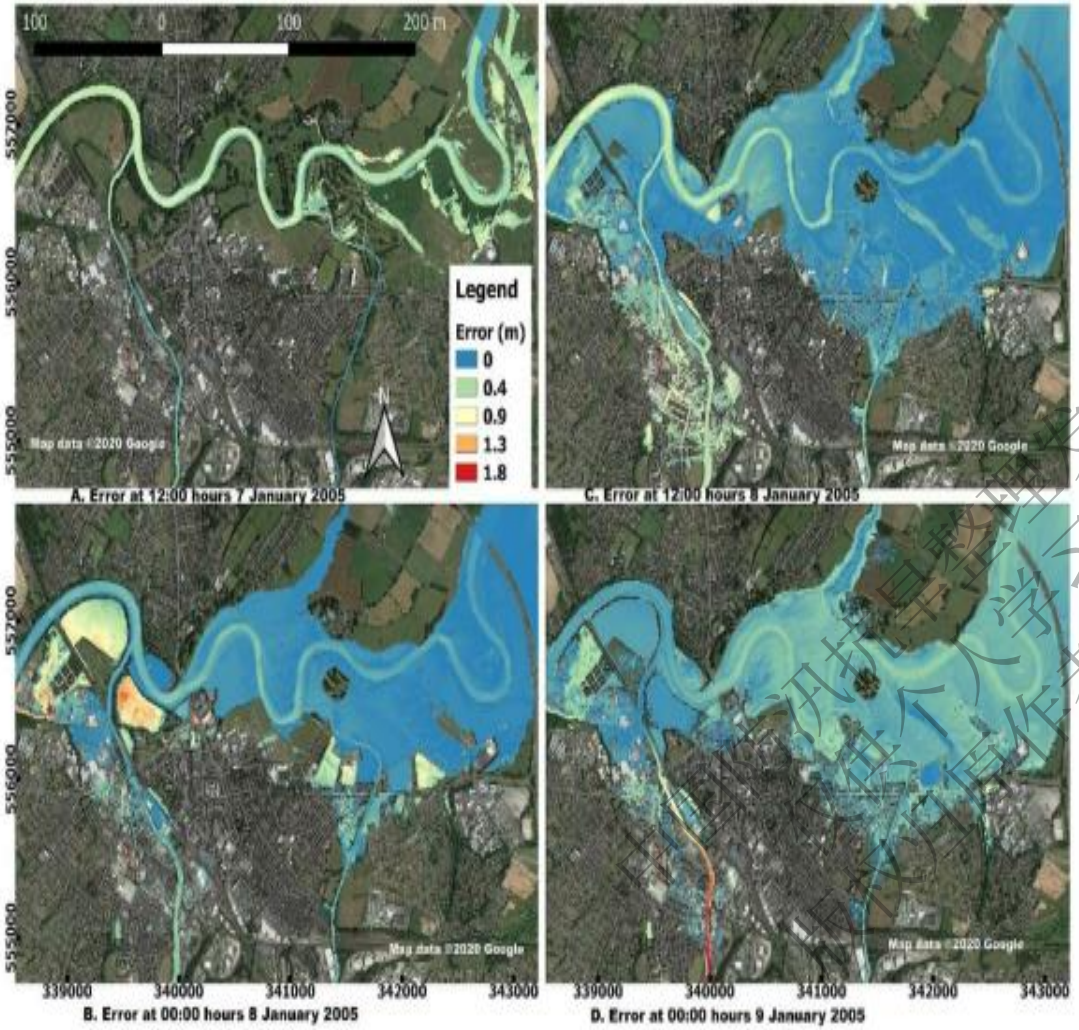
- ✓ 基于卷积神经网络(CNN)的河流洪水快速模拟方法，CNN模型使用二维水力模型(即LISFLOOD-FP)的输出进行训练，以预测水深。然后将预先训练好的模型应用于模拟2005年1月在英国卡莱尔发生的洪水事件，将预测结果与校准后的LISFLOOD-FP产生的输出进行比较，将CNN的性能与基于支持向量回归(SVR)的方法进行比较
- ✓ CNN模型比SVR模型有很大优势，在捕获淹没单元方面具有很高的精确度，当得出99%的置信度水平时，对于网格中97%的单元，峰值洪水深度的估计误差为0-0.2m。该方法简单、性能优越、计算效率高，具有很大的实时应用潜力

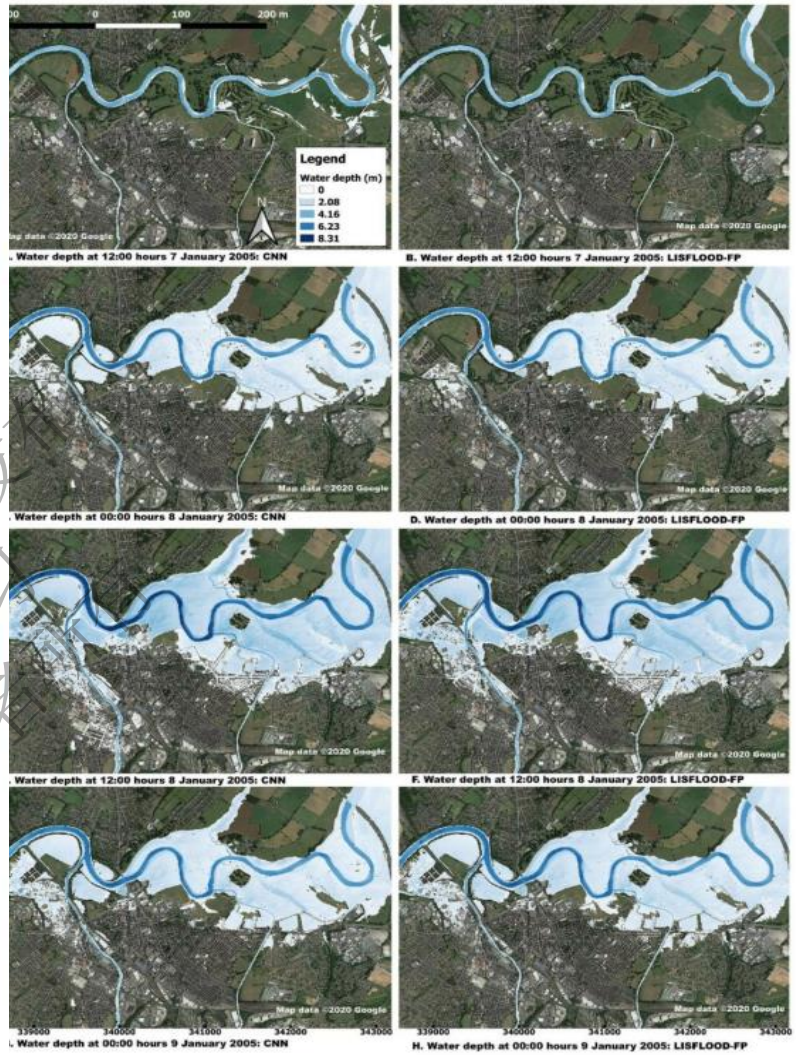
中国防汛抗旱管理发布
仅供学习
版权归原作者所有



中国防汛抗旱管理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

- ✓ 该网络有五个隐藏层，包括两个卷积层和三个全连接层
- ✓ 网络的输出层数量等于模拟域中单元的节点数(对于所选择的案例研究站点，581,061个单元)，并且输入层以类似3D数组的形状接收上游流量值

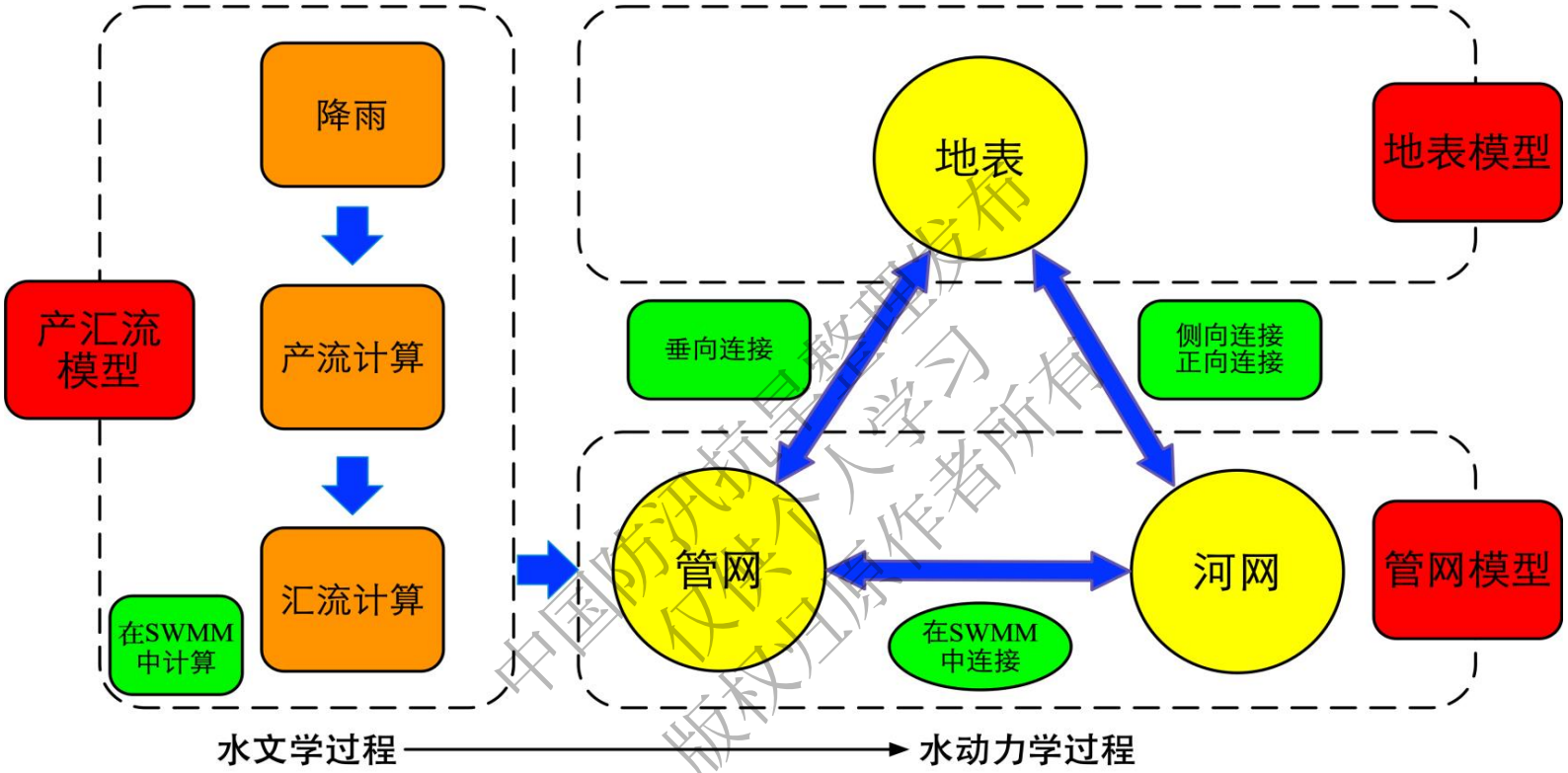




误差的空间分布，CNN产生的洪水深度与LISFLOOD-FP的输出之间的差异

CNN和LISFLOOF-FP的地图在洪水事件的不同阶段产生的水深

4、基于GPU加速的城市洪涝水文水动力耦合模型



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

- ✓ 自主开发模型，代替框图中SWMM模型，尤其是管网和河网计算，但难度十分巨大，SWMM模型开发了快48年
- ✓ 目前国际上还没有管网GPU加速算法的相关报道，主要集中于二维水流计算，如果管网跟上速度，实时预报问题引刃而解

恳请各位同行批评指正！