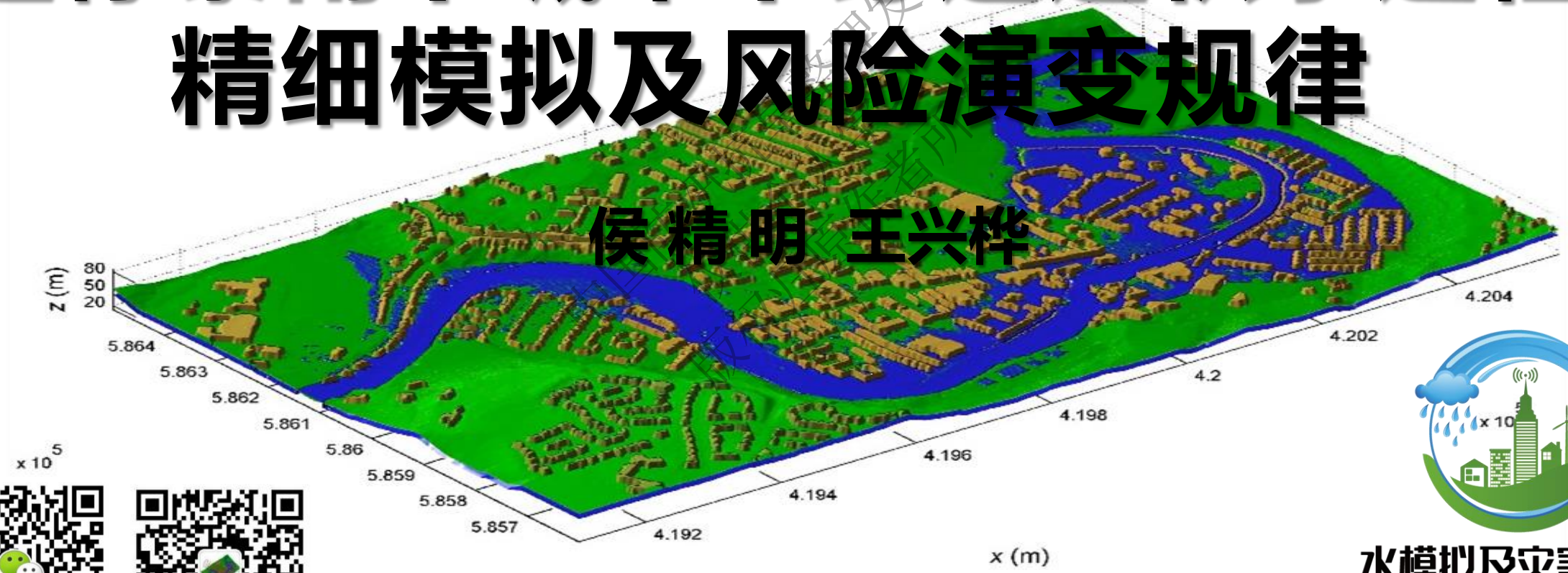
西安理工大学
XI'AN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室
STATE KEY LABORATORY OF ECO-HYDRAULICS IN NORTHWEST ARID REGION OF CHINA

# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

侯精明 王兴桦




水模拟及灾害管理
Group of Water Simulation & Flood Management

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
2021.10.11，西安

jingming.hou@xaut.edu.cn

# 研究背景及意义

郑州7.20特大暴雨，京广北路隧道成为郑州特大暴雨中的一个悲情缩影。这条连接郑州南北的一条交通要道，主线全长1835米，隧道总高6米。当日下午4时到5时，郑州降雨量达到201.9毫米，只用了不到3个小时灌满隧道，造成极大的人员伤亡和损失。

中国防汛抗旱管理发布
仅供大学习
版权归原作者所有

# 研究背景及意义

2020年7月10日14时30分许，一场突如其来的暴雨降临古城西安。暴雨造成东二环金花隧道积水严重，车辆无法行。

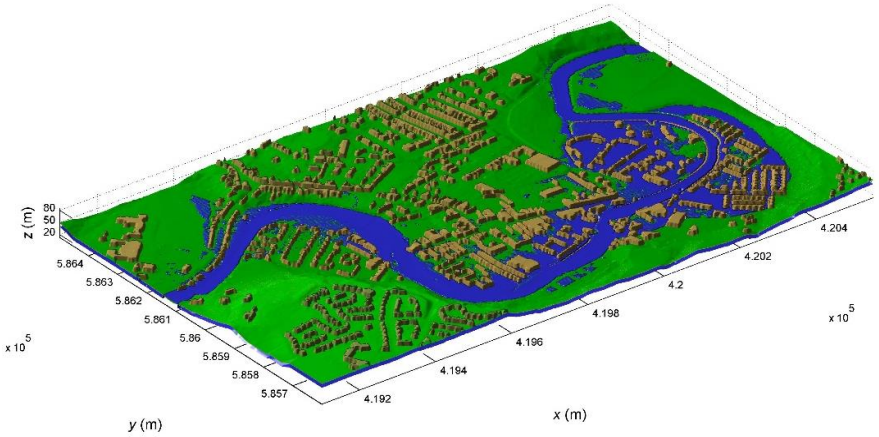
中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

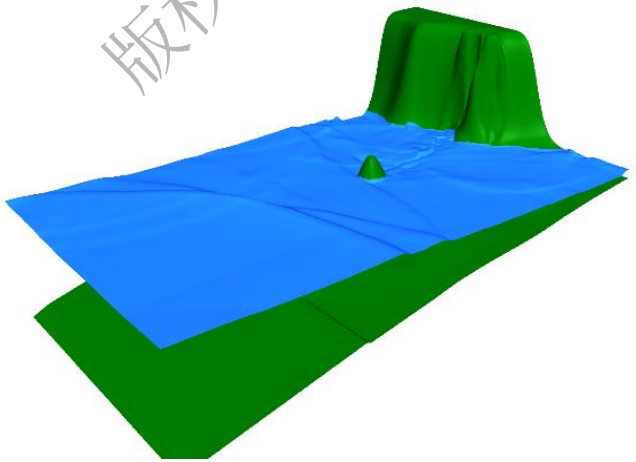
摸清楚降雨量与隧道积水过程的**变化规律**可以根据雨量实时监测数据**提前预判**隧道积水过程，组织车辆人员疏散，减少人员伤亡和损失。

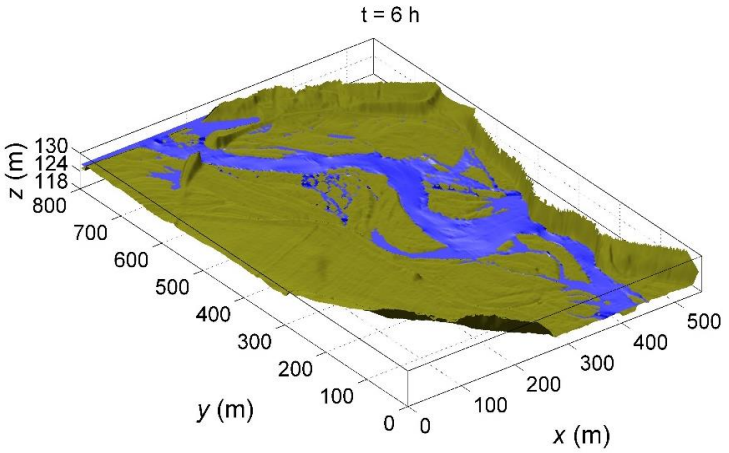
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

- 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟
- 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市内涝管理新思路

中国防汛抗旱整理发
仅供个人学习
版权归原作者所有



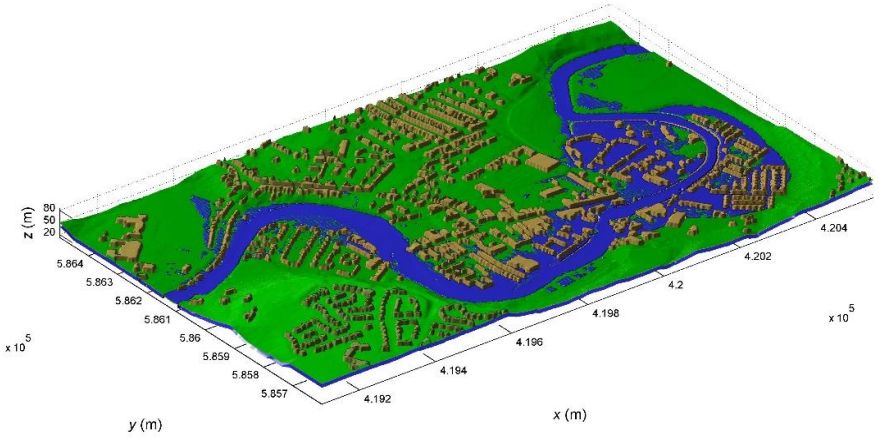



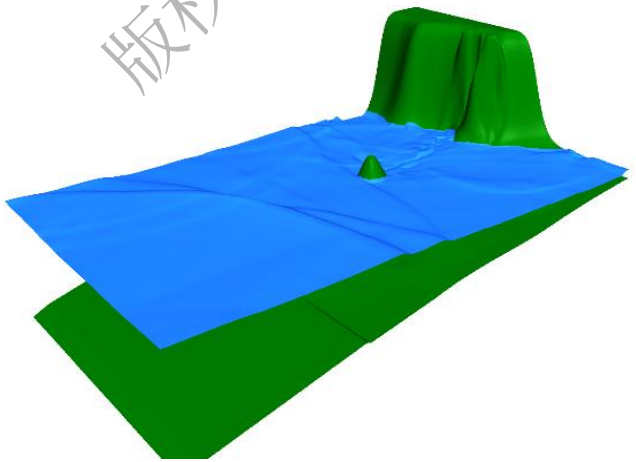


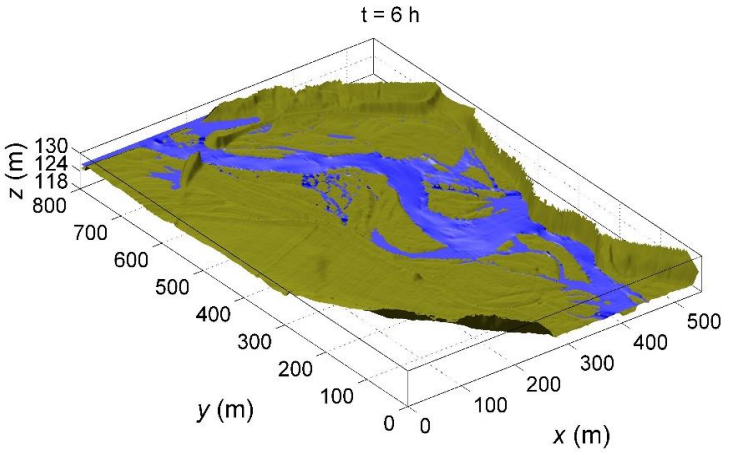
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

- **超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟**
- 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市内涝管理新思路

中国防汛抗旱数理发
仅供个人学习
版权归原作者所有





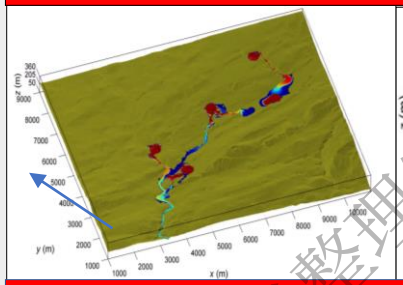
# 水动力过程高效高分辨率数值模型

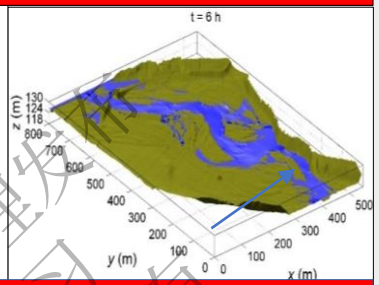
水模拟及灾害管理
Group of Water Simulation & Flood Management

## 地表水文及水动力过程

发展稳健数值算法，求解耦合水文过程的二维浅水方程（SWEs）

## 污染物及泥沙输移过程

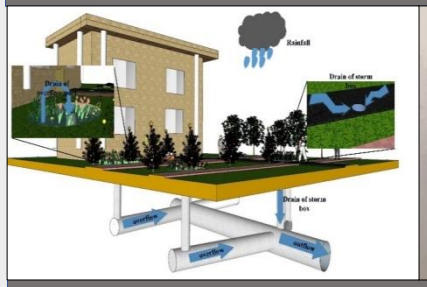



数值求解耦合水动力的污染物输移泥沙输移和河床演变控制方程

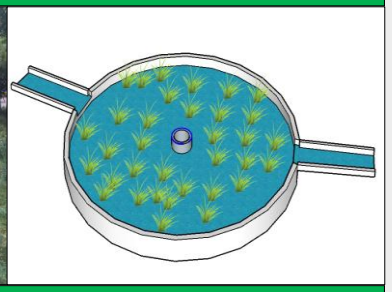
耦合

## 管网排水过程



求解一维扩散波方程并考虑重力与压力流情景（Diffusive Wave）或概化方法

## 海绵设施作用过程



系统模拟海绵设施对水文、水动力过程的影响（渗、滞、蓄、净、用、排）

## 高效高分辨水动力过程稳健模型

**FVM/GPU**

**C++/CUDA**

**精度高**
应用新式模拟算法

**速度快**
GPU并行计算技术

**功能全**
多过程全面耦合

**运行稳**
发展稳健计算方法

中国防汛抗旱决策管理支撑系统
仅供个人学习参考
请勿用原作商业用途

# 地表汇流过程模拟算法（地表水动力过程）

## 地表汇流及洪水演进过程

模型汇流及演进过程的控制方程为平面二维浅水方程（简称SWEs）。忽略了运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力，二维非线性浅水方程的守恒格式可用如下矢量形式表示：

$$\frac{\partial \boldsymbol{q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial y}=\boldsymbol{S}\ ,\ \boldsymbol{q}=\begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix},\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix} uh \\ uq_x+gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix},\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y+gh^2/2 \end{bmatrix}$$

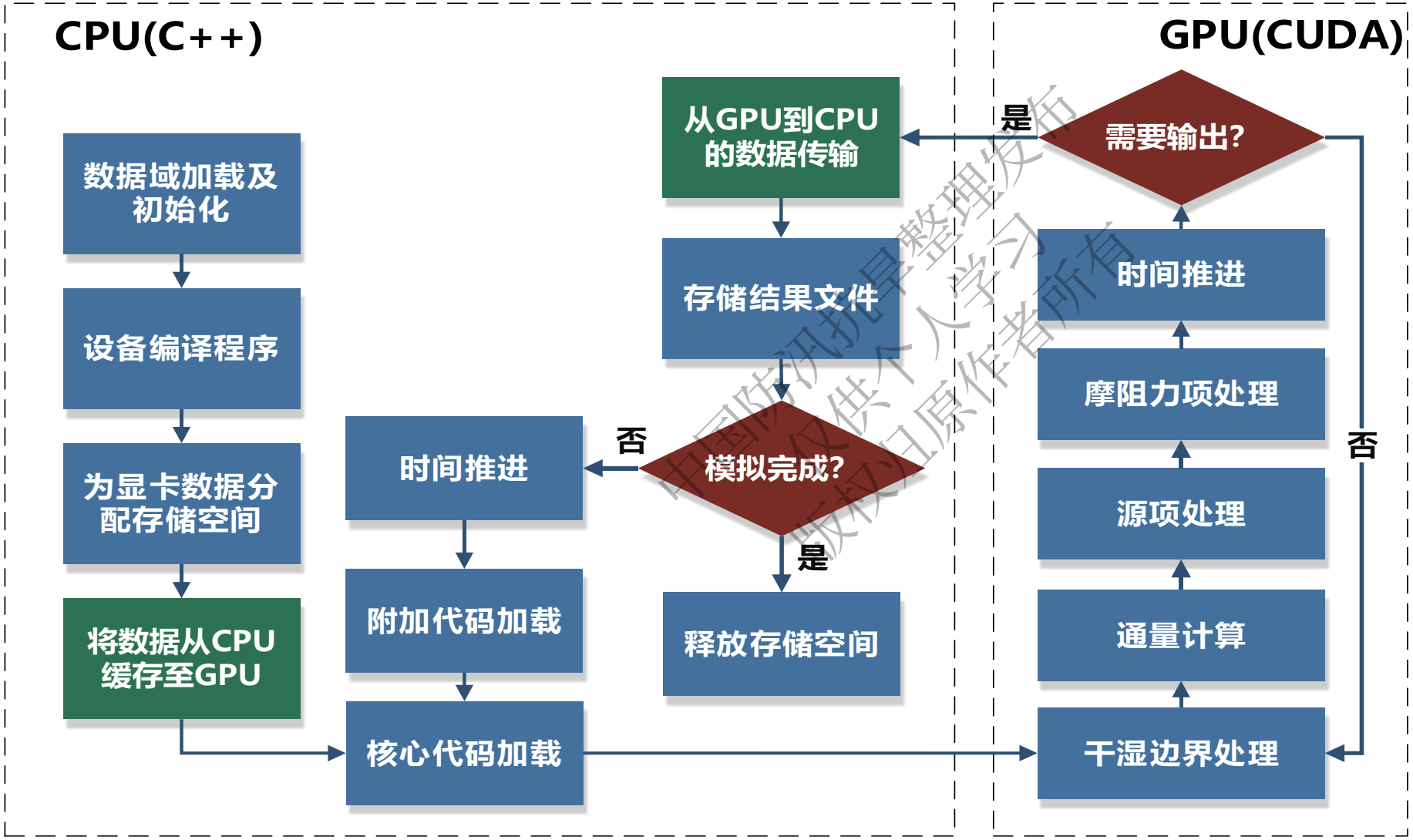
$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ -c_f u\sqrt{u^2+v^2} \\ -c_f v\sqrt{u^2+v^2} \end{bmatrix}$$

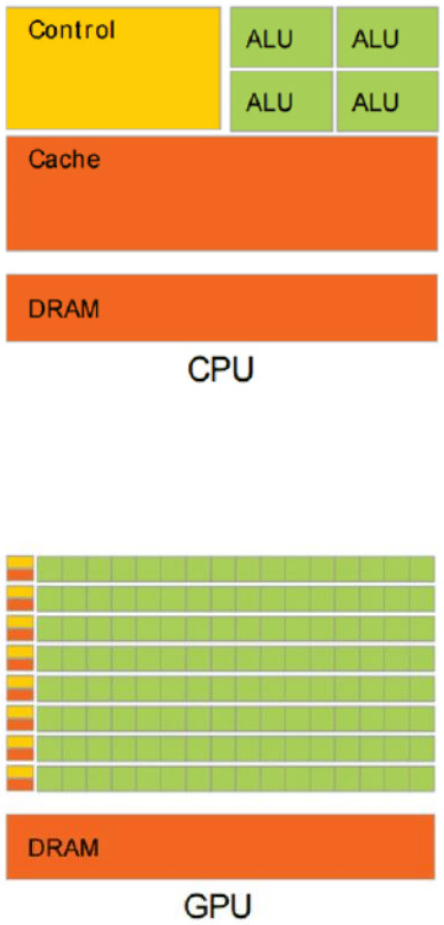
基于Godunov型有限体积法 (CCFV)

- **通量计算**：HLLC近似黎曼求解器
- **空间插值**：二阶MUSCL方法
- **源项计算**：底坡源项法
- **摩阻项计算**：半隐式法
- **时间推进**： 二阶显式龙格-库塔方法
- **干湿边界处理**：非负水深重构及在水深急剧变化网格，通过将二阶格式降阶到一阶的方法解决数值不稳定性

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# GPU加速技术




中国防汛抗旱整理发布
版权归原作者所有
仅供个人学习

# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟-研究区域

**金花隧道是西安市东二环上一处下穿通道，全长约500m，上部为华清路立交，左右各有辅道汇入主路。金花隧道在城市化快速扩张、多条道路汇入、地势低洼等多重因素的影响下，金花隧道成为暴雨易涝点。**

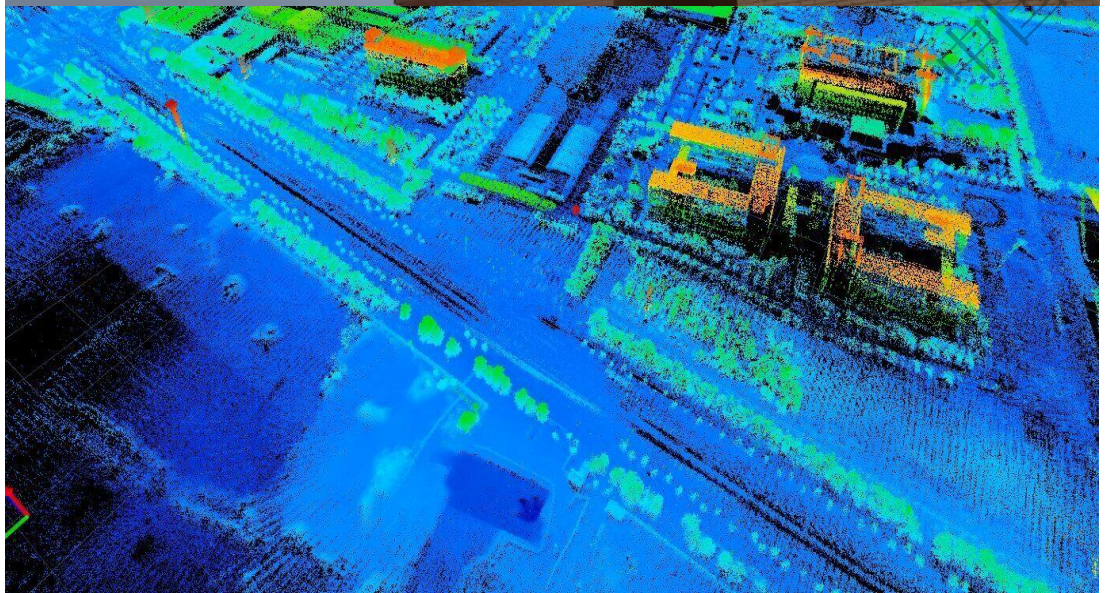
## 2020年7月10号金花隧道内涝

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

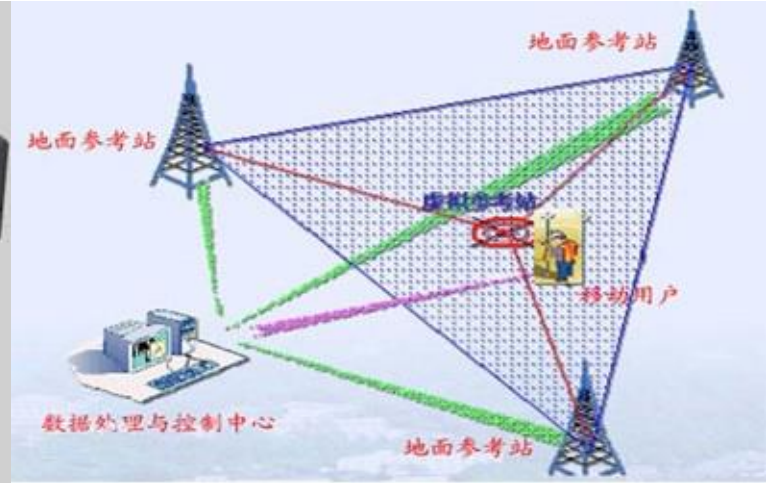
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟—高精度地形采集

水模拟及灾害管理
Group of Water Simulation & Flood Management

## 无人机载激光雷达技术



## 基于网络CORS的RTK测量技术

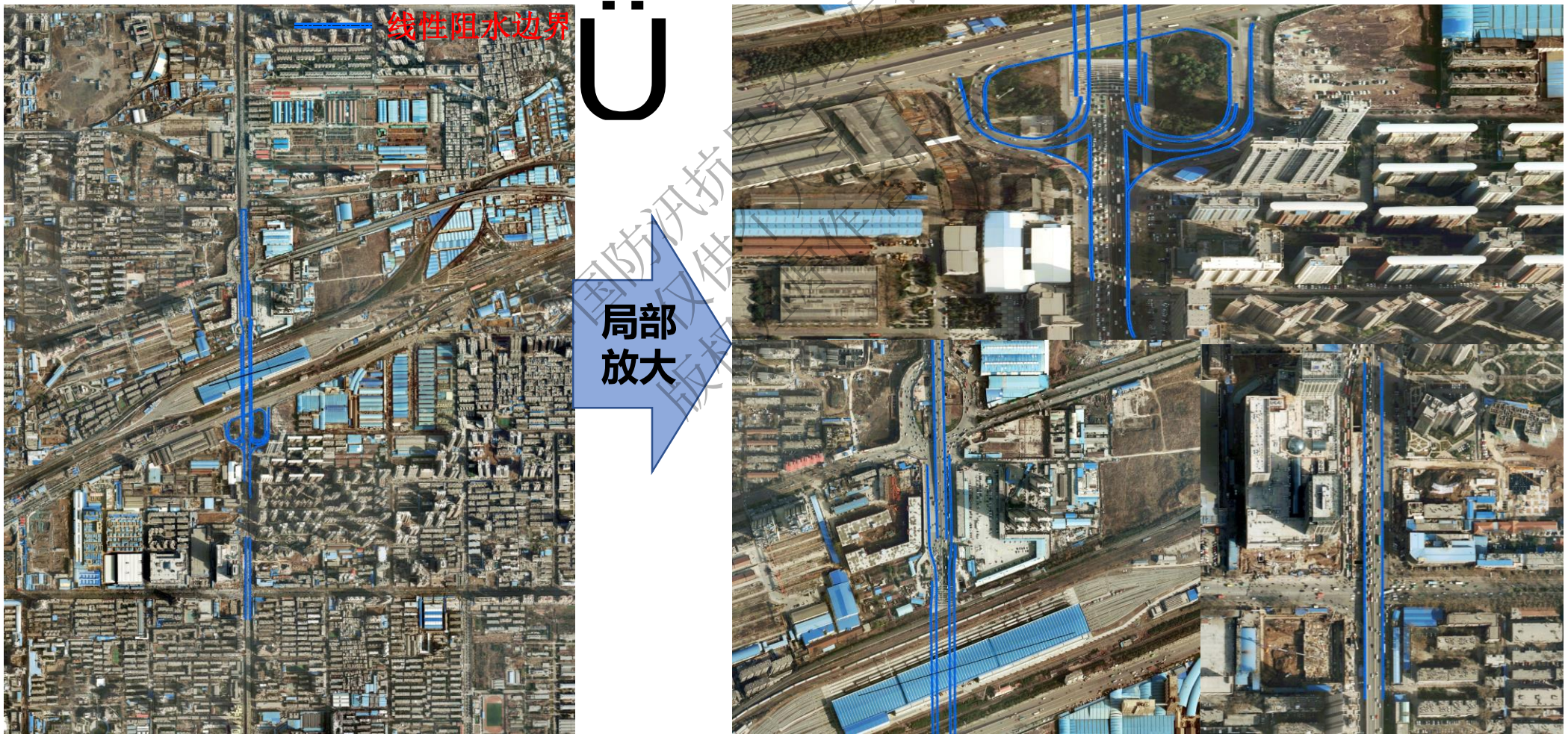


中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

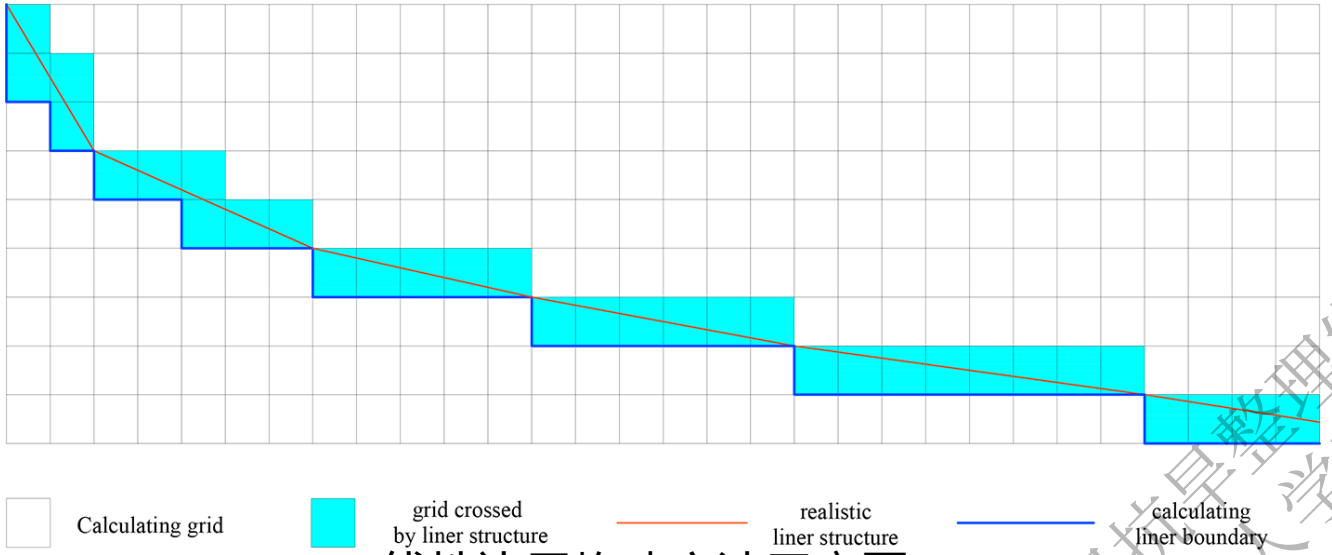
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟—线性阻水边界构建

**城市由于其强大的交通需求，路网错综复杂，路沿等构筑物作为道路重要的一部分，在洪涝过程中扮演了线性阻水边界的角色，让城市洪涝过程更具复杂性。**

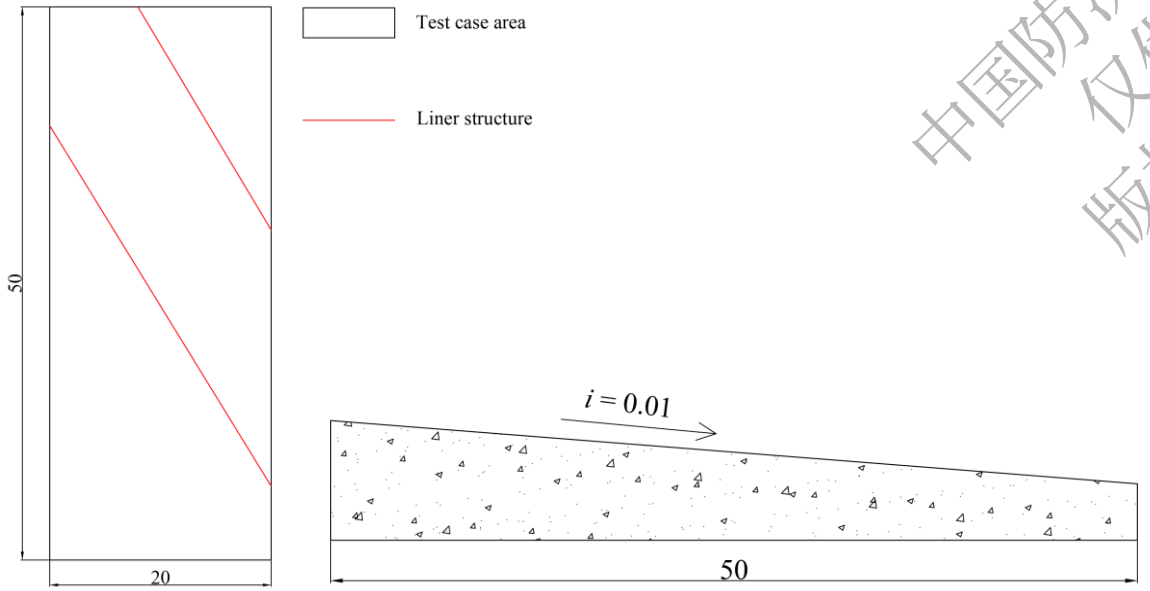
基于研究区域街景和影像数据，对线性阻水边界进行精细化建模



# 线性阻水边界构建方法及验证




线性边界构建方法示意图

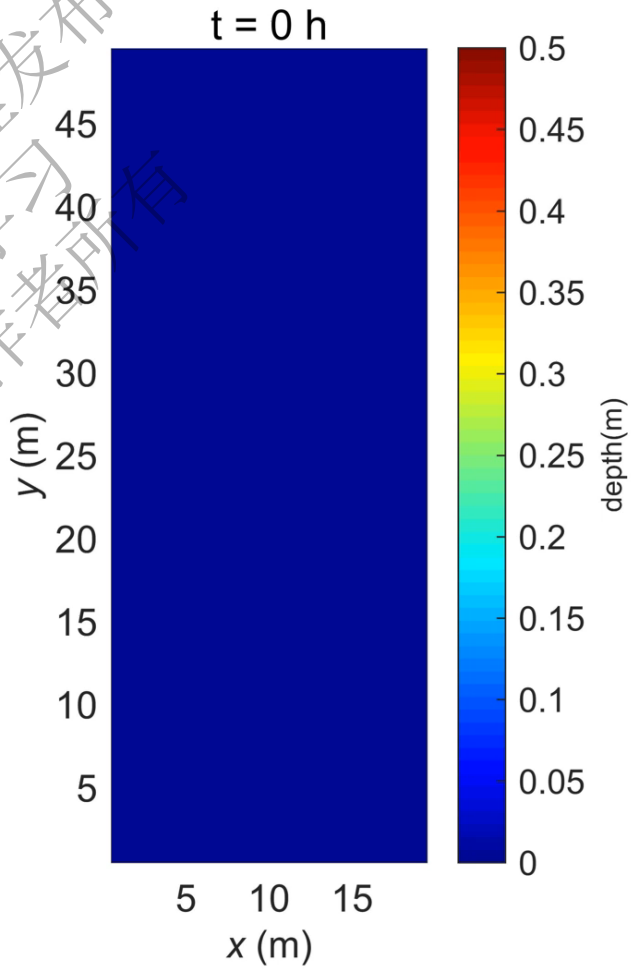


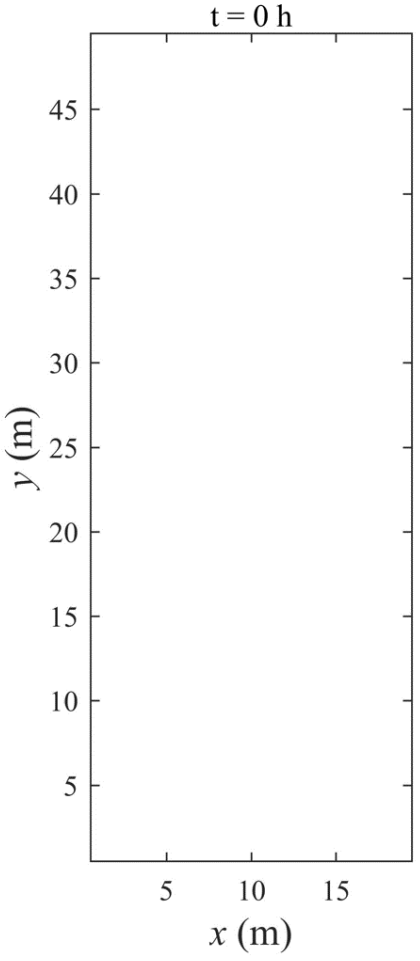

测试算例平面布置图及剖面图

算例设置：

1）四周均为闭边界

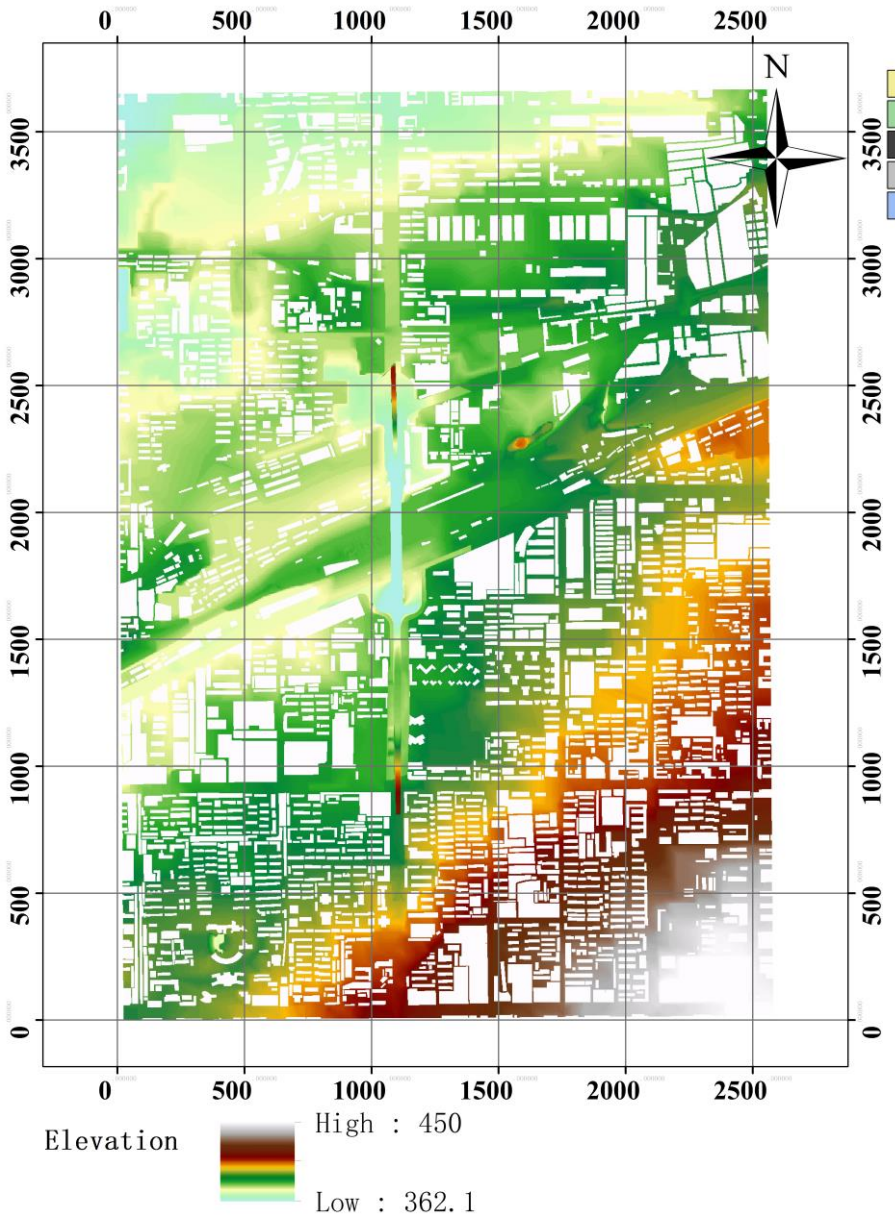
2）降雨输入

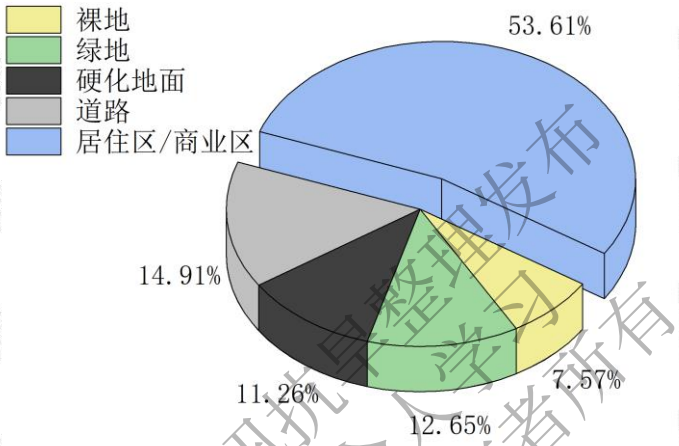


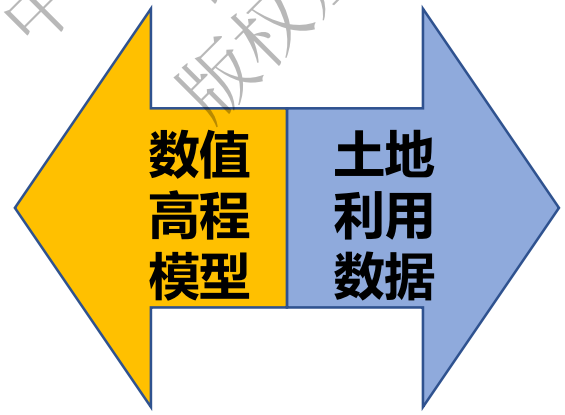



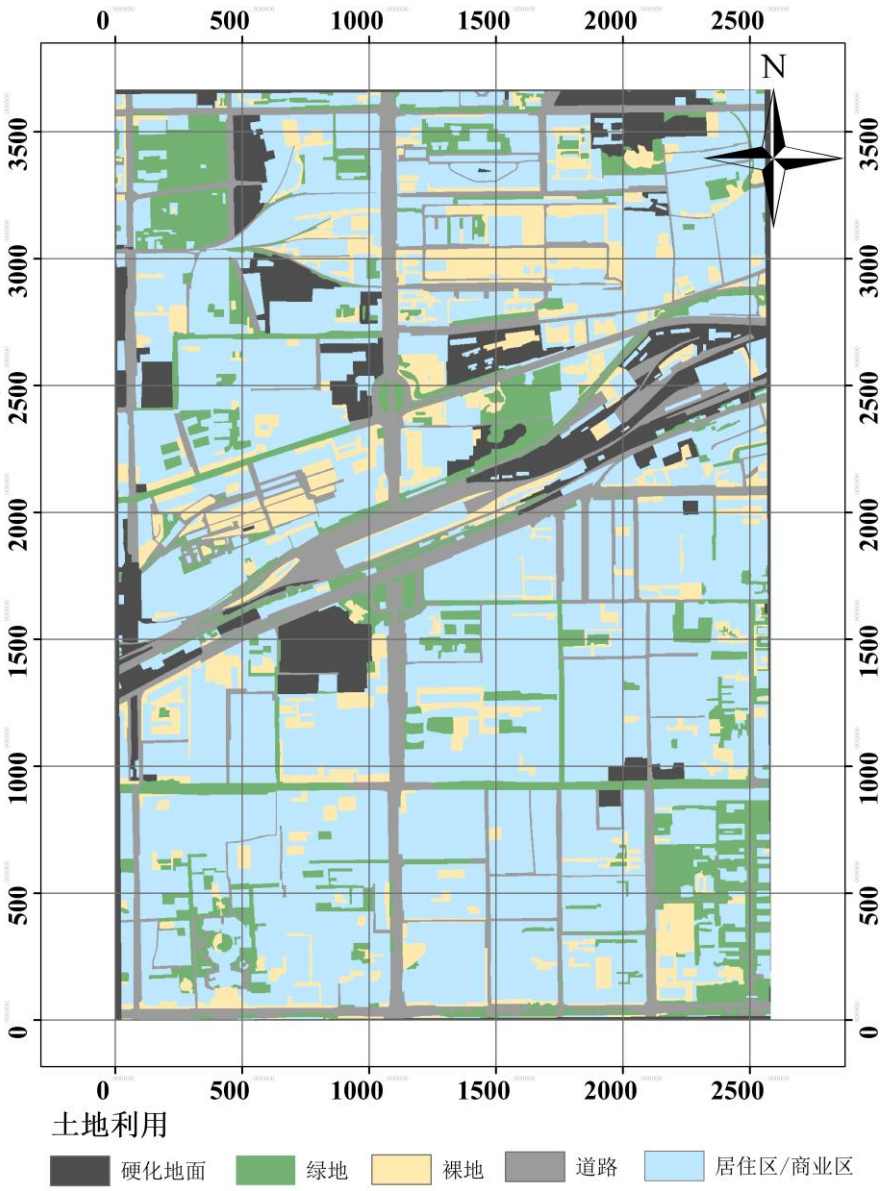

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟—模型构建



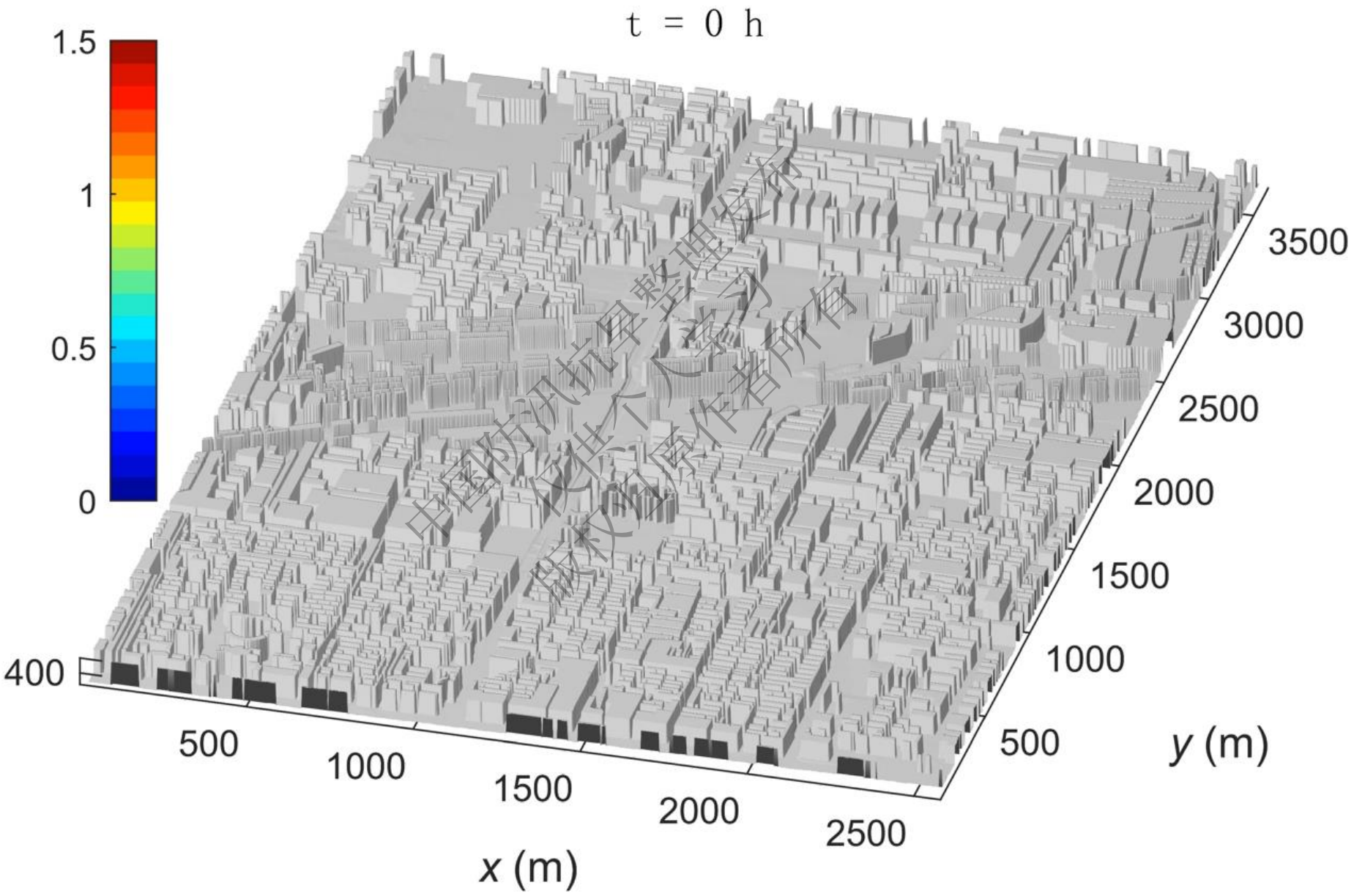



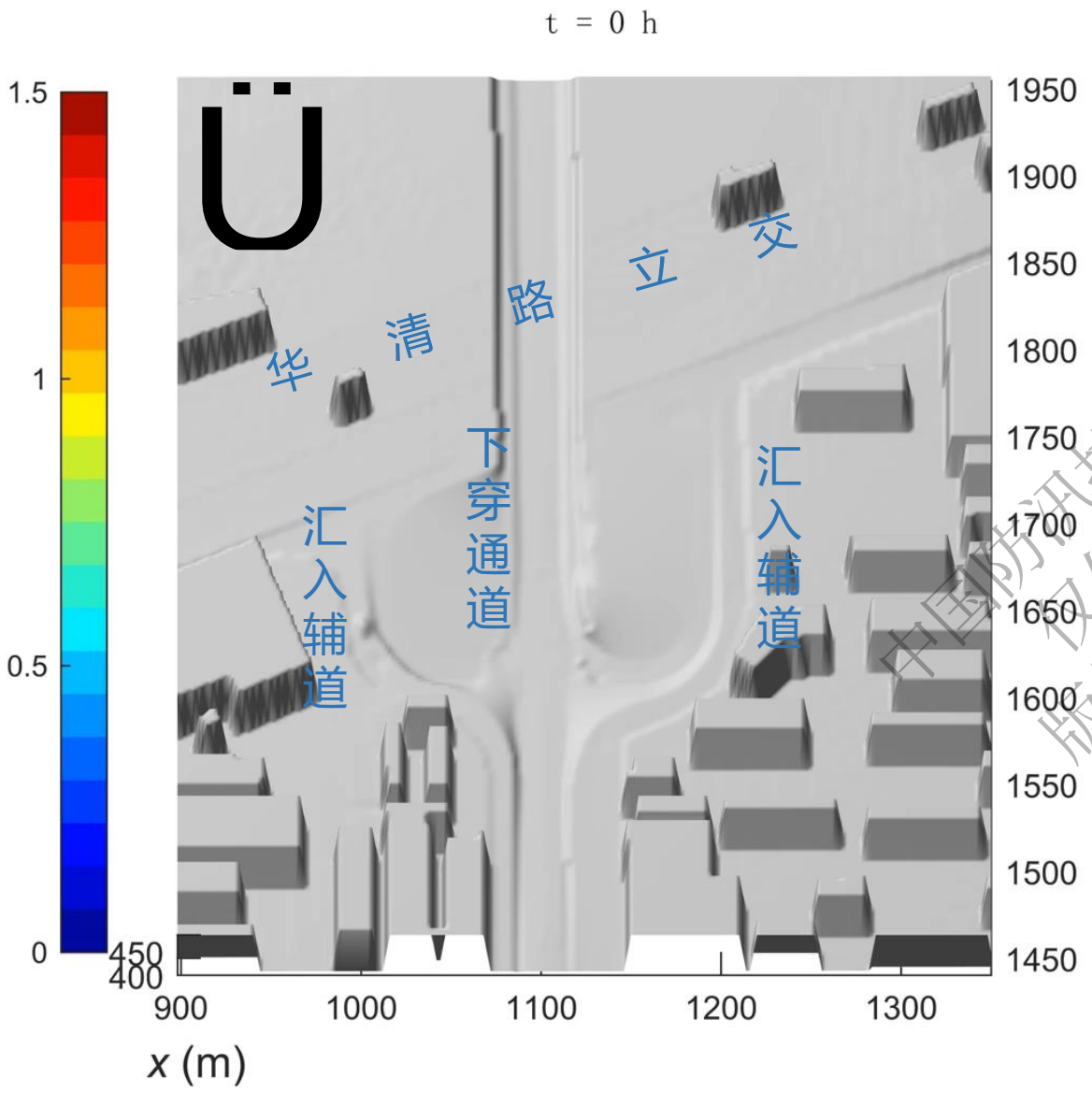

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

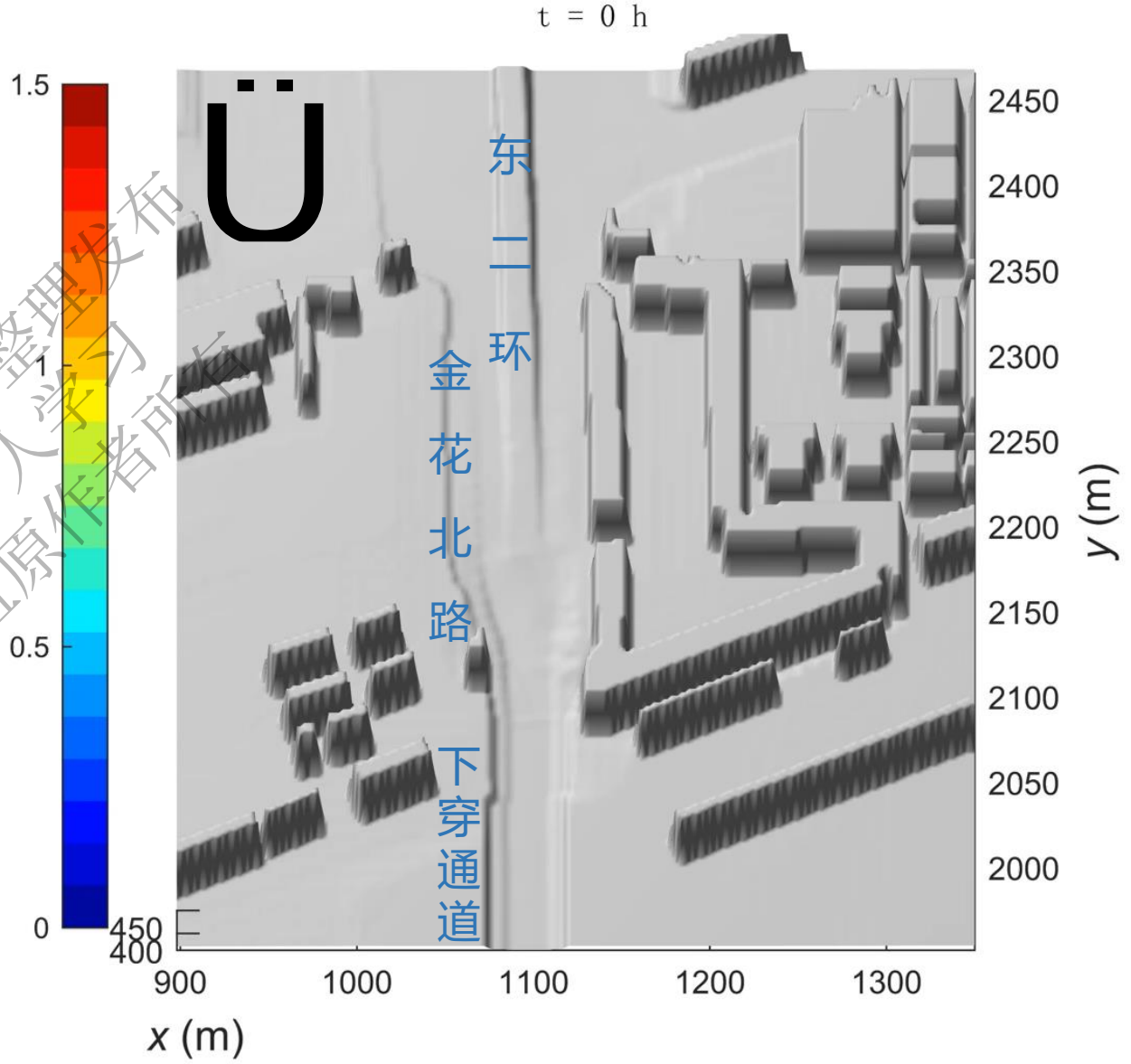
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟




中国防汛抗旱整理发布
版权所有 仅供个人学习

# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟



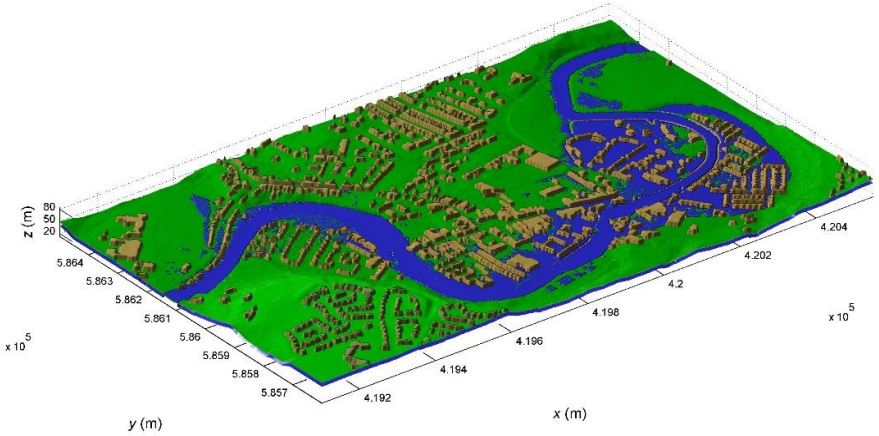



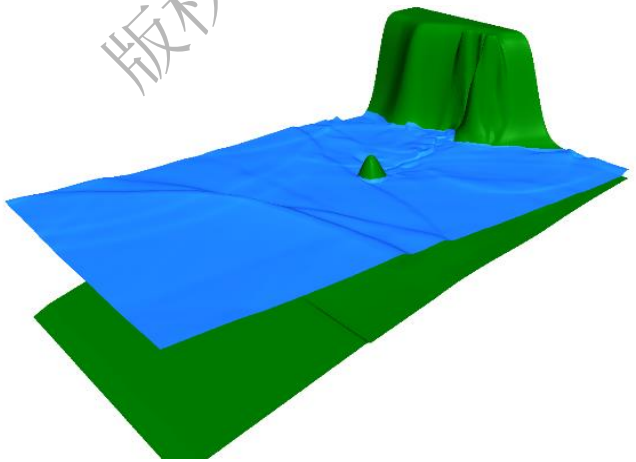

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

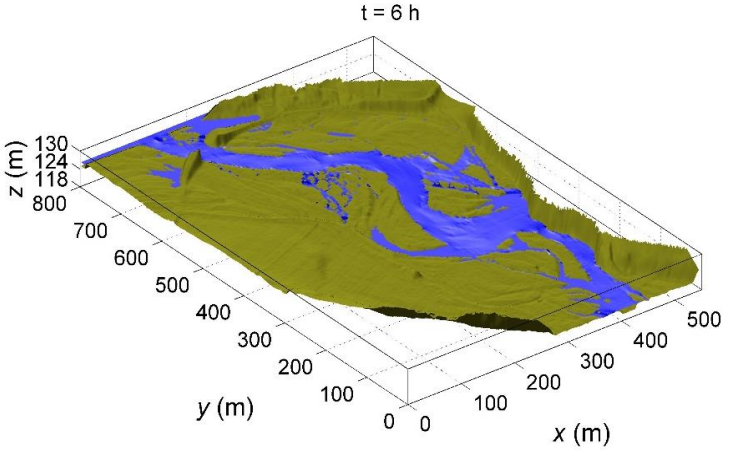
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

- 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟
- **超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律**
- 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市内涝管理新思路

中国防汛抗旱数理发
仅供个人学习
版权归原作者所有

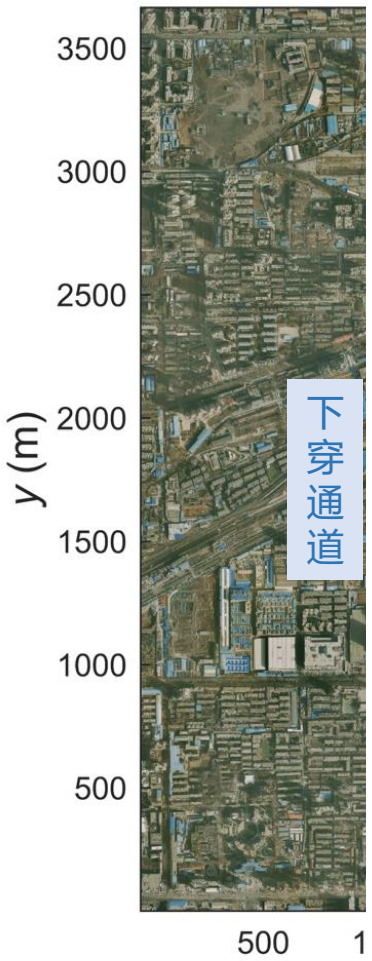


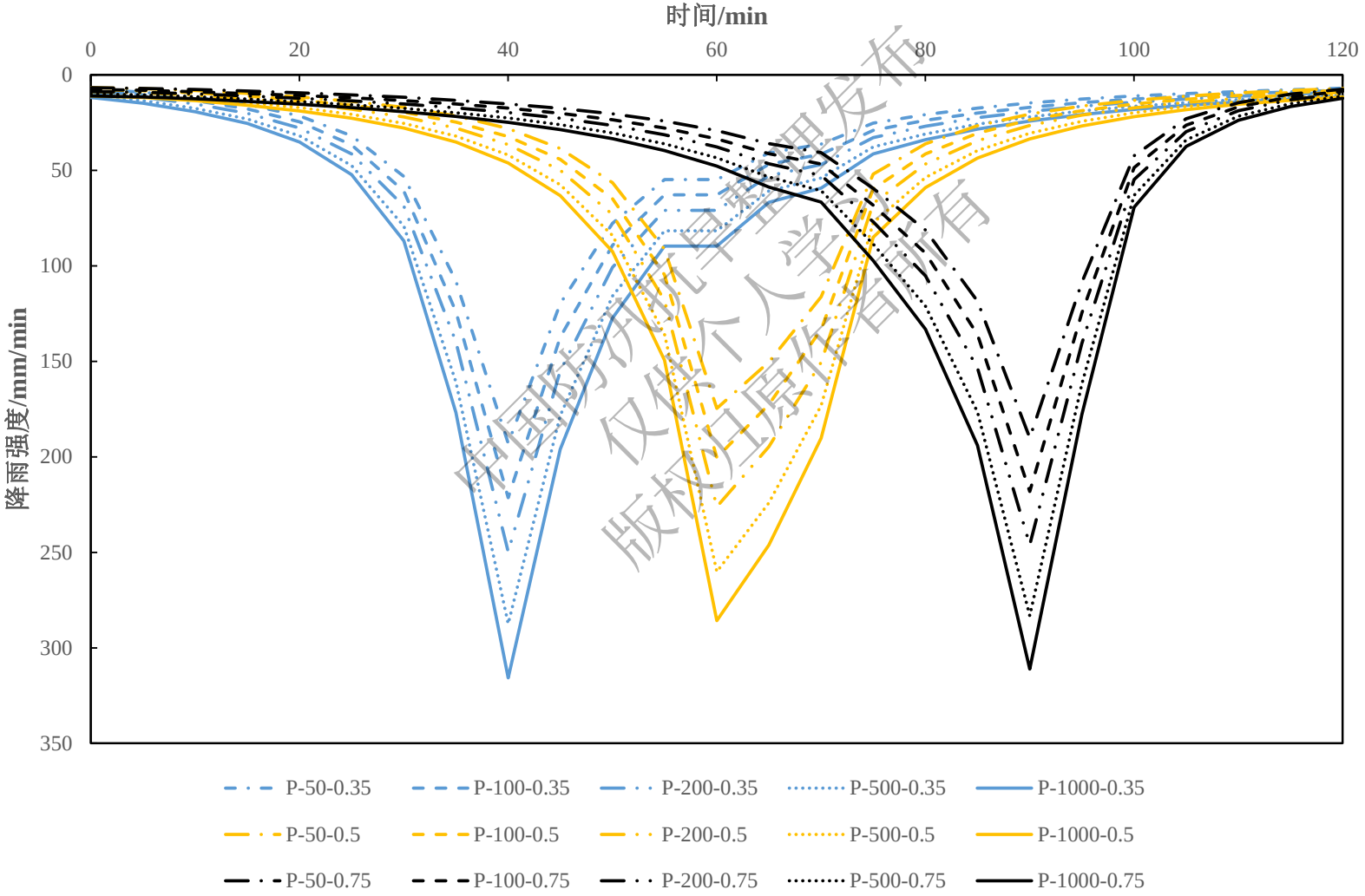



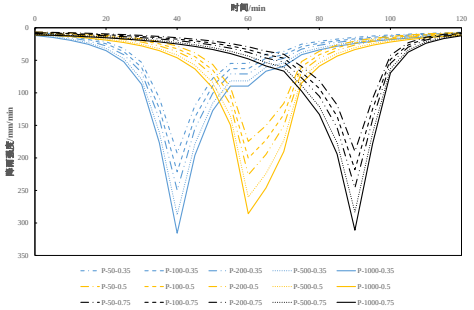


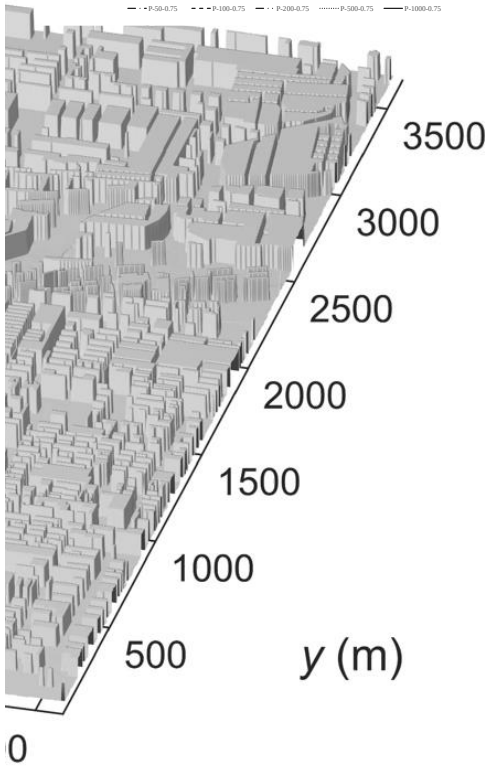
# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

基于精细地表二维水动力模型，模拟不同超标暴雨情景下（50a、100a、200a、500a、1000a）城市典型下穿通道的内涝积水过程，分析隧道水位变化过程与降雨的关系，从而可以根据实时降雨过程评估下穿通道水位变化。



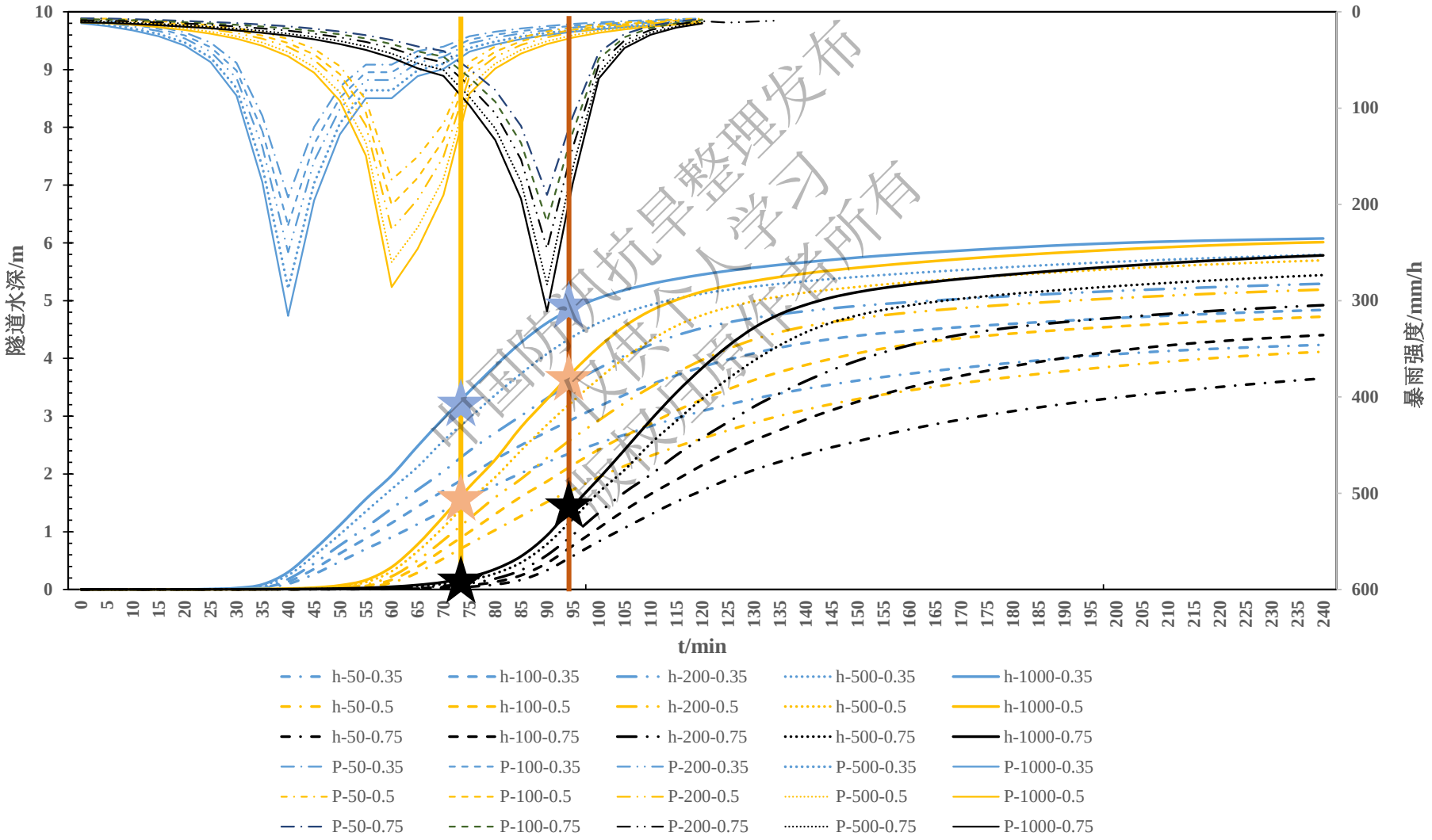



中国防汛抗旱基理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

1）通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析**隧道水深**与**超标暴雨过程**的关系。

**结果显示：1）暴雨峰值越靠前，同一任意时刻下穿通道水深越大**

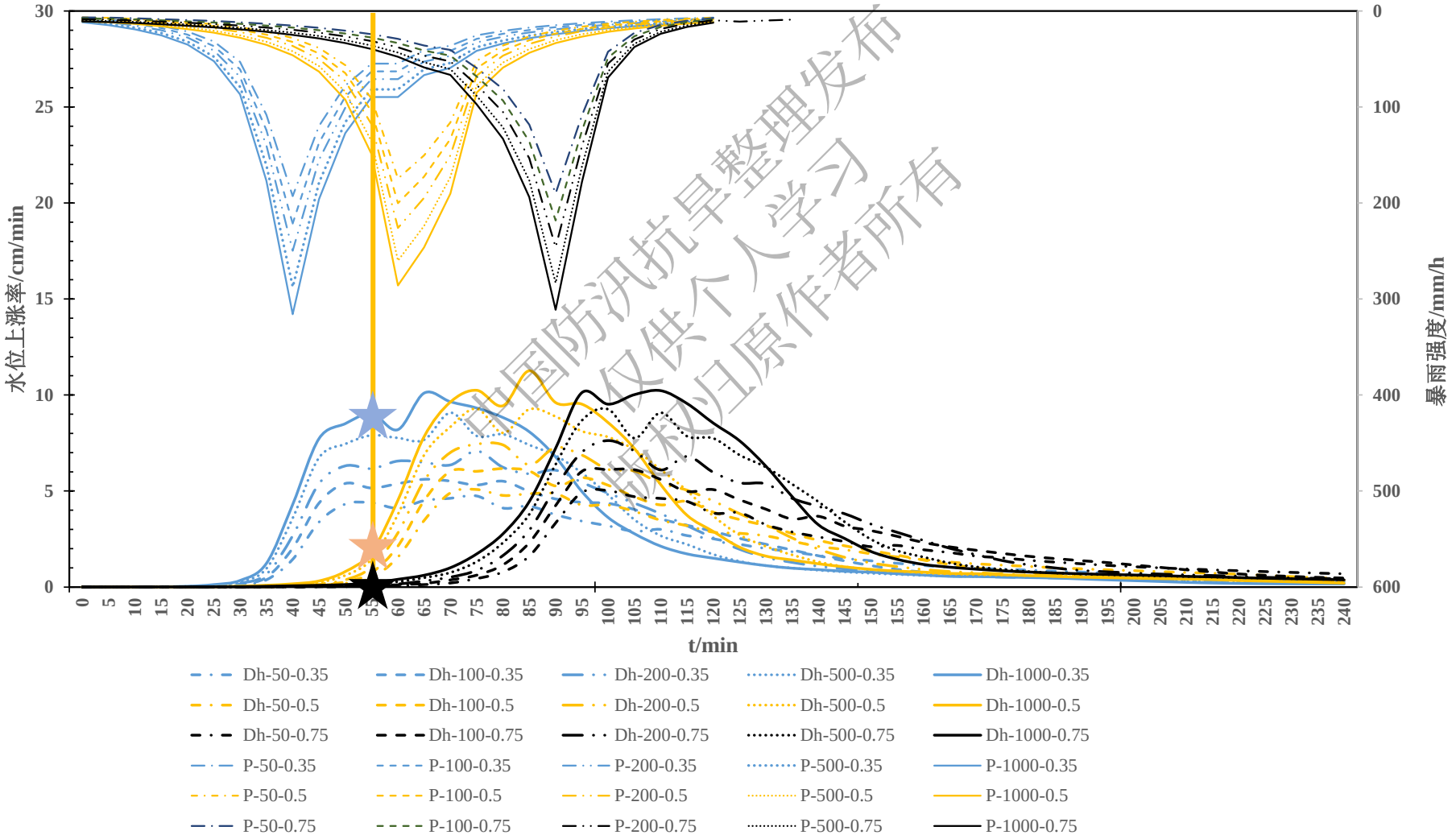



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

2）通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析**水位上涨率**与**超标暴雨过程**的关系。

结果显示：暴雨峰值越靠前，下穿通道水位变化更快，达到车辆人员危险水位的时间更短

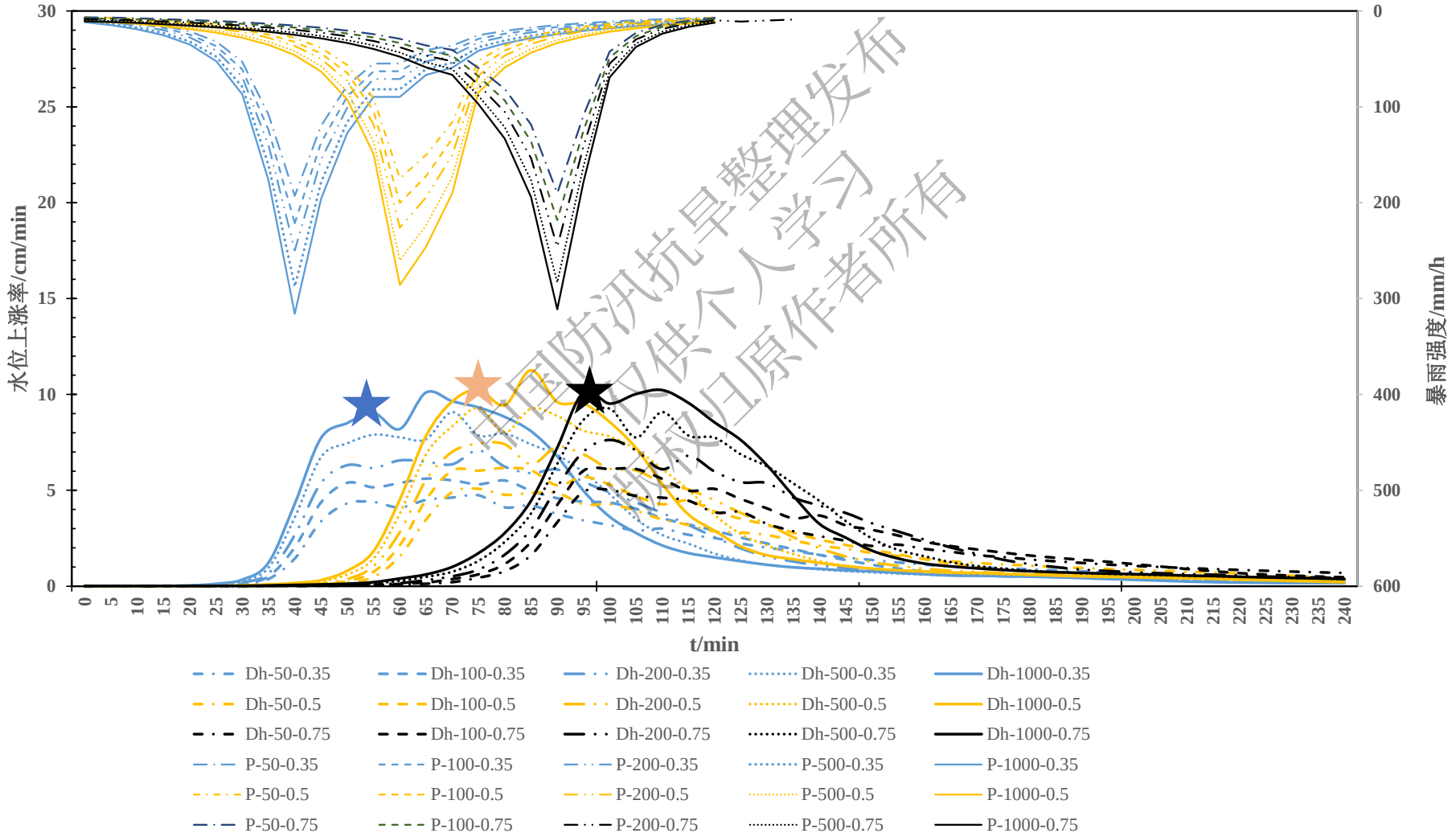



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

3）通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析**水位上涨率**与**超标暴雨过程**的关系。

**结果显示：下穿通道水位上涨率与暴雨过程具有一致性，水位最大上涨率较暴雨峰值延迟5分钟左右**




国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

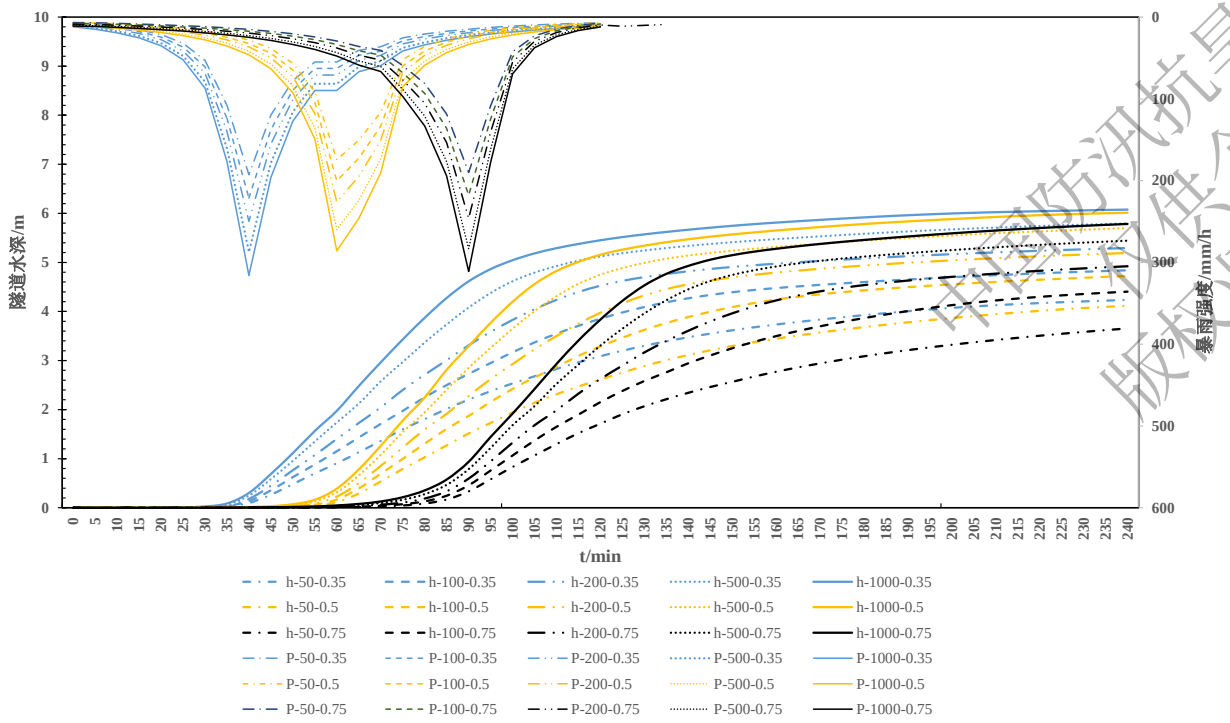
通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析水位变化规律与超标暴雨过程的关系。

结果显示：1）暴雨峰值越靠前，同一任意时刻下穿通道水深越大

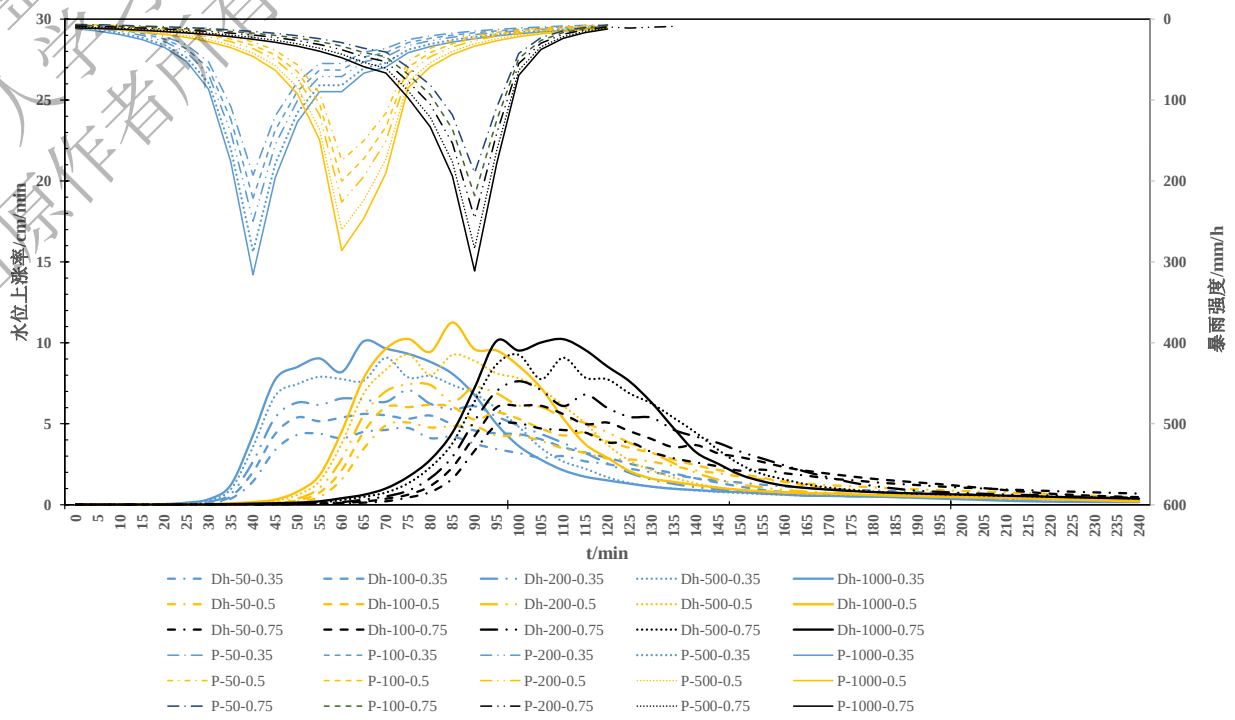
2）暴雨峰值越靠前，下穿通道水位变化更快，达到车辆人员危险水位的时间更短

3）下穿通道水位上涨率与暴雨过程具有一致性，水位最大上涨率较暴雨峰值延迟5分钟左右

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有




下穿通道水深-时间

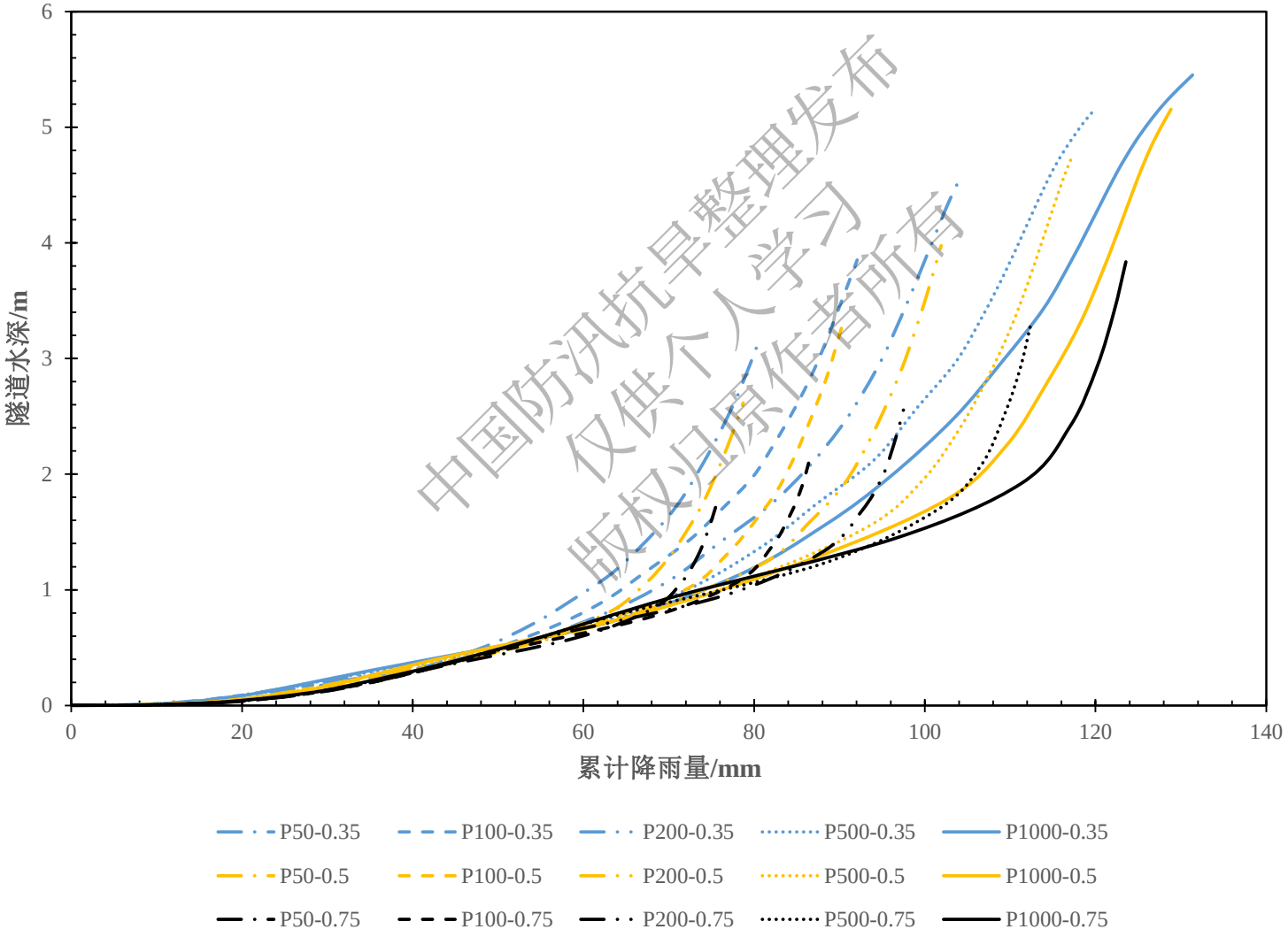



下穿通道水位上涨率-时间

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

1）通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析**隧道水深**与**累计降雨量**的关系。

结果表明：当累计降雨量小于50mm时，下穿通道水位变化与暴雨过程无关，下穿通道最大水深为0.3m

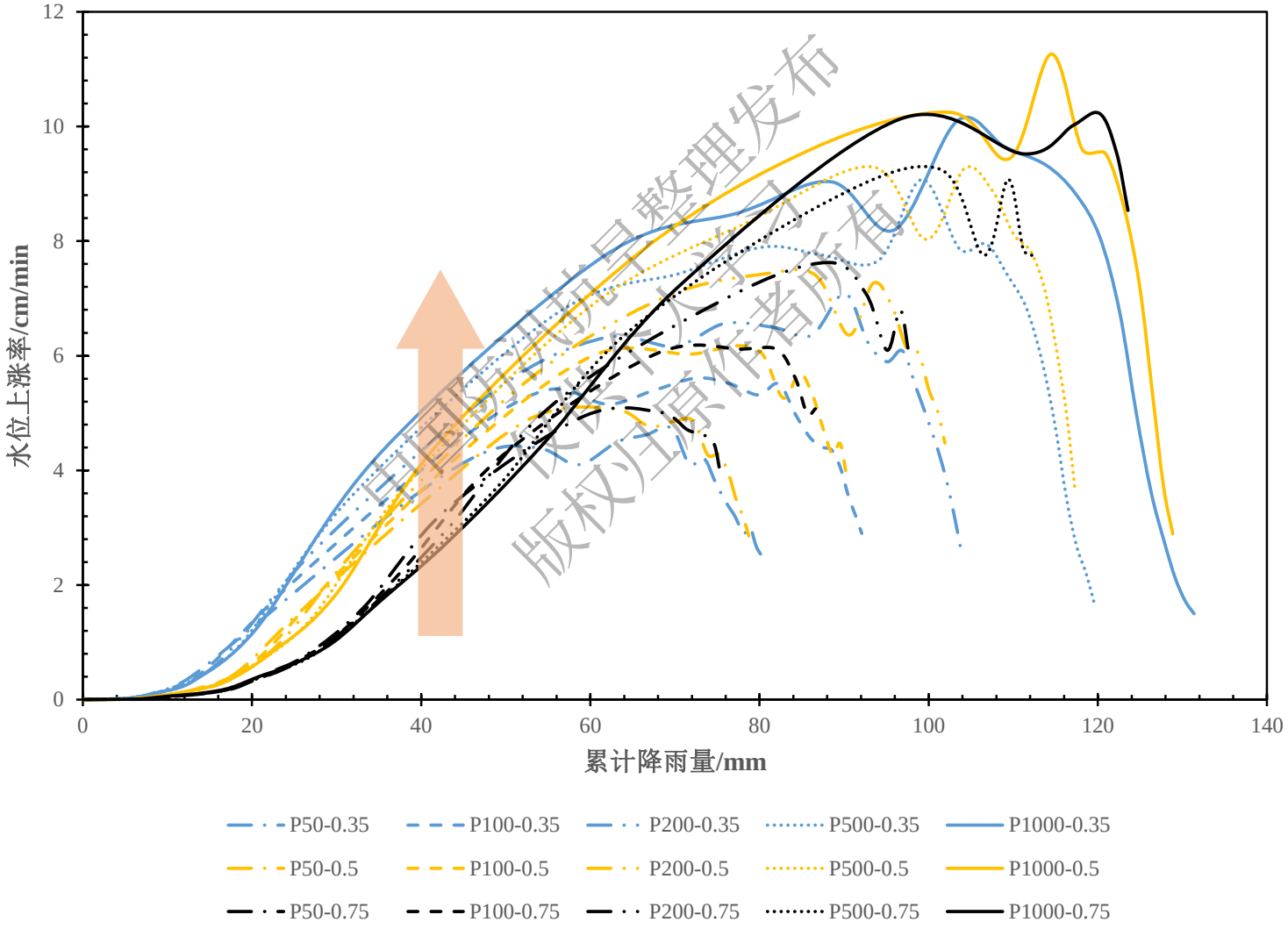



中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

2）通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析**水位上涨率**与**累计降雨量**的关系。

**结果表明：暴雨峰值越靠前，同一降雨量情况下，下穿通道水位上涨更快**




版权归原作者所有

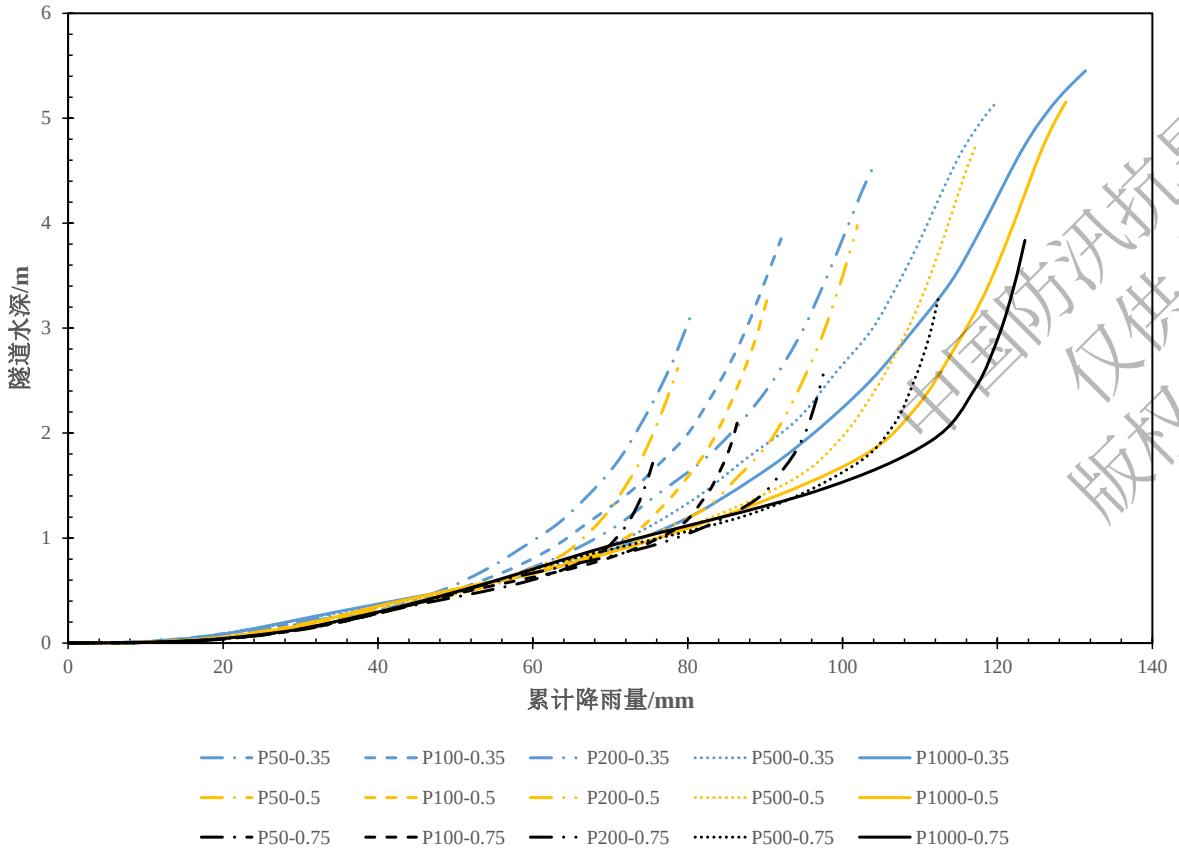
# 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律

**通过模拟不同重现期超标设计暴雨情景下穿通道的洪涝过程，分析水位变化规律与累计降雨量的关系。**

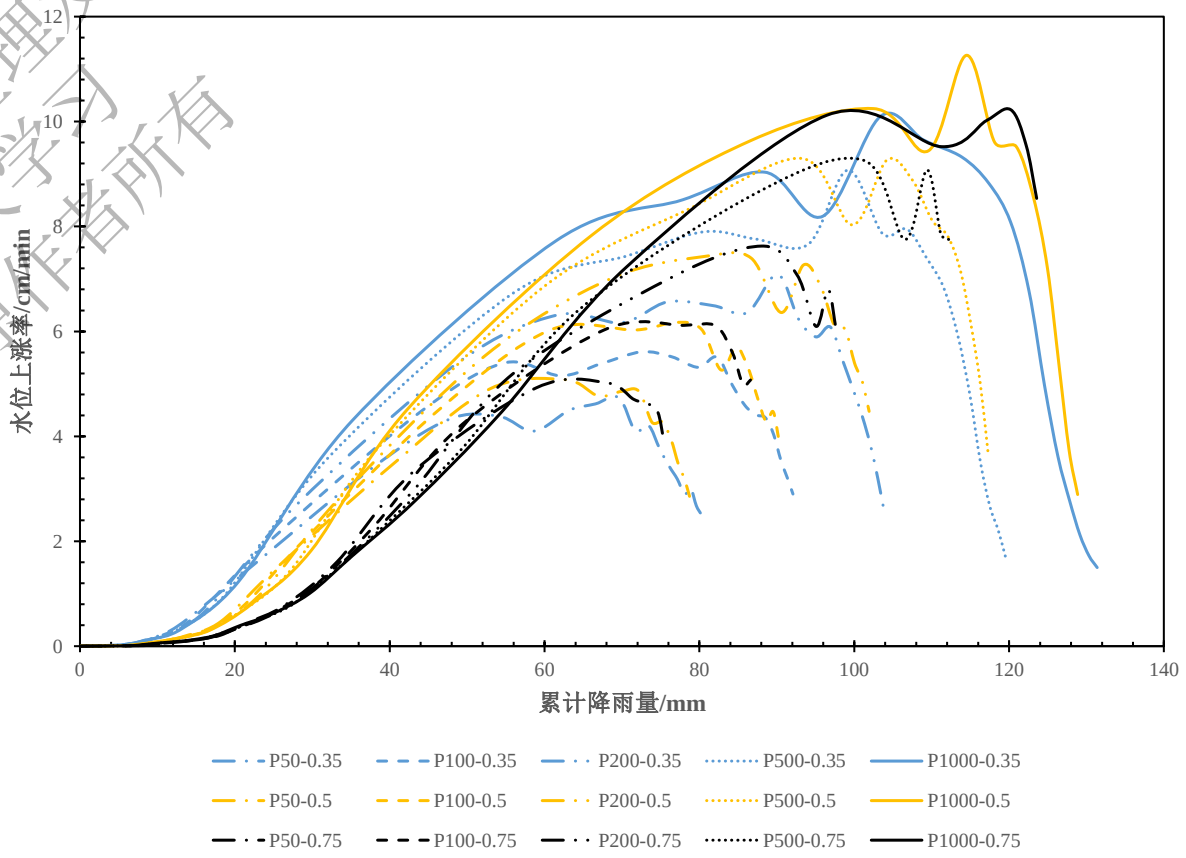
**结果表明：1）当累计降雨量小于50mm时，下穿通道水位变化与暴雨过程无关，下穿通道最大水深为0.3m**

**2）暴雨峰值越靠前，同一降雨量情况下，下穿通道水位上涨更快**

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有




下穿通道水深-累计降雨量

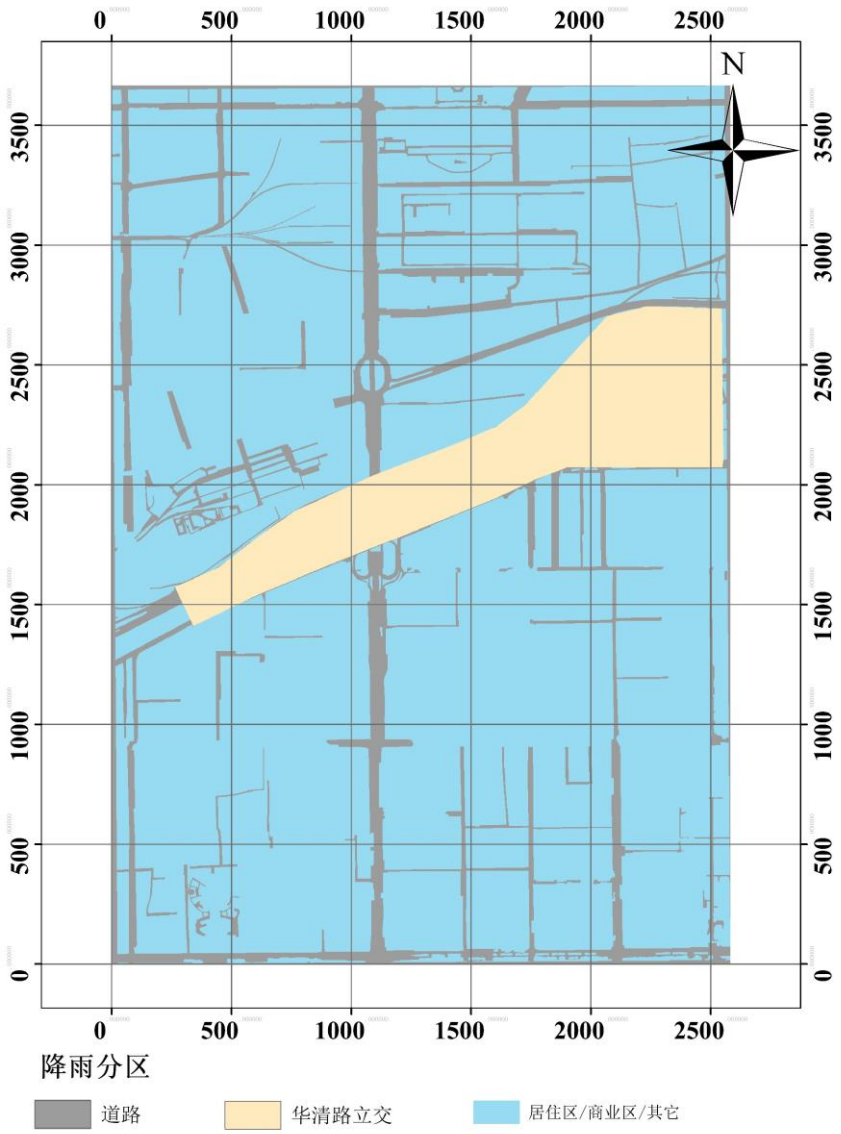


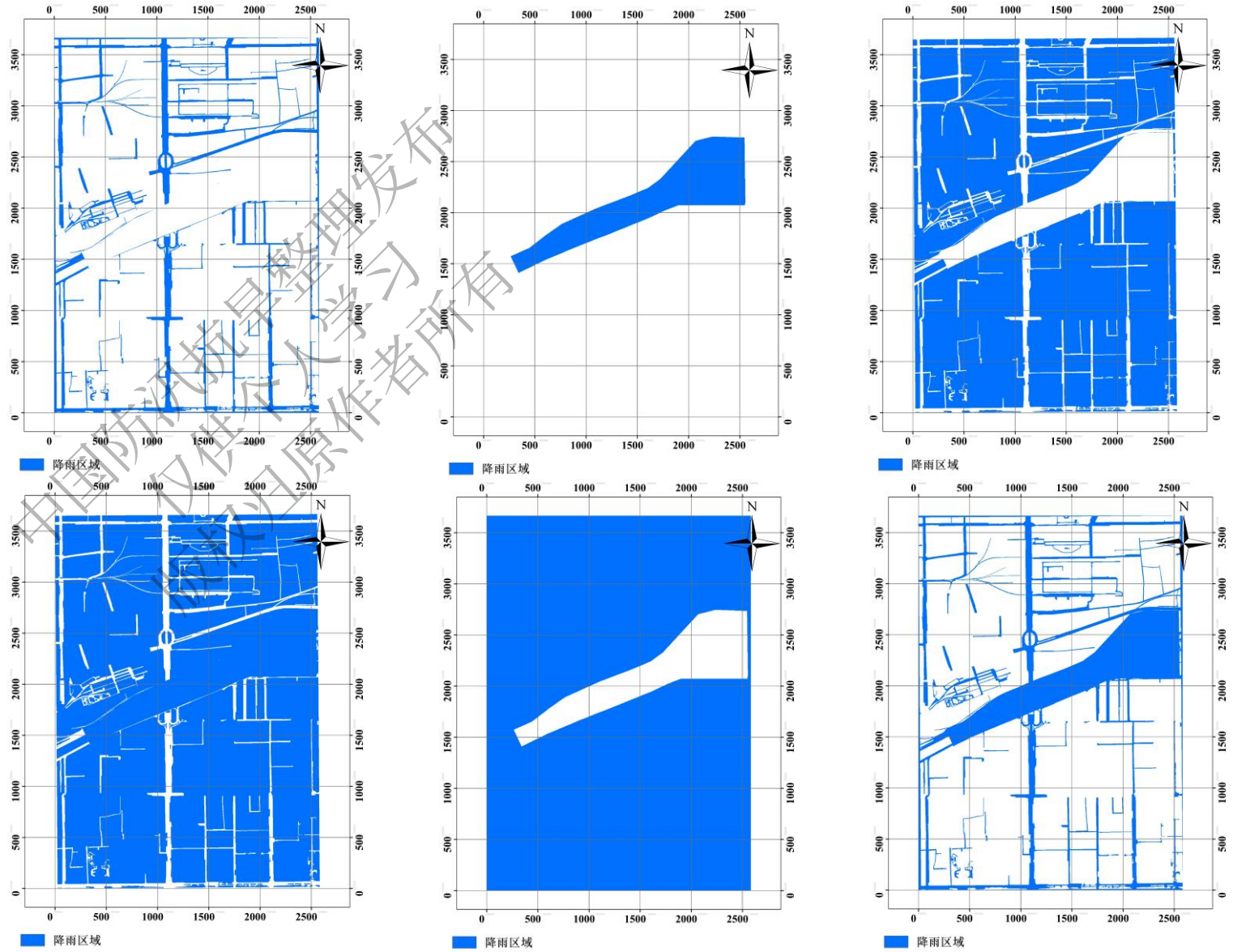

下穿通道水位上涨率-累计降雨量

# 基于精细化雨洪模型的内涝积水来源分析

水模拟及灾害管理
Group of Water Simulation & Flood Management

**通过假定不同空间降雨分布，进一步分析华清路立交汇入辅道和金花北路的径流来源。**



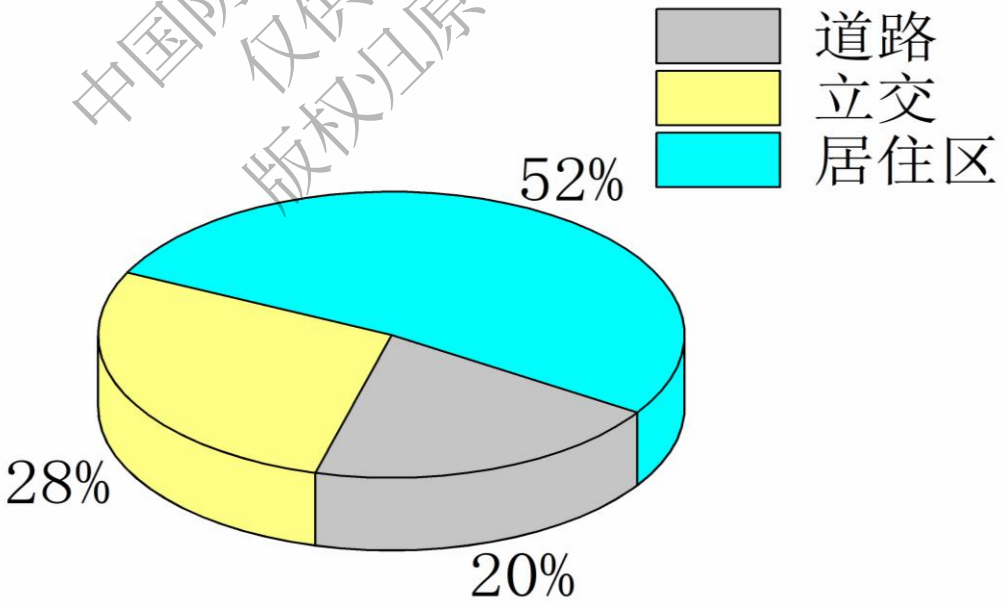




中国防汛抗旱整理发布
仅供广大学习
版权归原作者所有

# 基于精细化雨洪模型的内涝积水来源分析

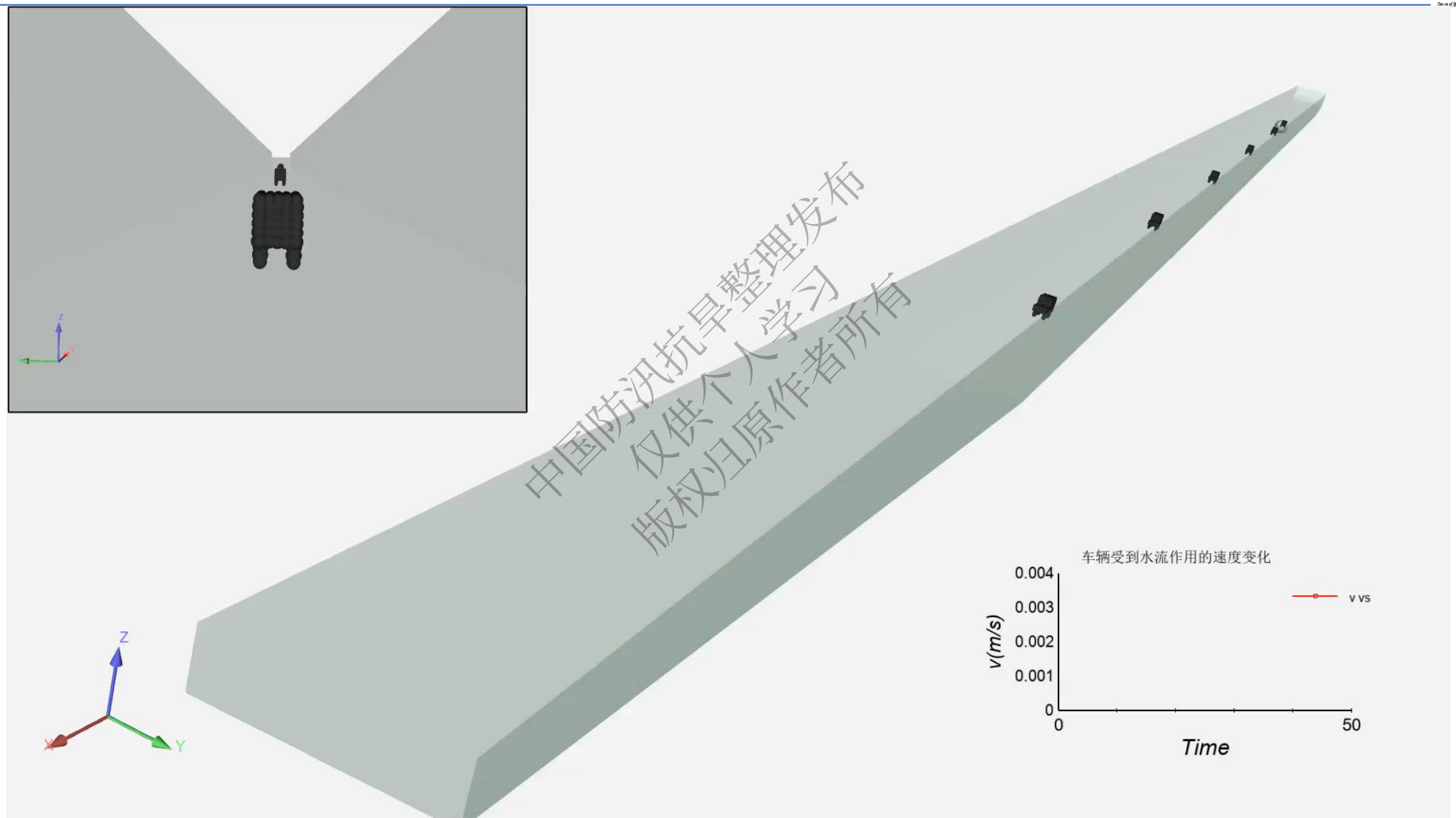
根据不同降雨空间分布条件下的金花隧道积水深度与全区域降雨下水深之比初步得到每个分区对金花隧道积水的贡献率，考虑到叠加效应，最后计算得到道路、立交、居住区的积水贡献率分别为：20%、28%、52%。

| 道路 | 7.14 | 立交+居住区 | 73.43 | 叠加效应 | 9.715 |
|---|---|---|---|---|---|
| 立交 | 15.82 | 道路+居住区 | 62.76 | 叠加效应 | 10.71 |
| 居住区 | 36.73 | 道路+立交 | 30.61 | 叠加效应 | 16.33 |




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DEM方法的下穿通道车辆受力过程流固耦合模拟

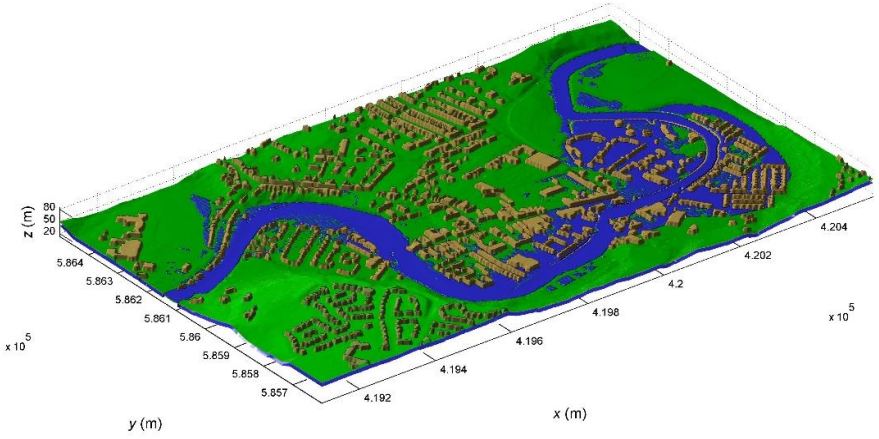


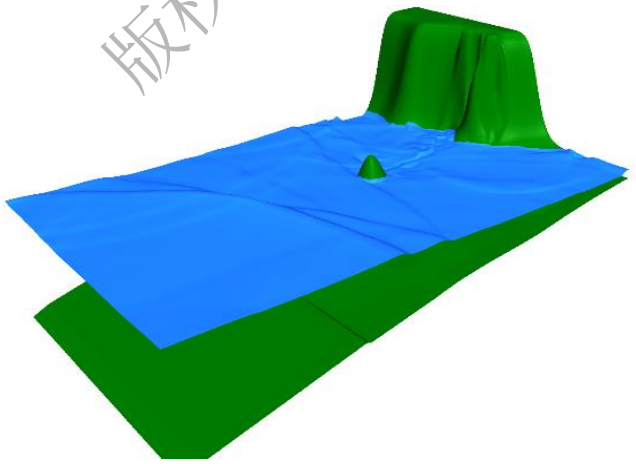

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

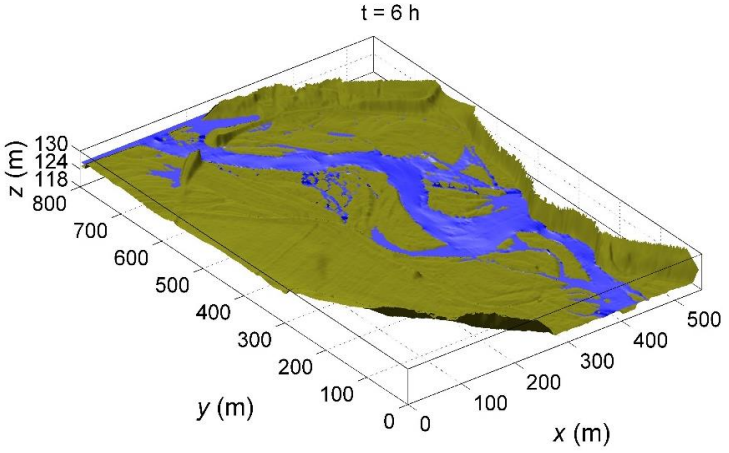
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

- 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟
- 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律
- **超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律**
- 超标暴雨下城市内涝管理新思路

中国防汛抗旱管理发
仅供个人学习参考
版权归原作者所有





# 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律

## 主要研究目的：

为定量评估超标暴雨引发地下空间水灾时，行人通过地下空间出入口楼梯进行疏散的风险，设计了数值模型来模拟不同坡度（26.6°、28.2°、29.1°、30°和35°）条件下楼梯和自动扶梯上的超标雨水径流的流动情况，所得模拟结果可为行人从被水淹没的楼梯或自动扶梯中疏散提供理论指导。

## 模型数值方法：

模型模拟基于FLUENT 17.0软件进行

控制方程：
$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\mu_i)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})]$$

Reliable $k$-$\varepsilon$ 湍流模型：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left[\mu+\frac{\mu_t}{\delta_k}\right]\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G-\rho\varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\mu_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left[\mu+\frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon}\right]\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

VOF模型，用于追踪两相流接触面变化

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}+V\cdot\nabla\alpha=0$$

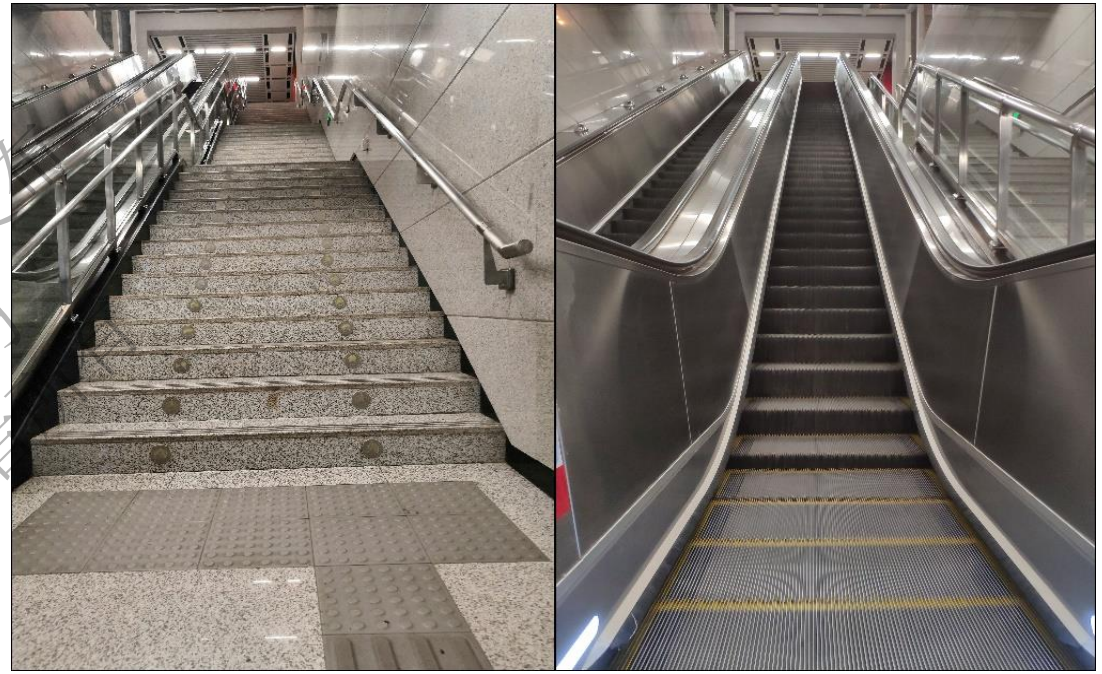
## 危险性评价指标：

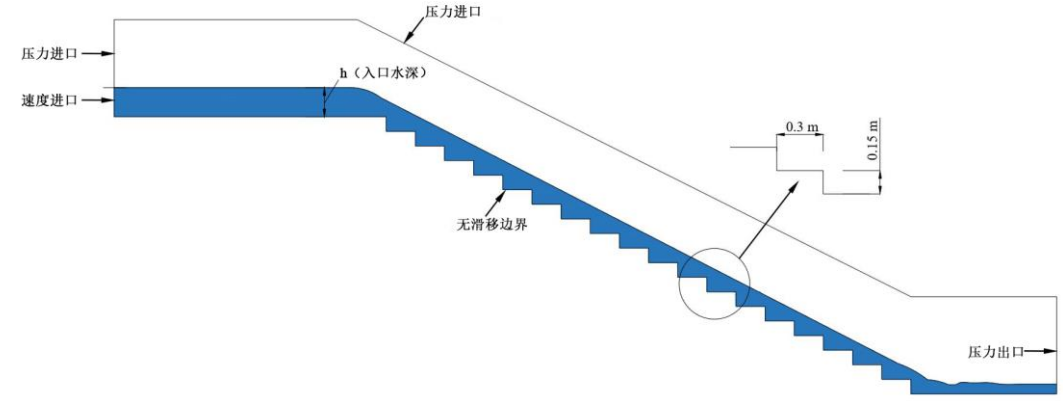
京都大学Ishigaki等人基于搭建的1:1楼梯模型，进行了不同年龄段、不同性别的志愿者在水流冲刷楼梯时通过楼梯逃生难易程度的实验，统计得出安全指标$F$，数值1.2为安全逃生临界点。

$$F\left(v^2,y\right)=v^2y$$

式中，$v$为台阶上的水流流速，$y$为台阶水深

## 阶梯算例及其示意图：

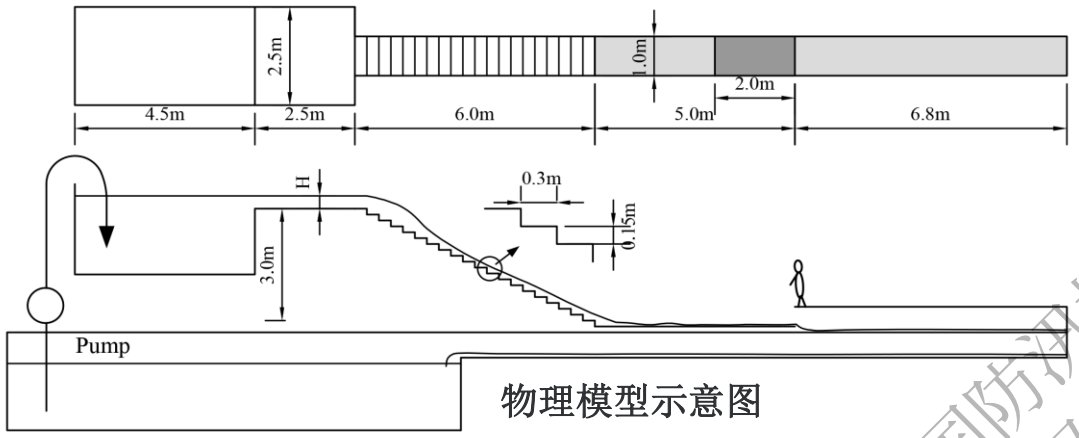




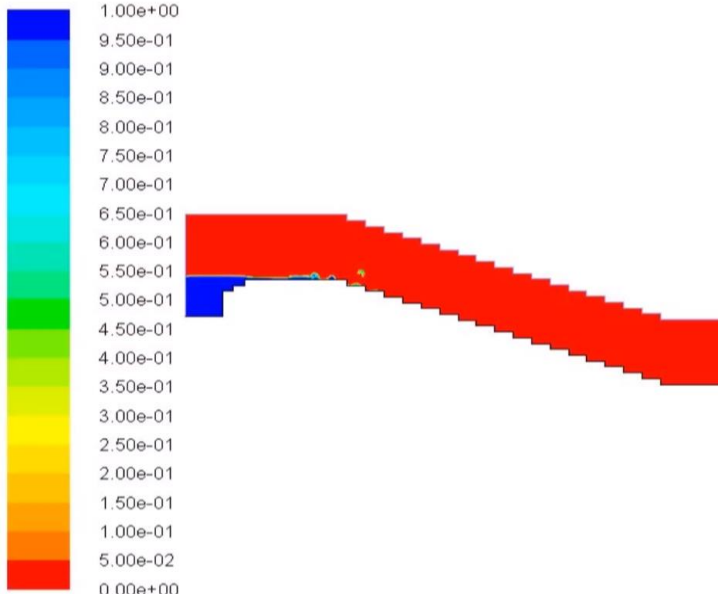
# 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律

## ● 模型数值验证

验证实验数据来自日本京都大学防灾研究所(DPRI)，Ishigaki et al.(2005)的物理模型实验

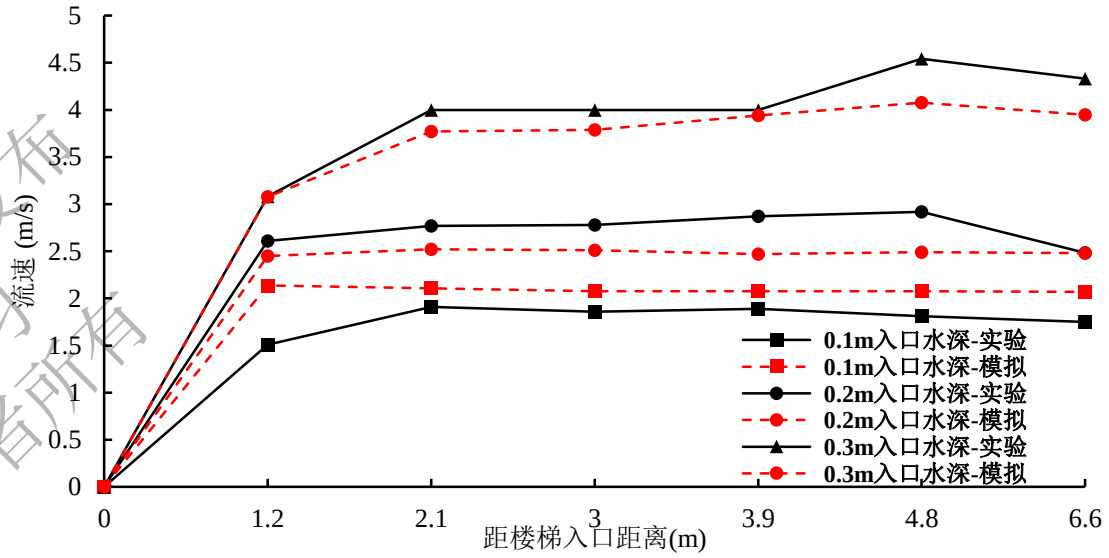


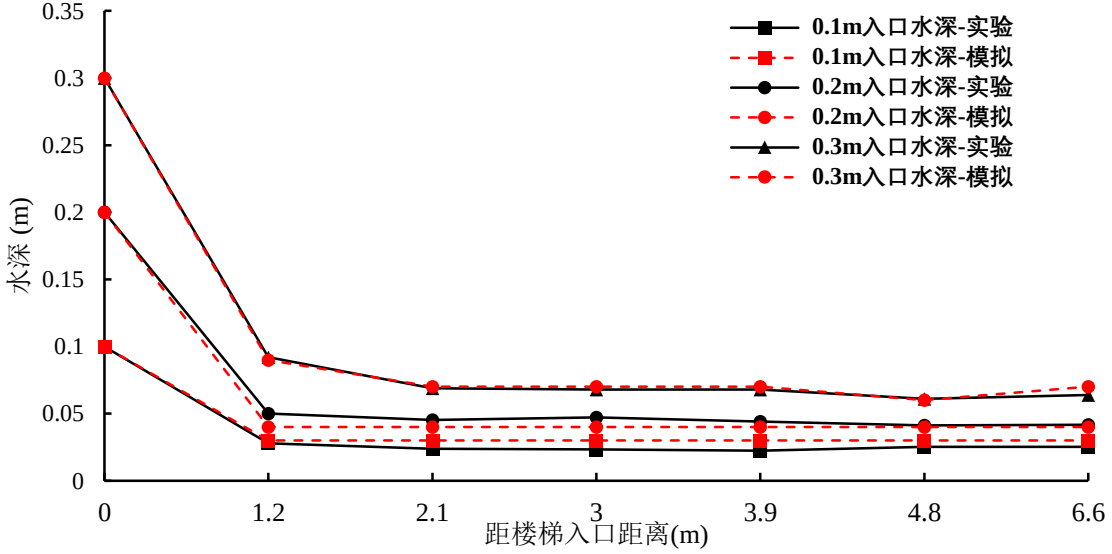

物理模型示意图




选取楼梯入口水深为0.1 m、0.2 m和0.3 m三种工况进行模拟验证。模拟阶梯水深、流速与实验水深、流速数据对比分别如右图所示。

水深数据NSE分别为0.96、0.99和0.97；流速数据NSE分别为0.76、0.92和0.99（NSE越接近于1，模型越加可靠）。



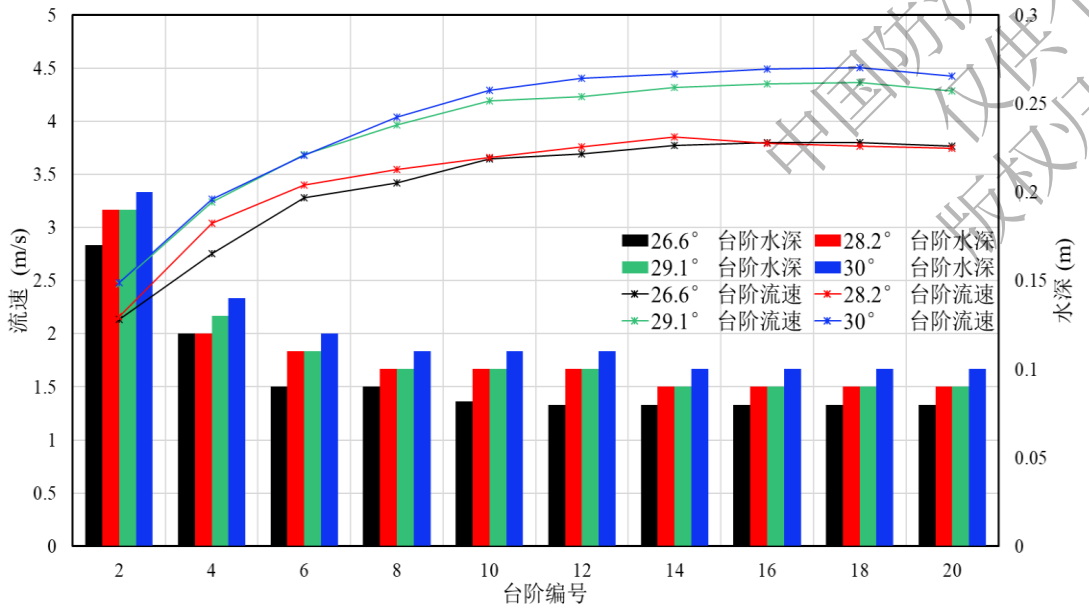

国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律

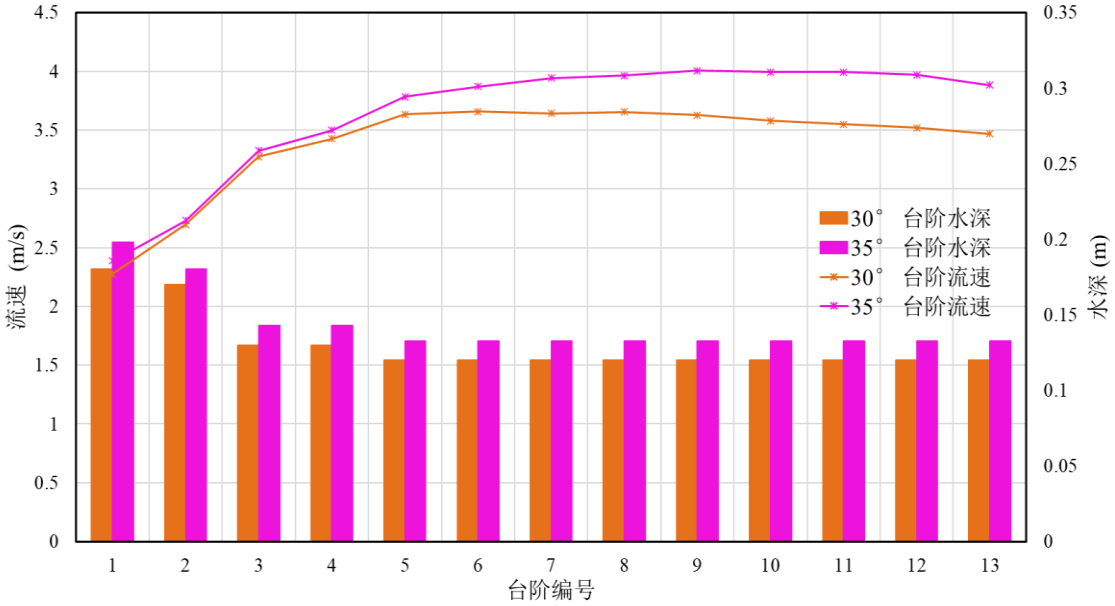
## ● 模拟结果分析

- 模拟结果显示，在遭遇水灾时，行人从坡度更陡峭的楼梯或自动扶梯上撤离的逃生难度更大。台阶上的流速从楼梯入口至楼梯底部逐渐增加；且随着楼梯坡度的增加，流速也随之显著增加，而台阶水深受坡度的则相对较小。
- 在模拟算例中，当楼梯入口水深条件从0.1m增加至0.3m时，不同坡度楼梯上的最大流速增大约1.5m/s，最大水深增加约0.15m；而不同坡度扶梯的最大流速增加约1m/s，最大水深增加约0.1米。
- 风险指数（$F$（$v^2$，$y$））从楼梯入口至楼梯底部，呈现出先快速增加，进而略有下降的变化过程，楼梯上危险性最大的地方处于楼梯中部区域。相同条件下，自动扶梯的风险指数值大于相同坡度下的楼梯，行人应优先选择楼梯进行逃生，以降低逃生风险。

楼梯




自动扶梯



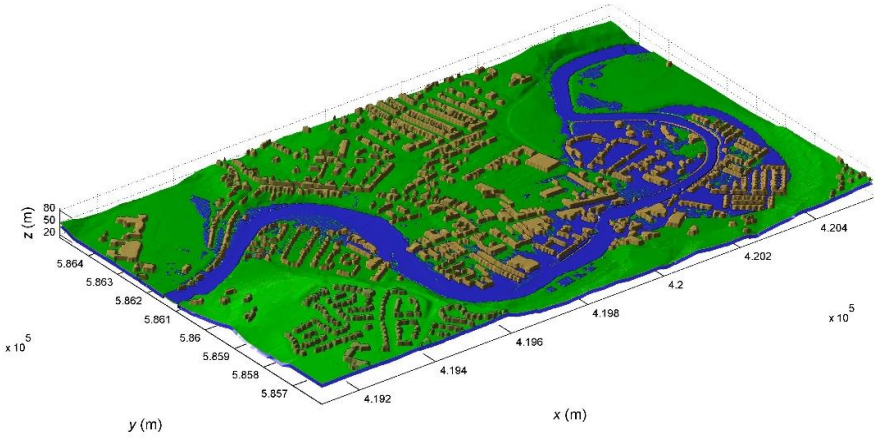

中国防汛抗旱管理学会
仅供个人学习参考
版权归原作者所有

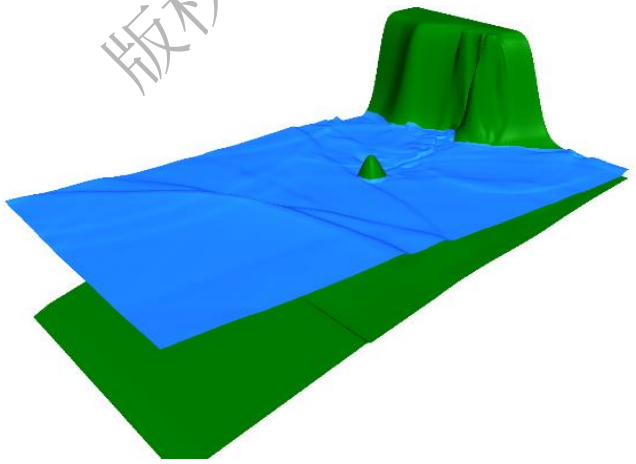
Hou, J., Chen, G., Zhang, Y. et al. A simulation study on risks of pedestrian evacuation from flooded staircases of different slopes in the underground space. *Nat Hazards* (2021). *https://doi.org/10.1007/s11069-021-04956-7*

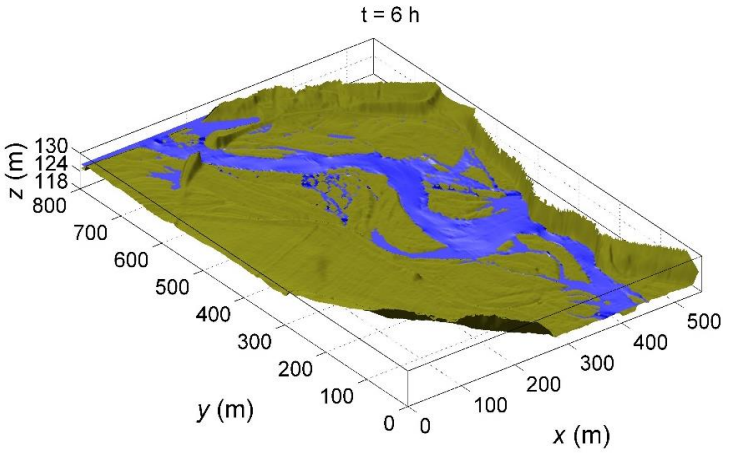
# 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟及风险演变规律

- 超标暴雨下城市下穿通道积水过程精细模拟
- 超标暴雨下城市下穿通道积水风险演变规律
- 超标暴雨下城市地下空间积水风险演变规律
- **超标暴雨下城市内涝管理新思路**

中国防汛抗旱数理发
仅供个人学习
版权归原作者所有





# 一、新增极端暴雨场次对已有设计暴雨公式的影响规律研究

**主要研究目的：**

**全球气候变化导致极端暴雨频发，近年来重大超标暴雨致灾事件已不是个例，为了指导城市排水防涝系统建设，建立完善的防灾减灾应急预案，以更好地应对超标暴雨，需要关注极端暴雨对设计暴雨公式的影响。**

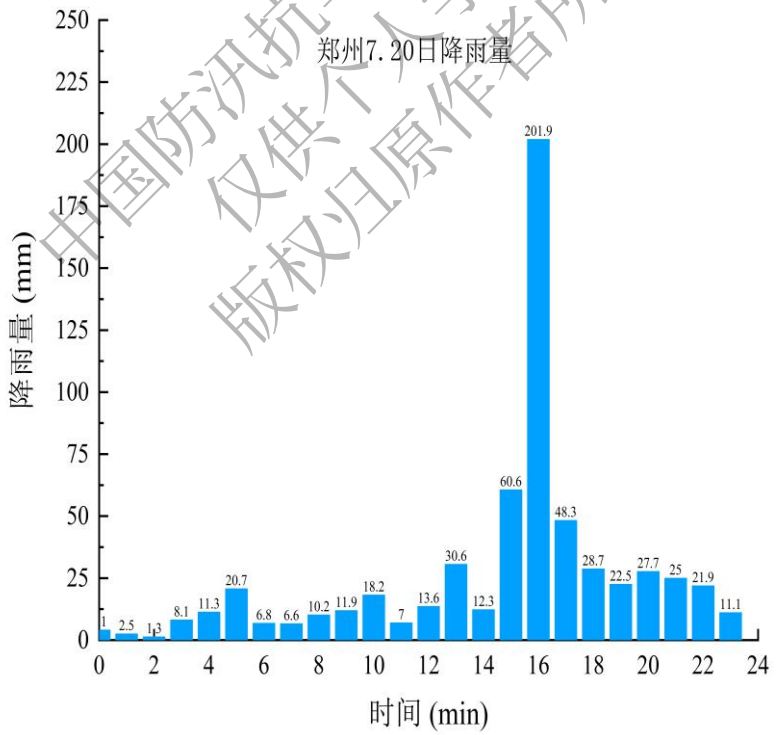
**修正原因：**

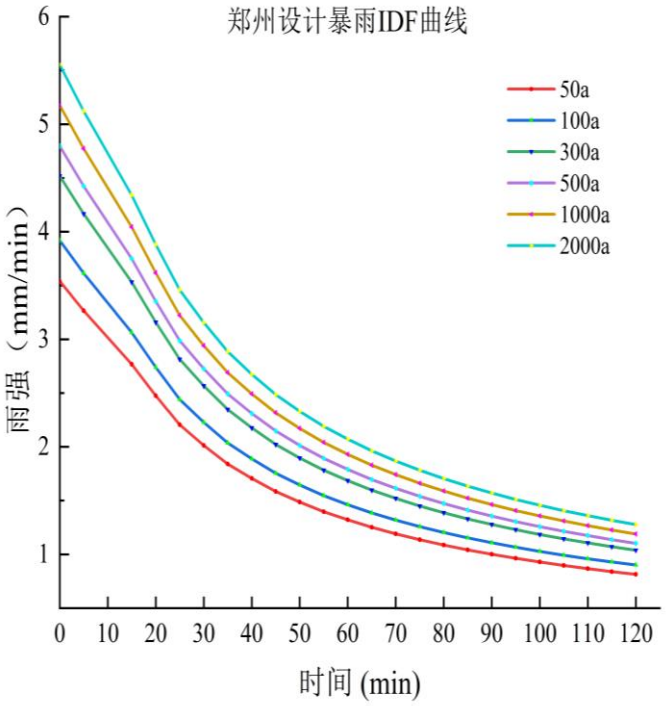
**设计暴雨公式编制的数据来源于实测暴雨资料，为保证精度和适用性，一般用以编制的数据都需要经过三性检验，极端暴雨一般会因为不具有总体代表性、在频率曲线上远离规律而被剔除，所以设计暴雨公式无法表征极端暴雨。**

**近年来，**
**部分全球极端强降水事件**

| 日期 | 地点 | 降雨情况 | 评价 |
|---|---|---|---|
| 2007年7月 | 中国 重庆 | 24小时降雨量为266.6毫米 | 百年一遇暴雨 |
| 2012年5月 | 俄罗斯 克拉斯诺达尔 | 2小时降水量达到110毫米 | 俄罗斯最严重的洪涝灾害 |
| 2012年7月 | 中国 北京 | 此次最大降水量达460毫米 | 特大暴雨 |
| 2013年5月 | 欧洲 中部国家 | 平均降水量达77.6毫米 | 世纪洪水 |
| 2014年8月 | 日本 广岛 | 最高雨强达100毫米每小时 | 有史以来最强暴雨 |
| 2014年10月 | 印度 安得拉 | 24小时降雨总量达380毫米 | 特大暴雨 |

资料来源：媒体公开报道、WMO历年年全球气候状况声明

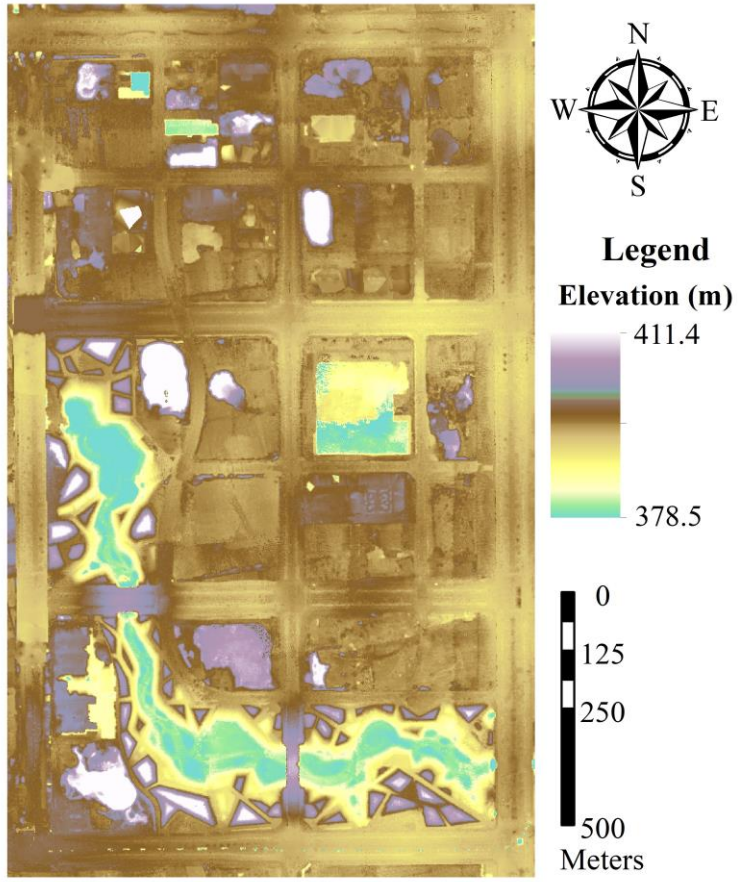


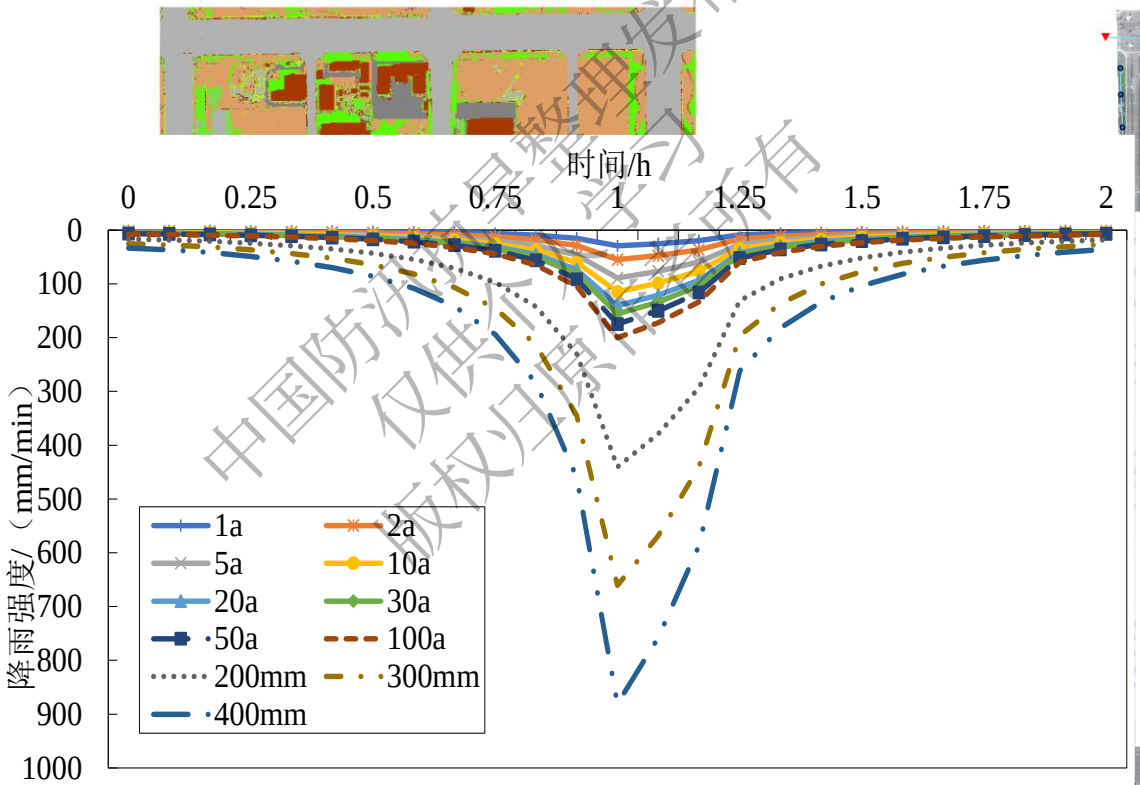

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 二、常规和超标暴雨下管网排水能力探索分析

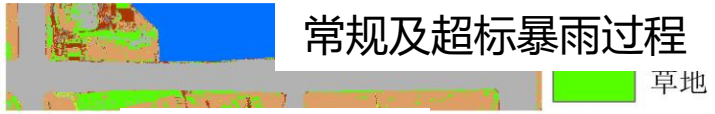
**基于自主研发的一二维耦合模型，以沣西新城核心示范区为研究区域，模拟不同设计暴雨情景下城市区域降雨径流过程，分析了不同设计降雨下管网排水能力，为探明城市降雨径流和管网排水情况提供参考依据。**



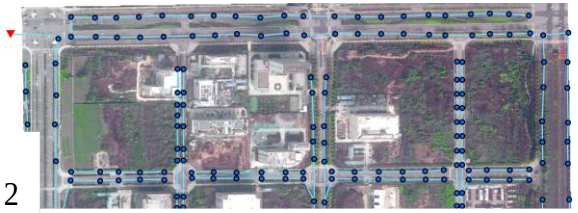

地形数据

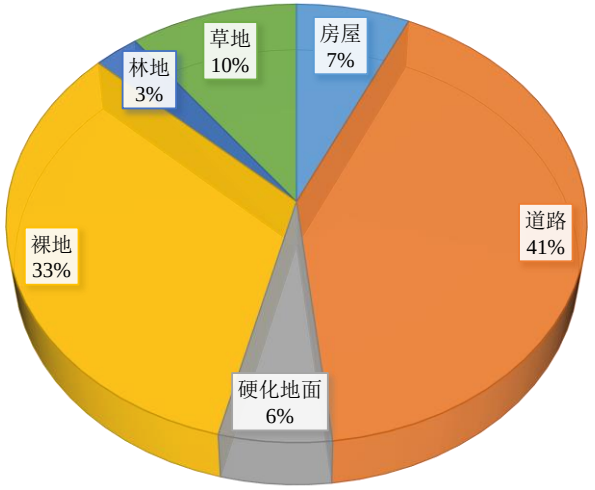


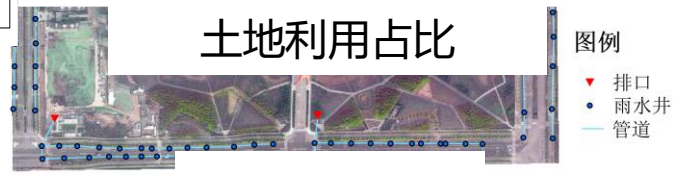



土地利用数据



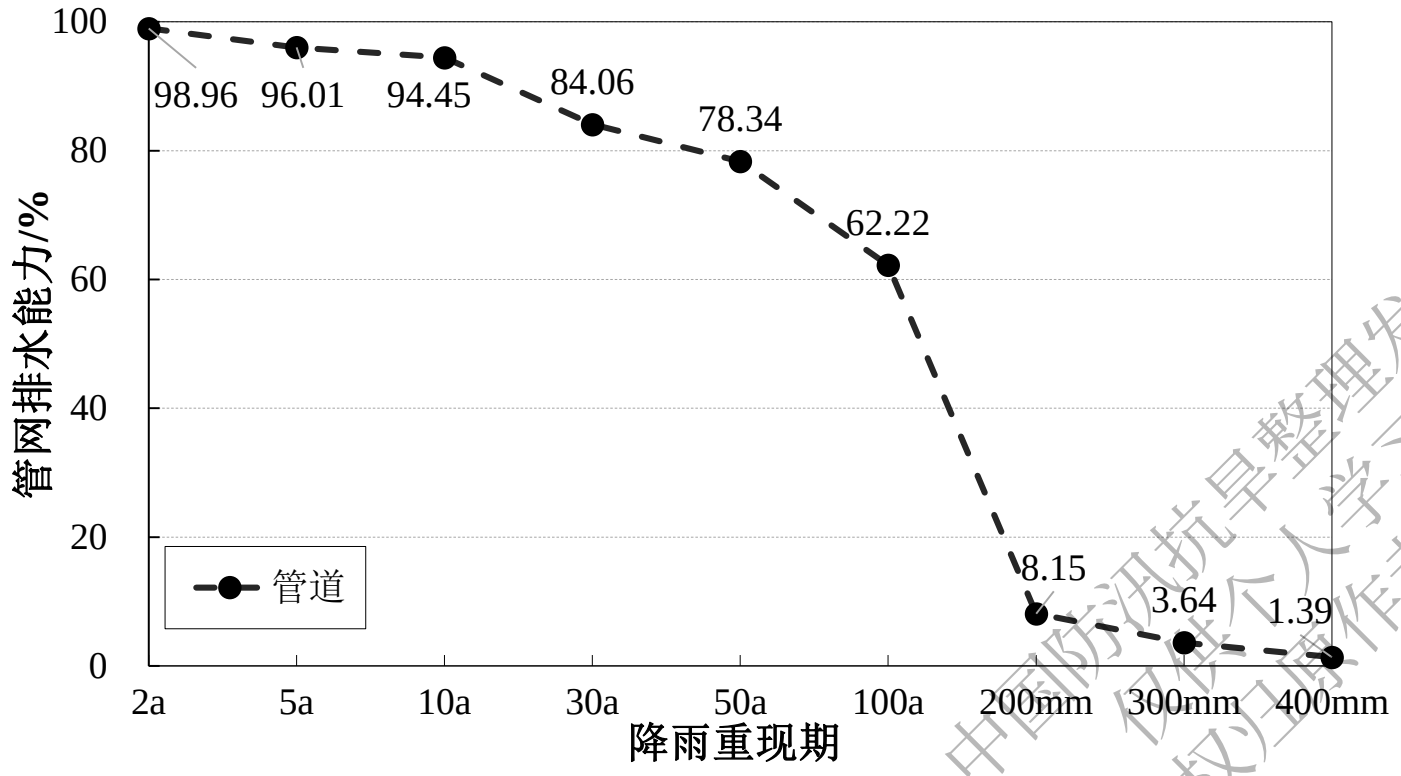



管网数据

中国防汛抗旱整理发布
仅供学习
版权归原作者所有

# 二、常规和超标暴雨下管网排水能力探索分析




**结果表明：**

**1.随降雨重现期增大管网排水能力逐渐减小；**

**2.在降雨重现期小于10年一遇时，管网排水能力均高于90%，在该降雨下大部分管网达标，足以应对该降雨。**

**3.在极端暴雨下（2小时降雨量>=100 mm）管网排水能力迅速减小到10%以下，此时地表径流已经远超管网排水能力。**

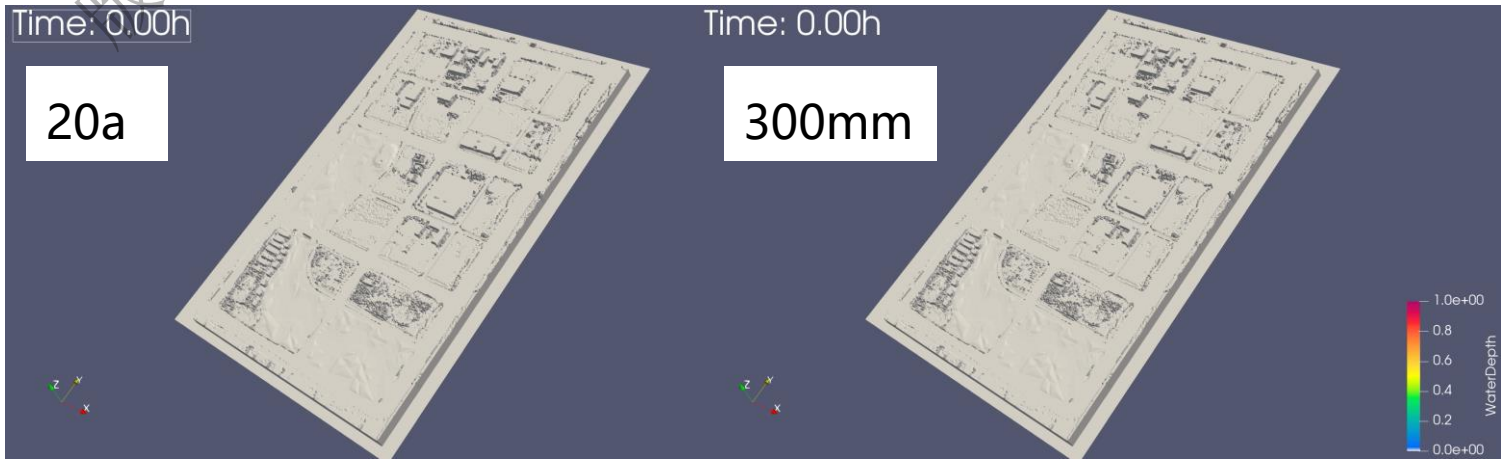
注：上述结果均假设管网畅通、末端自由出流无阻碍、雨水口无堵塞情况下获得。

**以管道超载长度为评价指标，评估管网排水能力：**

$$管网排水能力=\frac{L-L_S}{L}$$

$L$：管道长度，m；

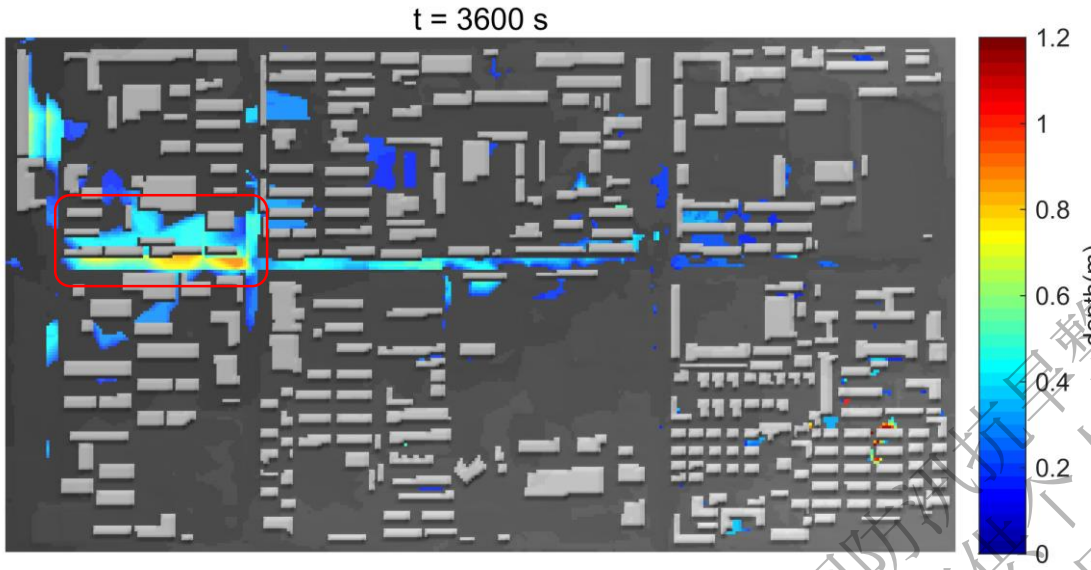
$L_S$：超载管道长度，m。



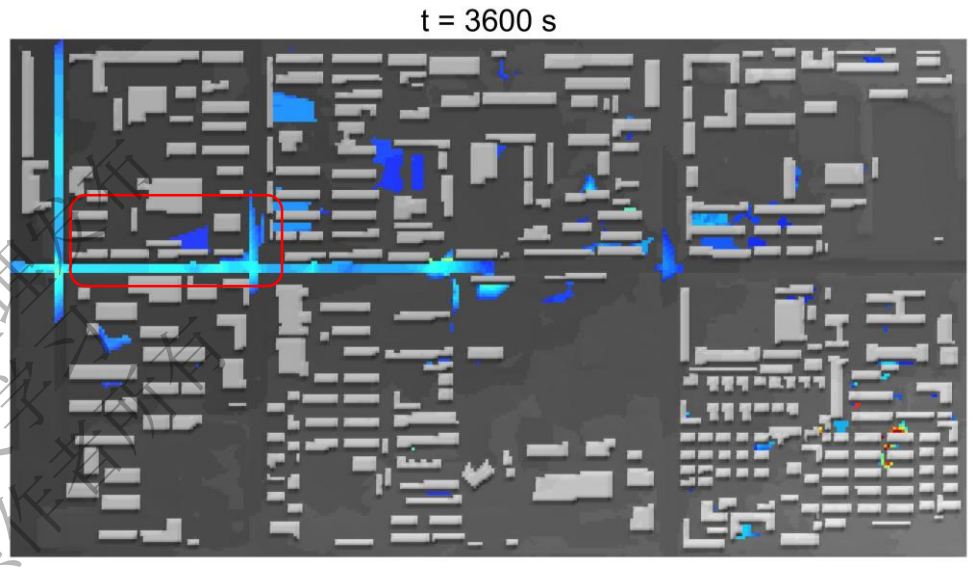

中国防汛抗旱整理发布
仅供个人学习
版权归原作者所有

# 二、超标暴雨下地表排水理念探索

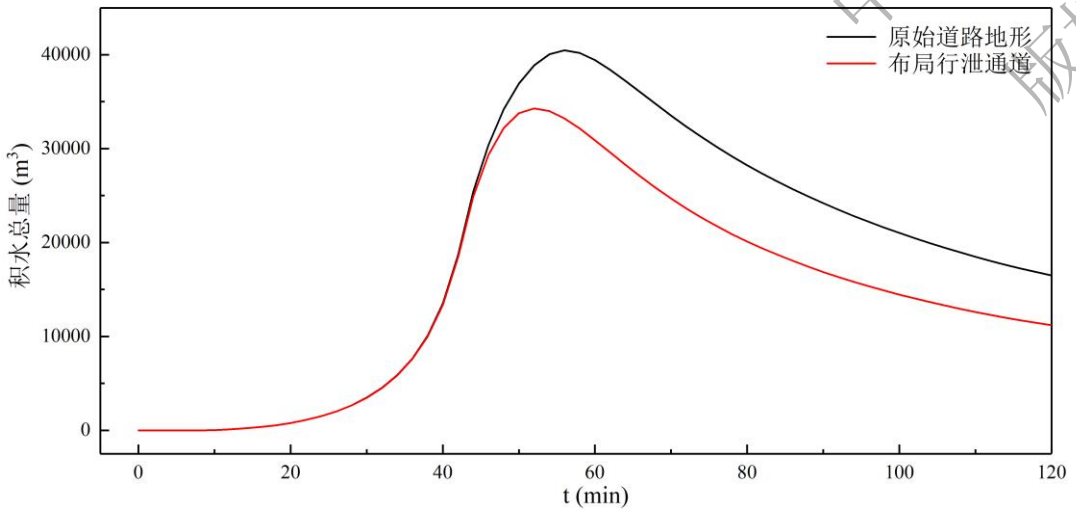
- **地表道路行泄通道加强排水**




行泄通道布局前



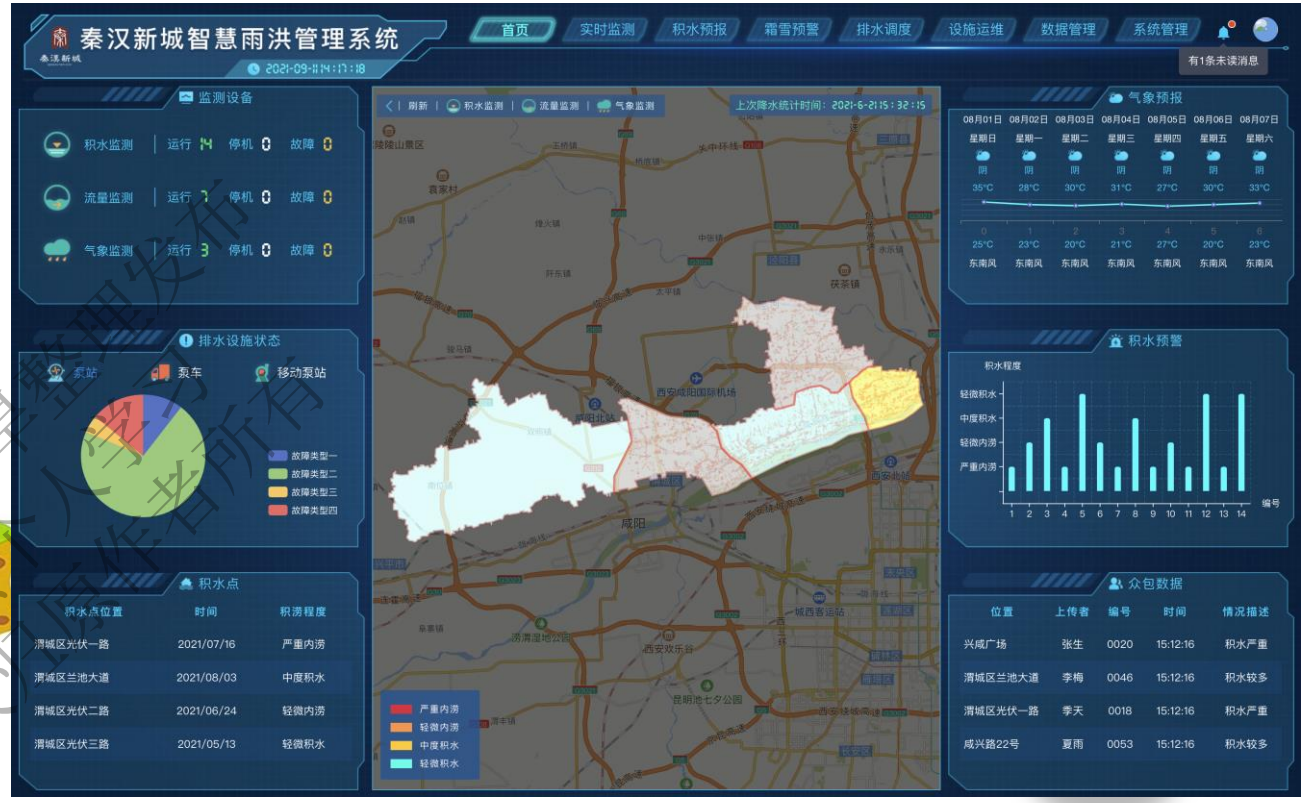

行泄通道布局后




**通过是否布局地表道路行泄通道加强排水的模拟，体现地表道路行泄的排水效果和地表排水在整个排水体系中的重要性。结果表明：在该区域上，加强地表排水能够减少约21.6%的积水量，有效减小地表径流深。**

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、针对常规及超标暴雨的灰绿蓝+红海绵城市建设管理模式



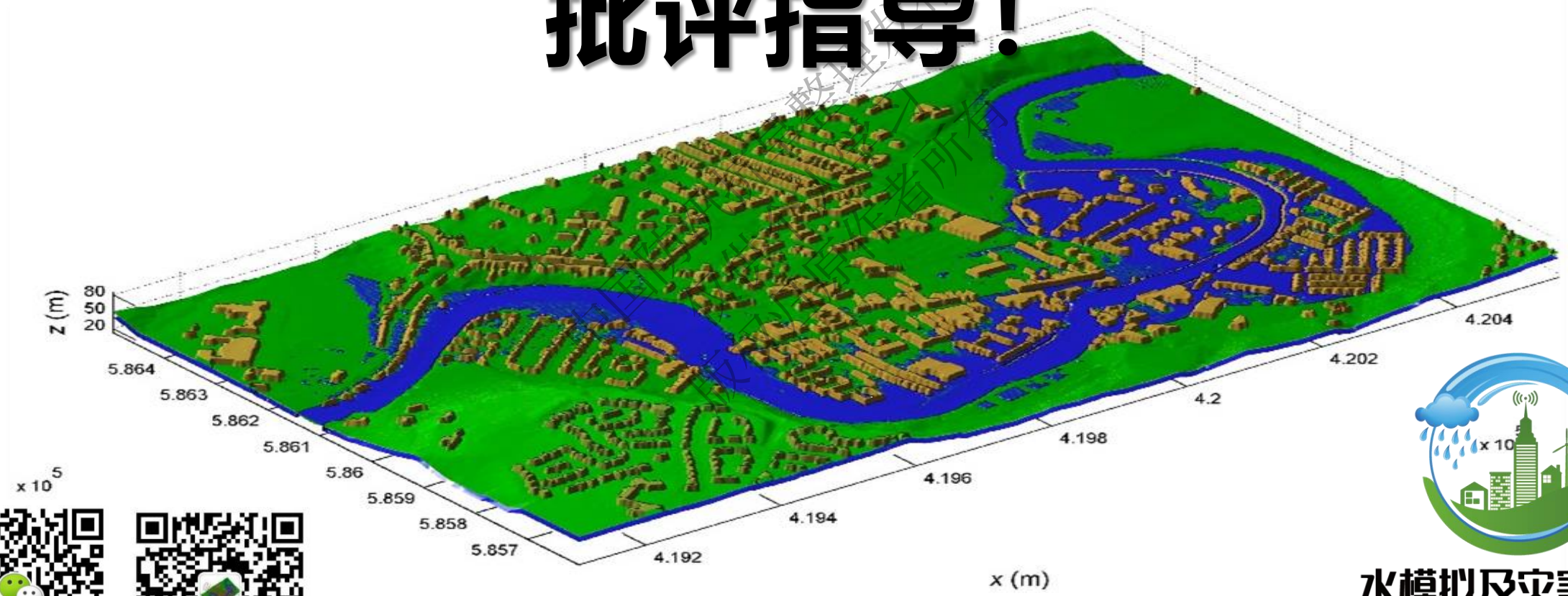

**基于洪涝预报预警的洪涝灾害应急响应措施**

版权归原作者所有

西安理工大学
XI'AN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室
STATE KEY LABORATORY OF ECO-HYDRAULICS IN NORTHWEST ARID REGION OF CHINA

# 敬请各位专家学者批评指导！




版权所有

水模拟及灾害管理
Group of Water Simulation & Flood Management

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
2021.10.11，西安

jingming.hou@xaut.edu.cn