城市下垫面地表漫流过程及内涝点形成机理研究

林斌良
孙健，刘璐
清华大学水利系
2019-11-22

目录

1 研究背景与意义
2 理想城市地表水流实验研究与模型验证
3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟
4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理
5 总结与展望

清華大學 Tsinghua University

目录

1 研究背景与意义

2 理想城市地表水流实验研究与模型验证

3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟

4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理

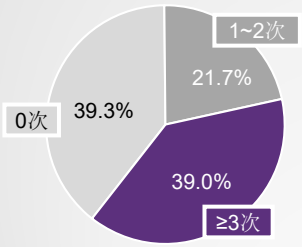
5 总结与展望

城市洪涝灾害

城市洪涝会形成大面积道路积水，引发交通系统瘫痪，造成巨大的经济损失和社会影响，甚至威胁人民的生命健康。

[2012/07/21 莲花桥]

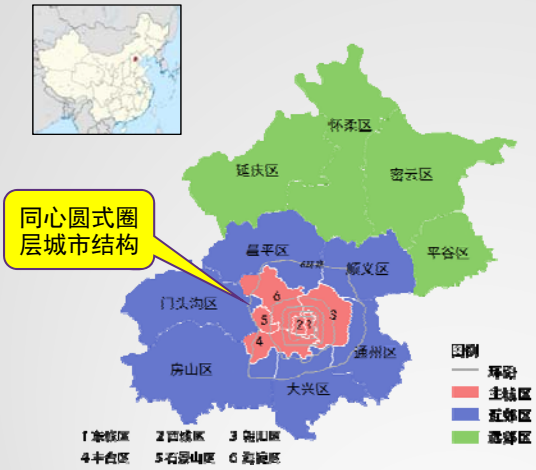
[2018/07/18 回龙观]



住房和城乡建设部对351个城市进行的内涝灾害调查显示，2008-2010年间有60%的城市发生过不同程度的积水内涝。

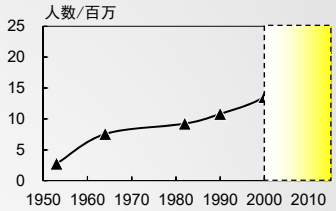
4

城市化发展



[北京市行政区划分]

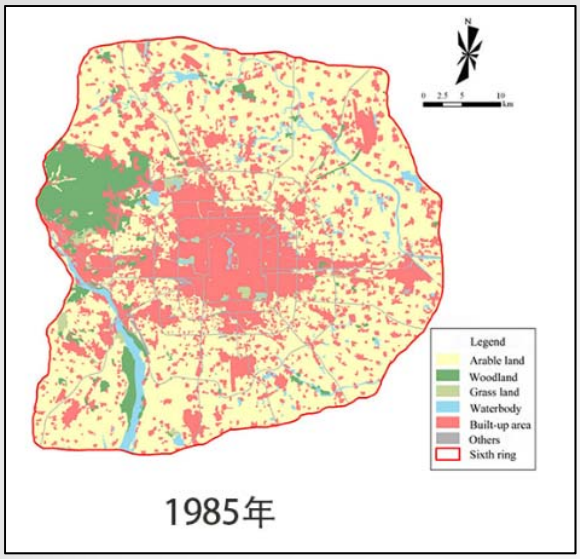
北京作为中国政治、经济和文化中心，是一个超大城市，也是全国城镇化水平最高、经济最发达的城市之一。



[北京市人口数量]

5

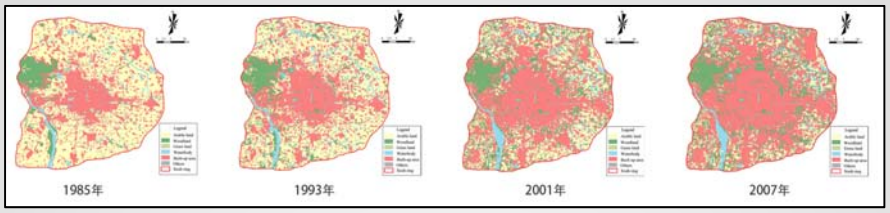
北京市城市地表利用情况



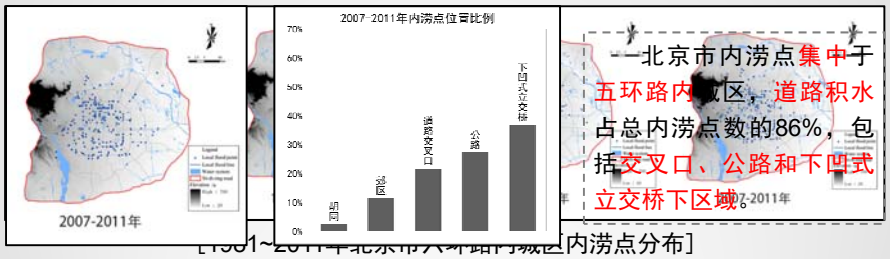
黄色代表耕地，
绿色代表林地，
蓝色代表水域，
红色代表硬地，
如房屋、道路等。

6

北京市城市化进程与内涝点分布



[1985~2007年北京市六环路内城区土地覆盖类型]



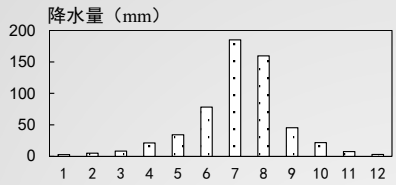
[1981~2011年北京市六环路内城区内涝点分布]

北京市内涝点集中于五环路内城区，道路积水占总内涝点数的86%，包括交叉口、公路和下凹式立交桥下区域。

Zhao J, Yu K J, Li D H. Spatial characteristics of local floods in Beijing urban area[J]. Urban Water Journal, 2014.

7

极端天气

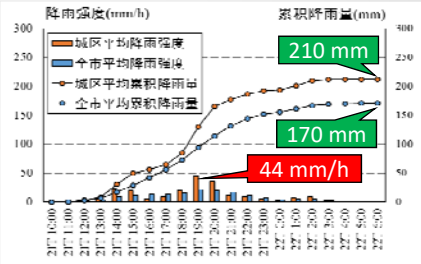


[多年平均月降水量]

北京市为温带大陆性季风气候，夏季高温多雨，6~9月降水量超过年平均降水量（500~600 毫米）的80%以上。

- 北京“7. 21”特大暴雨

2012年7月21日降水持续16小时，全市平均累积降雨170毫米，城区平均累积降雨210毫米，为60年以来最大一次降雨过程。降雨峰值时刻在城区的降雨强度达到了44mm/h。



[降雨强度及累积降雨量过程]

[1] Qiu J. Urbanization contributed to Beijing storms[J]. Nature News, 2012.

8

北京市“7. 21”特大暴雨

城区内涝严重影响城市交通，中心城区共形成道路积水点63处，公路中断39945次，交通系统大范围瘫痪[1]。受灾人口接近百万人，直接经济损约100亿元[1]。

[城区道路积水点分布]

[1] 尹志聪, 郭文利, 李乃杰等. 北京城市内涝积水的数值模拟[J].

9

城市洪涝研究现状

城市洪涝

城市洪涝被称为地表洪水(“surface water flood”)，指降雨落至地表，雨水在进入排水系统前积聚或是因超过城市排水能力而未能进入排水系统产生积水的现象[1,2]。

复杂城市下垫面地表漫流研究

建筑物对洪水影响的实验研究

北京暴雨内涝形成机理研究

[1] Jenkins. et al. Assessing surface water flood risk and management strategies[J]. Science of the Total Environment, 2017.
[2] Osti. et al. Lessons learned from southern and eastern Asian urban floods[J]. Journal of Flood Risk Management, 2016.

10

道路坡面上的地表漫流

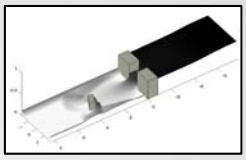
[道路坡面水流]

- 降雨在道路坡面上形成的地表漫流水深较小，一般为几毫米到几厘米，属于薄层水流。
- 当城市道路坡度较大（2.5%~4%），坡面薄层水流的实验研究[1]、现场观测[2]和模拟计算[3]表明急流与缓流都会出现，且以急流为主。

[1] Charbeneau R J, et al. Physical modeling of sheet flow on rough impervious surfaces[J]. J. Hydraulic Engineering, 2009.
[2] 尹艳, 高建恩, 李慧娟, 等. 坡面薄层含沙水流水动力学参数提取的方法[J]. 水土保持学报, 2019,.
[3] 王海亮, 郭子会, 李月光, 等. 雨天道路表面薄层水流特性的影响因素分析[J]. 交通科技, 2018.

建筑物对洪水影响的实验研究

城市大量建筑物对地表水流运动影响极大，导致城市下垫面水深和流速的分布极不均匀。



[城市洪水实验及数值模型研究]

经典文献

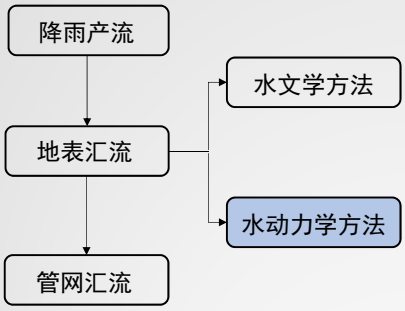
- 单个建筑物对洪水演进的影响[1]
- 理想城市建筑群对洪水演进的影响 [2]
- 洪水在意大利某城市的演进过程的实验研究[3]

十分需要建筑群与洪水相互作用的实验，特别是具备水位与流速测量、实验条件可以精确控制、重复的实验。

[1] Soares-Frazão S, Zech Y. Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. J. Hydraulic Research, 2007.
[2] Soares-Frazão S, Zech Y. Dam-break flow through an idealised city. J. Hydraulic Research, 2008.
[3] Testa G, et al. Flash flood flow experiment in a simplified urban district. J. Hydraulic Research, 2007.

城市下垫面的地表漫流模拟

复杂的城市下垫面（建筑物、道路、绿地和雨水口等地物）与雨水的相互作用是城市地表雨水漫流模拟的主要难点。



［城市洪涝模型框架］

水动力学模型考虑从降水输入城市系统开始的完整降雨-汇流过程[1]，能够提供地表水流详尽的时空变量，准确重现水流汇聚路径和积水演变过程[2]。

[1] Yu D P, Coulthard T J. Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model[J]. Journal of Hydrology, 2015.
[2] Chen A S, Leandro J, Djordjevic S. Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations. Urban Water Journal, 2016.

城市下垫面的地表漫流模拟

高空间分辨率地形数据使数值模型可以预测建筑尺度的洪水过程，被称为“微尺度洪水灾害分析”。开发和应用高空间分辨率的水动力学模型是城市洪涝研究的发展方向。

- 建筑物处理方法：固壁边界法、真实地形法、透水系数法和人工加糙法[1]
- 雨水口的入流情况直接决定了管网的排水量，呈现堰流或是孔口入流形式[2]
- 绿地的土壤下渗能力通常以初始降雨量的减少或恒定下渗率来反映[3]

准确性受多方面不确定性因素影响，包括水文资料、水力学参数、验证校核数据以及与洪水相互作用的障碍物。

[1] Schubert J E, et al. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. Advances in Water Resources, 2012.
[2] Noh S J, et al. Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments. Advances in Water Resources, 2016.
[3] Chang T J, et al. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. Journal of Hydrology, 2015.

北京暴雨内涝致灾机理研究

城市内涝形成的直接原因主要与下垫面、管网排水能力和降雨强度等相关。各城市在地理特征、城市规划和排水系统差异较大，城市洪涝灾害具有典型的个例特征。

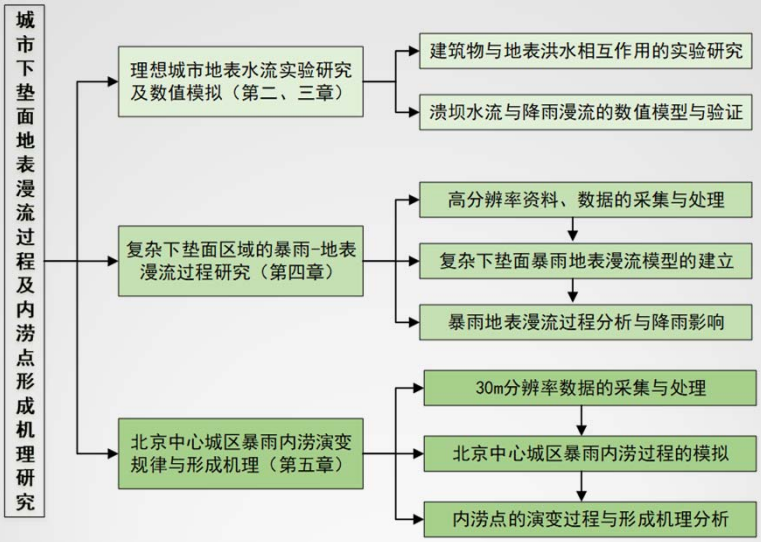
从城市整体视角出发，北京市城区内涝成因复杂：极端降雨增多、下凹式立交桥的地势特点[1]和管网整体排水能力[2]等。

多是从内涝点分布特征[3]和城市雨水系统规划设计与管理角度进行内涝形成的相关分析。如何科学认识北京城区暴雨内涝形成机理、客观评价下垫面对雨水产汇流影响，需要进一步研究。

[1] 孙喆. 北京中心城区内涝成因. 地理研究, 2014.
[2] 黄谦. 对北京城市雨水排除体系的若干思考. 市政技术, 2012.
[3] Zhao J, et al.. Spatial characteristics of local floods in Beijing urban area. Urban Water Journal, 2014.

15

主要研究内容



16

Tsinghua University

目录

1 研究背景与意义

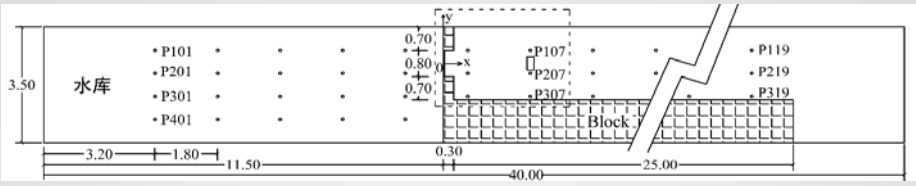
2 理想城市地表水流实验研究与模型验证

3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟

4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理

5 总结与展望

2.1 单个建筑物洪水实验



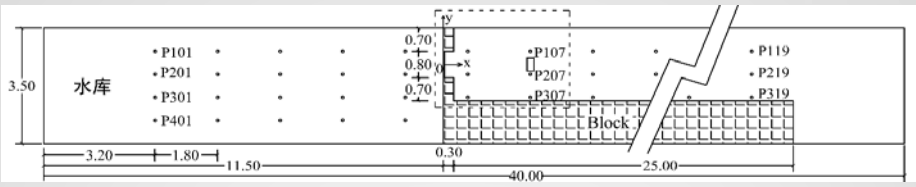
[水槽平面布置]

[水槽实验大厅]

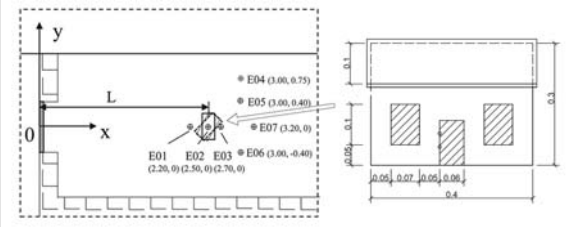
[单个建筑物的洪水实验]

18

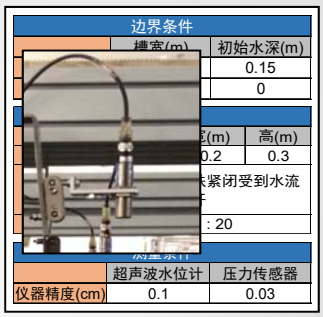
2.1 单个建筑物洪水实验



[水槽平面布置]



[模型房屋示意图和超声波水位计位置]



边界条件		
	槽宽(m)	初始水深(m)
		0.15
		0

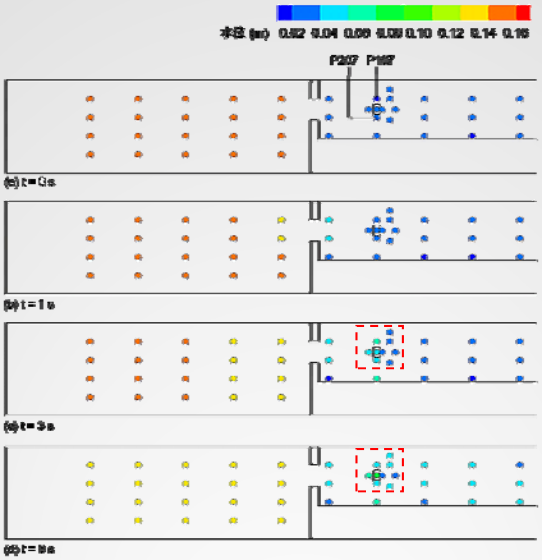
	宽(m)	高(m)
	0.2	0.3
	紧闭受到水流	
	: 20	

	超声波水位计	压力传感器
仪器精度(cm)	0.1	0.03

[实验条件]

19

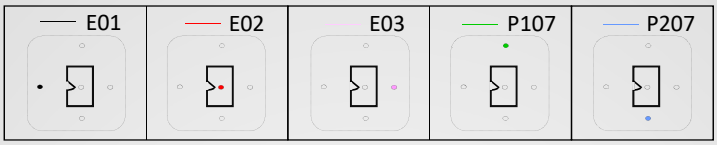
洪水演进过程

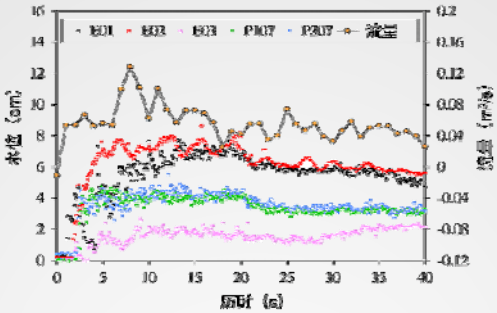


房屋上游水位高于周围水位，后方存在尾流区，水位偏低。

20

房屋周围水位变化

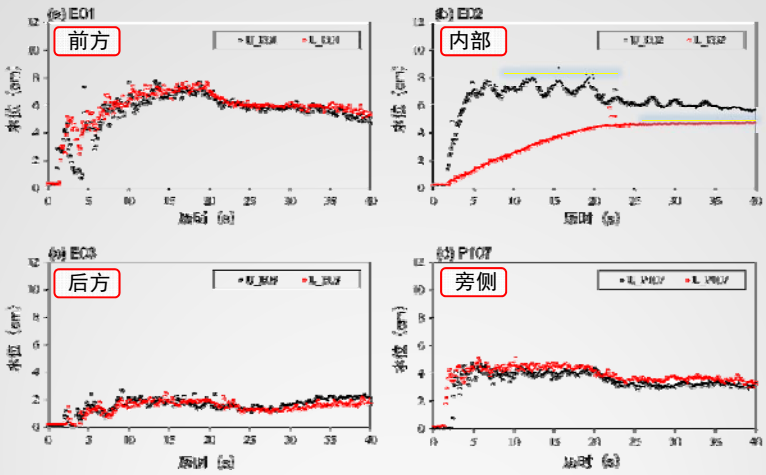




房屋前门开启后，门前水流变为急流，而后水位上升。
房屋两侧水位较为稳定，水位序列一致。
房屋下游尾流区水位持续较低。

21

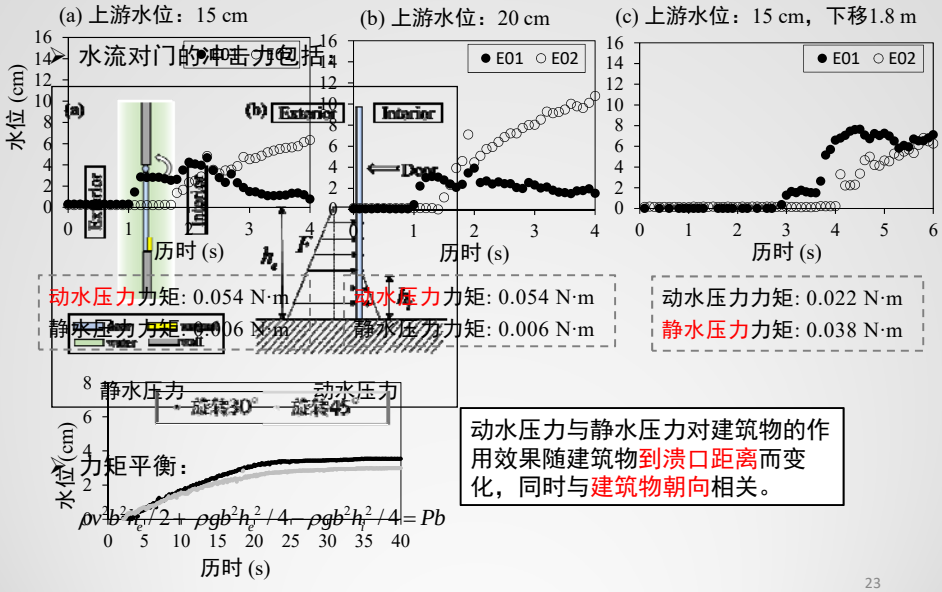
房屋前门开启对周围水位影响



(1) 前门开启对模型内部水位影响较大，特别是水位峰值。
(2) 前门开启对屋前、屋后和旁侧影响较小。

22

静水压力和动水压力



水流对门的冲击力包括：

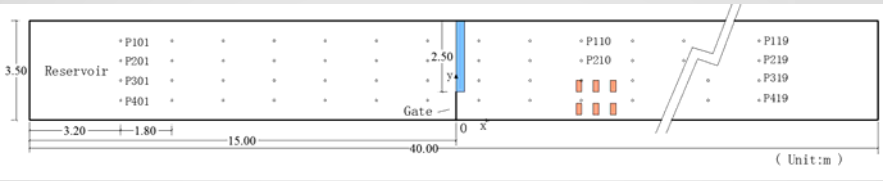
动水压力与静水压力对建筑物的作用效果随建筑物到溃口距离而变化，同时与建筑物朝向相关。

力矩平衡：

$$\rho v^2 b^2 h_e^2 / 2 + \rho g b^2 h_e^2 / 4 - \rho g b^2 h_i^2 / 4 = Pb$$

23

2.2 建筑群对水流特性影响



[水槽平面布置]

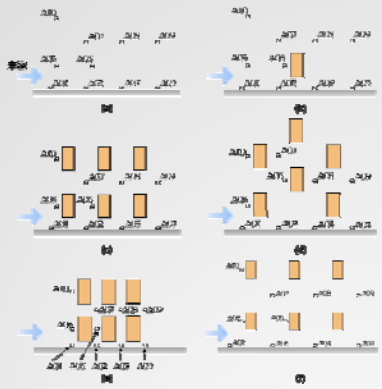
[建筑群的洪水实验]

边界条件		
	槽宽(m)	初始水深(m)
上游	3.5	0.15
下游	3.5	0
模型条件		
	长(m)	宽(m)	高(m)
尺寸	0.4	0.2	0.3
比尺	1 : 20		
房屋数	6 (2×3排布)		
测量条件			
	超声波水位仪	压力传感器	粒子追踪技术（PTV）
仪器精度(cm)	0.1	0.03	——

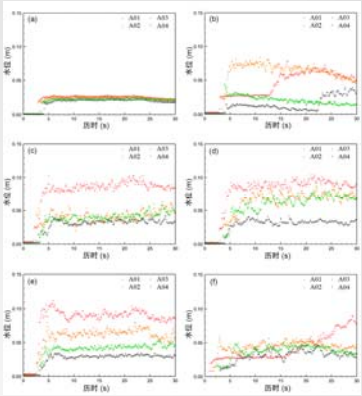
[实验条件]

24

建筑群对中心街道水位影响



［建筑群排列方案］



［A01~A04水位变化过程］

- 建筑群上游一直存在较高壅水，比单个建筑物造成的壅水位高；
- 建筑物间距与建筑物最小尺寸相同时，水位沿街道呈现稳定的梯级式下降；
- 建筑物间距增大后，水位沿道路几乎相同；
- 建筑群错落排列时，街道内部水流更加掺混。

25

2.3 城市洪水数值模型

- 控制方程

连续方程

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0$$

动量方程

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial\left(\beta q_x^{\,2}/H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\beta q_x q_y/H\right)}{\partial y}=-gH\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{g q_x\sqrt{q_x^{\,2}+q_y^{\,2}}}{H^2C^2}$$

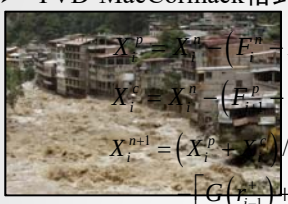
$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial\left(\beta q_x q_y/H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\beta q_y^{\,2}/H\right)}{\partial y}=-gH\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{g q_y\sqrt{q_x^{\,2}+q_y^{\,2}}}{H^2C^2}$$

- TVD-MacCormack格式

$$X_i^p=X_i^n-\left(F_{i+1}^n-F_{i-1}^n\right)\cdot\Delta t/\Delta x+S^n\cdot\Delta t$$

$$X_i^c=X_i^n-\left(F_{i+1}^p-F_i^p\right)\cdot\Delta t/\Delta x+S^p\cdot\Delta t$$

$$X_i^{n+1}=\left(X_i^p+X_i^c\right)/2+\left[G\left(r_{i-1}^-\right)+G\left(r_{i+1}^-\right)\right]\cdot\Delta X_{i+1/2}^n-\left[G\left(r_{i-1}^+\right)+G\left(r_i^+\right)\right]\cdot\Delta X_{i-1/2}^n$$



急流

缓流

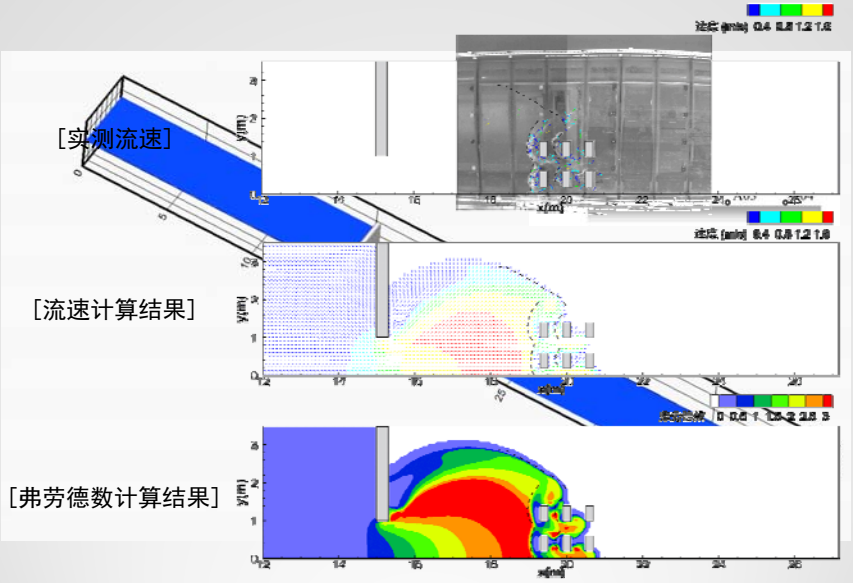
$$X=\begin{bmatrix}\eta\\ q_x\\ q_y\end{bmatrix}$$

洪水流动中急流和缓流均会出现

Liang D., Lin B., Falconer R.A., 2007. "Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-MacCormack scheme." International Journal for Numerical Methods in Fluids.

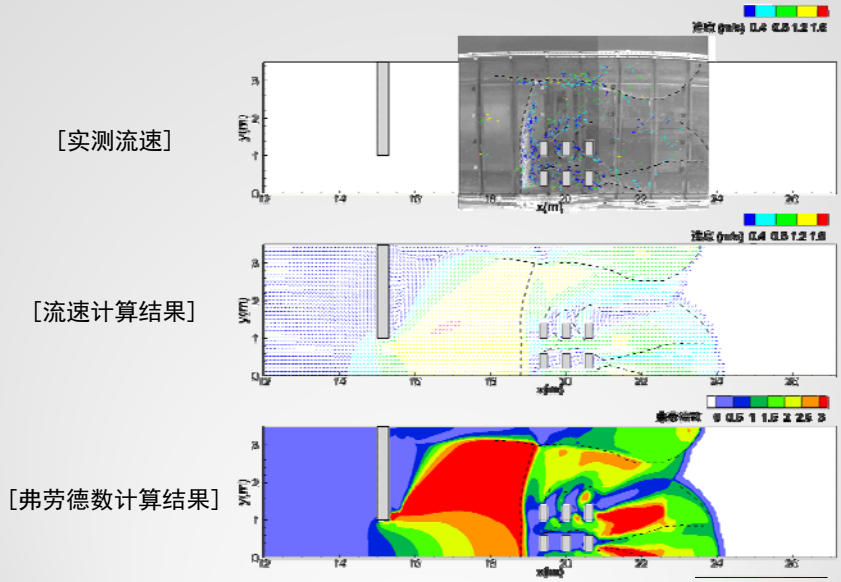
26

建筑群周围流场模拟与实测对比(t = 3.6 s)



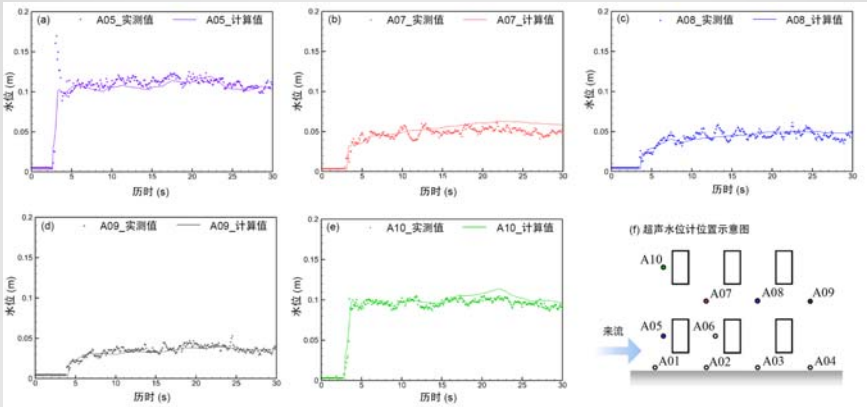
27

建筑群周围流场模拟与实测对比(t = 7.2 s)



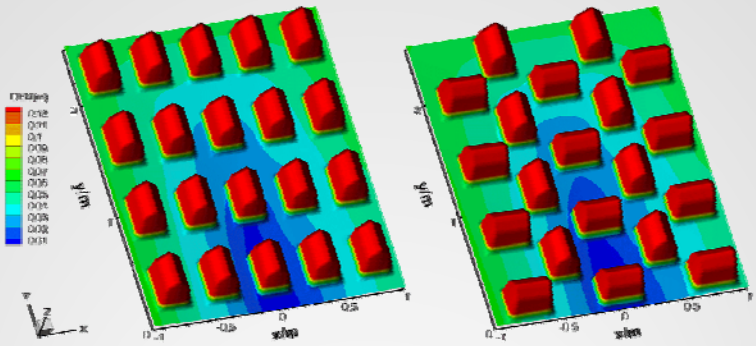
28

建筑群周围水位模拟与实测对比



计算水位与实测水位基本吻合。

降雨产生的地表漫流实验验证

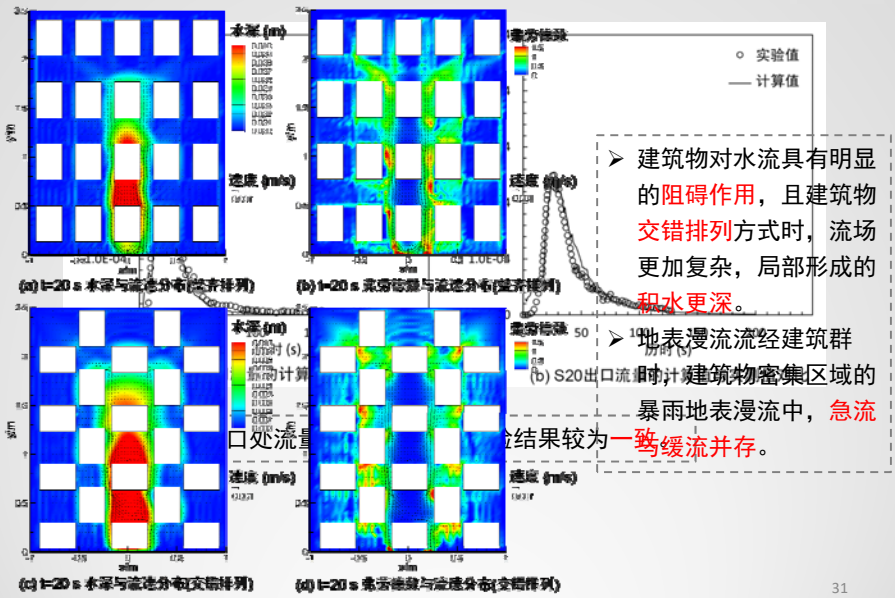


(a) 建筑物整齐排列　　(b) 建筑物交错排列

降雨产生条件：100个均匀分布的喷嘴

Cea L, Garrido M, Puertas J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas. Journal of Hydrology, 2010

降雨产生的地表漫流实验验证



- 建筑物对水流具有明显的阻碍作用，且建筑物交错排列方式时，流场更加复杂，局部形成的积水更深。
- 地表漫流流经建筑群时，建筑物密集区域的暴雨地表漫流中，急流与缓流并存。

口处流量 … 结果较为一致

31

小结

- 洪水波传播至建筑物上游附近后水位迅速升高，并伴随有振荡现象，房屋背面存在尾流区。房屋前门开启后屋前水位迅速下降，水流变为急流。
- 水流速度引起的动水压力和水深引起的静水压力对建筑物的作用效果随着建筑物到溃口的距离变化而变化。建筑物朝向也会影响水流对建筑物的作用效果，特别是水流速度引起的动水压力。
- 建筑群排列方式和间距对建筑群前雍水位、内部水位有影响。间距较小时，建筑群中心街道水位沿街道逐渐降低。
- TVD-MacCormack格式能够在堤坝溃决产生的快速洪水和暴雨产生的地表薄层水流的模拟中都具有较高的精度，准确模拟建筑群周围水流的水位、流速和洪水波传播，反映洪水水流的急流、缓流及其转变。

32

清華大學 Tsinghua University

目录

1 研究背景与意义

2 理想城市地表水流实验研究与模型验证

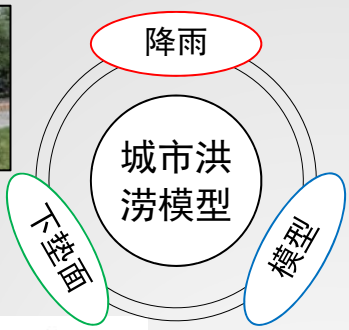
3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟

4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理

5 总结与展望

城市洪涝模型

气象站

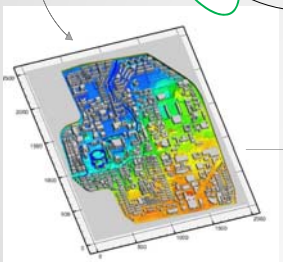


城市洪涝模拟的数据支撑

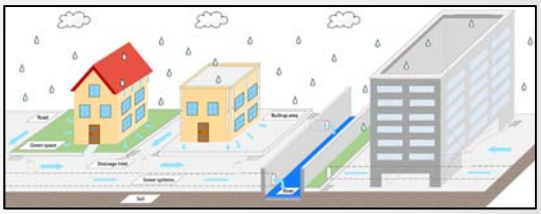
降雨数据

地形数据和地表水文参数数据

验证数据



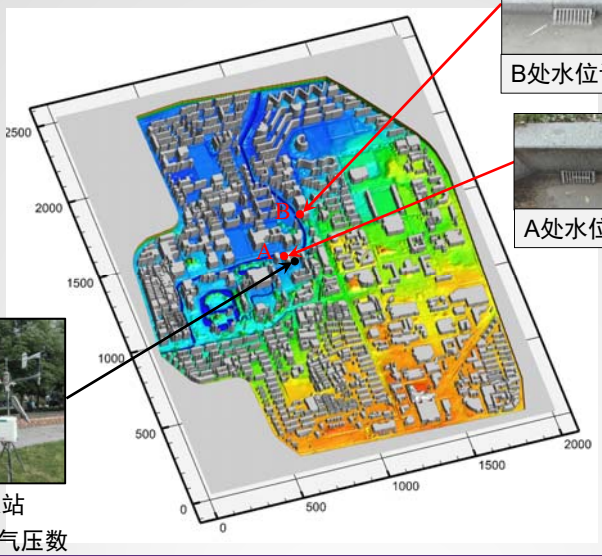
高分辨率地形

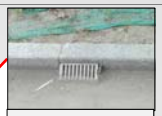


地表漫流过程的精细模拟

34

研究区域概况与数据采集





B处水位计

压强式水位计
（积水数据监测）

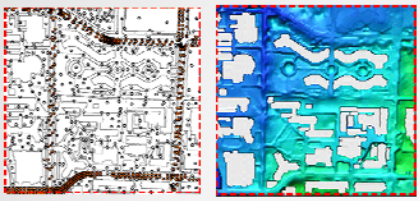
A处水位计

气象站
（降雨、气压数

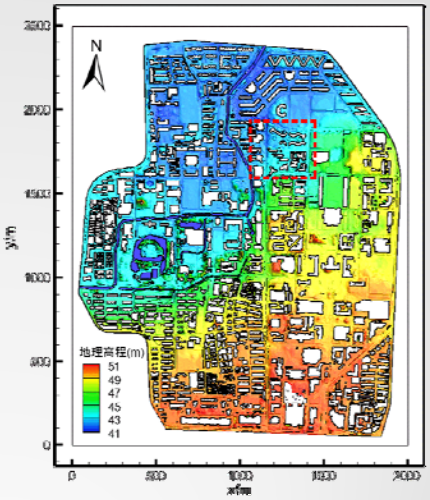
- 研究区域面积：3.63 km^2
- 管网排水能力：36-50 mm/h

研究区域地形高程

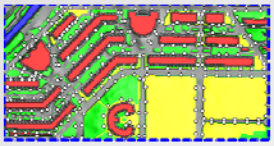
RTK
（Real time kinematic）



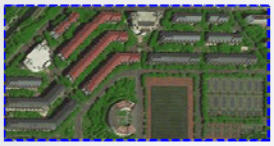
[经道路强化处理后的局部高程图]



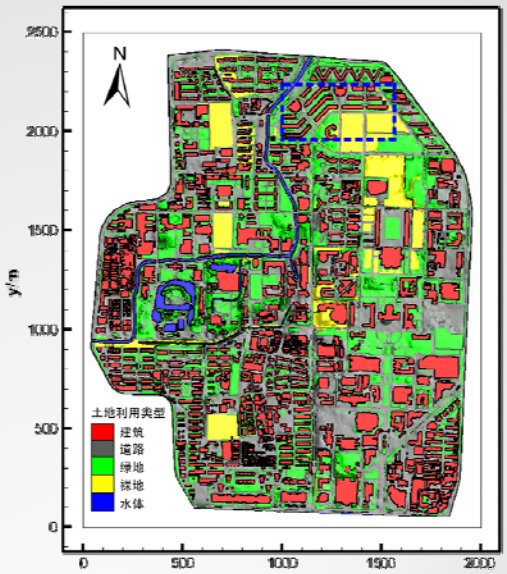
研究区域土地覆盖类型



[RTK测量雨水口位置图]



[卫星地图局部参照图]



37

积水点实测数据

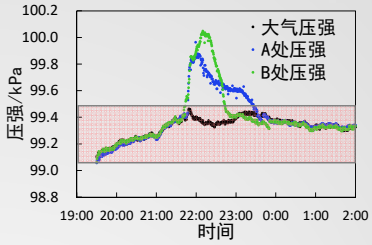
压强式水位计

压强 ⇨ 水深

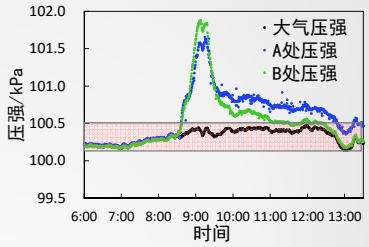
$$P_{gauge} = P_{air} + \rho_{water} g (H - h)$$

$$H = h + (P_{gauge} - P_{air}) / \rho_{water} g$$

大气压强在降雨过程中变化较大



[20170808实测大气、积水点处压强]



[20170811实测大气、积水点处压强]

38

数值模型

➢ 控制方程

降雨强度 下渗速率 排水速率

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial \eta}{\partial t}+\dfrac{\partial q_x}{\partial x}+\dfrac{\partial q_y}{\partial y}=R-f-d \\
\dfrac{\partial q_x}{\partial t}+\dfrac{\partial\left(\beta q_x^{\,2}/H\right)}{\partial x}+\dfrac{\partial\left(\beta q_x q_y/H\right)}{\partial y}=-gH\dfrac{\partial \eta}{\partial x}-\dfrac{g q_x\sqrt{q_x^{\,2}+q_y^{\,2}}}{H^2C^2} \\
\dfrac{\partial q_y}{\partial t}+\dfrac{\partial\left(\beta q_x q_y/H\right)}{\partial x}+\dfrac{\partial\left(\beta q_y^{\,2}/H\right)}{\partial y}=-gH\dfrac{\partial \eta}{\partial y}-\dfrac{g q_y\sqrt{q_x^{\,2}+q_y^{\,2}}}{H^2C^2}
\end{cases}
$$

［绿地］

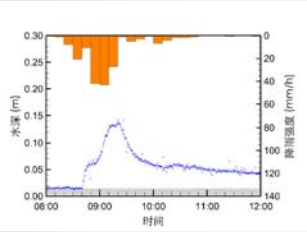
［雨水口］

［建筑物］

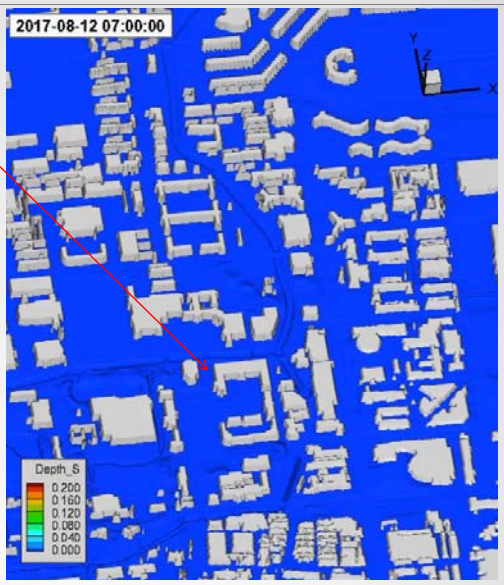
39

洪涝过程模拟

［A积水点附近积水情景］

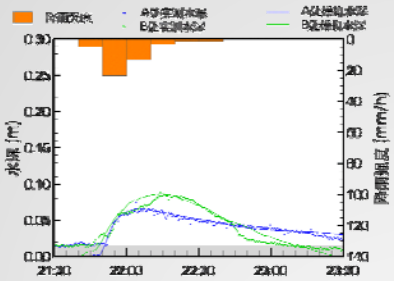


［20170812场次降雨中A积水点水深变化］

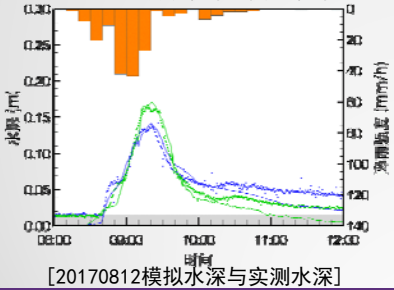


40

模型验证



[20170808模拟水深与实测水深]



[20170812模拟水深与实测水深]

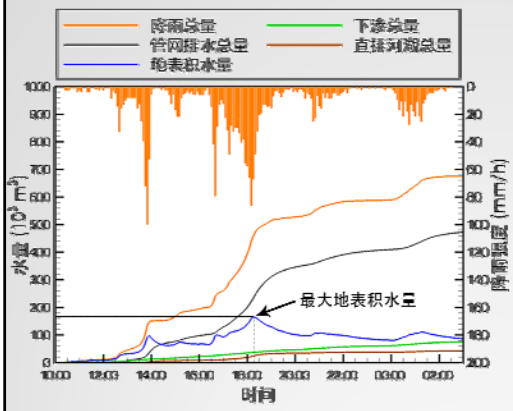
Nash-Sutcliffe效率系数：

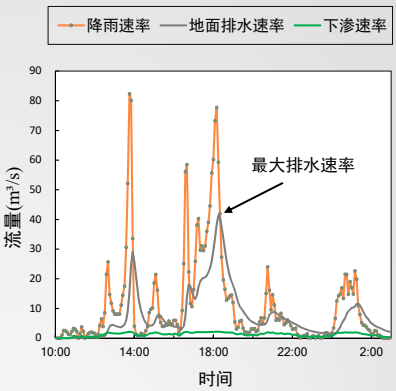
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(h_i^{sim} - h_i^{obs}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(h_i^{obs} - h^{ave}\right)^2}$$

- 率定A处和B处积水水深的Nash-Sutcliffe效率系数为0.92和0.89。
- 验证A处和B处水深的Nash-Sutcliffe效率系数为0.92和0.95。
- 构建的水动力学模型具有较高的准确性和可靠性。

41

“7.21”暴雨



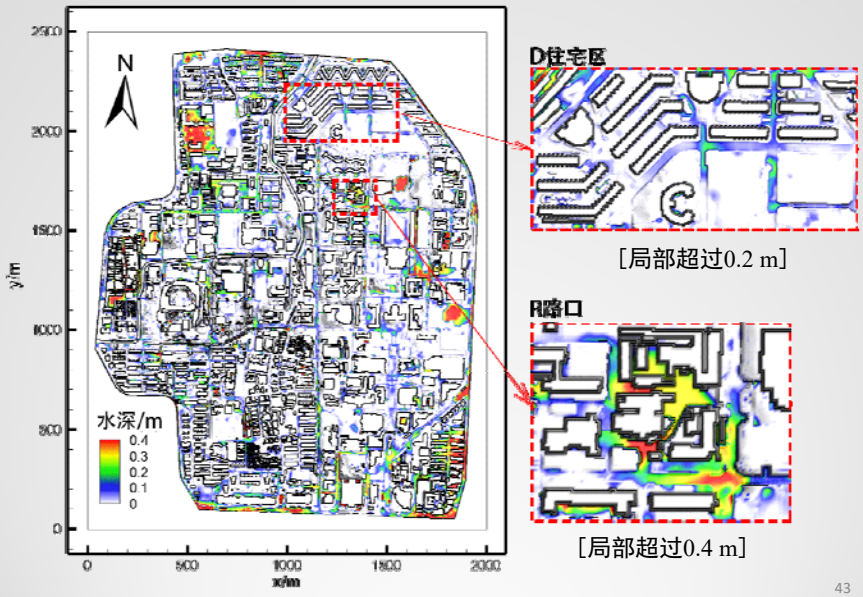


- 通过雨水口排走水量占总雨量70.0%
- 土壤下渗量占总量11.1%
- 降雨结束时地表积水占总量12.7%

- 地面排水速率最大值41.4 m³/s，即41.1 mm/h。
- 土壤下渗速率远小于排水速率。

42

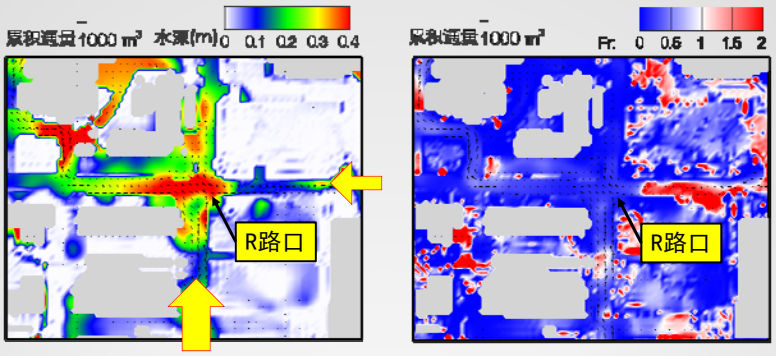
积水点分析



[局部超过0.2 m]

[局部超过0.4 m]

路口积水来源分析



南侧道路路面雨水流量较大，而东侧道路坡降较大，流态由急流在R路口转变为缓流，造成大量雨水汇聚在该路口，形成严重积水。

设计暴雨

暴雨强度	$q=\dfrac{167A(1+C\lg P)}{(t_d+b)^c}$

$a=167A(1+C\lg P)$

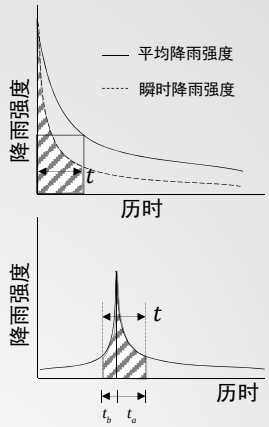
平均降雨强度	$\bar{i}=\dfrac{a}{(t_d+b)^c}$

$\bar{i}=\dfrac{1}{t_d}\int_0^{t_d} i(t)dt$

瞬时降雨强度	$i=\dfrac{a[(1-c)t_d+b]}{(t_d+b)^{c+1}}$

$t_b/r=t_a/1-r=t$

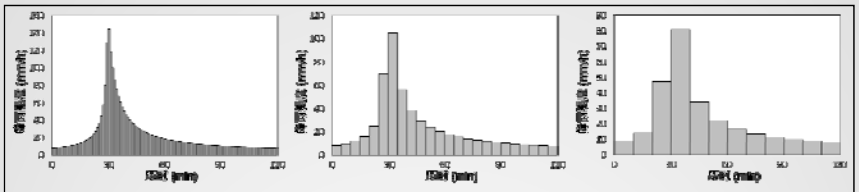
峰前降雨强度	$i(t_b)=\dfrac{a\left[\dfrac{(1-c)t_b}{r}+b\right]}{(\dfrac{t_b}{r}+b)^{c+1}}$
峰后降雨强度	$i(t_a)=\dfrac{a\left[\dfrac{(1-c)t_a}{1-r}+b\right]}{(\dfrac{t_a}{1-r}+b)^{c+1}}$



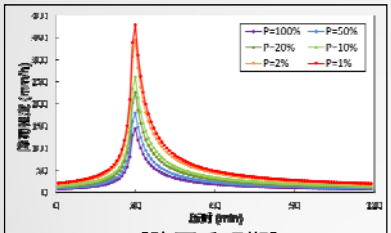
[芝加哥降雨过程线]

设计暴雨

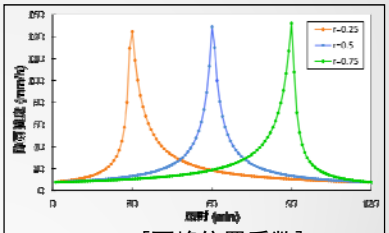
北京市暴雨强度公式： $q=\dfrac{12.006(1+0.8111\lg P)}{(t+8)^{0.711}}$



[降雨时间分辨率（1 min,5 min,10 min）]



[降雨重现期]



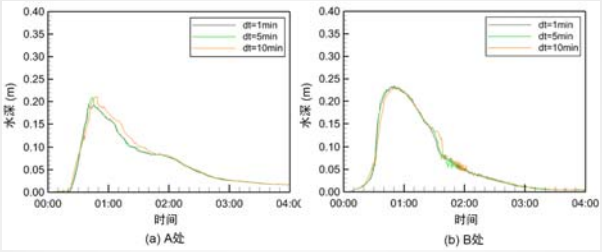
[雨峰位置系数]

降雨时间分辨率对洪水过程模拟影响

降雨观测的时间分辨率较低时，则会影响对降雨因素的描述，从而给地表漫流过程的输出带来较大的不确定性，特是在小区域的降雨汇流模拟中。

不同时间分辨率的降雨参数

时间分辨率	总降雨量（mm）	平均雨强（mm/h）	峰值雨强（mm/h）
dt = 1 min	45.7	22.9	144.4
dt = 5 min	45.7	22.9	105.1
dt = 10 min	45.7	22.9	80.7



降雨分辨率对积水点水深的模拟影响不显著。

[不同降雨时间分辨率下A、B处水深变化过程]

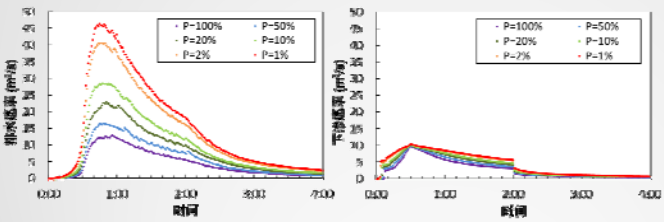
47

降雨重现期对洪水过程影响

不同重现期下降雨结束后水量分配

体积/（10^3 m^3）	P=100%	P=50%	P=20%	P=10%	P=2%	P=1%
降雨总量	163	203	255	295	387	427
管网内水量	65	85	114	142	199	224
土壤下渗	40	46	52	55	61	63
截留量	52	59	68	74	85	89
直接排入河湖水量	6	13	21	24	42	51
径流系数（河湖+管网内水量）	0.436	0.483	0.529	0.563	0.623	0.644

- 降雨重现期增大，径流系数增大。
- P=100%，土壤下渗量与排向管网水量相当，随着降雨重现期增大，土壤下渗量比例缩小。

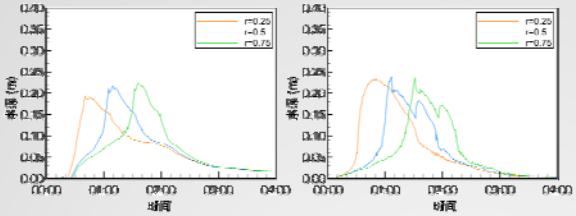


(a) 不同重现期下雨水口排水速率　(b) 不同重现期下土壤下渗速率

降雨重现期由P=100%增大至1%，最大排水流量变化范围为12.7~46.2 m³/s，而最大土壤入渗速率变化范围较小，为9.7~10.3 m³/s。

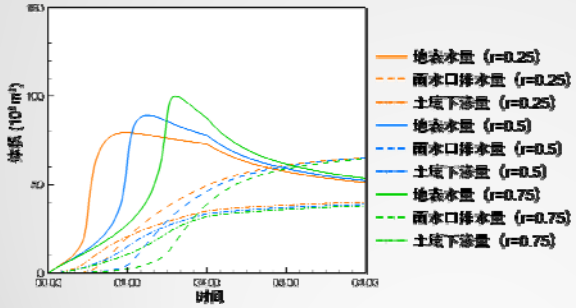
48

雨峰位置对洪水过程影响



[不同雨峰位置下A、B处水深变化过程]

雨峰位置影响积水点最大水深。



[不同雨峰位置下水量变化过程]

雨峰位置靠后，地表水量最大值增大，但降雨结束后各部分水量基本不变。

49

小结

- 本章对地表高程尤其是道路部分的高程进行了精确测量，是地表漫流过程模拟的数据保证，此外收集雨水口的位置信息、计算雨水口的实际排水流量，并考虑建筑屋顶雨水的产汇流过程，精细地反映了微观地表特性。地表积水点的模拟结果与实际积水过程吻合较好，表明该模型具有较高的可靠性。
- 本章利用压强式水位计测量校园中易涝点在降雨中的水深和大气压强，结果显示大气压强在降雨过程中的变化幅值较大，同时测量可以显著地提高水深值的精度。
- “7.21”特大暴雨情景下地面雨水口排水流量随降雨过程而改变。地面排水总量约为雨水总量的70%。
- 降雨数据的时间分辨率取1 min、5 min和10 min对地表积水过程影响较小。雨峰位置会影响地表最大水量。重现期增大，径流系数增大。排水口排水速率随重现期增大而显著增大，而土壤入渗速率变化范围较小。

50

清華大學 Tsinghua University

目录

1 研究背景与意义

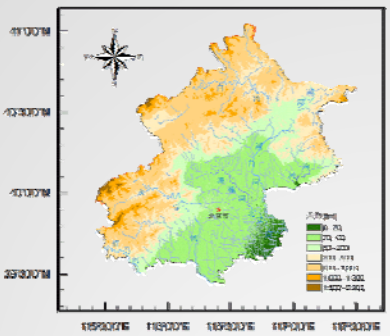
2 理想城市地表水流实验研究与模型验证

3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟

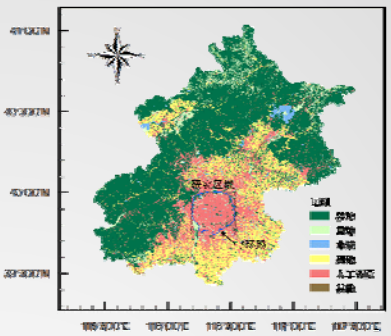
4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理

5 总结与展望

研究区域



[北京市地形]



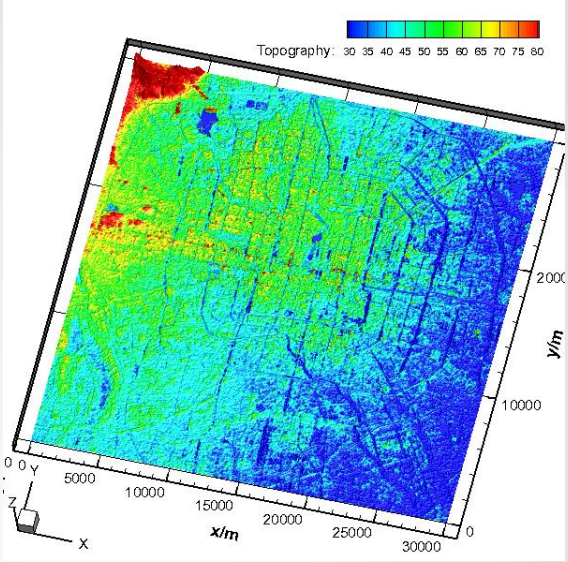
[北京市土地利用]

- 北京市平原面积约占全市面积39%，坡降为1‰~3‰，海拔20~60 m。
- 北京市五环内区域的不透水率高达84%，是最易受洪涝灾害影响的区域。
- 研究区域覆盖五环及内部区域(30 km ×30 km) 。

52

地理高程数据与处理

- 基础数据：30 m DEM
- 存在大量非真实洼地，需要处理
- ARC/INFO中基于D8算法的填洼处理后会使地形中出现大片平坦区域，产生非真实流态。

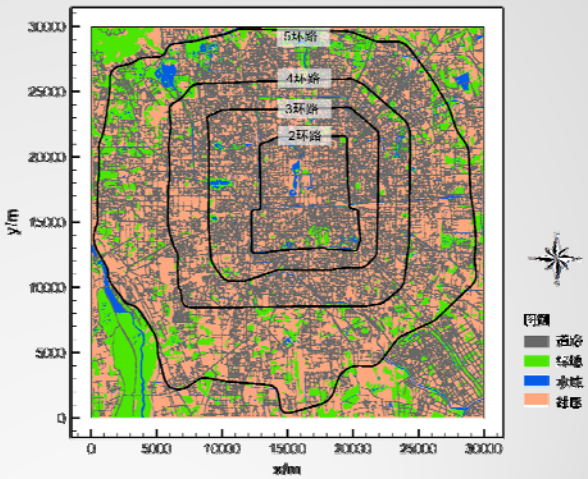


53

地理高程数据与处理(1)

- 提取北京市城区道路，表征水流汇流路径
- 根据北方道路断面设计，设定道路高程低于周围地面0.2 m
- 建筑物与周边空地作为整体（社区），研究区域被重新划分为道路、社区、绿地和水体四部分

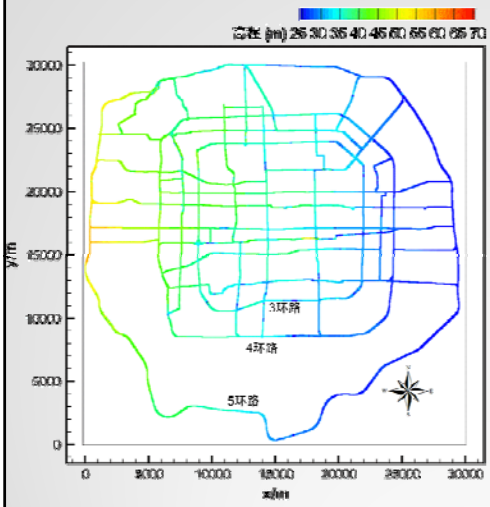
道路密度从高度发达的中心城区地带向郊区递减



[北京市城区土地利用类型]

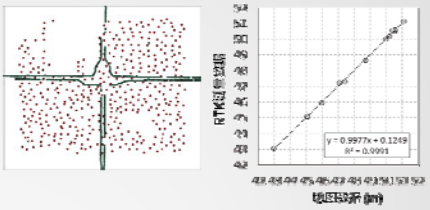
54

地理高程数据与处理(2)



[北京市城区道路的高程测量]

车载 RTK

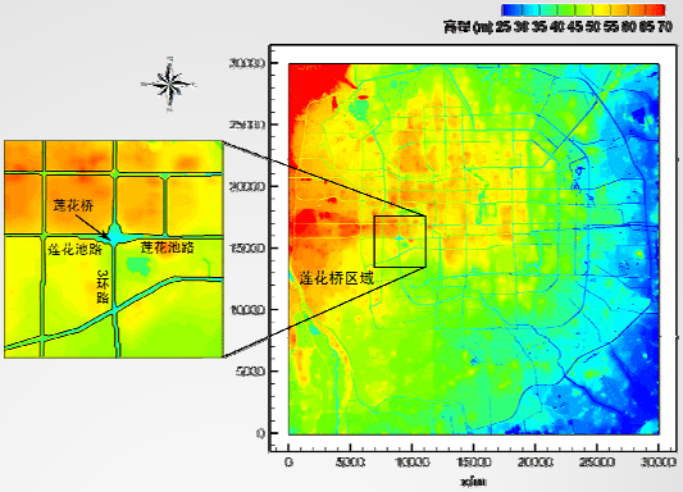


[测量数据与地图数据的对比]

道路测量与测绘图数据吻合较好

55

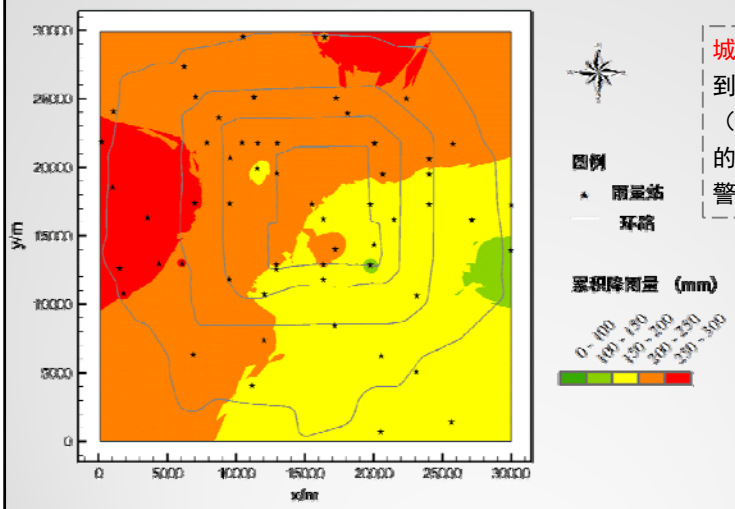
地理高程数据与处理(3)



[精度提高后的地表高程模型]

56

降雨资料与数据处理（“7.21”暴雨）



城区94%的雨量站达到橙色以上预警级别（40 mm/h），31%的雨量站达到红色预警级别（60 mm/h）

[雨量站分布和累积降雨量]

57

“7.21”暴雨积水资料

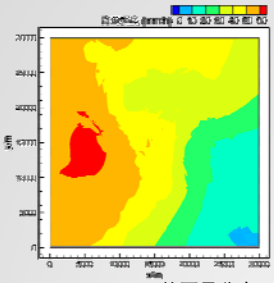
城区内涝点积水状况：

- 研究区域内共51处严重积水点，大部分位于下凹式立交桥和道路交叉路口
- 约55%内涝点出现在三环路以内

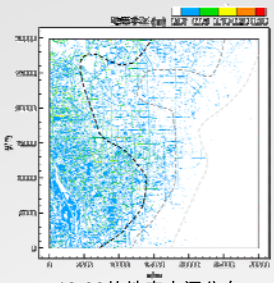
[北京市城区内涝点位置和积水深度]

58

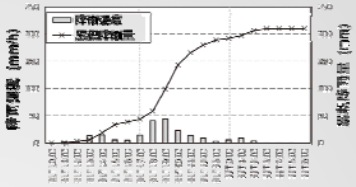
“7.21”暴雨模拟结果

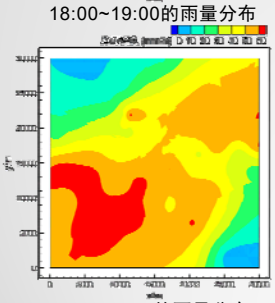


18:00~19:00的雨量分布

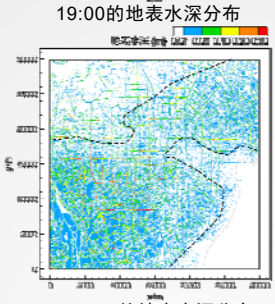


19:00的地表水深分布





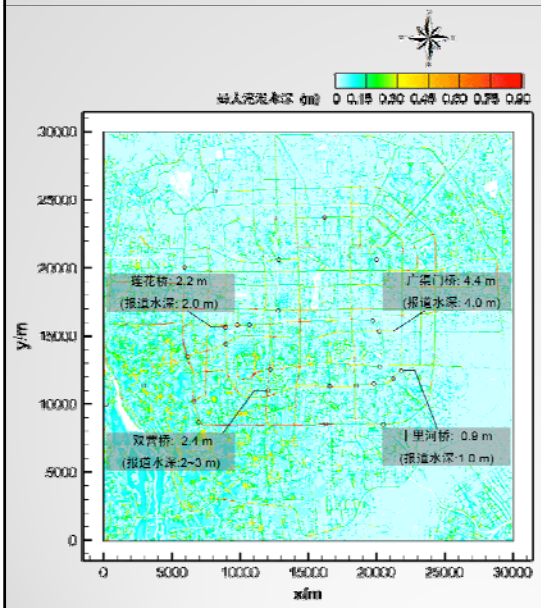
19:00~20:00的雨量分布



20:00的地表水深分布

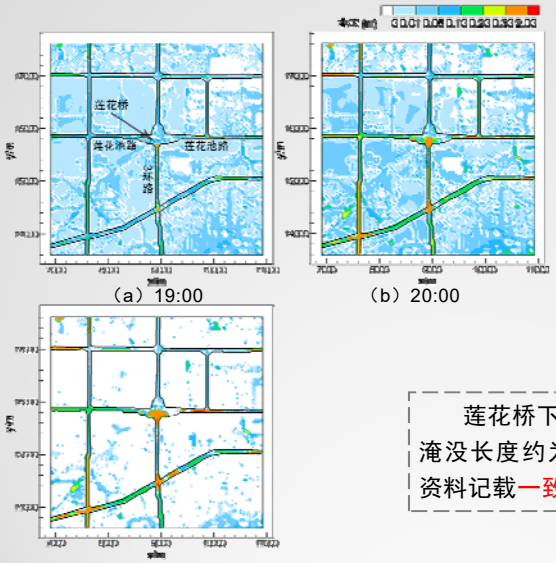
- 降雨在城市尺度上分布不均
- 地表积水深度的空间分布与降雨强度的空间分布大体一致
- 雨水在城市大尺度上的流动特征不明显

“7.21”暴雨最大淹没水深



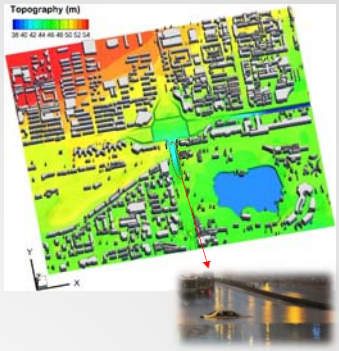
- 主要以局部内涝的形式分散在道路较低部分。
- 研究区域内淹没水深在0.3 m以上的积水点在四环路以内区域有25处，模型对其中72%的内涝点进行了正确的预测。

“7.21”暴雨典型下凹区域积水过程



（a）19:00　（b）20:00

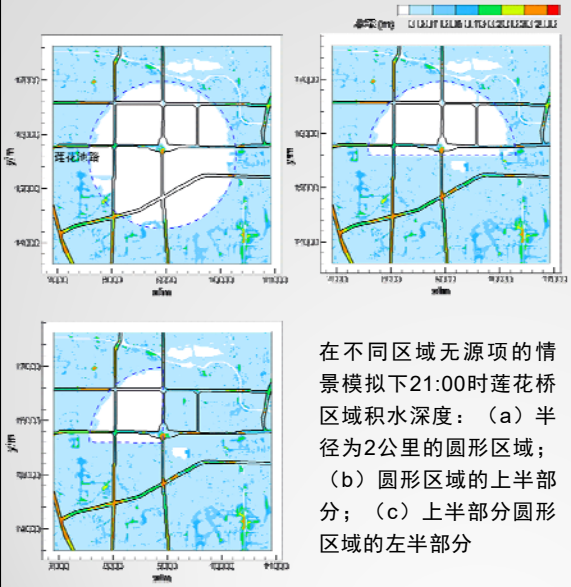
（c）21:00

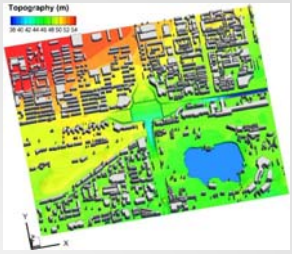


莲花桥下最大水深超过2 m，淹没长度约为400 m，与积水资料记载一致。

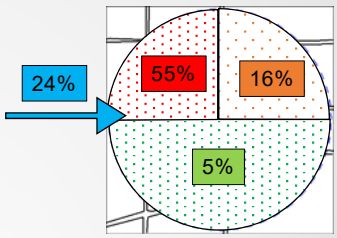
61

“7.21”暴雨典型下凹区域积水来源分析



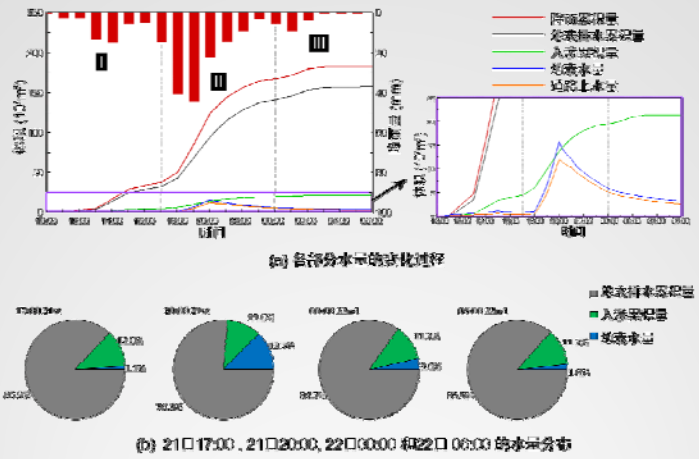


在不同区域无源项的情景模拟下21:00时莲花桥区域积水深度：（a）半径为2公里的圆形区域；（b）圆形区域的上半部分；（c）上半部分圆形区域的左半部分



62

“7.21”暴雨水量分析



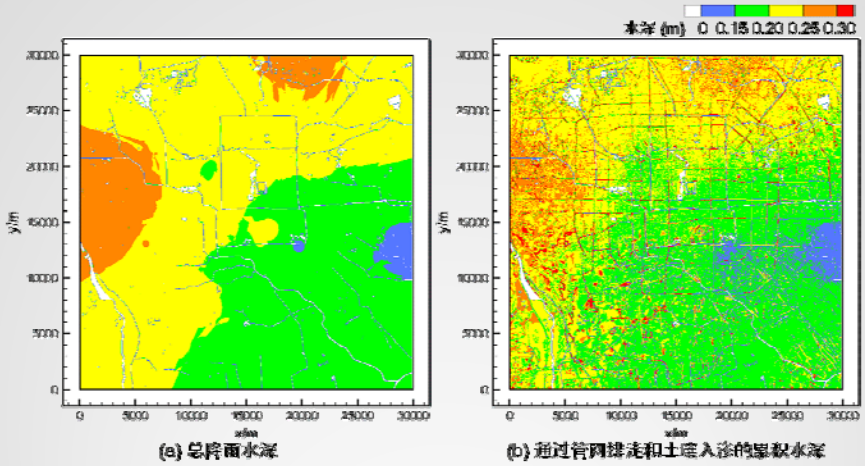
(a) 各部分水量的变化过程

(b) 21□17:00、21□20:00、22□00:00 和22□06:00 的水量分布

- 86.5%的总水量进入排水系统，在强降雨结束时地面水量仅占总水量的3.6%
- 入渗量占总水量的11.7%左右

63

“7.21”暴雨水量分析



(a) 总降雨水深

(b) 通过管网排走和土壤入渗的累积水深

较多水量需要通过道路上的排水系统排走，排水系统的洪涝脆弱性更突出。

64

小结

- 在“7.21”强降雨条件下，北京市城区排水系统总体效率较高。在降雨强度达到峰值期（21日19:00~20:00）后，12.7%的总降雨量分布在地表。而后大量积水通过排水管网系统迅速排走，强降雨时段结束时（22日00:00），地表水量占总水量的3.6%。
- 复杂的路网在地表径流输送中发挥了重要作用，同时也对道路下方的排水系统施加了更大的排水压力。内涝点通常发生在人口密度较高的城市地区，主要分布在道路的低洼区域，如下凹式立交桥和道路交叉口。
- 内涝点积水与局部地形、降雨强度紧密相关。附近社区和道路流向内涝点的雨水是积水的主要来源，从2公里以外流至内涝点的雨水占较小的比例。

65

清華大學 Tsinghua University

目录

1 研究背景与意义
2 理想城市地表水流实验研究与模型验证
3 复杂下垫面洪涝过程的高精度模拟
4 北京城区洪涝过程及内涝点形成机理
5 总结与展望

总结和展望

通过上述三部分内容，本论文研究的主要结论如下：

- 通过物理实验重现洪水通过单个建筑物和建筑群的运动过程。建筑物前都一直存在较高的雍水，伴随有振荡现象。动水压力和静水压力对建筑物的作用与建筑物到溃口距离、建筑物朝向相关。建筑群内部间距较小时，水位沿街道逐渐下降。
- 通过对地表尤其是道路高程进行测量，并考虑建筑物和雨水口等微地形对汇流影响，本研究采用水动力学方法建立了复杂城市下垫面的高分辨率地表漫流模型，结果表明该模型能够较准确的预测积水点水深变化过程。大气压强在降雨过程中的变化幅值较大，同时测量可以显著地提高水深值的精度。
- 在“7.21”强降雨条件下，北京市城区排水系统总体效率较高。大量积水通过排水管网系统、河流和土壤迅速排走，强降雨时段结束时地表水量占总水量的3.6%。北京市内涝点主要分布在下凹式立交桥下区域。内涝点积水与局部地形、降雨强度紧密相关，2公里内社区和道路流向内涝点的雨水是积水的主要来源。

67

总结和展望

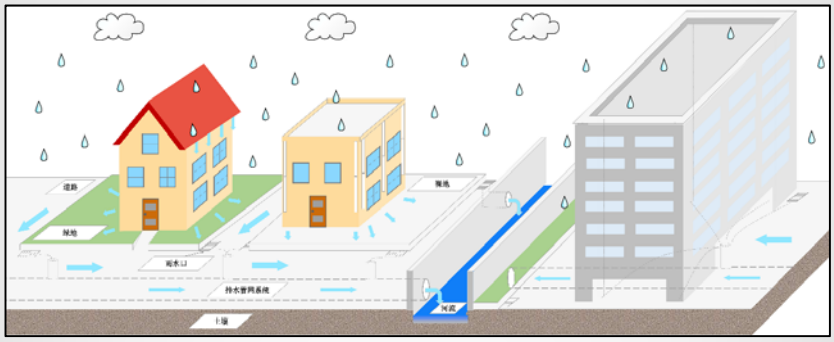
- 基于TVD-MacCormack数值方法建立适用于模拟城市暴雨径流的数学模型，对一大型城市与一大学校园的暴雨地表漫流过程分别进行了模拟和分析，阐明了建筑物、道路、绿地和雨水口等城市地物影响下的地表水流运动过程。
- 采用压强式水位计能够测量积水点水位，且发现了大气压强在降雨过程中的变化幅值较大，可达到积水压强的量级，同时测量可以提高水深值的精度。
- 采用二维水动力学模型模拟了典型暴雨过程引起的城区地表内涝过程，反演了媒体报道的水深在0.3 m以上的72%的严重内涝点，揭示了北京城区内涝点积水与局部地形、降雨强度的关联机制。

68

总结和展望

未来的研究中，可以进一步完成以下内容：

- 本论文建立的城市洪涝模型着重于地表漫流过程的模拟，没有考虑 管网汇流过程。在目前模型的基础上，与现有的一维地下管网模型进行耦合，能够更加全面反映从降雨产流到地表漫流再到地下管网汇流以形成河道汇流的过程。



69

清華大學
Tsinghua University

谢谢！