水　利　学　报
2021年6月　SHUILI　XUEBAO　第52卷　第6期

文章编号：0559-9350(2021)06-0659-14

基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究

陈文龙[1]，徐宗学[2]，宋利祥[1]，张大伟[1]，刘　培[1]
（1. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究院，广东 广州　510611；2. 北京师范大学 水科学研究院，北京　100875）

摘要：针对传统城市洪涝治理洪、涝孤立考虑的弊端，在广州市2020年“5·22”特大暴雨洪涝成因分析的基础上，提出了“洪涝同源”的流域系统整体观，建立了统一市政和水利设计雨型的“大包小、长包短”方法，构建了“城市海绵-市政小排水系统-水利大排水系统”耦合的城市洪涝模拟模型。以广州市某区域洪涝治理为例，研究表明，基于流域系统整体观进行工程布局优化，既满足高度城市化地区经济性和约束性原则，也可实现系统治理、整体达标，有效避免了传统洪涝分治模式存在“因洪致涝、因涝致洪”的弊端，为我国城市洪涝治理提供了新思路。

关键词：流域系统整体观；洪涝共治；雨型；洪涝模拟
中图分类号：TV213.4　**文献标志码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200750

1　研究背景

近年来，我国城市洪涝频发，已成为影响城市公共安全的突出问题和制约社会经济可持续发展的重要因素。陈文龙等[1]针对广州“5·22”特大暴雨洪涝灾害，立足整体观和系统观，从降雨强度、城市建设、城市小排水系统、城市大排水系统、外江潮汐影响等五个方面解析了广州城市洪涝成因，并分析了传统城市洪涝治理模式“洪归洪，涝归涝，水利市政背靠背”的弊端。

设计雨型描述了暴雨强度过程，不同的设计雨型对产汇流及调蓄计算均有重要的影响，是城市洪涝灾害防治规划的基础[2]。国外对雨型研究起步较早，已有较多研究成果[3]。国内对设计雨型研究起步相对较晚，主要集中在水文和城市规划领域，且不同研究领域对设计雨型选样、场次划分、场雨间隔时间、雨型的选择均有不同的理解和争议[4]。目前，市政部门一般采用超定量法、年多次法，主要研究5 min间隔3 h的短历时设计雨型；水利部门一般选取年最大值法，主要研究1 h间隔1 d ~ 60 d等较长时段的设计雨型[5]。由于采用不同的采样方法，水利和市政部门的设计暴雨成果存在一定差异性，其中，水利长历时降雨的总量较大，而市政短历时降雨的峰值较大。针对该问题，近年来学者从暴雨重现期衔接关系[6]、设计洪水计算方法[7-10]、暴雨时空分布规律[11]方面开展了大量研究。总体而言，目前市政排水和水利排涝的设计雨型仍无规范统一方法，亟需构建两者的衔接关系，以确保洪涝共治对策的有效性。

城市洪涝模型是城市洪涝灾害防治设施工程规划与设计、洪涝风险评估与预警预报的科学基础，长期以来是国内外研究的热点问题，主要集中在城市化对径流特性的影响分析、城市洪涝模拟等方面[12]。张建云等[13]系统归纳了城市化水文效应评估方法和技术手段，剖析了水循环过程对快速城市化进程的响应机制。宋晓猛等[14]从城市雨洪模型构建的角度，阐述了各种城市雨洪产汇流计算方法的特点、适用性和局限性，提出了城市雨洪模型的概念性框架与基本流程。蒋卫威等[15]从降水

收稿日期：2020-09-21；网络首发时间：2021-03-15
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210312.1530.002.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51809297)；国家重点研发计划项目(2018YFC1508200)；广州市科技计划项目(201906010078)
作者简介：陈文龙(1977-)，教授级高级工程师，主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail：longyancwl@163.com

时空变异性、人工基础设施、下垫面空间变异性等三个方面，总结了城市水文与水动力过程对变化环境与人类活动的响应机制。徐宗学等[16]详细总结了城市化水文效应、城市产汇流理论、城市雨洪模型等方面的国内外研究进展，指出城市化水文效应与产汇流理论是当前和未来一段时间研究的重点和难点之一。刘家宏等[17]考虑不同透水性地面的差别和地下建筑物对入渗过程的影响，将城市区域细分为不透水、透水、半透水、伪透水、强透水等单元，建立了城市水文模型。李娜等[18]将SCS法降雨产流模型与地面二维水力学模型进行耦合，用于评估低影响开发措施内涝削减效果。戎贵文等[19]提出了屋面雨水源头调控技术，为实现雨水就地积存、渗透提供了支撑。目前已有学者提出并建立了河道–管网–地表耦合的城市洪涝模型[20-23]并用于城市洪涝治理，但是，基于流域系统整体观，在考虑经济性和用地空间约束性条件下洪涝治理工程优化布局方面有待进一步研究。

针对传统城市洪涝治理模式存在的弊端，本文通过广州市城市洪涝成因分析，以高度城镇化的小流域为对象，基于“流域树”结构，提出了“洪涝同源”的流域系统整体观，统一了市政和水利设计雨型，建立了“城市海绵–市政小排水系统–水利大排水系统”耦合的城市洪涝模型，力求准确地模拟城市洪涝过程，合理评估洪涝防治多元措施的效果，为城市洪涝灾害防治提供技术支撑。

2　城市洪涝的流域系统整体观

2.1　广州市城市洪涝成因分析　在广州2020年“5·22”特大暴雨洪涝灾害调研的基础上，本文把广州城市洪涝成因归结为五个方面。(1)短历时强降雨是造成城市内涝的直接原因。“5·22”特大暴雨具有强度大、范围广和面雨量大的特点。降雨强度远超广州市现状河涌排涝能力和城市排水管网排水能力；(2)广州是高度城市化城市。在城市建设导致的“硬底化”影响下，广州的地面径流系数由0.3～0.5增大到0.6～0.9，暴雨汇流速度加快，“龙舟水”径流峰值出现时间提前了1～2 h；同时城市建设导致农田、池塘、河道、湖泊等“天然调蓄池”被填平、占用，城市的自然调蓄能力大幅下降；(3)排水管网的排水能力不足。当降雨强度超过排水管网设计规模时，地下管道无法及时将地面雨水排除，导致地表产生积水，发生内涝。目前，广州新城区排水管网按3年一遇标准设计，而老城区83%左右排水管网为1年一遇标准，仅9%达到2年一遇标准。另外，城市建设截断排水管网，破坏排水系统，老城区排水系统老化失修，淤积堵塞严重，进一步降低了排水能力；(4)河道行洪能力不足。城市河道承接上游山洪及两岸排水区汇水，排入外江河道。目前广州市许多内河水系尚不能满足10年一遇的排涝标准，行洪能力不足。河道中的各类阻水桥涵以及垃圾倒弃等使得原本不足的行洪空间被进一步占用，加大了两岸洪涝灾害发生的概率；(5)外江高水位的顶托。如强降雨遭遇外江天文大潮或风暴潮，外江高潮位顶托使得城市河道洪水不能及时排入外江，河道长时间维持高水位，排水管网排水能力大幅度下降，出现内涝。在广州2020年“5·22”特大暴雨灾害调研基础上，本文提出了城市洪涝治理的流域系统整体观，包括“流域树”、洪涝同源、洪涝共治等核心理念。

2.2　“流域树”结构　大的城市往往可以划分为若干流域分区，流域集雨面积一般都不大，流域大范围同时发生暴雨的可能性很大，因此城市防洪排涝体系的研究要以流域为单元。传统的城市防洪排涝体系由排水系统(又称小排水，包括排水管网、雨水泵站等)和排涝系统(又称大排水，包括城市河网、水库、湖泊等)构成。地面降水通过排水系统汇入排涝系统，最终直排或泵排到外江。随着2012年海绵城市概念的提出，城市洪涝治理的理念发生了质的飞跃。城市海绵(如绿地、渗水道路、下凹式广场等)也成为城市防洪排涝体系的有机组成部分，也就是说，现代城市的防洪排涝体系包括城市海绵、排水系统和排涝系统三部分。城市防洪排涝体系是由“地–管–河”构成的“流域树”(如图1所示)，城市河网构成树干和枝杈，排水分区为树叶(地面、城市海绵、地下排水管网)。

2.3　洪涝同源　一般把地面雨水排除不及而成灾的积水称之为涝，河道水漫溢造成的水淹称之为洪。洪涝同源有两个内涵：(1)城市小流域集雨面积一般都不大，大范围同时发生暴雨的可能性很大，所以城市洪涝治理规划一般应考虑全流域同时降雨；(2)流域是一个有机的整体。从纵向看，城市河网上中下游、干支流相互联系，上游流量大，则下游水位高，下游水位高又会顶托上游来水。

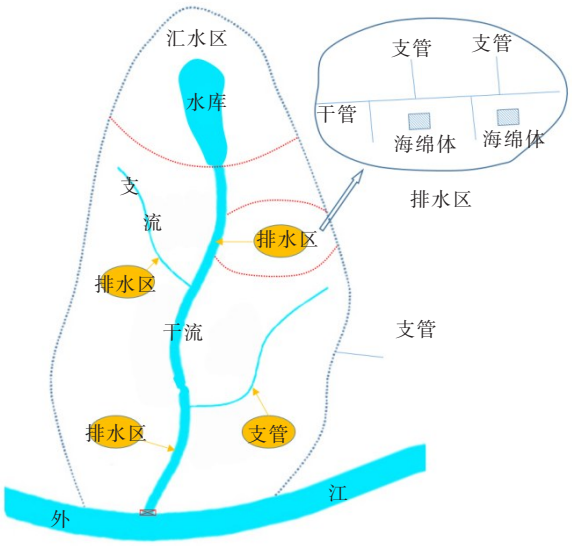


图 1 “流域树”结构示意

从横向看，“地–管–河”相互耦合，地面排水快，管网流量大；管网的水流的慢，地面就会积水。管网排水快，则河道水位高；河道水位高，又会顶托管网排水，甚至满过堤顶造成水淹。因此，流域是纵向来水和横向来水相互交错的有机整体，洪和涝相互交织，相生相伴。

2.4 洪涝共治 长期以来，由于水利和市政是两个独立的行政部门，水利和市政又分属两个不同的学科专业，市政和水利分别独立按各自的规范进行设计：城市排水标准按照《室外排水设计规范》，针对产生于城市内较小汇水面积上较短历时的雨水径流进行排除；城市排涝标准按照《城市防洪工程规划规范》，针对解决较大汇流面积较长历时暴雨产生的涝水排放。“洪归洪，涝归涝”的治理模式，就导致洪涝治理不衔接，忽略城市海绵、小排水和大排水的系统性，主要表现在：(1)市政排水和水利排涝设计采用的设计雨型不统一，导致对于同样的致灾要素(降雨)采用了两个不同的标准；(2)未充分考虑排水系统和排涝系统互为边界条件，市政排水设计主要考虑局部排水区的降雨强度，对承泄区河道的水位顶托考虑不足；水利则一般按照流域面积计算产汇流，无法充分考虑地面的水文物理性质和产汇流格局。不衔接的各自达标不等于整体设防达标。如河道设计洪水位高，就单一的加高堤防，高水位行洪又会降低排水系统的排水能力；管网的排水能力不足，一味提高排水管网标准，加大排水流量的同时相当于把风险转嫁到河道下游。

洪涝同源意味着洪涝治理必须洪涝共治。一是要树立防洪排涝体系整体设防达标的概念。城市洪涝相生相伴，不能刻板地界定洪涝的边界。城市内涝防治标准，是指在发生相应频率 24 h 设计暴雨工况下，城市海绵、小排水系统和大排水系统整体设防、综合协调作用下达到城市内涝防治要求。二是城市洪涝治理必须从流域尺度，统筹城市海绵、小排水系统和大排水系统三大要素加强“流域树”建设，按照因地制宜的原则把现有的“流域树”培育得更加粗壮、结构更加合理。(1)树枝和树杈建设。如新建水库或水库挖潜(疏浚水库或降低水库溢洪道高程)，拦蓄进入城市的山洪；把湿地公园改造为临时蓄滞洪区，河道流量大时，可以分洪；加高堤防、拓宽河道，增强河道行洪能力等。(2)树叶建设：管网扩容，增强管网的排水能力；建设蓄水池或利用下凹式广场，实现错峰功能等。(3)建立科学模拟“洪涝同源”的城市洪涝计算方法，关键是统一市政排水和水利排涝的设计雨型和建立“城市海绵–小排水–大排水”耦合水文水动力模型，以科学指导洪涝评估和洪涝治理布局。

3 统一市政排水和水利排涝的设计雨型

市政排水设计暴雨多采用年多个样本法，每年选取 6 ~ 8 个降雨样本，然后将暴雨样本不论年份从大到小进行排序，选择 3 ~ 4 倍的年数样本数后，采用经验频率计算公式进行计算。水利排涝设计

暴雨采用年最大样本法，每年选取一个最大样本，然后对样本系列进行由大到小排序，采用经验频率计算公式进行计算。由于样本选取方法及统计采用的雨量站不同，水利与市政设计成果有一定的差异，导致小排水与大排水衔接不匹配。基于洪涝治理的流域系统整体观，为更好统筹小排水和大排水，必须统一设计雨型。同时，从偏安全角度考虑，采用的设计雨型须同时兼顾水利长历时降雨的量和市政短历时降雨的峰，即降雨过程统一，长历时降雨涵盖短历时降雨。本文以广州某流域设计雨型为例加以说明。

3.1 基于“大包小”概念的暴雨强度 目前已有《广州市中心城区暴雨强度及计算图表》(2011年，市政，以下简称“暴雨强度公式”)和《广东省暴雨参数等值线图》(2003年，水利，以下简称“等值线图”)等设计暴雨成果，前者从市政角度出发，可推求历时3 h以内暴雨强度，后者从水利角度出发，可推求1 h间隔24 h降雨过程。设计暴雨成果见表1。

表1 A流域“暴雨强度公式”和“等值线图”设计暴雨成果 (单位：mm)

重现期	暴雨强度公式			等值线图				
	10min	1h	3h	10min	1h	3h	6h	24h
100年	43	114	189	50	127	190	235	347
50年	41	106	172	46	114	173	212	312
20年	37	95	147	39	98	147	180	263
10年	33	85	126	34	84	122	155	226
5年	30	75	108	29	71	102	128	187

由表1可知，重现期为100年、50年和20年一遇时，“等值线图”设计暴雨均大于“暴雨强度公式”；重现期为10年时，10 min“等值线图”设计暴雨大于“暴雨强度公式”，1 h、3 h设计暴雨相反；重现期为5年时，“等值线图”设计暴雨均小于“暴雨强度公式”。综合“暴雨强度公式”和“等值线图”成果，采用“大包小”方法统一两者设计暴雨，见表2。

表2 A流域设计暴雨成果 (单位：mm)

重现期	10min	1h	3h	6h	24h
100年	50	127	190	235	347
50年	46	114	173	212	312
20年	39	98	147	180	263
10年	34	85	126	155	226
5年	30	75	108	128	187

3.2基于“长包短”概念的暴雨过程 根据《广东省暴雨径流查算图表》(1991年)，A流域位于珠江三角洲I区，可得逐时设计雨型，在保证各历时降雨与设计暴雨一致的前提下，采用“长包短”的方法进行1 h、3 h、6 h和24 h分段控制，并进行归一化处理，见表3。

表3 A流域分时段控制设计雨型 (单位：mm)

时程	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h
占H_1/%										100		
占(H_3−H_1)/%									53.1		46.9	
占(H_6−H_3)/%							25.7	39.2				35.1
占(H_{24}−H_6)/%	1.5	2.9	3.6	8.8	10.7	11.3						
时程	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
占(H_{24}−H_6)/%	9.7	7.8	8.8	5.5	5.4	4.8	3.3	3.3	2.5	4.0	3.6	2.7

在表3的基础上，按照10 min及逐小时控制各频率设计雨量，利用暴雨公式 $H_{tp}=S_P\times t^{1-n_p}$，得

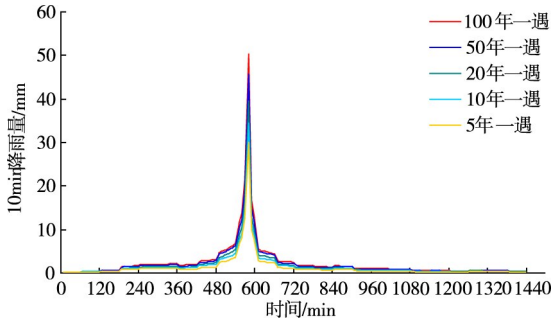


图2　A流域设计暴雨过程

到逐10 min降雨过程，见图2。

4　“城市海绵–小排水–大排水”耦合水文水动力模型

4.1　城市洪涝水文水动力耦合模型　基于城市洪涝的流域系统整体观，城市洪涝水文水动力模型需对“地–管–河”构成的“流域树”进行全要素模拟，故本文建立的城市洪涝模型由流域坡面产汇流模型、水库调洪演算模型、河道洪水演进模型、管网模型、城区地表洪水演进模型等耦合组成，以适应统一边界条件下城市洪涝过程精细化模拟。

(1)流域坡面产汇流模型。采用基于地形指数的分布式水文模型进行流域坡面产汇流计算。模型假设在DEM的每一个栅格上有2种不同的蓄水单元：河道、坡面。栅格上的径流形式分为地表径流和地下径流两种。流域产流机制为蓄满产流，考虑土壤达到栅格点蓄水能力产生地表径流。栅格上每段河道的流量演算采用马斯京根法。此外，采用线性叠加方式，将上游几个河道演算所得到的出口流量对应时段之和作为汇流栅格节点的流量。据此可得子流域出口断面的流量过程，并将之作为水库调洪演算模型、河道洪水演进模型的流量边界条件。

(2)水库调洪演算模型。水库调洪计算的目的是在入库洪水过程、库容曲线、泄洪建筑物的型式尺寸以及调度规则确定的条件下，推求下泄流量过程和库水位过程。水库调洪演算的实质就是联合求解水量平衡方程和蓄泄方程，得到水库下泄流量过程，并作为河道洪水演进模型的流量边界条件。

(3)河道洪水演进模型。采用一维圣维南方程组作为河道洪水演进控制方程。水闸断面的通量由水闸过流公式确定。闸门关闭情况下，过闸流量为0；闸门开启情况下，按宽顶堰的自由出流或淹没出流经验公式计算过闸流量。

(4)管网水动力模型。采用管网明满流方程作为管道水流控制方程，并结合Preissmann狭缝法处理管网明、满流交替现象。

(5)城区地表洪水演进模型。高度城镇化地区，密集建筑物对城区地表洪水演进的影响主要表现在蓄、滞两个方面。一方面，建筑物减少了单元有效蓄水区域，使得单元蓄水容量减少；另一方面，建筑物使各计算单元过水断面面积减少，阻碍洪水传播。本文运用容积率系数(即网格内非建筑区所占地表的面积率)对浅水方程进行修正，同时结合人工加糙法，以概化高度城镇化地区建筑物对洪水传播的影响。

(6)耦合模型。河道–地表模型的侧向耦合：侧向耦合界面处需要满足流量约束条件，即保证一维河道、二维地表模型间水量及动量守恒。因此，通过“互相提供边界”的方式实现河道–地表模型的侧向耦合。

河道–管网模型的侧向耦合：管网水头较高时，水流通过排水口进入河道；河道水位较高时，可对管网排水造成顶托甚至倒灌。因此，通过“互相提供边界”的方式实现河道–管网模型的侧向耦合，即将河道水位作为管网排水口的水位边界，进行管网计算；将管网排水口的流量计算结果作为河道的旁侧入流/出流边界。

管网–地表的竖向耦合：竖向耦合方法与侧向耦合类似，即通过“互相提供边界”的方式计算管网–地表的交换流量，再进一步对模型状态进行更新。

(7)边界条件及耦合过程。“城市海绵–小排水–大排水”耦合水文水动力模型中，首先进行水文模型计算，即将流域产汇流区域分为山区坡面产汇流及城区产汇流，以降雨过程为边界条件，山区坡面产汇流计算得到的流量过程作为水库入库或河道无控断面上游流量边界，城区产汇流计算得到的流量过程作为雨水井的输入流量；其次，以水文模型的流量计算过程为边界条件，并结合外江潮位过程、闸泵调度规则等边界条件，进行河道–地表–管网的耦合计算。

(8)洪涝治理工程概化方法。洪涝治理工程主要包括水库挖潜、河道整治、湿地公园、坑塘利用、蓄滞设施、场坪抬高、泵站等。其中，水库挖潜通过修正水库水位–库容曲线、特征水位、调度规则等进行模型概化；河道清淤、拓宽、堤防加高等通过修正河道断面地形及堤防节点高程等进行模型概化；湿地公园、坑塘利用、蓄滞设施等通过修正水文计算中下渗率、洼地蓄水深度等参数进行模型概化；场坪抬高通过修正二维模型网格节点高程进行概化。

4.2 数值求解方法 采用一维有限体积法和汊点水位预测–校正法进行河网模型求解[24]，该方法实现了河网内各河段、河段内各断面的完全数值解耦，计算稳定性好；采用二维有限体积法进行地表洪水演进模型求解[25]，并结合GPU并行计算技术实现了模型快速计算[26]；通过构造并求解Riemann问题实现河道–地表模型的侧向耦合[27]，有效克服了基于堰流公式的传统方法难以适用于不规则溃口、堰流公式中流量系数选取存在不确定性等缺点；基于SWMM开源模型代码实现管网模型求解及城市海绵措施模拟，并通过开发数据接口实现自主研发模型与SWMM模型的耦合计算。相关求解方法可参考前述文献，本文在此不再赘述。

5 案例分析

5.1 研究区域概况 研究区域上游为高丘陵区，属侵蚀台地丘陵，地势较高，雨水借助地势汇入河涌，山丘、田野、村落、工厂错落分布。下游为冲积平原，地势平坦，地面高程在5.4～8.7 m左右(广州城建高程，下同)，河涌众多。干流全长18.5 km，流域面积为56.7 km^2，干流上游建有小(I)型水库一座，总库容730万m^3，流域范围及水系分布见图3。流域内干流及部分支流已按规划20年一遇标准进行达标整治，支流2和支流4未整治；排水管网达到5年一遇标准约72 km，占比约50%，其余基本为1～2年一遇。根据《室外排水设计规范》(GB 50014–2006，2016版本)3.2.4条，流域中下游城市中心城区的规划内涝防治设计重现期为100年。

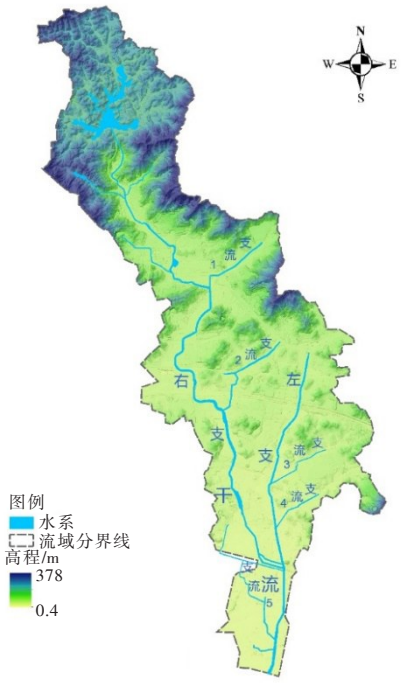


图3 流域范围及水系分布示意

该区域属于高度城市化地区，内涝标准从20年一遇提升到100年一遇，必须充分考虑经济合理性原则和约束性原则。城市土地空间有限，寸土寸金，河道、管网提升空间明显不足，在有限的土地空间进行防洪排涝的工程布局，洪涝的精细化模拟是个关键问题。以往城市洪涝防治对策研究工作中采用的综合单位线法推求设计洪水过程，该方法忽略了管网汇流、城市下垫面水文物理性质和产汇流格局等城市化地区特有的产汇流影响因素，计算相对过于简化，不能满足高密度城市化地区洪涝防治工程布局的要求。本文构建“城市海绵–小排水–大排水”耦合水文水动力模

型，可以充分考虑城市海绵、小排水、大排水之间以及流域上下游、干支流之间的相互联系，通过河道流量、河道水位、地面淹没情况，整体评估工程布局的洪涝防御效果，科学指导工程布局优化。

5.2　模型构建

（1）基础数据概况。所采用的基础数据包括现状管网数据、1 m精度DEM数据，基于2020年遥感影像提取的土地利用类型数据。干流及主要支流的断面采用实测资料及最新整治设计断面，其余支流通过DEM和遥感数据提取河底高程和河宽，并结合平均水深对河底高程进行修正，水库起调水位按汛限水位考虑。

（2）耦合模型构建。一维河道模型范围上至干流上游的水库，下至河口。下游采用水位边界，河道沿程与管网模型耦合；二维模型模拟地面的漫流和内涝积水过程，模型范围共56.7 km^2，划分20万个三角形网格，最小网格面积100 m^2；管网模型模拟研究区域的管网汇流过程，利用DEM划分子汇水区，根据土地利用资料确定每个子集水区的不透水率，模型范围包括干流水库以下共49.7 km^2的区域，4223个子汇水区、4581个管井、4397条管道。三个模型分别构建完成后进行耦合，一维河网模型与管网模型排水口之间共构建202个耦合连接，二维模型与管网模型之间共构建4195个耦合连接，一、二维模型之间共构建11个耦合链接。耦合模型如图4所示。

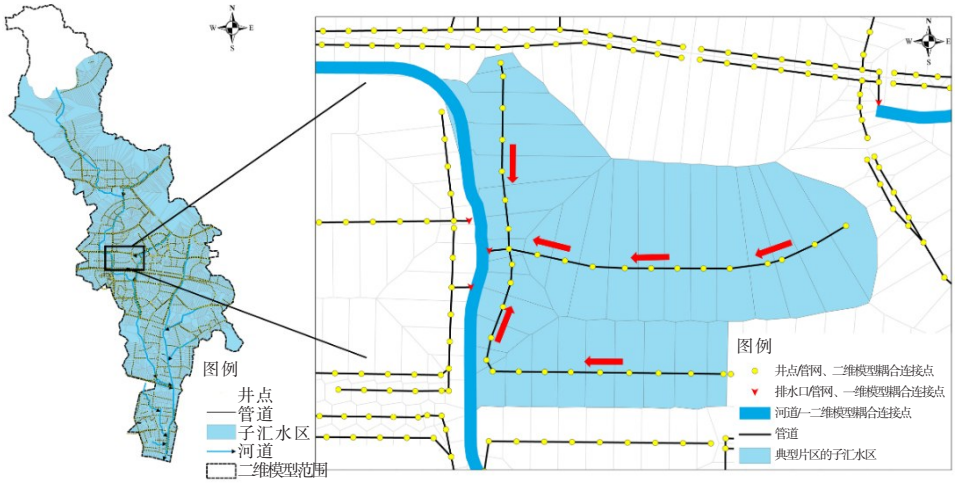


图4　耦合模型示意

5.3　模型验证　基于河道设计水面线成果对一维模型糙率进行初始率定，基于土地利用数据对二维模型糙率进行赋值。结合“5.22”暴雨洪涝淹没调查成果及广州市水旱灾害防御中心一雨一报表数据，进一步对耦合模型进行参数率定验证，其中，河道糙率为0.02 ~ 0.035，城区地表糙率为0.035 ~ 0.07。根据实测降雨资料，“5.22”暴雨历时约10 h，最大1 h降雨约3年一遇，最大6 h降雨约20年一遇。洪涝淹没水深分布计算结果见图5。由计算结果可知，本次淹没总面积约为0.12 km^2，淹没范围与实际水淹点位置基本一致。16处验证点（位置分布见图5）的洪涝淹没最大水深计算值与实测值对比见图6，由结果可知，计算值与实测值较为一致，误差范围在±0.2 m以内，表明模型精度较高，可有效模拟城市暴雨洪涝淹

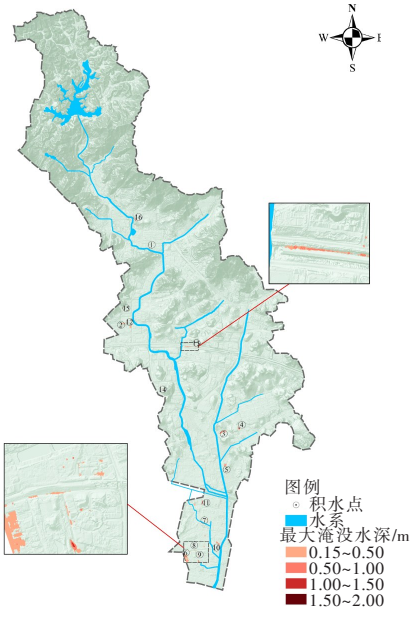


图5　“5.22”暴雨洪涝淹没水深计算结果

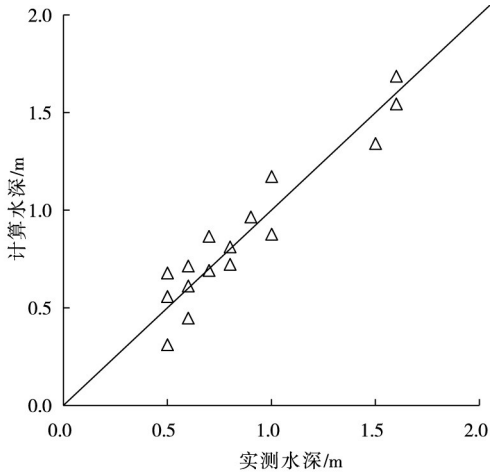


图6　16处水淹点最大水深计算值与实测结果对比

没。

5.4　不同设计雨型的洪涝模拟结果对比　市政设计雨型历时一般为1～3 h，采用10 min间隔的降雨过程表示；水利设计雨型历时一般为24 h，采用1 h间隔的降雨过程表示，见图7。由图7可知，水利设计雨型的最大10 min降雨量较小，但从1 h、3 h降雨量来看，水利设计雨型较大。

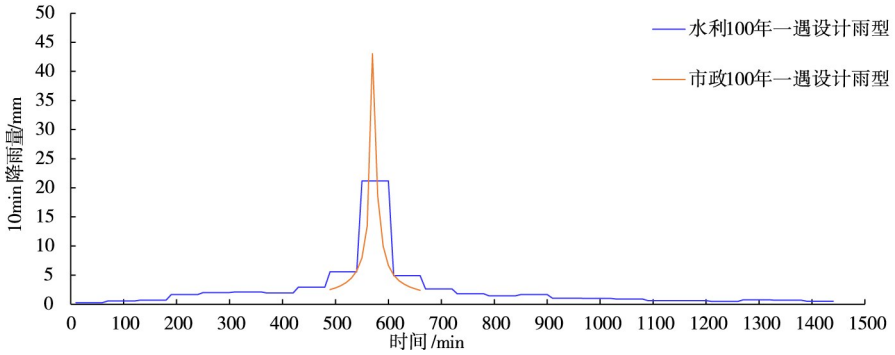
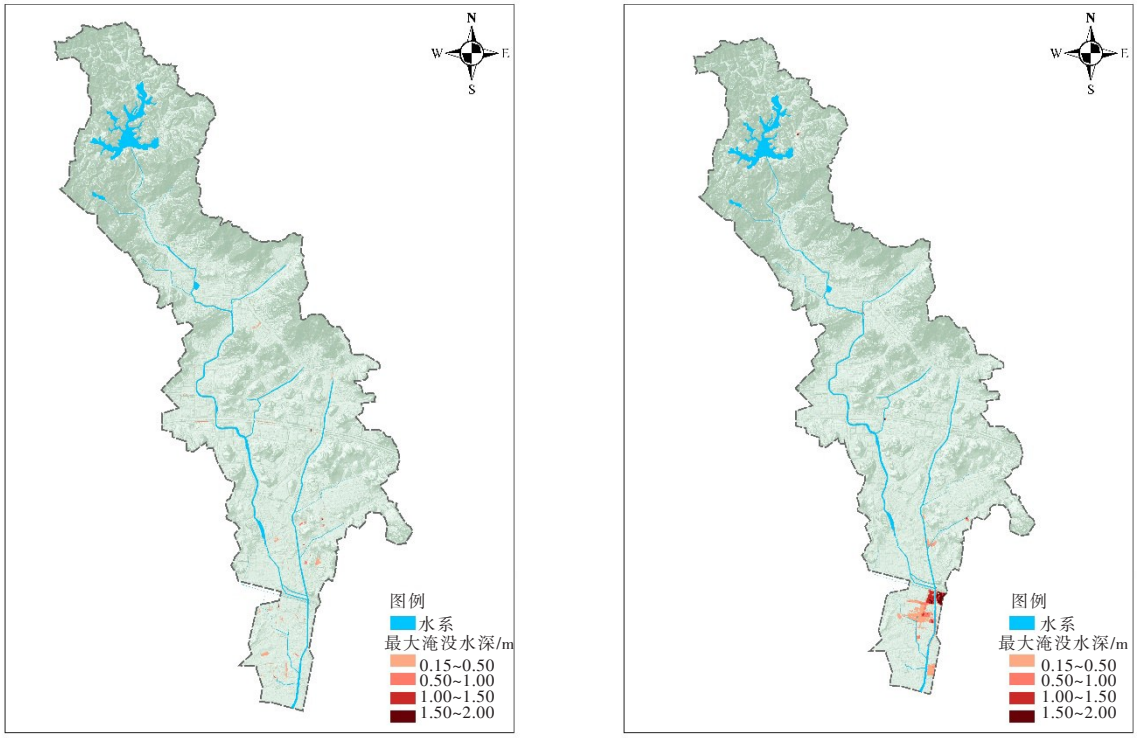


图7　A流域市政、水利100年一遇设计暴雨过程

采用“城市海绵-小排水-大排水”耦合水文水动力模型，分别输入市政、水利设计雨型，计算100年一遇暴雨条件下流域洪涝受淹情况，见图8。采用市政设计雨型条件下，管道出口基本不受河道水位顶托，流域共有积水深度大于0.15 m的积水点17个，积水区域面积约为0.48 km^2；水深大于0.5 m的积水区域面积约为0.23 km^2；采用水利设计雨型条件下，管道受河道水位顶托甚至发生倒灌，且局部河道发生漫溢，共有水深大于0.15 m的水淹点23个，淹没面积约为1.05 km^2；水深大于0.5 m的淹没面积约为0.39 km^2。由结果对比可知，100年一遇暴雨条件下，与市政设计雨型相比，水利设计雨型的淹没范围较大。主要原因包括：①市政设计雨型历时小于A流域汇流历时(3～6 h)，雨峰发生时，雨水尚未完全汇入河道，河道水位较低、管道基本不受河道水位顶托，故管道溢流主要受自身排水能力影响；②市政设计雨型历时短，100年设计雨型仅最大10 min降雨超过5年一遇暴雨峰值，超标时段短、总量小，大部分溢流管道尚未造成地面明显积水时已开始退水，故积水范围较小；③水利设计雨型历时长、总量大，雨峰发生时河道水位较高，虽然雨峰小于市政5年一遇最大10 min降雨，但受河道水位顶托甚至倒灌影响，管道溢流造成的积水范围较大。

本文提出的统一设计雨型，既考虑了市政的降雨峰值，又兼顾了水利的降雨时长及雨量，相应的水淹范围是水利、市政设计雨型条件下的外包络范围，可为流域洪涝共治提供科学、合理的边界条件。



（a）市政雨型　　（b）水利雨型

图8　100年一遇不同设计雨型条件下淹没水深分布

5.5　现状洪涝防御能力分析　利用率定后的城市洪涝耦合模型，计算发生20年、100年一遇设计暴雨条件下流域出口断面洪水过程（见图9），20年一遇洪峰流为314 m^3/s，100年一遇洪峰流量为390 m^3/s。初步估算流域需削峰76 m^3/s，滞蓄洪量120万 m^3。作为比较，采用传统综合单位线计算流域出口100年一遇洪峰流量为418 m^3/s。本次计算设计洪水较综合单位线法偏小约6.7%，洪峰提前约2 h，主要因为传统综合单位线法未考虑地面淹没积水、管网和河道过流能力对流域产汇流过程的影响，故本次计算结果洪峰较综合单位线法偏小，洪峰提前。

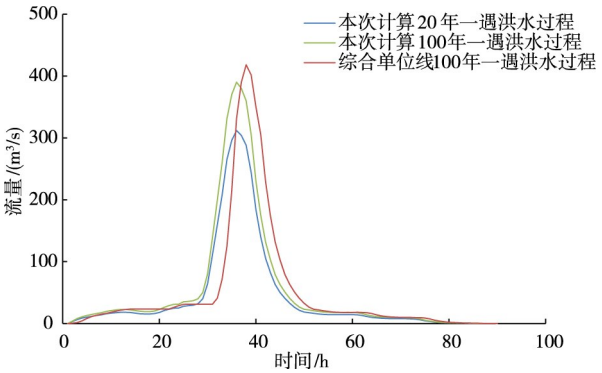


图9　流域出口断面洪水过程

现状河道100年一遇水面线见图10。由结果可知，干流及右支河道下游发生漫溢，堤岸最大欠高0.7 m，发生漫溢河长2.0 km，占干流河长约11%；左支下游河道局部发生漫溢，堤岸最大欠高0.3 m，发生漫溢河长0.6 km，占左支河长约12%；管道充满度及淹没水深见图11，满管管道长度占比为85%；受排水口处河道水位顶托，管道发生溢流长度占比约35%，发生区域主要为下游干管和标准较低的管段。流域共有淹没水深大于0.15 m的积水点37个，淹没总面积约为1.34 km^2；水深大于0.5 m的淹没总面积约为0.52 km^2；淹没区域与河道漫溢、管道溢流位置基本一致，其余部分集中在地势低洼区域。综上，流域现状与100年一遇内涝防治标准差距较大。

5.6　城市洪涝治理工程布局优化　传统城市洪涝治理将洪、涝孤立对待，从内涝防治来看，管道溢流采用调蓄和加大管径的措施，管道承泄区水位较高，对管道排水造成顶托，采取局部抽排措施；从防洪来看，如河道发生漫溢，采取加高堤防、扩宽河道或者上游水库挖潜等措施予以解决。然而，“洪归洪，涝归涝”的治理模式，未充分考虑城市洪涝的联系及相互转化，如城市地面集水发生内涝，则加大管网、末端抽排，解决局部问题，随着管道规模、抽排泵站规模增加，入河流量增

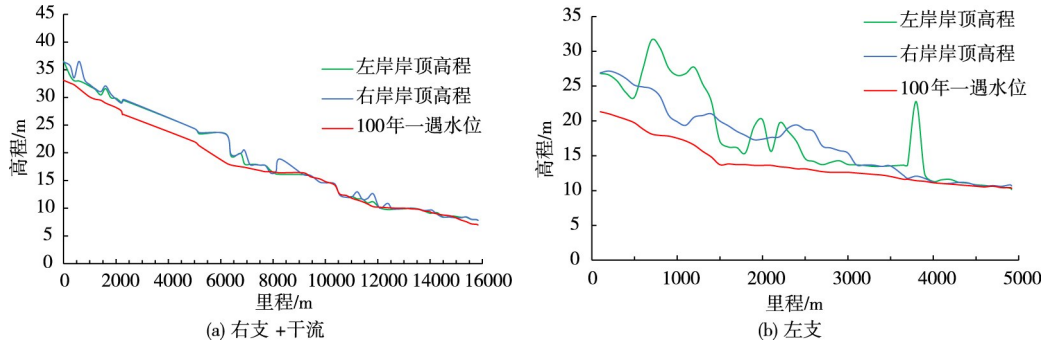
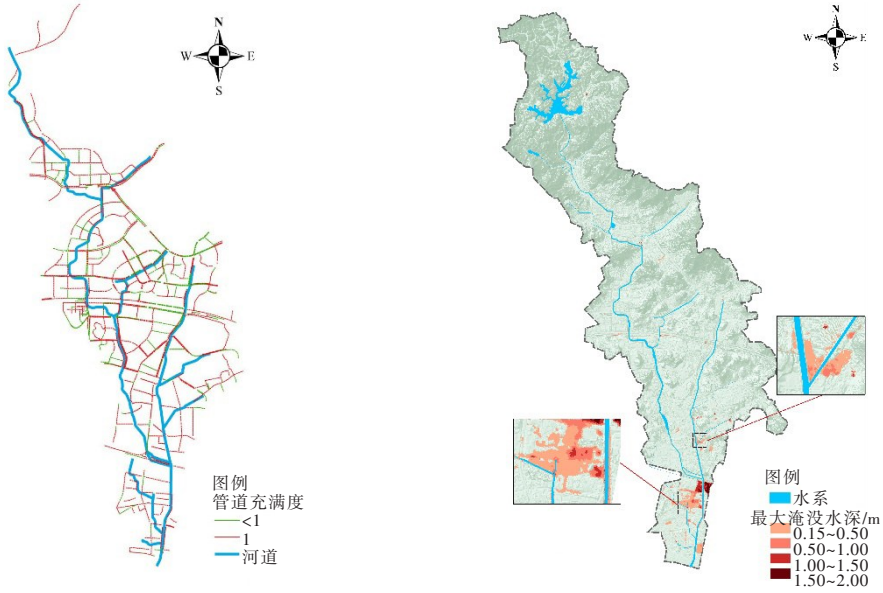


图 10　现状河道 100 年一遇水面线



（a）管网充满度　　（b）淹没水深

图 11　100 年一遇设计降雨条件下管网充满度及淹没水深分布

加，河道水位升高，引起其它区域河道漫溢，出现“因涝致洪”的问题；城市河道漫溢，采取堤防加高措施，河道水位升高，引起管网排水不畅，出现“因洪致涝”的问题。因此，城市洪涝分治忽略了大、小排水系统之间的联系且存在转移城市洪涝风险的弊端，难以从根本解决城市洪涝灾害。

基于流域树建设理念，从全流域出发，统筹上下游、左右岸，统筹水库、坑塘、管网、河道，流域洪涝治理工程布局优化技术路线见图 12。首先，结合城市洪涝模型对现有流域洪涝防御体系防御能力进行评估，依据管道充满度、河道水位、地面高程、淹没水深分布图，诊断流域洪涝成因；其次，结合城市用地规划、更新改造、周边环境因素及工程经验，干流及右支、左支下游不具备加高、扩宽条件，无法直接提升河道自身防洪标准，通过上游水库挖潜、结合城市旧改增加滞蓄设施、现有坑塘利用、新建湿地公园（蓄滞洪区）进行滞洪削峰，系统性提高流域设防标准；管道直接扩容提标难度大，通过上游滞蓄洪水和局部支流河道整治，降低河道水位，减小管网来水量和出口水位顶托，系统提升管道应对暴雨能力；对于局部地势低洼区域，结合城市旧改进行场坪抬升，无旧改区域，采取泵站抽排措施；依据流域现状洪涝体系防御能力，结合工程经验初步拟定工程措施规模，流域治理工程措施分布见图 13；最后，采用城市洪涝模型分析流域洪水过程、水位变化、管道充满度、淹没水深及范围，对规划工程效果进行评估，如不满足规划目标，则对工程布局及规模进行优化，直至满足规划目标。

流域洪水由城市海绵（坑塘、滞蓄设施）、小排水、大排水（河道、湿地公园、水库、泵站）等进

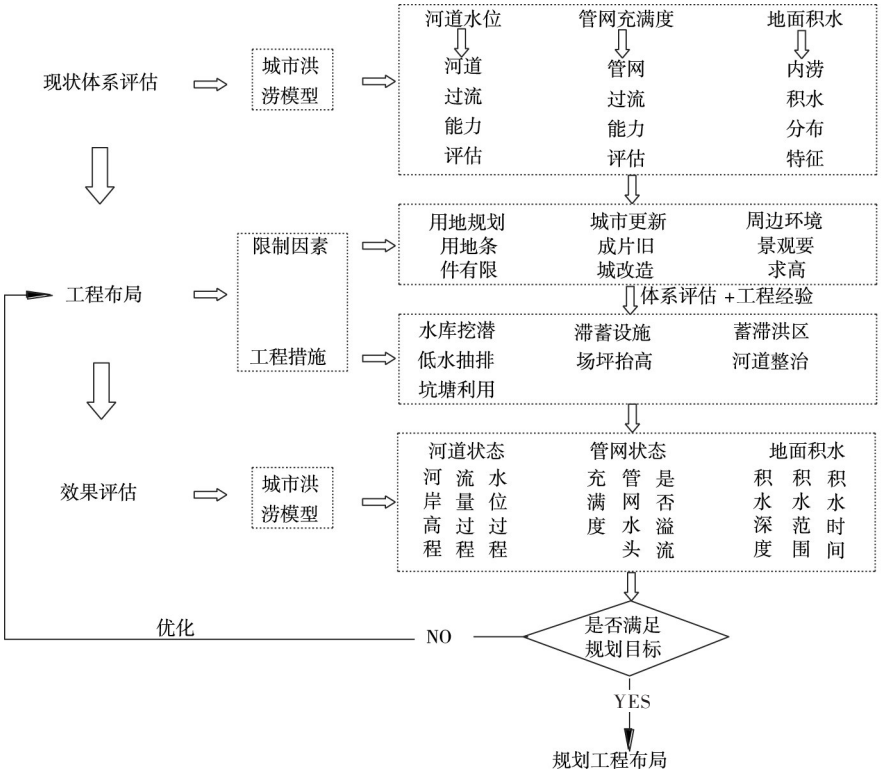


图 12　流域洪涝治理工程布局优化技术路线图

行控制，流域规划工程措施如下：

（1）水库挖潜。上游水库无供水任务，可对其泄流构筑物进行改造，降低溢洪道高程，并增设闸门，提前预泄，确保 100 年一遇暴雨下，水库不泄洪，可削峰 40 m^3/s，增加蓄洪 55 万 m^3。

（2）河道整治。支流 2、支流 3 两岸目前及规划均有土地空间进行扩宽，《广州市河涌水系规划（2017—2035 年）》中拟对其扩宽整治，整治范围为分别为河口至上游 2.1 km 和 1.5 km，宽度分别为 5 m 和 11 m。

（3）湿地公园。新建湿地公园区域目前为绿地和农田，规划用地类型为绿地，占地 27 hm^2，增加调蓄容积 25 万 m^3，并增设闸门控制，当河道水位超过阈值时，进行分洪，可削减洪峰 15 m^3/s。

（4）场平抬高。低洼区域共有城市旧改面积约 472 hm^2，考虑城市旧改过程中的不确定因素，进行整体改造区域按 80%考虑，对 378 hm^2区域进行场平抬高。

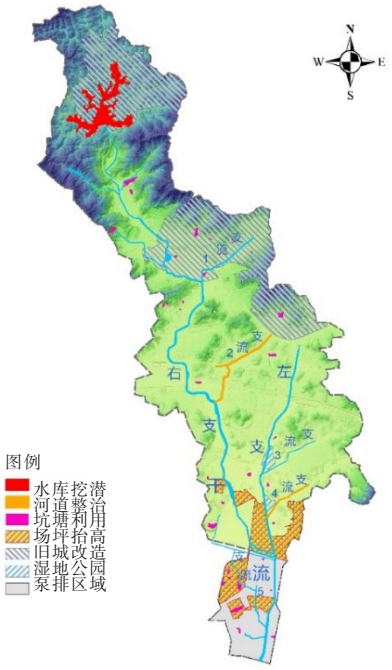


图 13　治理措施分布

（5）坑塘利用。对流域内已纳入河涌水系蓝线规划的 35 座坑塘进行改造，占地 27.5 hm^2，增加调蓄容积 38 万 m^3，总调蓄容积 69 万 m^3，对区域涝水进行削峰控泄，可削减洪峰 20 m^3/s。

（6）滞蓄设施。流域内旧城改造面积共 708 hm^2，根据《广州市海绵城市专项规划（2016—2030）》，城市旧改区域，每公顷新建 500 m^3滞蓄设施，共 35.4 万 m^3，对片区涝水进行削峰控泄，可削减洪峰 18 m^3/s。

(7)低水抽排：对地势低洼且无旧城改造的局部区域进行低水抽排，低水区面积共3.1 km^2，分设4座雨水泵站，规模总计25 m^3/s。

100年一遇设计暴雨工况下，工程后，流域出口断面洪水过程见图14，水面线见图15。流域出口断面洪峰由390 m^3/s削减至308 m^3/s；流域内洪涝水淹点减至6个，最大淹没水深均不超过0.15 m；河道设计水位整体基本低于堤顶高程0.5 m。综上，在规划工程实施后，流域整体上可有效应对100年一遇降雨。

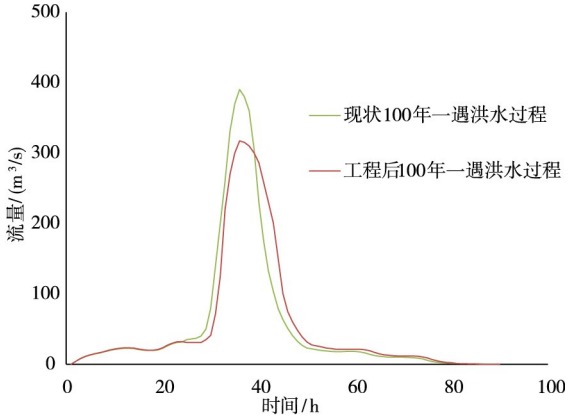


图14　工程后流域出口断面洪水过程

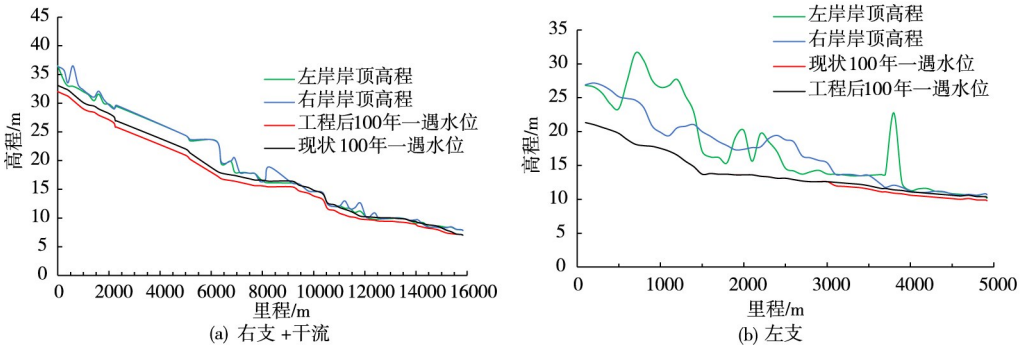


图15　工程后河道100年一遇水面线

6　结论

随着我国城市化的快速发展，城市洪涝问题越发凸显，然而传统治理思路缺乏系统性和整体性，无法科学指导城市洪涝治理。本文在广州“5·22”特大暴雨洪涝灾害调查及成因分析基础上，提出流域系统整体观，统一水利和市政雨型，并以典型流域为例，运用“城市海绵-市政小排水系统-水利大排水系统”耦合城市洪涝模拟模型，指导流域洪涝治理工程布局。主要结论如下：

(1)城市洪涝治理要以流域为研究单元，坚持流域系统整体观，树立防洪排涝体系整体设防达标的概念。流域整体系统观包括“流域树”、洪涝同源、洪涝共治等核心内涵。

(2)基于流域系统整体观，采取“大包小、长包短”方法统一市政排水与水利排涝设计雨型，可实现水利和市政的有机衔接。

(3)城市土地空间有限，城市河道、排水管网的提升改造空间明显不足，洪涝治理工程布局必须同时考虑经济性和约束性原则，故洪涝过程的精细化模拟尤为关键。运用“城市海绵-市政小排水系统-水利大排水系统”耦合城市洪涝模拟模型，按流域系统整体观充分考虑了城市海绵、小排水、大排水之间以及流域上下游、干支流之间的相互联系，同时又实现洪涝过程精细化模拟，可科学指导工程布局优化。

综上，本文提出城市洪涝治理理念以及相应的城市洪涝模拟方法，可为城市洪涝治理提供技术支撑，具有较好的推广应用前景。

参　考　文　献

[1] 陈文龙，夏军．广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]．中国水利，2020(13)：4-7．

[2] 宁静 . 上海市短历时暴雨强度公式与设计雨型研究[D] . 上海：同济大学，2006 .
[3] 莫洛可夫 M B . 雨水道与合流水道 [M] . 北京：建筑工程出版社，1956：17-19，
[4] 牟金磊 . 北京市设计暴雨雨型分析[D] . 兰州：兰州交通大学，2011 .
[5] 王俊，贾建伟，张明波，等 . 水文分析计算与海绵城市[J] . 中国防汛抗旱，2017，27(3)：74-78 .
[6] 黄国如，曾娇娇，张明珠，等 . 不同选样方法设计暴雨重现期衔接关系探讨[J] . 水利与建筑工程学报，2015,13(1)：30-35，41 .
[7] 陈鑫，邓慧萍，马细霞 . 基于SWMM的城市排涝与排水体系重现期衔接关系研究[J] . 给水排水，2009,35(9)：114-117 .
[8] 冯耀龙，马姗姗，肖静 . 水利排涝与市政排水重现期的转换关系[J] . 南水北调与水利科技，2015(4)：614-617 .
[9] 刘俊，俞芳琴，张建涛，等 . 城市管道排水与河道排涝设计标准的关系[J] . 中国给水排水，2007，23(2)：43-45 .
[10] 蔡剑波，林宁，谢振安，等 . 洪峰流量与雨水流量常用计算方法的对比选用[J] . 中国给水排水，2011，27(18)：25-28 .
[11] 刘媛媛，刘洪伟，霍风霖，等 . 基于机器学习短历时暴雨时空分布规律研究[J] . 水利学报，2019，50(6)：773-779 .
[12] 王浩 . 城市洪涝模型构建[J] . 中国防汛抗旱，2018，28(2)：2-3 .
[13] 张建云，宋晓猛，王国庆，等 . 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I . 城市水文效应[J] . 水科学进展，2014，25(4)：594-605 .
[14] 宋晓猛，张建云，王国庆，等 . 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II . 城市雨洪模拟与管理[J] . 水科学进展，2014，25(5)：752-764 .
[15] 蒋卫威，鱼京善，赤穗良辅，等 . 变化环境与人类活动对城市水文与水动力过程影响研究进展[J] . 北京师范大学学报(自然科学版)，2020，56(2)：160-168 .
[16] 徐宗学，程涛 . 城市水管理与海绵城市建设之理论基础—城市水文学研究进展[J] . 水利学报，2019，50(1)：53-61 .
[17] 刘家宏，梅超，向晨瑶，等 . 城市水文模型原理[J] . 水利水电技术，2017，48(5)：1-5，13 .
[18] 李娜，孟雨婷，王静，等 . 低影响开发措施的内涝削减效果研究——以济南市海绵试点区为例[J] . 水利学报，2018，49(12)：55-68 .
[19] 戎贵文，沈齐婷，戴会超，等 . 基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨[J] . 水利学报，2017，48(8)：1002-1008 .
[20] PAN Anjun，HOU Aizhong，TIAN Fuqiang，et al . Hydnologically enhanced distributed urban drainage model and its application in Beijing City [J] . Journal of Hydrological Engineering，2012，17(6)：667-678 .
[21] TANIM A H，GOHARIAN E . Developing a hybrid modeling and multivariate analysis framework for storm surge and runoff interactions in urban coastal flooding [J] . Journal of Hydrology，2020，https://doi.org/10.1016/j.jhydrol . 2020 . 125670 .
[22] JAMALI B，LWE R，BACH P M，et al . A rapid urban flood inundation and damage assessment model [J] . Journal of Hydrology，2018，doi：10.1016/j.jhydrol.2018.07.064 .
[23] 王静，李娜，程晓陶 . 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J] . 水利学报，2010，41(12)：1393-1400 .
[24] 宋利祥，李清清，胡晓张，等 . 基于有限体积法的河网水动力并行计算模型[J] . 长江科学院院报，2019，36(5)：7-12 .
[25] SONG Lixiang，ZHOU Jianzhong，GUO Jun，et al . A robust well-balanced finite volume model for shallow water flows with wetting and drying over irregular terrain[J] . Advances in Water Resources，2011，34(7)：915-932 .
[26] HU Xiaozhang，SONG Lixiang . Hydrodynamic modeling of flash flood in mountain watersheds based on high-performance GPU computing [J] . Natural Hazards，2018，91(2)：567-586 .
[27] 陈文龙，宋利祥，邢领航，等 . 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J] . 水科学进展，2014，25(6)：848-855 .

Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system

CHEN Wenlong[1], XU Zongxue[2], SONG Lixiang[1], ZHANG Dawei[1], LIU Pei[1]

(1. *Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou* 510611, *China*;
2. *College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: Pluvial and fluvial floods were considered independently in traditional flood disaster prevention. According to the investigation and analysis on flooding occurred in Guangzhou City in May 22, 2020, a new concept, in which the whole river basin is regarded as an integrated system, is proposed in this study. The design rainfall patterns from both municipal authorities and water authorities are integrated as one pattern through the way of "big one include small one, and long one include short one". A simulation model for fluvial and pluvial flooding in urban area is developed by coupling the low impact development facilities, small-scale municipal drainage system, and large-scale hydraulic drainage system. Take the control measures of pluvial and fluvial urban floods in Guangzhou as an example, the case study shows that the control engineering layout optimization based on holistic view of watershed system can not only meet the economic and restrictive principles for highly urbanized areas, but also achieve systematic governance and reach the overall standards. It effectively avoids the disadvantages of "fluvial flooding caused by pluvial flooding and vise versa" in the traditional flood divide-management mode, which provides a new approach for urban flood management in China.

Keywords: holistic view of watershed system; joint control of fluvial and pluvial floods; rain pattern; urban flood simulation

(责任编辑：李福田)

(上接第658页)

Review of research progress on water transport mechanism of cracks within concrete

WANG Licheng, MU Linjun, ZOU Kai

(*State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technolog, Dalian* 116024, *China*)

Abstract: Cracking of concrete, which may be induced by mechanical loads or resulted from the exposed environmental action, not only reduces the ability of concrete to resist water penetration, but also provides additional pathways for aggressive media to penetrate into concrete. This process will obviously reduce service life as well as durability insufficiency of reinforced concrete structures. This paper systematically reviews the research progress relating to the influence of cracks on water transport within concrete from experimental research and numerical simulation. The previous studies indicated that water transport coefficient of cracked concrete is proportional to the second or third power of crack width. The increase of crack tortuosity can significantly reduce the speed of water transport, while it has little effect by changing the crack surface roughness. Meanwhile, the water content absorbed of concrete can be increased due to the development of crack density. In addition, the self-healing of cracks exposed to profitable environments can decrease water transport speed in cracks of concrete. Therefore, to investigate the effect of cracking or cracks concrete on water transport mechanisms in concrete will provide the theoretical basis for durability design of reinforced concrete structures. Based on the summary of the existing research results, research expectations as well as future priorities associated with water transport mechanisms of the cracked concrete are argued and suggested in the final section of the paper.

Keywords: concrete; water transport; cracks; durability; research progress

(责任编辑：王冰伟)