

张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展 [J]. 灾害学, 2014, 29(1): 144 – 149.  
[Zhang Dongdong, Yan Denghua, Wang Yicheng, et al. Research Progress on Risk Assessment and Integrated Strategies for Urban Pluvial Flooding[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 144 – 149. ]

# 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展<sup>\*</sup>

张冬冬, 严登华, 王义成, 鲁 帆, 刘少华

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘 要:**城市内涝灾害风险评估是城市内涝灾害管理, 减少内涝灾害损失的有效途径。基于自然灾害风险评估理论, 对城市内涝形成机理和风险评估方法进行了概述。从规划、建设和管理三个层面提出应对城市内涝的总体思路和技术框架, 并指出相应的关键技术问题。最后, 指出未来城市内涝灾害风险评估和综合应对的研究工作重点: ①加强城市内涝形成机理的研究; ②完善城市内涝灾害风险评估的理论与方法; ③构建城市内涝灾害数据库; ④城市内涝应对与城市水生态修复相结合。

**关键词:**城市内涝; 形成机理; 风险评估; 综合应对

**中图分类号:** X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000 – 811X(2014)01 – 0144 – 06

doi: 10. 3969/j. issn. 1000 – 811X. 2014. 01. 026

随着全球气候变化的不断加剧以及城市化的快速发展, 城市极端洪涝灾害发生的频次更加频繁, 影响范围也逐渐扩大。印度计划委员会前委员 Gilliat Parikh 指出, 极端天气导致的城市内涝是中国、印度等新兴发展中国家城市化过程中面临的问题<sup>[1]</sup>。近年来, 中国大中城市不断发生严重的城市内涝, 对经济社会造成了严重的影响, 城市内涝灾害已经成为制约城市发展的重要障碍因子。《中国 21 世纪议程》<sup>[2]</sup>指出, 近年来, 随着我国城市化和工业化进程的加快, 大量城市林地、湖泊等洪水调蓄空间被挤占, 城市排水设施建设落后于城市发展速度以及不健全的城市灾害风险管理体系, 使得我国城市内涝灾情呈现出复杂性、多样性和放大性的特点。

如何在城市内涝灾害形成机理基础上对城市内涝灾害进行风险评估分析, 并提出一套城市内涝灾害风险应对技术框架, 已经成为城市灾害研究领域亟需解决的热点问题。本文基于城市内涝的风险评估理论, 对城市内涝的形成机理和风险评估研究进展进行了概括和评述, 提出城市内涝灾害综合应对的思路以及未来城市内涝风险评估及综合应对的发展方向。

## 1 城市内涝灾害形成机理

城市的水循环系统(图 1)是由自然水循环系统和高强度的社会水循环系统组成的, 城市内涝是城市水循环极端现象的表现, 是自然因素和社会

因素共同作用的结果, 城市内涝的影响要素具有“自然 – 社会”双重属性。

从自然因素看, 全球变暖引起全球气候发生变化, 同时也改变了城市的局地气候特征, 增加了城市极端暴雨产生的概率<sup>[3]</sup>。从社会因素看, 主要体现在城市化对城市水循环各个环节的影响。城市化引起的城市“热岛效应”和“雨岛效应”增加了城市降雨频率与强度, 是城市暴雨内涝的直接诱导因素<sup>[4–5]</sup>; 从产流过程上看, 城市高密度的硬化地面阻碍降雨下渗和渗透过程, 提高地表的产流系数, 加大了地表径流量; 从汇流过程上看, 大部分地表径流通过社会水循环由排水管网汇集到河道, 增加了汇流的水力效率, 导致河道洪峰流量增大, 峰现时间提前<sup>[6–9]</sup>。另外, 城市功能区规划不合理、雨水回收利用等基础设施不完善、防洪调度管理水平不高以及排水管网设计标准偏低等人为因素, 也是造成城市内涝的重要因素。

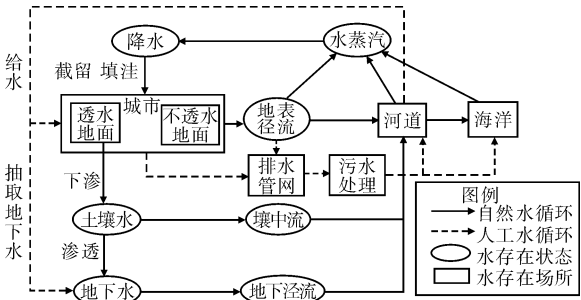


图 1 城市水循环系统运行图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013 – 07 – 26      修回日期: 2013 – 08 – 28  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2010CB951102, 2013CB036406); 国家自然科学基金项目(51109224)  
作者简介: 张冬冬(1986 –), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事水文及水资源研究。E – mail: www123qe@ 126. com

## 2 城市内涝灾害风险评估方法

### 2.1 历史灾情数理统计法

该方法主要利用数理统计的方法, 对历史灾害的数据进行统计分析, 找出灾害发展的规律, 建立起灾害发生概率与其影响因素的统计模型, 进而对未来灾害造成的可能损失进行预估。对于内涝灾害, 主要是研究暴雨重现期、洪水淹没范围与不同财产损失率的关系。郭涛<sup>[10]</sup>以 2000 多年的历史资料为基础, 对四川城市水灾的规律特征进行了分析研究。李吉顺等<sup>[11]</sup>基于历史暴雨洪涝灾情分省的数据, 构建综合危险度和相对危险度两个评价指标, 对全国暴雨洪灾的危险性进行了评估和区划。马建明<sup>[12]</sup>对水灾史记资料揭示区域水灾风险方面理论进行了研究。许月卿等<sup>[13]</sup>分析东汉至今旱涝资料, 探讨了河北省旱涝时空分布规律和风险区域。周魁一<sup>[14]</sup>提出“历史模型”的概念, 论述了基于历史数据的历史模型方法和在灾害问题中的应用。Benito 等<sup>[15]</sup>根据过去 1000 年的历史灾害数据和 50 年的规范记录, 构建了评估城市洪水风险的方法。Nott<sup>[16]</sup>提出长时间的历史洪水资料可以作为评估区域洪水灾害风险的重要参考依据。Hans de Moel<sup>[17]</sup>利用荷兰 1900–2000 年以及未来 100 年规划的空间地理信息分析城市化对洪水产生的影响。基于历史灾情数理统计的方法计算简单, 不需要详尽的地理背景数据, 但是由于城市内涝灾害的观测数据较少且灾情数据很难获取, 在应用上具有一定的局限性。另外, 风险是未来的潜在的发生的概率, 用历史资料预测未来灾害风险发生的概率, 可能存在一致性的问题。

### 2.2 指标体系法

主要思路是根据灾害系统的特点, 研究者凭借经验选取一定的指标体系, 然后通过一系列数学方法对原始指标进行处理, 最后得到区域灾害风险的过程。该方法侧重于指标的选取记忆权重方法的优化, 涉及的空间尺度范围较广, 适用于全球灾害风险评估的指标计划有 Hotspots、美洲计划。北美的学者利用指标体系从国家、市级尺度对洪水灾害风险进行区划和评估<sup>[18–21]</sup>。Aleksandra<sup>[22]</sup>基于风险的三个要素(孕灾环境危险性、受灾体的脆弱性和暴露性)理论, 选择 26 个指标对英国曼彻斯特市洪水风险脆弱性进行了评估, 通过主成分分析, 找出了受城市洪水影响的高风险区域。傅湘、纪昌明<sup>[23]</sup>选取人员伤亡损失、经济损失、生态环境损失与灾害救援损失四个指标对城市涝灾损失进行了分析评估。冯平等<sup>[24]</sup>通过选取资产特征指标参数来确定洪涝灾害的直接

损失, 并建立了一套城市洪涝灾害的评估预测模型。杜鹃等<sup>[25]</sup>从孕灾环境的自然属性、承灾体的社会环境以及致灾因子的特点出发, 构建了洪水灾害综合风险评估指标体系, 并将理论成果运用在湘江流域风险评估中。刘荆等<sup>[26]</sup>选取降水量、河网、高程、人口、经济等作为指标, 通过相关分析, 从致灾因子危险性和承灾体脆弱性两方面出发, 评估淮河流域暴雨内涝灾害。

因为大尺度风险评估精度要求不高, 因此指标体系风险评估在大尺度风险评估中应用广泛, 但是基于小尺度的研究由于其自身的精度局限性, 应用较少。

### 2.3 水文水力学模型与仿真模拟法

水文水力学模型与仿真的方法是通过设置不同频率暴雨情景过程, 利用流域产汇流模型以及洪水演进模型的数值模拟计算, 推求不同情景下暴雨可能引起的城市内涝的淹没范围、淹没水深以及淹没历时。基于水文水力学模型的内涝灾害风险评估关键是通过成熟的水文和水力学模型或根据区域特征构建的水文水动力模型模拟不同暴雨情境下的灾害情景。模型的核心是研究降水(主要是极端降雨)作用于城市下垫面后, 城市雨水空间上的垂直分布分配过程以及水平运动状态。在模型开发方面, 欧美发达国家科研机构和公司开发的水文水动力模型比较成熟, 在城市内涝灾害情景分析中应用广泛。国内对城市暴雨内涝模型研究相对国外起步较晚, 但是也取得了一定的成果<sup>[27–31]</sup>(图 2)。其发展过程大致也可划分为 3 个阶段: ①为初期发展阶段(1970 年以前), 此阶段主要运用基于物理机制的经验方程满足城市径流计算的需要; ②为兴起阶段(1970 年至 1990 年), 此阶段相继将一些新的理论和方法引入城市雨洪模型之中, 如水量平衡方程、圣维南方程等, 使得雨洪模型应用于城市管网汇流以及水质模拟中; ③为现代阶段(2000 年以后), 此阶段各种模型日趋成熟, 与 GIS、RS 结合广泛, 并且开始研究城市防洪调度以及内涝积水的模拟与仿真。

从国内外模型特点对比来看, 国内用于模拟城市内涝模型还存在一下的不足: ①从模型的通用性的方面来说, 国内城市雨洪模型的研发仅针对特定某些特定的城市区域, 移植到别的城市的时候需要进行改进, 通用程度不高。相比国内针对某些城市开发的雨洪模型, 国外一些比较成熟的模型已开出的商用软件, 如 Wallingford 的 Infloworks、DHI 的 Mouse 及 Mike-SWMM 等具有较强的通用性, 数据分析和能力强, 可视化程度高, 用户方便使用。②国内模型普遍缺少对系统可靠性和风险性的分析功能, 同时随着 RS、GIS

等空间信息技术的发展,建立一套将 RS、GIS 等空间信息技术与城市暴雨内涝模型有机结合,形成有较好的人机对话、结果显示、决策支持、预警预报等功能的城市内涝灾害预警系统,必将成为城市雨洪模拟技术发展的趋势。

水文水力学模型与仿真的方法基于明确的物理机理,能过模拟内涝成灾过程,并能很好的反映城市河道闸门、桥梁、涵洞、蓄滞洪区等人为干预的影响,具有较好的适用性,但数据量要求较大,计算较为复杂,如何在数据可获得性、计算复杂性和评估精度之间取得平衡是今后研究急需解决的问题。

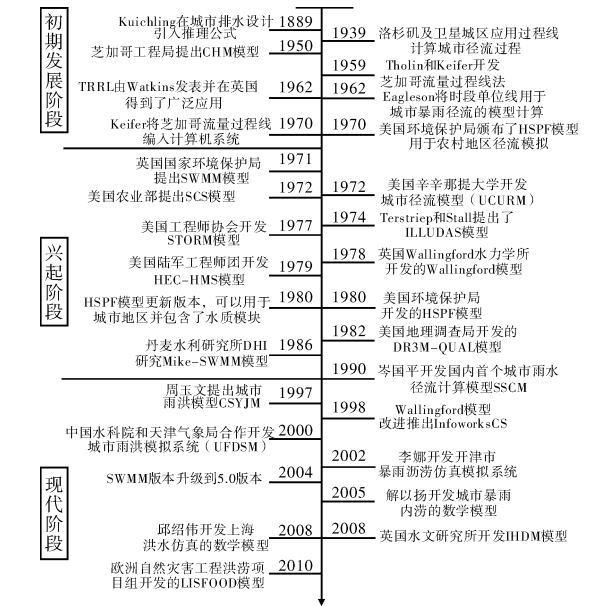


图2 城市雨洪模型研究进展图

3 城市内涝综合应对总体思路

目前,我国城市的治涝思路是用最短时间将雨水排走,这种依靠快速排水的理念在一般降水强度较小情况下可以起到较好的排涝效果,但当出现极端降水的情况,会出现严重的问题,首先,雨水随着排水管网迅速向低洼地区汇聚,超出这些地区管道排水能力,出现雨水回涌地面现象,加上地表面的汇流,使得这些低洼地区出现严重的内涝。同时,雨水管网将雨水迅速排入城市河道,导致峰现时间提前,对下游河道防洪构成严重威胁。另外,雨水作为水资源的一种形式对于缺水的城市来说十分重要,在降雨过程中将雨水迅速排走是一种资源的浪费。传统的治涝思想没有从影响城市径流的要素入手,快速排水的方法没有考虑合理分配城市汇流面积和减小径流系数,忽略了雨水的资源效益,因此对于强度较大的降

水,城市很容易产生内涝的灾害。

解决城市内涝问题,应转变传统的思路,构建一套“合理规划、源头控制、强化下渗、蓄排结合、科学管理”的内涝综合应对体系,本文从规划、建设和管理三个层面提出“三位一体”综合应对的思路,主要从以下几个方面体现:

(1)在规划层面,要合理规划城市各个功能区的布局。城市内涝的地区从地形特征上可分为两种(图3),分别是碟形涝区和开放涝区。碟形涝区是指由于自然地形或人为建筑的影响形成四周高中间低的低洼地带,暴雨期间雨水沿着周边地势较高的地区汇集到碟形地区中心,雨水在碟形中心汇集形成内涝。开放涝区是指位于排水管网交汇点或是城市河道附近地区,暴雨期间降雨水强度超过排水设施或是河道排水能力产生溢流,雨水从河道溢出流向四周形成内涝。合理协调城市各功能区布局是城市功能区规划的关键,未来城市建设项目应避开易涝地区,城市规模功能区规划应与城市内涝灾害风险区相结合,在规划过程中尽量避免在碟形涝区规划民居、建筑设施等建筑,在碟形涝区宜布置生态湿地、公园绿地、广场等城市开敞空间,对于开放涝区要提高其排涝能力,从而最大程度上减小承灾体的暴露性。规划道路、立交桥建设时要考虑路面排水的出路,如泵站建设、管网的联通、河道的联通和排水能力等等,避免出现道路规划和区域发展超出排水管网和河道排水能力的问题。对于重点易涝的立交桥,要通过提高立交桥管网排水标准、增设抽水泵站、修建雨水调蓄池等措施减轻内涝灾害的影响。

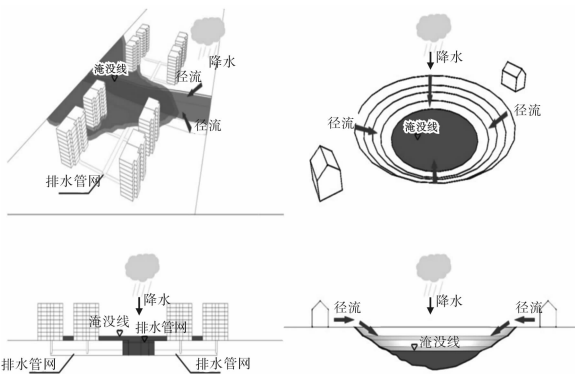


图3 城市开放涝区(左)与碟形涝区(右)示意图

(2)从建设层面,要强化城市雨水蓄排工程建设。我国城市排水管网标准偏低,防涝设施相对落后,当有极端暴雨时,极易形成内涝灾害。在现阶段,从影响地表径流的要素着手,分别采取相应的措施。①加强雨水源头控制,推进绿色建筑、生态小区,推广雨水回收利于技术,从源头

减少雨水排放量, 对于适合修建大型调蓄场所的区域, 可修建人工水体或利用河湖等天然水体对雨水进行集中调蓄, 实现雨水蓄存的“化零为整”; 对于不适合修建大型调蓄场的区域, 建立一些分散式的调蓄设施如公园绿地、道路绿化带及庭院绿地等, 接纳城市小区和道路上的雨水, 实现雨水蓄存的“化整为零”; ②强化雨水下渗, 建立“入渗池、井、草地、透水地面”组成的地表回灌系统, 强化城市下垫面渗透雨水的能力; ③合理规划城市管网建设, 适当提高管网排水标准, 拓宽疏通河道, 提高泄洪能力; 通过以上源头控制、强化下渗及蓄排结合的措施, 实现削减洪峰、减小地表径流系数的效果。

(3)在管理层面, 从过去的“被动应对”转向“主动应对”。过去城市治涝往往是在灾害产生之后被动的启动应急减灾措施, 而新形势下应对城市内涝灾害应该重视灾前减灾措施。一方面, 在工程措施上提高防洪排涝设施标准, 加强管网设施的维护和修理。另一方面, 构建城市内涝灾害风险评估指标体系, 对城市内涝灾害进行风险评估, 根据风险等级对城市内涝灾害区进行区划, 完善当前城市灾害预警体系, 提高暴雨洪水预测预报水平, 加强人们的防灾意识, 同时加快出台相关法律法规。

综上所述, 城市内涝综合应对的总体思路是在规划层面上实现城市功能区的合理布局; 在建设层面上, 加强雨水源头控制, 强化雨水下渗同时适当提高城市管网排水标准; 在管理层面上加强对城市内涝风险评估, 完善内涝预警系统。从三个层面构建一套“合理规划、源头控制、强化下渗、蓄排结合、科学管理”的内涝综合应对体系。

4 城市内涝综合应对技术框架

城市内涝综合应对的技术框架包括 4 个基本层次(图 4): 基础信息整合层、内涝风险识别与评估预测层、模型构建及和方案优选及综合应对层。

(1)基础信息整合层。以城市水文气象、社会经济、地形地貌、排水管网、应急能力、历史灾情等数据为基础, 利用 GIS 和 RS 平台构建城市内涝灾害数据库。

(2)内涝风险识别与评估预测层。在基础数据库的支撑下, 识别影响城市内涝灾害的因素, 定量评价一定的孕灾环境下城市内涝灾害的致灾因子危险性和承灾体脆弱性和暴露性。

(3)风险评估及模型构建。构建一套评估城市内涝灾害风险以及应对管理的评价指标体系, 并提出评估方法与相应的评估标准, 通过设置不同

孕灾环境和致灾因子的情景, 构建城市内涝灾害的风险评估模型, 评估城市内涝灾害的风险等级以及城市综合应对内涝风险能力, 在评估结果的基础上对城市内涝灾害风险进行区划, 并构建城市内涝的预警预报系统。

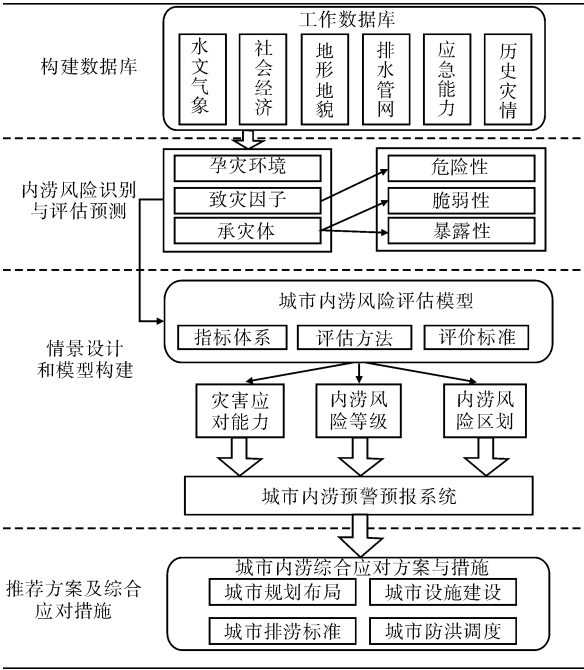


图 4 城市内涝综合应对技术框架图

(4)推荐方案及综合应对措施。根据前面几个步骤, 得出最终的推荐方案, 评估城市综合应对内涝的能力与应对内涝的潜力, 从规划、建设和管理三个层面对蓄水排水工程建设、城市功能区的规划布局、排涝设计标准制定和城市防洪调度等给出建议, 并提出综合应对措施。

5 城市内涝综合应对的关键技术问题

5.1 城市内涝灾害指标体系构建和风险评估

以 GIS 为平台, 综合考虑城市的地形地貌、河流水系、经济社会、历史灾情、排水标准等情况, 研究暴雨诱发城市内涝的风险评估方法。基于自然灾害风险系统三要素理论<sup>[22]</sup>及其相互作用机制, 对内涝灾害风险的危险性、承载体脆弱性和暴露性进行评估, 建立一套评价城市内涝灾害风险各要素的指标评价体系并应用 AHP 方法确定各个指标的权重, 构建城市内涝灾害风险评估模型, 通过不确定分析方法对城市内涝风险进行评估, 并定量表示这种不确定性的 大小, 最后得到城市内涝灾害综合风险区划图。

5.2 城市内涝灾害综合实时监测预警系统开发

目前我国内涝灾害预警系统多为各个部门独立开发, 如气象局的气象灾害系统, 水利局的洪

涝灾害系统，同时多数系统依托非网络的地理信息系统，建立的相关静态数据库，不能在灾害发生时及时更新数据，而内涝灾害的预警涉及到多方面的因素，因此，开发多部门协作的综合实时预警系统显得十分必要。城市内涝灾害综合实时预警系统包括5个模块(图5)：①内涝灾害监测模块，利用遥感、雨量计的监测设施实时监测气象数据；②内涝灾害风险评估模块，将实时气象数据作为驱动数据与参数集一起输入内涝灾害风险评估模型，对内涝灾害进行风险评估和区划；③内涝灾害风险预警模块，对评估结果进行分析，将预警信息与媒介(通信、电视等)相连接，及时有效将风险预警信息发布给相关利益群体；④救灾减灾方案，对产生积水道路或立交桥提出防灾与减灾方案，及时有效的采取相关措施；⑤灾后评估，对灾害系统进行误差估计，及时更新参数集，不断完善系统。通过多部门的合作，形成统一的综合数据观测、信息发布、以及减灾和救援的实时预警系统。

6 展望

本文对城市内涝形成机理、内涝灾害风险评估主要方法以及内涝综合应对研究进展进行了评述。对于城市内涝风险评估以及综合应对的研究在以下几方面需要进一步发展。

(1)加强城市内涝形成机理的研究。在城市化过程中，城市洪涝的水文特性与成灾机制发生着显著的变化，使城市型水灾显现出新的特点，具体表现为城市化使得不透水地面增加，地表持滞水及渗透能力减弱，产汇流时间缩短，地表径流量增大，河道洪峰流量成倍增加，洪峰提前，城市雨洪频率差别明显，使得原有防堤的防洪能力难以满足需要。深入研究城市化和气候变化背景下大城市极端降水特性的变化规律，城市长历时与短历时降水过程曲线差异，城市下垫面变化对城市产汇流影响机理，是未来该领域的迫切解决的问题。

(2)完善城市内涝灾害风险评估的理论与方法。目前，从灾害系统的角度综合分析孕灾环境、致灾因子变化对城市内涝的影响，研究新形势下城市内涝灾害风险孕育机制的理论不完善，没有一套系统的城市内涝灾害风险评估的方法，研究变化环境下城市内涝灾害风险新的特征以及相适应的评估方法是未来研究的重点和难点。

(3)构建城市内涝灾害数据库。由于城市内涝灾害涉及到城市地形地貌、社会经济、灾害历史、排水管网布局、防灾减灾能力等很多方面，需要大量的数据。但是很多数据在现实中很难获取，如大范围洪水淹没损失数据、社会经济数据等。积极建立城市排水管网的地理信息系统，数据标准和质量应满足构建水力模型的需求，有条件的地区应考虑建立排水防涝的综合管控平台，实现日常管理、运行调度、灾情预判和辅助决策，并根据城市建设情况，动态更新基础数据，构建城市内涝灾害数据库是未来研究的一个重要的方向。

(4)城市内涝应对与城市水生态修复相结合。城市内涝灾害的产生与城市内部水生态系统关系密切，维持城市地下水量、河道基流量以及水生生物多样性对于维持城市水循环正常运行起到重要作用，因此从机理上揭示生态修复与城市水循环的影响，研究定量不同生态修复措施对减轻城市洪水内涝灾害的程度是未来研究的重点。

参考文献：

[1] 腾讯网. 中国南方频遭暴雨 挑战催变城市治水理念[EB/

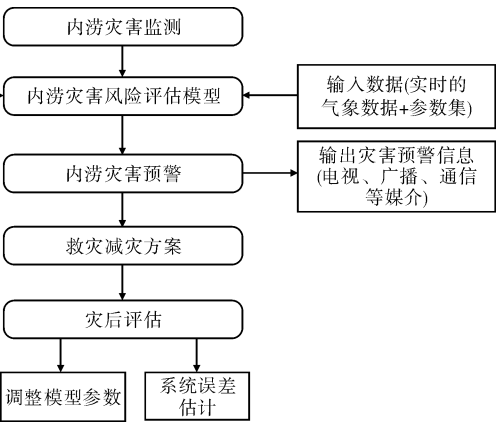


图5 内涝灾害综合实时预警预报系统

5.3 城市内涝综合应对管理机制建设

城市内涝灾害应对要从工程措施和非工程措施两个方面做出应对，因此，除了完善应对城市内涝工程体系以外，还应加强非工程措施建设，即建立上下协调、反应迅速、运转高效的城市内涝应对管理机制，最大程度减小城市内涝灾害风险。具体来说，一方面注重城市内涝管理政策与法规的制定，将雨水管理和内涝灾害防治作为规章，形成城市内涝综合应对的工作体系；另一方面，对城市内涝进行常态管理，加强暴雨监测与预警预报，快速准确地获取监测信息并及时处理、发布和预警，为政府与公众做好涝灾防御的规划及应对提供决策依据。只有建立起系统性、全局性的“软硬”结合的综合应对城市内涝灾害管理体系，才能充分整体提高社会应对城市内涝灾害的能力。

- OL]. [2010-07-12]. <http://news.qq.com/a>.
- [2] 中国 21 世纪议程管理中心. 国际水资源管理经验及借鉴 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2010.
- [3] IPCC. Intergovernmental panel on climate change special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [4] 王萃萃, 翟盘茂. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(5): 553-560.
- [5] 孙激. 北京地区暴雨气候特征及其变化分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 672-676.
- [6] Leopold L B. Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrologic effects of urban land use [J]. U. S. Geol. Survey Circ. 1968.
- [7] Jinkang Du, Li Qian, Hanyi Rui, et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhua River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 465: 127-139.
- [8] Suriya S, Mudgal B V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed-A case study[J]. Journal of Hydrology, 2012, 412: 210-219.
- [9] Okada N, Tatano H, Hagihara Y, et al. Integrated research on methodological development of urban diagnosis for disaster risk and its applications[J]. Annual of Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ, 2004, 47: 1-8.
- [10] 郭涛. 四川城市水灾的历史特征[J]. 灾害学, 1991, 6(1): 72-79.
- [11] 李吉顺, 冯强, 王昂生. 我国暴雨洪涝灾害的危险性评估: 台风、暴雨灾害性天气监测, 预报技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
- [12] 马建明, 周魁一. 水灾史料量化与区域洪水灾害风险分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 1997, 1(2): 101-108.
- [13] 许月卿, 邵晓梅, 刘劲松. 河北省旱涝灾害历史特征研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 53-57.
- [14] 周魁一. “历史模型”与灾害研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 10-14.
- [15] Benito G, Lang M, Barriendos M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation, review of scientific methods [J]. Natural Hazard, 2004, 31(3): 623-643.
- [16] Nott J. Extreme event: a physical reconstruction and risk assessment[M]. London: Cambridge University Press, 2006.
- [17] Hans de Moel, Jeroen C, Aerts J H, et al. Development of flood exposure in the Netherlands during the 20th and 21st century [J]. Global Environmental Change, 2011, 21: 620-627.
- [18] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social vulnerability to environmental hazards [J]. Social Science Quarterly, 2003, 84: 242-261.
- [19] Cutter S L, Mitchell J T, Scott M S. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2000, 90: 713-737.
- [20] Clark G, Moser S, Ratlick S, et al. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: The case of Revere, MA, USA [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1998(3): 59-82.
- [21] Rygel L, O'Sullivan D, Yarnal B. A method for constructing a social vulnerability index: An application to hurricane storm surges in a developed country [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11: 741-764.
- [22] Aleksandra Ka'zmierzczak, Gina Cavan. Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103: 185-197.
- [23] 傅湘, 纪昌明. 洪灾损失评估指标的研究[J]. 水科学进展, 2000(4): 432-435.
- [24] 冯平, 崔广涛, 钟响. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. 水利学报, 2001(8): 64-68.
- [25] 杜鹃, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评估[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38-44.
- [26] 刘荆, 蒋卫国, 杜培军, 等. 基于相关分析的淮河流域暴雨灾害风险评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 735-740.
- [27] Christopher Zoppou. Review of urban storm water models [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16: 195-231.
- [28] 岑国平. 城市雨水径流计算模型 [J]. 水利学报, 1990(10): 68-75.
- [29] 周玉文, 赵洪宾. 城市雨水径流模型研究 [J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 4-6.
- [30] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津城区暴雨沥涝仿真模拟系统 [J]. 水利学报, 2000(11): 34-42.
- [31] 李娜. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 112-118.

## Research Progress on Risk Assessment and Integrated Strategies for Urban Pluvial Flooding

Zhang Dongdong, Yan Denghua, Wang Yicheng, Lu Fan and Liu Shaohua

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Risk assessment of urban pluvial flooding is the effective way to reduce the loss of disaster. Based on the theory of risk assessment of natural disaster, research progress on risk assessment of urban pluvial flooding are reviewed. The integrated countermeasures are discussed on three different levels: the project planning level, the operational level and the management level. Finally, further research work is pointed out. First, the research of the mechanism of urban pluvial flooding should be strengthened. Second, the theory and method of risk assessment should be developed. Third, a database of urban pluvial flooding disaster should be built. Last, ecological restoration should be used when coping with the urban pluvial flooding.

**Key words:** urban pluvial flooding; formation mechanism; risk assessment; integrated strategies