文章编号：1006-4710(2015)01-0025-09

对应对城市洪涝问题的一些认识

解建仓，李波，柴立，姜仁贵
（西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程国家重点实验室，陕西 西安 710048）

摘要：城市化和气候变化让城市洪涝成为常态，频发、广发、急转、重灾的特征显现，应对城市洪涝更加成为广泛重视的研究主题。以往研究成果大多集中在对洪涝发生发展的机理认识和城市建设中的防御体系加强与改造方面，交叉应用现代信息技术的研究成果也不少，但城市洪涝作为自然灾害的一种，目前的应对成效还有很大差距。在相当长的一个时期内，就现存的应对条件，特别是当前急需要见效，研究者把重点放在机理研究和城市基础改造就不妥当，要把城市洪涝按突发事件对待，强化应急应对才是上策。本文遵循分治与综合思想，建议整合信息、计算、经验资源，探索与事件特征和过程相适应的情景组合、事件主题、模型方法组件、应对预案、模拟调控等的集成应用，提出了快速适应、不断积累、知识智慧服务的城市洪灾应对新模式。

关键词：城市洪涝；突发事件；应急应对；模拟调控
中图分类号：TV122　　**文献标志码**：A

Some realizations of dealing with the urban flood disaster problems

XIE Jiancang, LI Bo, CHAI Li, JIANG Rengui
(State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Urbanization and climate change make the urban flood disaster (UFD) into normal state with characteristics of higher frequency, more influenced area, sudden turn and higher disaster. Accordingly, coping with the urban flood disasters has become the research objective with extensive attention. In the past, most of the research results focus on the mechanism of the UFD occurrence and development, and enhance and reformation of the defense system in the urban construction, and less focus on the cross-application of modern information resources. As one of the natural disasters, the efficiency of the response to the UFD still has a big disparity. In quite a long time, as far as the existing response conditions are concerned, especially it should gain the immediate results nowadays. For this reason, it is inappropriate to put our emphasis on the mechanism research and urban foundation upgrading, instead, the best plan should treat UFD as emergency event so that the control and response of UFD should be strengthened. Following the divide-and-conquer and meta-synthesis theories, this paper suggests that the study explores the integrated application of the combined scenario, event theme, model and method component, response preplan, simulation and adjustment, which adapt to the characteristics and processes of the events, integrating resources of information, computing and experience. Accordingly, the new flood disaster control methods consisted of quick adaptation, continuous accumulation and knowledge wisdom service have been proposed.

Key words: urban flood disaster; emergency event; control and response; simulation and adjustment

“请到城里来看海”，城市暴雨内涝似乎成了每年夏天的定期“风景”。有点讽刺，但“看海”事件频发、广发、急转已是常态，从词语上也表露了人们对城市洪涝的无奈。城市洪涝影响到了正常生活，也

收稿日期：2014-06-20
基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126118110011)；西北旱区生态水利工程国家重点实验室研究基金资助项目(2013ZZKT-6)。
作者简介：解建仓，男，教授，博导，博士，研究方向为水资源管理及决策支持系统、水利信息化。
E-mail:jcxie@xaut.edu.cn。

带来了重大损失。随着城市发展、气候变化,受影响的人口数量和损失水平也在加剧。面对城市洪涝事件,"防灾、抗灾、救灾、减灾、赈灾"活动得到了重视,从百度上找"城市洪涝"找到相关结果约3 470 000个;从CNKI中国知网上查"城市内涝"有148篇文章,但2012年以来就有110篇;从Google Scholar查"城市洪涝"找到约8 480条结果,找"Urban Storm Flood"就有约1 570 000条结果。无论从科学技术上,还是政府政策上都得到了社会的广泛关注、也成了学者们研究的热点。

1 从以往研究获得的启示

2014年2月,包括首都伦敦在内的英国多处地方风雨交加,泰晤士河的水位上涨,引发了英国几十年来最严重的洪灾。沿河城市洪灾源于持续暴雨和河水水位上涨造成的决堤。

2013年7月22日,延安长时段大暴雨造成了延安史上最严重的灾害损失。黄土失陷、塬岸垮失、窑洞倒塌,建筑物因年久失修而损毁严重。

2012年7月21日,北京市发生了破纪录的暴雨事件,导致了严重的人员伤亡和重大损失,在城市洪涝历史上,十分罕见。预报有暴雨,但预报量级偏低,而且是大范围、长时间降雨。随后,人们更多关注的是排水不畅,要求提高城市排洪标准。

2010年5月7日,席卷整个广州市的特大暴雨,雨量之多、强度之大、范围之广,均"历史罕见"。大家抱怨没有准确的预报成果,人们准备不足。

2007年8月11日,青岛市发生了50年来日降水量最大的暴雨,"暴雨如注,电闪雷鸣,像要把整座城市炸掉、冲走一般。"但受损不大。对比分析,青岛的下水道系统是德国人留下来的,加之这些年也下功夫修建,排水效率很高;青岛是丘陵地形,三面环海,从高到低,自然排水就直接入海。

从众多的历史事件看,城市洪涝源于暴雨和城市河流,消于排泄。暴雨及成灾过程十分复杂,有预报问题、城市建设问题、应急管理问题、人们防灾素质问题等等,自然因素与人为因素混杂,近几年来,针对城市暴雨洪涝问题,研究重点多集中在对洪涝过程的特征分析、机理探讨、模拟与仿真、应对管理这四个方面。

1) 城市暴雨洪涝特征与成因分析

极端降水是关键性诱因;城市化进程的加快使得城市水文效应加大。暴雨连同复杂的城市下垫面状况共同作用形成城市暴雨洪涝[1];城市热岛效应的形成机理和演化机制非常受关注[2]。

2) 暴雨洪涝的形成机理

以大气环流特征以及对天气系统演化规律的认识为重点的研究工作开展得比较多,以叶笃正院士和陶诗言院士等为代表的著名气象学家开创性地采用大气环流演变过程分析暴雨形成机理[3]。以阻塞高压和副热带高压为代表的天气系统与我国近年来发生的暴雨洪涝天气密切相关[4]。文献[5]利用气象站观测和NCEP/NCAR分析,认为副热带高压北移和低涡演变特征是"2012.7.21"北京特大暴雨的主要环流特征。气候异常对降雨的影响也受到重视。2010年汛期,中国南部遭遇的特大暴雨洪涝与强烈的"厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)"和"北极震荡(AO)"现象有关。城市热岛(Urban Heat Island, UHI)效应、高层建筑物的阻挡以及大气凝结核效应使得城区的强对流与灾害性天气增加,年降水量增加5%,汛期暴雨强度和频率增加超过10%。下垫面状况发生变化,使得地表暴雨径流量增加,汇流时间缩短,洪水过程线向高、瘦、尖方向发展,加大了城市防洪和排涝压力,加重了城市暴雨洪涝灾害程度[6]。

3) 城市暴雨洪涝过程的模拟与仿真

从相对简单的经验性和概念性模型发展到较为复杂的水动力学物理模型,国外有QQS模型[7]、SWMM模型[8]、MIKE-SWMM模型[9]、Wallingford模型[10]、HSPF模型以及城市水量水质耦合模型等[11]。国内有雨水径流计算模型、城市地表与明渠河道水流运动的城市暴雨内涝数学模型、基于二维非恒定水力学模型、分布式模型InfoworksCS、耦合不同时空尺度的多种统计降尺度模型和水文模型、二维洪水淹没模型等[12-14]。基于地理信息系统(GIS)平台,计算和模拟城市内涝积水面积和涨消过程,可对城市暴雨积水实现可视化仿真,基于数字地球平台可实现对洪涝淹没过程的分析和三维动态仿真[12,15]。

4) 城市暴雨洪涝的应对管理

目前,国际上典型的城市暴雨洪涝管理理念有美国的最佳管理实践(Best Management Practices, BMPs)[16]和低影响开发(Low Impact Development, LID)[17]、新西兰的低影响城市设计与开发(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)以及英国的可持续城市排水系统(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)[18]等。国内方面主要有:从工程措施和非工程措施两个方面,建设雨洪公园以提高对雨水的蓄滞能力;在国务院办公厅发布的《关于做好城市排水防涝设施建设工作

的通知》（国办发[2013]23 号）中，要求积极推行 LID 模式；城市暴雨洪涝智能防控联合策略[19]；集监测、预报以及模拟等为一体的城市雨洪智能管理系统[20]等。在城市暴雨洪涝应对方面，Turoff[21]建立了动态应急管理信息系统，用于对暴雨突发事件的快速应对。Jason[22]则通过建立群决策支持系统为洪涝灾害风险管理提供辅助决策支持。李原园[23]指出，从协调城市防洪与建设关系、提高城市防洪标准等方面出发，制定了城市防洪减灾对策。张亚州[24]针对强暴雨洪涝，提出了科学调度、及时预警以及规范响应的应对策略。李帅杰[25]建议通过建立城市防洪预案体系以降低城市防洪风险。

综上，以下几点应当是关注的焦点。

启示 1：暴雨的预报问题能解决，就解决了洪涝根本。但实际情况很不乐观，突发暴雨的预报成果靠不住。

以欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）、英国气象局和美国国家环境预报中心（NCEP）等为代表的全球气候预测模型在短期（日）天气预报准确率较高（>80%），然而仍难以实现对暴雨的定时、定点和定量精准预报。北京市气象台首席预报员孙继松说，影响天气变化的因素复杂多变，要想达到 100% 准确率，别说我们这代人不可能实现，下一代人也做不到。统计表明，我国暴雨预报准确率平均为 15% 左右，明显低于美国平均 22% 的水平；另外，能提前几个小时预警也不易。虽然目前定时、定点、定量的“三定”预报问题还未被解决，但我们也不能被动等待。现阶段把重点放在应对上才是上策。

启示 2：对暴雨洪水快速排泄也是解决洪灾的关键。但大量人力、物力、财力的投入，也不是短期能见效的最好办法。

“加强城市防洪排涝工程建设，提高城市排涝标准”已写入了 2011 年出台的中央一号文件和中央水利工作会议文件中，李克强总理在 2013 年 9 月 18 日主持召开的国务院常务会议上要求“提高城镇内涝防治能力”，在国务院印发的《关于加强城市基础设施建设的意见》（国发[2013] 36 号）中指出用 10 年左右时间建成较为完善的城市排水防涝与防洪工程体系，以解决城市积水内涝问题。看来决心已下，积极投入，让洪涝安全搬走。

不过，中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究所向立云教授认为：单纯强调增加排水能力并不科学。“以北京为例，清河、通惠河等河道的排水能力有限。如果一味增加城市排水能力，一旦超过河道限制，将会酿成更大的灾难。”

国家减灾委专家委员会专家程晓陶教授认为：加大排水远远没有想象的那么简单，加粗排水管比拓宽道路要难得多。大面积整修排水管道，整个城市都有可能瘫痪。事实上，排水是要受到限制的。因为单纯靠排水确保自己不受淹，就是把风险转给别人，让别人接收你的洪水。

如此看来，大面积彻底的改造可行么？单从排泄考虑还存在争议。排泄不畅，要求改建、修改设计标准，但提高建设标准一定要科学、慎重、权衡。庞大的改造工程，要多少人力、物力、财力投入；还要等待多久？何况，如何退水也有待研究。

在合理提高城市排涝能力的同时，应充分利用渗漏、调蓄等措施，就地消化降雨。蓄水是可以遍地开花的，修雨水调节池，把水装起来，分散蓄水。

城市排水防涝是一个综合工程，要排、漏、蓄结合，逐步完善并使其最终成为城市内涝防御体系的基础设施。

针对防御体系开展定量计算，回答争议，科学协调排、漏、蓄，适时调控，主动防御洪涝，这样才更有意义。

启示 3：在城市内涝防御体系中除排漏蓄工程措施以外，非工程措施发挥作用潜力很大。

一方面，机理研究很难，另一方面，工程投入太大，所以走非工程研究见效相对较快。

去年国家基金委重点建议还在机理研究，但今年就是“城市洪涝特征与减灾方法”了，更趋向于应用基础与应用实际。

城市洪涝成因近似明确，但机理研究还有很长的路要走。研究已经取得了不少成果，可以以此为基础强化应用，先有一点就用一点。把理论与实践结合，通过实际应用检验理论，更进一步提高理论研究的推动力。以往的研究成果要经过应用检验，用上哪怕是一点才是硬道理。

不断提高人们认识水平、应急意识、基本素质，加强警示作用，充分发挥现代信息技术的作用。飞速发展的现代信息技术是促进应用的条件，用好才能见效。

城市洪涝事件属于突发事件，突发事件应急管理的理念和成果要充分考虑，沿着这个方向走下去一定不会走错。

从应急管理上下功夫，应急应对以减少损失，急需要而且能见效。在相当一段时间内，研究的核心还要放在发挥人的能动性方面，尽可能减少损失。在这一目标的驱动下，快速应对就是重中之重。

2 对问题的科学认识及定位

在城市化与气候变化双重作用下,城市洪灾出现新特点:人口资产密度提高,同等淹没情况下损失增加;城里城外的行洪渠道、河道受到影响,局部水系紊乱,河道与排水管网淤塞,加重了防洪负担;城市空间立体开发,立体损失亦在所难免,恢复更加困难;城市作为社会、经济、文化中心,损失影响范围远远超出受淹范围,间接损失甚至超过直接损失;城市傍河洪水洪峰流量快速增加,洪峰出现时间提前,已有堤防的防洪标准相对降低;市区暴雨的频率与强度高于周边地区。

严格讲,洪与涝也有区别,涝常规点,靠排;洪水就可能不一定常规了,不是简单的排了。常规也好、非常规也好,暴雨洪水就是突发事件,要按照突发事件来应对。

既然局地暴雨难以预报或预报成果靠不住,在目前来看,定时、定点、定量的暴雨基本上就是不可预报的。明确了这一点,大众就不要过分依赖预报成果,而要靠预估、预警、预案来发挥作用。否则"狼来了"的预报结果,也会产生强大的副作用。缺乏判断正误的能力,失去信服力。

暴雨内涝易发地点、范围是容易标志的。预警是重要途径,一是投入,二是公众,是一个过程。为大众服务的手段多式多样(如手机、公示牌等),对水灾风险进行评估,以风险图的形式向社会公布评估的信息。从信息技术入手,特别是把预警与预估和预案融合一体,切实发挥出预案的作用。

实际发生的洪涝灾害事件不重复,事前、事中、事后各个环节的应对都很重要,强化过程,不管是演变还是反演都只能在计算机上模拟,这种实际事件发生过程与计算机上的虚拟仿真过程同步平行,对决策会有重大影响。

要按照突发事件来应对,应急应对会商就是应急管理的核心。对此研究潜力还很大。

基于上述认识,兼顾机理、过程、模拟、调控,相关城市洪涝的科学问题目前应当为:在以往机理认识的基础上,在现有的城市基础设施上,在现代信息技术的支撑下,采用可视的模拟手段、快速的计算能力、大量的数据资源,对实际事件发生过程与计算机上的虚拟仿真过程同步平行服务,对事件全过程应对、处置流程逻辑清楚可信、适应变化并能有效调控,确保减少洪灾损失。

3 能支持研究的科学思路及技术基础

对于上述科学问题,目前已具备了良好的研究基础,下述几个方面将是目前研究的基础保障。

1) 对突发事件的应对十分重视,认识也在不断提高。

城市洪灾也属于突发事件,能成灾缘于暴雨来得突然,不好控制。这对我们的预见能力和应对能力是一个考验。发生前兆不充分、预报成果不明确,难以预料或即使有所察觉用常规管理方式应对也无力或低效,其具有明显复杂性特征和潜在衍生危害[26-28]。

城市洪灾事件可以分为非常规的和常规的,区别在于对事件掌握程度、出现次数的多少、损失大小、影响深度等等。重要的是,笔者已比较清楚地认识到,对非常规事件,只能依赖发展情景来应急应对,"情景-应对"是方向;对常规事件,可以依赖有限的预测来应急应对,"预测-应对"是方向。

虽然有预测可以依赖,但预测成果并没有让人们放心,准确预测一直是人们追寻的科研方向和要解决的难点,这样重心又落到了"预案-应对"。

长期多次对城市洪灾事件的处置实践及应急应对,使人们的研究重点从突发事件发生、发展、演化的机理逐步转移到了应急应对[29-30]。快速适应变化是基本、快速服务是生命、系统可操作是实效;对突发事件要预防、要积极编制预案,要应急应对;利用一切可以利用的资源,靠综合集成服务平台支撑,充分发挥人的能动作用,强化服务快速应对,提高应急管理水平。

2) 综合集成思想的作用在不断增强。

复杂性理论自20世纪60年代出现以来,在短短几十年的时间里进展神速,从天文、地理、物理、化学、生物、社会,小至粒子,大到宇宙,到处可以看到复杂性的影子[31-34]。相对于国际上流行的研究模式,我国钱学森先生等人创建了综合集成思想方法体系[35-37],综合集成发展了还原论和整体论,它的实质是将专家群体、统计数据和信息资料、计算机技术三者结合起来,构成一个高度智能化的人一机结合系统。在国家自然科学基金重大项目"支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅体系研究"的带动下,"集大成、成智慧"成了一个重要方向。

在钱学森等人综合集成思想指导下,在应用手段要落实的强烈需求下,在信息技术发展成果的支持下,由平台来集成实现新的应用成为可能。

由综合集成服务平台,可以支持主题化服务;支持预案的描述、预案的管理、预案与信息的融合、预案的执行、预案的评价;实现一体化应用;支持决策会商。

3）信息采集技术已飞速发展，信息获取已十分方便，大数据时代已经到来。

水利行业信息化建设一直是按照工程来建设，没有信息如何调控？成了常识，信息采集技术的快速发展致使人们对采集测站建设的重视，采集测站从1万到10万很自然。加之还有其他行业的测站建设，如市政、气象、环境、地质等，不同来源的信息（直接、间接；专业、非专业；本行业、外行业等），使信息丰富到了我们来不及全部使用。提高采集信息的利用效率成了当务之急。先集成，后融合，再充分利用已成共识。更为重要的是把应用应当放在首位，在应用中发现需要或缺失哪方面信息，再去有目的地去采集，变被动为主动。

空间数据增长很快，大尺度、高分辨率的城市相关数据已经积累到非常好用的阶段。

另一方面，国际互联网的发展是人类科学奇迹之一，网络资源（重要的是信息资源）极速膨胀，已成为获取信息的主要途径。依赖网络、融合网络信息逐步成了应用的增长点。

尽管物联网、大数据是近期的研究热点，会对预报城市洪涝灾害发挥最要作用，但目前还处在尝试阶段。在快速发展过程中，将会逐步成熟。这些非常好的理念，就会用于该类问题的应用研究之中。

4）计算机软件硬件发展迅速。

建立应用支撑平台是信息化的又一热点。软件硬件日新月异，技术上保障程度越来越高。中间件、云计算、云服务、物联网、网格及高效能计算等已是国家发展的重要战略，是研究和应用的热点[38-43]。一方面在积极建设强大的基础硬件平台；另一方面更是十分看重软件支撑平台的建设[44-47]。

网格及高效能计算、云计算云服务以硬件资源虚拟化为核心，提供与用户无关的庞大的计算力，集成硬件计算资源的技术和应用已成熟，快速高效的计算有了保障[48-51]。

软件支撑平台虽然有基础软件平台与行业应用平台之分，但二者之间的分界线长期不清。都在不同程度推进，但效果的核心在于：基于平台还要二次开发应用程序，还是基于平台不需要用户二次开发，而是直接在平台上组建或搭建应用系统？很显然，后者才是方向。

随着技术的进步及应用的深入，大量的工作都是以不同形态的中间件来实现了。随着中间件的丰富及统一管理，就自然形成了应用的支撑平台，在这个平台之上，应用就成为了组织，而不是程序开发。这样的模式将对支持应急应对有光明前景。

5）基于数字地球与三维GIS的实景可视化。

基于数字地球的可视化服务模式由一系列层次递进的模型框架构成。其底层为遥感影像和数字高程数据所构造出的空间区域内的地形地貌模型，并建立基本的水利实体要素仿真和虚拟现实环境，从而丰富仿真过程中的信息资源量；然后通过Web-GIS与遥感影像的无缝对接，形成一个3S集成平台，增强GIS系统的服务效能；其后融合OGC（OpenGIS Consortium）和KML（Keyhole Markup Language）等多种空间信息规范以及水利标准，以瓦片金字塔和数据中间件方式对空间信息资源和城市洪涝事件数据资源进行有效整合，将道路、水系、建筑物等以透明图层方式在数字地球上叠加；然后建立空间信息缓存机制和数据通信交换协议，完成虚拟现实环境的配置、管理和维护；最后集成文本、图像和视频数据，构建用于描述与城市洪涝相关的关键信息的图元表示，并结合图层控制、效果设置、比例尺等表现方法配置方案，在互操作综合服务环境的支撑下面向洪涝事件提供虚拟现实和模拟仿真环境，进而依靠高性能计算力来支持实时监视、预警、预案、应急响应、模拟、情景方案展现等服务，并提供对比分析、预测评价、虚拟视察、演化、情景模拟、事件查询、实体标示等上层服务接口，基于数字地球和大尺度的三维GIS平台可以对洪涝模拟仿真[52-53]。

6）计算实验及平行系统。

高的计算力使计算实验和平行系统可行。城市洪涝不可能对其进行"试验"，更不用说是“实验”或“重复性”试验了。其中的主观和不可控因素太多，结果和结论往往不具有一般性。无法对其进行分解还原分析，因为分解后的系统已在本质上不具有原系统的功能和作用了。在并行计算、分布式计算和网格计算等大型模拟方法和结构得到广泛应用的今天，仿真也完全可以从基于微分差分方程的自然过程模拟，到对社会系统和人的行为等人造或混合过程的计算机模拟。把“仿真”结果作为现实的一个替代版本，或一种可能出现的现实，而把实际系统也作为可能出现的现实中的一种，同仿真结果“等价”。从系统仿真走向计算实验[54]。

当计算实验逐步逼近现实，就可以由一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统来组成共同系统（平行系统）。利用平行系统来引导、管理和控制人类活动[55-56]。

对于城市洪涝这一复杂系统，多数情况下既没有系统的足够精确的模型，无法或非常困难对复杂

系统的行为进行解析的分析和预报，也不可能对复杂系统进行实验研究，许多时间只能按照“摸着石头过河”的方式一步步对复杂系统进行决策和控制。不断挖掘平行系统中人工系统的潜力，使其角色从被动到主动、静态到动态、离线到在线，不断交互，以至最后从从属的地位提高到相等的地位，使人工系统在实际复杂系统的管理与控制中充分发挥作用[57]。

这些观点及尝试在推进，但可以利用人工系统以比较容易操纵和重复的形式，将方便抓住洪涝突发事件模拟系统的复杂性特征，方便对其行为和各种影响因素进行“量化”地分析和评估。

7）反问题对非常规问题的研究可以换个思路。

在城市洪涝过程中，我们常常会知道事件发展的现在状态，希望了解它的过去，对过去反演，反问题就存在了[58-60]。人们对时间顺序、空间顺序、因果顺序等已经习惯，一般是按着这种自然顺序来研究演化过程或分布形态，由因推果[61]。但特殊事件，常常面对的是演化结果，并伴随着可观测的很多现象，由此也可以探求事件的内部规律或所受的外部影响，由表及里，索隐探秘，倒果求因。

建立模型，研究洪涝演变机理和规律是正问题，由于诸多方面的认识还在深入，有效调控还有难度，与此相反，可尝试由现状反演过去、或通过已获得的测量数据来反求数学模型及模型参数、边界条件、初始条件、暴雨中心位置等。从历史资料分析统计出一定的规律，其实就是在做反问题研究[62-63]。

探寻不同情景暴雨洪涝产生原因及主要影响因素，"追根溯源"的研究十分迫切，要解决这样一个多目标、多条件、多控制的反问题，就是在寻找各种有效的调控措施及手段。

4 结 语

综上所述，从城市洪涝事件发生受灾的原因分析、从大量研究成果中获得的启发等，有大量的基础可以让我们立足，尽可能再寻突破，但实用、可用的应用基础研究更为迫切，定位于用先进手段对城市洪涝进行适度调控，快速提升应对能力的应急管理水平，是最有效的研究方向之一。

进一步的研究重点在于可视可信，可以归纳为以下几点。

1）特征用情景、事件用主题、应对用预案，都用知识图描述。以预案为核心把应对环节可视化，情景-应对与预案-应对相结合。图的抽象描述就是应对的模拟，易标准化。

2）用图描述计算需求，靠计算力，按需灵活计算。组件组合、正向演进与反向演算互补，算法适应，问题可算、计算过程可视可信。

3）集数字地球与知识图一体，在计算机上人工模拟、重现洪灾过程。融合实时信息的人工系统与事件实际发展过程平行相伴，情景再现、人为参与调控。在实例平行系统上会商研讨，在线评价调控减灾效果。

参考文献：

[1] 芮孝芳，蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. 水利水电科技进展，2013，33(5)：1-5.
Rui Xiaofang，Jiang Chengyu. Problems of urban drainage in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2013，33(5)：1-5.

[2] 戴晓燕，张利权，过仲阳，等. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局[J]. 生态学报，2009，29(7)：3995-4004.
Dai Xiaoyan，Zhang Liquan，Guo Zhongyang，et al. Mechanism of formation of urban heat island effect and its spatial pattern in Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica，2009，29(7)：3995-4004.

[3] 赵思雄，孙建华. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展[J]. 大气科学，2013，37(2)：297-312.
Zhao Sixiong，Sun Jianhua. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2013，37(2)：297-312.

[4] 赵思雄，孙建华. 陶诗言院士对暴雨科学研究与预报的若干重大贡献[J]. 暴雨灾害，2012，31(4)：293-297.
Zhao Sixiong，Sun Jianhua. Acad./Prof. Tao Shiyan' important contribution to research and prediction of heavy rainfall[J]. Torrential Rain and Disasters，2012，31(4)：293-297.

[5] 孙明生，杨力强，尹青，等. “7·21”北京特大暴雨成因分析(Ⅱ)：垂直运动、风垂直切变与地形影响[J]. 暴雨灾害，2013，32(3)：218-223.
Sun Mingsheng，Yang Liqiang，Yin Qing，et al. Analysis on the cause of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 (Ⅱ)：vertical motion，wind vertical shear and terrain effect[J]. Torrential Rain and Disasters，2013，32(3)：218-223.

[6] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报，2012，(1)：1-4.
Zhang Jianyun. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today[J]. Hydro-Science and Engineering，2012，(1)：1-4.

[7] Geiger W P，Dorsch H R. Quantity-quality simulation (QQS)：a detailed continuous planning model for the urban runoff control. Volume 1，Model description，tes-

ting and applications[R]. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. Report EPA/600/2-80-011, 1980.

[8] Huber W C. Storm water management model, version 4, user's manual[R]. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. Report EPA/600/3-88-001a, 1988.

[9] Kim J S, Ahn J H, Oh T S, et al. Runoff analysis of urban watershed using MIKE SWMM Model[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2005, 38(11): 907-916.

[10] Knight D, Sellin R. The SERC flood channel facility [J]. Water and Environment Journal, 1987, 1(2): 198-204.

[11] McMahon G F, Fitegerald R, McCarthy B. BRASS model: practical aspects [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1984, 110(1): 75-89.

[12] 徐海顺，张秋卓，蔡永立. 基于雨洪综合管理的上海临港新城降雨径流水文模拟[J]. 地理与地理信息科学，2013，29(3)：114-118.
Xu Haishun, Zhang Qiuzhuo, Cai Yongli. Hydrological simulation of rainfall runoff based on the view of stormwater integrated management in Shanghai Lingang new city[J]. Geography and Geo-Information Science. 2013, 29(3): 114-118.

[13] 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.
Zhou Yuwen, Zhao Hongbin. A study on urban storm runoff model[J]. China Water and Wastewater, 1997, 13(4): 4-6.

[14] 黄国如，吴思远. 基于 Infoworks CS 的雨水利用措施对城市雨洪影响的模拟研究[J]. 水电能源科学，2013，31(5)：1-4，17.
Huang Guoru, Wu Siyuan. Simulation study on effect of rainwater utilization measures on urban stormwater based on Infoworks CS[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 1-4, 17.

[15] 姜仁贵，解建仓，李建勋，等. 基于数字地球的洪水淹没分析及仿真研究[J]. 计算机工程与应用，2011，47(13)：219-222.
Jiang Rengui, Xie Jiancang, Li Jianxun, et al. Analysis and simulation of flood inundation based on digital earth [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(13): 219-222.

[16] Field R, Struck S, Tafuri A, et al. BMP technology in urban watersheds: current and future directions[M]. USA: American Society of Civil Engineers, 2006.

[17] Zhen X, Cheng M, Coffman L, et al. Low impact development (LID) BMP technology: planning tools[C]. BMP Technology in Urban Watersheds, 2006: 293-314.

[18] Mortimer C. Low impact urban design and development [EB/OL]. [2013-12-23] http://www.ourfuture.net.nz/Collections/13.

[19] 汉京超，王红武，张善发，等. 城市雨洪调蓄利用的理念与实践[J]. 安全与环境学报，2011，11(6)：223-227.
Han Jingchao, Wang Hongwu, Zhang Shanfa, et al. Idea and practice of urban storm-clog water storage and advantageous utilization[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(6): 223-227.

[20] 张书函，潘安君，孟庆义，等. 北京城市雨洪智能管理总体设计[J]. 水利水电科技进展，2010，30(1)：68-71.
Zhang Shuhan, Pan Anjun, Meng Qingyi, et al. Integrated design of intelligent management of urban storm water and flood in Bejing[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 68-71.

[21] Turoff M, Chumer M, Van de Walle B, et al. The design of a dynamic emergency response management information system[J]. Journal of Information Technology Theory and Application, 2004, 5(4): 1-36.

[22] Jason K Levy. Multiple criteria decision making and decision support systems for flood risk management [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2005, (19): 428-437.

[23] 李原园，郦建强，石海峰，等. 中国防洪若干重大问题的思考[J]. 水科学进展，2010，21(4)：490-495.
Li Yuanyuan, Li Jianqiang, Shi Haifeng, et al. Strategic thinking on major issues in China flood control[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 490-495.

[24] 张亚洲，王金如. 湖北黄石市应对暴雨洪灾的实践与思考[J]. 中国防汛抗旱，2010，20(5)：59-60.

[25] 李帅杰. 城市洪水风险管理及应用技术研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2013.
Li Shuaijie. Study on urban flood risk management and practical technology——a case study of Fuzhou City [J]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.

[26] 刘筱璇，薛安. 突发公共事件应急预案支持系统的研究进展[J]. 中国安全科学学报，2007，17(9)：87-91.
Liu Xiaoxuan, Xue An. Review on the development of emergency response plan supporting system[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(9): 87-91.

[27] Jenkins L. Selecting scenarios for environmental disaster planning[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(2): 275-286.

[28] Jason K Levya, Kouichi Tajib. Group decision support for hazards planning and emergency management: a group analytic network process (GANP) approach[J].

Mathematical and Computer Modeling, 2007, (46): 906-917.

[29] Reservoir project [EB/OL]. [2008-12-20] http://www.reservoirfp7.eu/home/.

[30] 水利信息化简报[EB/OL]. [2013-01-29] http://www.mwr.gov.cn/zwzc/jbjc/slxwhjb/.

[31] 戴汝为,沙飞. 复杂性问题研究综述:概念及研究方法[J]. 自然杂志,1995,17(2):73-78.
Dai Ruwei, Sha Fei. Review on complexity research: concepts and methodology[J]. Nature Magazine, 1995, 17(2):73-78.

[32] 戴汝为. 现代科学技术体系与大成智慧[J]. 中国工程科学,2008,10(10):4-8.
Dai Ruwei. Advanced construction of science and technology with meta-synthetic wisdom[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(10):4-8.

[33] 戴汝为. 支持科学决策和咨询的技术——思维系统工程[J]. 中国工程科学,2005,7(1):17-20.
Dai Ruwei. Technique for supporting scientific decision and consultation—noetic system engineering[J]. Engineering Sciences, 2005, 7(1):17-20.

[34] 唐锡晋,刘怡君. 从群体支持系统到创造力支持系统[J]. 系统工程理论与实践,2006,26(5):63-71.
Tang Xijin, Liu Yijun. From group support system to creativity support system[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(5):63-71.

[35] 李耀东,崔霞,戴汝为. 综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(1):27-32.
Li Yaodong, Cui Xia, Dai Ruwei. The framework, design & implementation of hall for workshop of meta-synthetic engineering[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(1):27-32.

[36] 魏继才,钟玮珺,张静,等. 综合集成系统中模型按需服务研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):3779-3786.
Wei Jicai, Zhong Weijun, Zhang Jing, et al. Study of modeling and simulation on demand at metasynthetic simulation environment[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16):3779-3786.

[37] 崔霞,戴汝为,李耀东. 群体智慧在综合集成研讨厅体系中的涌现[J]. 系统仿真学报,2003,15(1):146-153.
Cui Xia, Dai Ruwei, Li Yaodong. The emergence of collective wisdom in the hall for workshop of metasynthetic engineering[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(1):146-153.

[38] Canos J H, Alonso G, Jaen J. A multimedia approach to the efficient implementation and use of emergency plans[J]. IEEE Multimedia, 2004, 11(3):106-110.

[39] Hewitt C. ORGs for scalable, robust privacy-friendly client cloud computing [J]. IEEE Internet Computing, 2008, 12(5):96-99.

[40] Sarjoughian H S, Cellier F E. Discrete event Modeling and Simulation Technologies[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.

[41] Smoliar S W. Book review of creative cognition[J]. Artificial Intelligence, 1995, 79(1):183-196.

[42] Aihara K, Hon K. Enhancing creativity through reorganizing mental space concealed in a research notes stack[J]. Knowledge-Based System, 1998, 11(7-8): 469-478.

[43] OpenNebula project[EB/OL]. [2008-12-31] http://www.opennebula.org/doku.php.

[44] Google App Engine [EB/OL]. [2008-12-15]http://appengine.google.com.

[45] Hadoop [EB/OL]. [2008-12-16]http://hadoop.apache.org/core/.

[46] Nutch[EB/OL]. [2008-12-16]http://lucene.apache.org/nutch/.

[47] VMware virtualization technology [EB/OL]. [2008-12-15]. http://www.vmware.com.

[48] 陈田庆,解建仓,岳新利,等. 面向水利应用的网格计算平台设计与实现[J]. 计算机应用,2010,30(12):3191-3193,3200.
Chen Tianqing, Xie Jiancang, Yue Xinli, et al. Design and implementation of grid computation platform for water applications[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12):3191-3193,3200.

[49] 蔡阳,解建仓,张永进,等. 搭建水利网格平台 促进信息集成服务[C]//水利部信息化工作领导小组. 2007 全国水利信息化论坛论文集. 深圳,2007:3-11.
Cai Yang, Xie Jiancang, Zhang Yongjin, et al. To establish water grid platform and promote information integration services [C]//Informationization Leading Group of MWR. Proceedings of the 2007 national water conservancy informatization Forum. Shenzhen, 2007:3-11.

[50] 唐宗仁,赵红梅. 水利网格计算研究[J]. 水文,2008,28(5):18-23.
Tang Zongren, Zhao Hongmei. Research on grid computation for water resources[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5):18-23.

[51] 李波,解建仓,李建勋,等. 网格环境下的水利高性能计算平行系统及应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(S1):198-200.
Li Bo, Xie Jiancang, Li Jianxun, et al. High performance parallel systems of water resources in grid environment and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Sci-

ence)，2011，39(S1)：198-200.

[52] 李建勋，姜仁贵，李维乾，等. 水利数字地球基础平台构建及其应用[J]. 水利信息化，2011，(1)：25-28.
Li Jianxun, Jiang Rengui, Li Weiqian, et al. Application and construction of basic hydrological digital earth platform[J]. Automation in Water Resources and Hydrology，2011，(1)：25-28.

[53] 李建勋. 水利信息可视化服务支撑系统研究与应用[D]. 西安：西安理工大学，2012.
Li Jianxun. Research on water resources visualized service support system based on information and its application[J]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.

[54] 臧垒，蒋晓原，王钰，等. 基于计算实验的探索性分析框架研究[J]. 系统仿真学报，2008，20(12)：3077-3081.
Zang Lei, Jiang Xiaoyuan, Wang Yu, et al. Research on framework of exploratory analysis based on computational experiments[J]. Journal of System Simulation, 2008，20(12)：3077-3081.

[55] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统--关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学，2004，1(4)：25-35.
Wang Feiyue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems [J]. Complex Systems and Complexity Science，2004，1(4)：25-35.

[56] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. 系统仿真学报，2004，16(5)：893-897.
Wang Feiyue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems [J]. Journal of System Simulation，2004，16(5)：893-897.

[57] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策，2004，19(5)：485-489.
Wang Feiyue. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Cecision，2004，19(5)：485-489.

[58] 阮周生，徐定华，王泽文. 一类逆时反问题的改进正则化方法的收敛性[J]. 高等学校计算数学学报，2011，33(2)：156-168.
Ruan Zhoushcng, Xu Dinghua, Wang Zcwcn. Convergence on modified regularization method for a backward-in-time problcm[J]. Numcrical Mathcmatics A Journal of Chincsc Univcrsitics，2011，33(2)：156-168.

[59] 刘家琪. 数学物理方程反问题的分类及不适定问题求解[J]. 计算数学和应用数学，1983，(4)：43-64.
Liu Jiaqi. Classification of mathematical and physics equations inverse problems, and soling of ill－posed problem[J]. Applied Mathematics and Computation, 1983，(4)：43-64.

[60] 韩波，李莉. 非线性不适定问题的求解方法及其应用[M]. 北京：科学出版社，2011.

[61] 王彦飞，I. E. 斯捷潘诺娃，V. N. 提塔连科，等. 地球物理数值反演问题[M]. 北京：高等教育出版社，2011.

[62] 金忠青，周志芳. 工程水利学反问题[M]. 南京：河海大学出版社，1997.

[63] Andreas Kirsch. An introduction to the mathematical theory of inverse problem[M]. New York: Springer-Verlag，1996.

（责任编辑　王卫勋）