

大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评

吴先华^{1,2*}, 肖杨², 李廉水^{1,2}, 王国杰^{1,3}

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学经济管理学院, 南京 210044;

3. 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

* 联系人, E-mail: wxhua_77@nuist.edu.cn

2016-09-28 收稿, 2016-11-10 修回, 2016-11-14 接受, 2016-12-12 网络版发表

国家自然科学基金(91546117, 71373131, 41501555, 41375099, 41561124014)、国家公益性行业专项(GYHY 201506051)、国家软科学研究计划(2011GXQ4B025)、教育部留学回国人员科研启动基金(2013-693-郭际)、国家社会科学基金重大项目招标项目(16ZDA047)、江苏高校优势学科建设工程项目和江苏省首批品牌专业“信息管理与信息系统”项目资助

摘要 日益频发的城市暴雨内涝灾害已成为快速城镇化建设中急需应对的严峻挑战;但当前与暴雨内涝相关的气象数据、灾情数据和社会经济数据等尚未能有效融合,不能快速有效地生成内涝灾害应急决策方案,这成为灾害应急管理的障碍.本文从城市暴雨内涝灾害大数据融合的几个方面入手,分别评述了大数据的本体技术、数据融合方法、数据降维与灾害识别、灾害的社会经济损失评估,以及应急决策的生成与评估方法等相关理论与实践进展,并对未来研究进行了展望.最后指出,在大数据融合背景下开展城市暴雨内涝灾害的应急管理研究,具有丰富的理论和实践价值.

关键词 大数据, 融合, 城市暴雨内涝, 灾害, 应急管理

最近几十年来,气候变暖导致极端降水的频率和强度显著增加^[1];同时,城镇化加快而排水设施建设相对滞后,导致我国城镇频频遭受暴雨洪涝灾害的威胁.如北京市2012年的“7·21特大暴雨”,造成79人死亡,160.2万人受灾,房屋倒塌10660间,经济损失达116.4亿元(http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201207/t20120724_179464.html, 2012-07-24).有的城镇甚至“逢雨必涝”,造成人员伤亡并带来巨大经济损失.特别是2016年入夏以来,受超强厄尔尼诺现象的影响,我国东部地区遭遇暴雨袭击,城市受灾极为严重.中共中央总书记、国家主席习近平同志一个月内三次谈抗洪救灾问题,提出“突出防御重点”等六点要求,洪涝灾害的应急管理成为各级政府和民众关注的热点和难点问题.

城市暴雨内涝灾害应急管理是一个典型的多学科交叉和大数据问题,涉及到气象学、地理学、信息科学、城市规划、经济学、管理学等多个学科.相关数据包括气象数据、城市内涝数据、社会经济数据等,来源丰富且数据量庞大.如仅气象数据就有4~5 PB,年增量约1 PB.城市内涝数据既有来自水量计、位移计、雷达水位仪、传感器等的实时水位数据,又有来自智能探头、微信等的视频、图片、语音数据,还包括互联网上的大量文字、图片信息^[2].这些数据具有大数据典型的4V特征^[3]:体量浩大(volume),模态繁多(variety),生成快速(velocity)和价值巨大但密度很低(value).由于数据来自水利、气象、城管、运营商和互联网等不同部门,时空尺度互不相融,格式标准互不统一,给灾害的应急决策带来巨大障碍.因此,

引用格式: 吴先华, 肖杨, 李廉水, 等. 大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评. 科学通报, 2017, 62: 920–927

Wu X H, Xiao Y, Li L S, et al. Review and prospect of the emergency management of urban rainstorm waterlogging based on big data fusion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 920–927, doi: 10.1360/N972016-01080

如何实现灾害大数据的融合,成为紧迫而又必要的关键问题.在大数据背景下,首先要构建城市暴雨内涝灾害本体,然后对多源异构数据进行有效融合,并对大数据进行降维、评估灾害的社会经济损失,在此基础上,借助专家决策,快速生成应急决策方案.这涉及到大数据的本体技术、数据融合方法、数据降维与灾害识别、灾害的社会经济损失评估,以及应急决策的生成与评估方法等内容.下面将简要论述这些理论研究和实践发展的趋势,提出未来研究的主要内容以及可能存在的研究难点.

1 相关理论及实践述评

1.1 相关理论进展

(i) 城市暴雨内涝灾害本体的构建.“本体”作为一种描述术语及术语间关系的概念模型,可以将各类灾害术语、数据及各类数据模型开发规范成一个“暴雨内涝灾害大数据”本体,使得多维异构的灾害数据更加规范统一,容易查找和利用,更好地为灾害的应急决策服务.目前国内外将本体理论和技术引入气象灾害尤其是城市暴雨内涝领域的研究相当少.如Austin等人^[4]融合本体规则和信息传递机制,对华盛顿特区的地铁系统如何应对严重暴雨灾害进行仿真模拟;Jung和Chung^[5]设计了一个基于本体驱动的气象灾害服务模型,可以对气象灾害进行快速反映和辅助决策.在国内,王海婷^[6]构建了洪水风险分析领域的本体,设计了面向对象的空间数据库.杜志强和顾捷晔^[7]提出了一种灾害链领域本体的构建方法,并以暴雨-洪涝灾害链为例进行了验证.何险峰等人^[8]提出了一种基于W3C(World Wide Web Consortium)标准的气象灾害本体化设计思路及其实现方法等.总体来看,关于气象领域的本体研究甚少,且多偏重于框架、模型和知识库的构建,几乎没有关于城市暴雨内涝灾害数据标准和规范制订、本体模型构建和语义标注(即对离散的灾情数据进行汇总和整理,并基于标准化的专家知识库和标准化语言进行分类和特征提取,以及时有效地抽取有价值的灾情信息)的研究,因此具有很大的探讨空间.只有在构建本体的基础上,才能对多维异构大数据进行规范统一,进而开展大数据的融合.

(ii) 城市暴雨内涝灾害大数据的融合.在气象灾害大数据领域中,数据融合技术的应用主要集中

在对多源、多尺度、多角度和多时相的气象遥感观测数据的融合等方面.如美国科学院地理信息科学院士Goodchild^[9]和Longley等人^[10,11]多年来一直专注于气象、地质、水文、植被、动物、湖沼、计算机及遥感等领域空间数据的融合研究,提出了基于网格的多元空间数据融合的算法模型,为空间大数据的融合发展作出了重要贡献.另外还有Llinas^[12],Granell和Ostermann^[13],Papadopoulos等人^[14]的研究.在我国,面向地质灾害应急的多源数据融合技术已有一定的发展^[15],但针对城市暴雨内涝灾害的大数据融合技术及其应用非常少.只有对城市暴雨内涝的相关数据资料如雨量计、传感器、摄像头、网络视频资料、人口分布、GDP密度、道路交通等数据进行有效融合,才能进一步开展大数据的特征提取与分类识别研究^[2].

(iii) 大数据的特征提取与分类识别.城市暴雨内涝灾害大数据所包含的属性数和记录数都很大,导致相应处理算法的执行效率低下.通过特征选择与特征提取算法可以得到更能反映数据本质结构、执行效率更高的特征空间,解决“维数灾”问题.在灾害识别方面,金菊良等人^[16]曾提出基于加速遗传算法的层次分析法(accelerating genetic algorithm-analytic hierarchy process, AGA-AHP),用于识别灾害的风险.吴鹏天昊等人^[17]根据高分影像纹理分维变化,进行灾害的自动识别.韩国学者Choi和Bae^[18]研发了灾害的实时监测管理系统,该系统可根据Twitter的社会媒体数据,自动识别生成灾害地图等.在利用深度学习技术进行分类识别建模过程中,如何构建特定激活函数和确定学习层数是深度学习能否成功的关键.进一步地,如何利用大数据挖掘技术,识别城市暴雨内涝风险和进行预警预报,是城市内涝应急管理的关键.

(iv) 城市暴雨内涝灾害的经济社会影响评估.通过经济损失评估,有利于筛选灾害的高风险点、高影响产业和部门,可为灾害应急管理方案优先序的生成提供参考.在灾害的直接经济损失评估方面,国内外已有许多机构和学者开展了类似的研究^[19-26].但国内学者研究的样本数量较少,覆盖面不够,不能反映不同类型承灾体的特征,这与城镇洪涝灾害事件急剧增加的现实并不相称.原因在于城镇承灾体种类繁多,加大了调研和统计分析的难度^[27].将社会调研、遥感数据和Web数据等融合后,构建合理的

灾损率曲线是直接经济损失评估的可行途径^[27,28]. 在灾害对产业部门的经济影响方面, 学者们多采用投入产出思想, 将暴雨内涝灾害等视为投入因子, 计算产业和社会系统的经济损失^[29~35]. 在区域的影响方面, Okuyama^[36]用投入产出模型及社会核算矩阵, 计算了全球近十年暴雨洪涝等自然灾害对各产业的影响. 结果发现, 制造业和服务业产业受到的影响最大, 农业和采掘业受到的影响反而次之等; van der Veen等人^[37]将县级社会核算矩阵(multi-county social accounting matrix)进一步细化, 用GIS描绘经济高敏感点的轮廓图, 将投入产出表(input-output table)的计算结果可视化; Brown等人^[38]将该技术进一步细化, 提出了500 m²尺度的多地区投入产出分解模型(disaggregation multiregional input-output model), 以显示经济活动的区域分布情况及其间接损失的大小. 细化后的地理模型能更清晰地说明哪些地区的经济损失更为重要. 结果显示, 经济损失的区域分布与人口及产业活动的分布并不完全一致. 由于灾后应急需要考虑受影响区域的优先次序, 这些研究对城市暴雨内涝灾害的应急管理颇具借鉴意义.

(V) 城市暴雨内涝灾害的应急决策. 融合生成的灾害大数据, 按照一定的规则支持应急决策方案的生成, 才体现其社会管理价值. 薛澜等人^[39]认为, 应急管理的实质是非程序化决策问题, 决策者必须在有限的信息、资源和时间(客观上标准的“有限理性”)的条件下寻求“满意”的处理方案. 余廉和曹兴信^[40]提出, 加强灾害监测与预警信息的快速采集与处理能力建设非常重要. 因此, 以大数据为驱动, 综合多方面信息, 实现灾害应急管理决策的快速生成、评估与反馈, 不但能在一定程度上解决“决策者有限理性”的难题, 还具有重要的实践意义. 在方案快速生成方面, 国内外学者主要采取案例推理(case-based reasoning, CBR)技术和规则推理(rule-based reasoning, RBR)等方法作了大量研究^[41~44]. 吴先华等人¹⁾针对深圳市暴雨内涝灾害开展了相关研究, 将降水量预报数据、易涝点社会经济财产数据、防御对策数据集成到Oracle关系型数据库, 计算各易涝点的直接和间接经济损失值, 采取GIS技术将损失值在空间上展布; 然后采用RBR技术提取不同灾害等级情

景下的防御对策, 自动生成暴雨内涝灾害的经济损失及防御对策报告, 做了有益尝试.

1.2 相关实践进展

美国等发达国家高度重视气象灾害的科学防灾减灾, 进行了卓有成效的探索. 美国自20世纪60年代以来, 将全国划分为13个区域, 利用先进的水文气象耦合预报和现代信息技术, 逐步建立“3S”洪水预警系统. 美国的联邦应急管理机构(Federal Emergency Management Agency, FEMA)^[45~47]推出HAZUS-MH系列, 作为国家适用的标准应用软件平台, 可以评估飓风和城市暴雨内涝带来的潜在损失. 该系统融合了基础地理空间信息数据、基于调查的社区社会经济数据、历史灾情数据、实时观测的地震和气象数据, 为内涝灾害的早期预警和灾害评估决策提供了重要的依据. 美国的国土安全部科学与技术局(US Department of Homeland Security's Science & Technology Directorate, DHS-S&T)研发了“市民社会媒体预警与反应系统”(Social Media Alert and Response to Threats to Citizens, SMART-C), 该系统利用手机和其他GPS设备数据, 提供市民反映、灾害事件的演化、社区需求等信息, 可以为城市内涝灾害应急决策提供实时、动态的空间信息^[48].

其他一些国家的政府、大学和研究部门等也纷纷构建了城市内涝灾害应急管理系统. 如韩国的国家灾害管理院(National Disaster Management Institute)研制了基于社会大数据的灾害实时监测系统(Social Big Board), 通过Twitter抓取、分析社会大数据, 在地图上实时显示灾害程度和发展趋势^[18]. 日本广播协会(Nippon Hoso Kyokai)以2011年东日本大地震灾害为例, 发布了有关人口、灾情分布和经济联系中断等大数据的概况等等, 但仅局限于将灾情和社会经济等数据在空间上简单展布, 还有很大的探讨空间. 另外的应急管理系统还包括日本的灾害应变系统、联合国国际减灾十年办公室研发的国际灾害信息资源网络, 加拿大应急管理署构建的全球危机和应急管理系统, 挪威、法国、芬兰、丹麦共同开发的模块化紧急管理系统等. 但这些系统大多侧重灾害风险的预警与损失评估, 对于如何自动生成应急决策方案, 如

1) 吴先华, 吴亚玲, 吉中会, 等. 深圳市龙华新区暴雨灾害经济损失快速评估系统研发. 工作论文. 南京: 南京信息工程大学, 2015

何开展具体的应急救援、疏散与处置等工作,涉及相对较少,但其如何进行数据融合的思路和方法值得我们学习。

2 研究展望

综上所述,在城市暴雨内涝灾害大数据融合及其应急管理主题上,国内理论研究和实践相对滞后。因此急需融合多学科知识开展协同攻关。由于本主题涉及到多项研究内容,拟按照城市暴雨内涝灾害应急管理研究的逻辑顺序:本体构建→数据融合→降维与灾害识别→经济社会影响评估→应急方案生成与评价,分5个方面对未来研究做简要展望,并指出可能存在的研究难点。

城市暴雨内涝灾害的本体构建问题。主要内容:设计城市暴雨内涝灾害大数据标准体系、实现城市暴雨内涝灾害的语义标注、构建城市暴雨内涝灾害的本体概念模型。研究难点可能在于:在前期城市暴雨内涝灾害的数据分类和本体概念建模的基础上,如何对UML(Unified Modeling Language)概念模型及OWL-DL(Web Ontology Language-Description Logic)本体语言进行模糊扩展,增强本体的表达能力。

多源(硬、软)数据的融合研究问题。内容可以包括:非空间属性数据的网格化、统一空间坐标体系的构建、网格化软硬数据融合的通用算法等研究,解决硬数据与软数据的一致性与关联问题。研究难点可能在于,如何根据不同城市中社会经济统计类非空间属性数据的特点,选择不同的函数形式,在空间尺度上进行分解,解决多源异构大数据集成时尺度不一致的问题。

城市暴雨内涝灾害大数据的降维与灾害识别。即从繁杂的大数据集中提取城市暴雨内涝灾害的复杂变化特征,实现高维数据的维数约简和城市暴雨内涝灾害的识别。但在深度学习技术的应用建模过程中,如何选择特定激活函数和确定学习层数,构建城市暴雨内涝灾害识别的深度学习系统,是可能的研究难点。

城市暴雨内涝灾害的经济社会影响评估。内容可以包括:构建城市暴雨内涝灾害风险数据库、评估高风险点(易涝点)的经济损失,评估典型城市暴雨内涝灾害给关联区域、产业和部门带来的经济影响,为城市暴雨内涝灾害的应急管理提供数据和情景支持。在构建经济损失评估模型时,如何设定城市暴雨内

涝灾害传导模块(如仓储业损失传导模块、交通运输业损失传导模块和旅游业损失传导模块等)以及其他相关模块,以体现灾害变量对经济系统中产业、区域和部门的影响,是可能的研究难点。

城市暴雨内涝灾害应急决策方案的生成与评价。如依据气象数据、城市内涝数据、社会经济数据融合平台,采取案例推理(CBR)、规则推理(RBR)、地理信息系统(GIS)等方法,生成应急决策方案,然后根据情景变化,对应急方案进行评价和调整。但灾害应急方案的自动生成须基于相似历史案例库。在相似历史案例库中如何确定方案的相似度阈值,在此基础上遴选、修正形成基于目标案例的应急决策方案的表达形式,是可能的研究难点。

3 结语

日益频发的城市暴雨内涝灾害已成为我国城镇化建设急需应对的严峻挑战,但目前的灾害大数据尚未能有效融合,成为城市暴雨内涝灾害应急管理的障碍。开展大数据融合背景下的城市暴雨内涝灾害的应急管理研究,价值和意义体现在以下几个方面。

(1) 丰富城市暴雨内涝灾害应急管理的理论和方法。从本体技术的角度研究硬数据和软数据融合的基本方法,从信息科学的角度提出相应的融合算法,从概率统计的角度研究大数据的降维与灾害识别技术,从经济学的角度研究灾害的经济损失评估问题,从管理学的角度研究应急决策方案的快速生成、评价与反馈等,这些都是各领域的基础性和热点难点问题,对于丰富城市防灾减灾和应急管理等领域知识具有重要意义。

(2) 为以大数据为驱动的管理决策范式改变进行创新性探索。目前,大数据的蓬勃发展,促使人们重新思考以大数据为基本资源和主要研究工具的管理决策范式的改变。城市暴雨灾害所涉及的多源异构数据是典型的大数据,在大数据融合的基础上开展应急管理实践,是突破传统应急管理决策范式的有益尝试。

(3) 为管理科学、经济学、气象学和信息科学的学科融合发展提供典型范例。范维澄^[49]提出,灾害的应急管理迫切需要多学科知识的支撑。由于传统的学科和专业设置,所培养人才的知识面和基本技能相对狭窄。灾害标准的设计、灾害应急流程的设计、灾害数据的处理和应急系统的设计,均处于无法

规可循、无行业标准可执行、无专业技术人员可依靠的状态。在灾害的应急管理上,常面临“头痛医头、脚痛医脚”的尴尬境地。城市暴雨内涝灾害的应急管理问题,迫切需要组建和培养多学科知识融会贯通的

人才队伍,深入开展具有原始创新特征的探索性研究,将“硬科学”与“软科学”充分结合,达到“顶天立地”的要求,才能有效应对城市暴雨内涝灾害带来的困扰,实现人类社会与自然发展的和谐统一。

参考文献

- Ding Y H, Wang H J. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1029–1041 [丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61: 1029–1041]
- Sun X X. Study on the big data technology of the city unexpected flood disaster (in Chinese). *Bull Sci Tech*, 2016, 32: 196–199 [孙欣欣. 城市突发水涝灾害大数据分析技术研究. 科技通报, 2016, 32: 196–199]
- Wang C H, Chen W N, Zhang J, et al. Challenging scientific problem for technologies and applications of big data (in Chinese). *Sci Foundation Chin*, 2014, 2: 92–98 [王成红, 陈伟能, 张军, 等. 大数据技术与应用中的挑战性科学问题. 中国科学基金, 2014, 2: 92–98]
- Austin M, Delgoshaei P, Nguyen A. Distributed system behavior modeling with ontologies, rules, and message passing mechanisms. *Procedia Comput Sci*, 2015, 44: 373–382
- Jung H, Chung K. Ontology-driven slope modeling for disaster management service. *Clust Comput*, 2015, 18: 677–692
- Wang H T. Ontology constructing and object-oriented spatial database designing in the flood risk analysis area. Master Dissertation. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012 [王海婷. 洪水风险分析领域本体构建与面向对象的空间数据库设计. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012]
- Du Z Q, Gu J Y. A domain ontology construction method of disaster chain—Case study of rainstorm flood disaster chain (in Chinese). *Geomatics World*, 2016, 23: 7–13 [杜志强, 顾捷晔. 灾害链领域本体构建方法——以暴雨洪涝灾害链为例. 地理信息世界, 2016, 23: 7–13]
- He X F, Zhang X F, Zheng L J, et al. Ontology design of meteorological disaster (in Chinese). *Meteorol Sci Technol*, 2012, 40: 1007–1013 [何险峰, 张祥锋, 郑利娟, 等. 气象灾害本体设计. 气象科技, 2012, 40: 1007–1013]
- Goodchild M F. Putting research into practice. In: Stein A, Shi W, Bijker W, eds. *Quality Aspects of Spatial Data Mining*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 345–356
- Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. *Geographical Information Systems and Science*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2001. 396–397
- Longley P, Goodchild M F, Maguire D, et al. *Geographic Information Systems and Science*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005
- Llinas J. Information fusion for natural and man-made disasters. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion 8–11 July 2002*. IEEE, 2002. 570–576
- Granell C, Ostermann F O. Beyond data collection: Objectives and methods of research using VGI and geo-social media for disaster management. *Comput Environ Urban Syst*, 2016, 59: 231–243
- Papadopoulos T, Gunasekaran A, Dubey R, et al. The role of big data in explaining disaster resilience in supply chains for sustainability. *J Cleaner Prod*, 2016, 142: 231–243
- Zhu C H. Study of data warehouse and data mining application on geohazards in Three Gorges Reservoir Area (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2010 [朱传华. 三峡库区地质灾害数据仓库与数据挖掘应用研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2010]
- Jin J L, Wei Y M, Fu Q, et al. An improved analytic hierarchy process and its application to risk identification of natural disaster (in Chinese). *J Nat Disaster*, 2002, 11: 20–24 [金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 改进的层次分析法及其在自然灾害风险识别中的应用. 自然灾害学报, 2002, 11: 20–24]
- Wu P T, Wu L X, Shen Y L, et al. Disaster auto-recognition method based on HSR-Image's texture monotonous change (in Chinese). *Geogr Geo-Inf Sci*, 2012, 28: 9–14 [吴鹏天昊, 吴立新, 沈永林, 等. 基于高分影像纹理分维变化的灾害自动识别方法. 地理与地理信息科学, 2012, 28: 9–14]
- Choi S, Bae B. The real-time monitoring system of social big data for disaster management. In: Park J J, Stojmenovic I, Jeong H Y, et al., eds. *Computer Science and its Applications*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015, 330: 809–815
- Davis S A. Business depth-damage analysis procedures. Research Report 85-R-5. Washington DC: Institute for Water Resources, Water Resources Support Center, US Army Corps of Engineers, 1985

- 20 Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods (in Chinese). *Prog Geogr*, 2009, 28: 41–46 [石勇, 许世远, 石纯, 等. 洪水灾害脆弱性研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28: 41–46]
- 21 Kelman I. Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England. Doctor Dissertation. Cambridge: University of Cambridge, 2003
- 22 Dutta D, Tingsanchali T. Development of loss functions for urban flood risk analysis in Bangkok. In: *Proceedings of the Second International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*. Tokyo: International Center for Urban Safety Engineering, 2003. 229–238
- 23 Yin Z E, Xu S Y, Yin J, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2010, 65: 553–562 [尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. *地理学报*, 2010, 65: 553–562]
- 24 Shi Y. Research on vulnerability assessment of cities on the disaster scenario—A case study of Shanghai city (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: East China Normal University, 2010 [石勇. 灾害情景下城市脆弱性评估研究: 以上海市为例. 博士学位论文. 上海: 华东师范大学, 2010]
- 25 Dong S N, Jiang L P, Zhang J Q. Research on flood vulnerability curves of rural dwellings based on “3S” technology (in Chinese). *J Catastrophol*, 2012, 27: 34–38 [董姝娜, 姜臻鹏, 张继权, 等. 基于“3S”技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究. *灾害学*, 2012, 27: 34–38]
- 26 Wu X H, Zhou L, Gao G, et al. Flood depth-damage curves for urban properties considering disaster prevention and mitigation capabilities: Evidence from Lizhong Town, Lixiahe region, China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2016, 35: 223–231 [吴先华, 周蕾, 高歌, 等. 考虑防灾减灾能力的洪涝灾害灾损率曲线构建: 以里下河地区的李中镇为例. *地理科学进展*, 2016, 35: 223–231]
- 27 Li J R, Ding Z X, Huang S F, et al. Research of flood and waterlogging loss assessment model based on spatial distribution social-economic database (in Chinese). *J Chin Inst Water Resour Hydr Res*, 2003, 1: 104–110 [李纪人, 丁志雄, 黄诗峰, 等. 基于空间展布式社会经济数据库的洪涝灾害损失评估模型研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2003, 1: 104–110]
- 28 Ding Z X. A study on the technology and method of flood and waterlogging disaster loss assessment based on RS and GIS (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. 25–41 [丁志雄. 基于RS与GIS的洪涝灾害损失评估技术方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004. 25–41]
- 29 Haines Y Y, Jiang P. Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *J Inf Syst*, 2001, 7: 1–12
- 30 Lu C, Wei Y M, Fan Y, et al. Quantitatively analytic model for the impact of natural disaster on national economy (in Chinese). *J Nat Disaster*, 2002, 11: 15–20 [路琮, 魏一鸣, 范英, 等. 灾害对国民经济影响的定量分析模型及其应用. *自然灾害学报*, 2002, 11: 15–20]
- 31 Hu A J, Li N, Shi P J, et al. Indirect effects of infrastructure disruptions caused by extreme weather events with application of the inoperability input-output model (in Chinese). *Econ Geogr*, 2009, 29: 529–534 [胡爱军, 李宁, 史培军, 等. 极端天气事件导致基础设施破坏间接经济损失评估. *经济地理*, 2009, 29: 529–534]
- 32 Zhang P, Li N, Wu J D, et al. Assessment of regional flood disaster indirect economic loss based on input-output model (in Chinese). *Resour Environ Yangtze Basin*, 2012, 21: 773–779 [张鹏, 李宁, 吴吉东, 等. 基于投入产出模型的区域洪涝灾害间接经济损失评估. *长江流域资源与环境*, 2012, 21: 773–779]
- 33 Haines Y Y, Horowitz B M, Lambert J H, et al. Inoperability Input-Output model (IIM) for interdependent infrastructure sectors: Theory and Methodology. *J Inf Syst*, 2005, 11: 67–79
- 34 Wu X H, Nie G X, Guo J, et al. Policy revelations and impact assessment of disasters based on technical coefficients matrix (in Chinese). *Stud Sci Sci*, 2012, 30: 1676–1683 [吴先华, 聂国欣, 郭际, 等. 基于技术系数矩阵的灾害影响评估及政策启示. *科学学研究*, 2012, 30: 1676–1683]
- 35 Wu X H, Xue P P, Guo J, et al. On the amount of counterpart assistance to be provided after natural disasters: From the perspective of indirect economic loss assessment. *Environ Hazards*, 2016, doi: 10.1080/17477891.2016.1229655
- 36 Okuyama Y. Economic impacts of natural disasters: Development issues and empirical analysis. In: *17th International Input-Output Conference*, 2009
- 37 Van der Veen A, Steenge A E, Bockarjova M, et al. Structural economic effects of large-scale inundations: A simulation of the Krimpen dike breakage. In: *In Search of A Common Methodology on Damage Estimation Workshop*. EU Joint Research Centre, 2003
- 38 Brown B B, Yamada I, Smith K R, et al. Mixed land use and walkability: Variations in land use measures and relationships with BMI, overweight, and obesity. *Health Place*, 2009, 15: 1130–1141
- 39 Xue L, Zhang Q, Zhong K B. Crisis management in China: The challenge of the transition (in Chinese). *Chin Soft Sci*, 2003, 18: 6–12 [薛澜, 张强, 钟开斌. 危机管理: 转型期中国面临的挑战. *中国软科学*, 2003, 18: 6–12]
- 40 She L, Cao X X. Basic thoughts on the construction of disaster emergency capacity in China (in Chinese). *Management World*, 2012, 7: 176–177 [余廉, 曹兴信. 我国灾害应急能力建设的基本思考. *管理世界*, 2012, 7: 176–177]

- 41 John D A, John R R. A framework for medical diagnosis using hybrid reasoning. *Lect Notes Eng Comput Sci*, 2010, 1: 978–988
- 42 Nisanbayev Y, Ko I S, Abduliaev S, et al. E-commerce Applications of the Hybrid Reasoning Method. In: *Proceedings of International Conference on New Trends in Information and Service Science*, 2009. 797–801
- 43 Yang L X, Yu L A, Tang L. Introduction to system engineering and unconventional emergency management (in Chinese). *Syst Eng Theor Prac*, 2015, 3: I0001–I0004 [杨列勋, 余乐安, 汤铃. 系统工程与非常规突发事件应急管理专辑序言. 系统工程理论与实践, 2015, 3: I0001–I0004]
- 44 Chen R, Wang H M, Tong J P. Modelling and simulation extreme flood disasters emergency management process using Stochastic Petri Net (in Chinese). *J Syst Manag*, 2014, 23: 238–246 [陈蓉, 王慧敏, 佟金萍. 基于 SPN 的极端洪灾应急管理流程建模仿真. 系统管理学报, 2014, 23: 238–246]
- 45 Scawthorn C, Flores P, Blais N, et al. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II: Damage and loss assessment. *Nat Hazards Rev*, 2006, 7: 72–81
- 46 Vickery P J, Skerlj P F, Lin J, et al. HAZUS-MH hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation. *Nat Hazards Rev*, 2006, 7: 94–103
- 47 Kappes M S, Keiler M, von Elverfeldt K, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Nat Hazards*, 2012, 64: 1925–1958
- 48 Adam N R, Shafiq B, Staffin R. Spatial computing and socialmedia in the context of disaster management. *Intell Syst*, 2012, 27: 90–96
- 49 Fan W C. Advisement and suggestion to scientific problems of emergency management for public incidents (in Chinese). *Sci Found Chin*, 2007, 2: 71–76 [范维澄. 国家突发公共事件应急管理中科学问题的思考和建议. 中国科学基金, 2007, 2: 71–76]

Summary for “大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评”

Review and prospect of the emergency management of urban rainstorm waterlogging based on big data fusion

WU XianHua^{1,2*}, XIAO Yang², LI LianShui^{1,2} & WANG GuoJie^{1,3}

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

² School of Economics and Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

³ School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

* Corresponding author, E-mail: wxhua_77@nuist.edu.cn

The frequent occurrence of urban rainstorm waterlogging is a severe challenge for China's rapid urbanization, which demands prompt countermeasures. However, the fact is that the meteorological data, disaster data, and socio-economic data about rainstorm waterlogging have not been fused effectively at present, which makes it difficult to make emergency response plans in a quick and effective manner and thus hinders the emergency management. The emergency management of urban rainstorm waterlogging is a typical problem of multi-disciplines and big data, involved with meteorology, geography, information science, city planning, economics, management science and other disciplines. The great mass of related data possess rich resources, such as meteorological data, urban waterlogging data, socio-economic data, etc. As these data come from such different departments as water conservancy, meteorology, urban management, operators and Internet, with incompatible temporal and spatial scales as well as non-uniform format standards, thus bringing a huge obstacle to emergency decisions. Therefore, how to achieve the integration of the big data of disasters has become an urgent key issue. In the context of big data, urban rainstorm waterlogging ontology should be constructed in the first place, and then multi-source heterogeneous data should be effectively fused, big data dimension reduced and socio-economic losses assessed. Based on that, an emergency decision can be quickly formed with the help of expert decisions. This is concerned with such contents as large data ontology technology, data fusion methods, data dimension reduction and disaster identification, socio-economic loss assessment of disasters as well as the formation and evaluation of emergency responses. This paper, proceeding from the five parts of the big data fusion of urban rainstorm waterlogging, reviews such theoretical and practical development as ontology technology, data fusion method, data dimension reduction, disaster identification, socio-economic loss assessment of disasters, as well as the drawing up and assessment method of emergency response plans. Generally speaking, China is in urgent need of multi-disciplinary integration to collectively tackle critical problems. Future studies can be carried out in the following ways: First, design big data standard system of urban rainstorm waterlogging, so as to realize the semantic annotation of city waterlogging. Second, conduct in-depth researches on such three aspects as grid non-spatial attribute data, unified spatial coordinate system, together with the general algorithm of soft and hard data fusion, in order to solve the problems of the consistency and association between soft data and hard data. Third, extract complex changes in urban rainstorm waterlogging from multifarious data, so as to realize the dimension reduction of high dimensional data and the recognition of urban rainstorm waterlogging. Fourth, construct the risk database of urban rainstorm waterlogging disasters and assess the economic impacts of typical urban waterlogging on related regions, industries and departments, in order to provide data and scenario support for the emergency management of urban rainstorm waterlogging. Fifth, based on the fusion platform of meteorological data, urban waterlogging data and socio-economic data, by means of case-based reasoning (CBR), rule-based reasoning (RBR) and geographic information system (GIS), generate emergency response plans, and then evaluate and adjust them according to the scenario changes. Finally, what is pointed out is that the research should be carried out on the emergency management of urban waterlogging in the context of big data fusion, which can enrich the theories and methods of the emergency management of urban rainstorm waterlogging and set a typical example for the innovative exploration of the paradigm changes in big-data-driven management decisions, and for the multi-disciplinary development of management science, economics, meteorology and information science.

big data, fusion, urban rainstorm waterlogging, disaster, emergency management

doi: 10.1360/N972016-01080