

# 大数据技术在应急救援领域的应用及展望

关键词：大数据 应急救援 物联网 灾害遥感 无人机

吕欣

国防科技大学

## 应急救援事件的大数据应用实践

地震、海啸、战乱等灾害事件每年都对世界各国的经济和社会发展产生巨大影响。红十字会与新月会国际联合会 (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, IFRC) 2016 年报告显示, 2016 年全球因自然灾害与人为灾难导致的经济损失总额达 1580 亿美元, 影响 5.7 亿人。过去 40 年, 全球自然灾害造成的总经济损失占全球 GDP 比例从 1975—1984 年间的 0.09% 增长到 2005—2014 年间的 0.27%<sup>[1]</sup>。除了直接影响外, 物资紧张、人群疏散和迁徙、流行病 (疟疾、霍乱等) 的爆发等次生灾害往往后果更严重, 持续时间更长、覆盖范围更广。因此, 研究灾害事件的应急理论, 如灾害感知和预警、应急救援、灾民疏散与安置等, 对及时援助受灾群众, 完善预防和救援保障机制, 保护人民生命财产安全等具有重要意义。然而, 长期以来, 由于灾害事件发生的不确定性以及严重的破坏性, 人们对灾害事件下的受灾规模、影响人群及其疏散和迁徙行为等的认知往往只能依赖历史经验, 或通过灾后对受灾地区或人群的跟踪调查获得, 缺乏时效性和针对性, 严重阻碍了应急救援的及时开展, 对各国建立灾害预警和应急反应系统、及时优化和配置决策方案造成很大困难。

大数据技术的应用和普及为灾害事件的应急管

理提供了新的思路<sup>[2,3]</sup>。随着移动互联网、卫星遥感、物联网、无人机等的广泛应用, 各种社会和物理传感设备为灾害感知、灾情评估、灾后重建等提供了大量实时、定量的数据。此外, 多种数据融合进一步为系统、全面地建立健全应急救援体系提供了新的技术方法。应急救援领域也涌现出一些新的技术和应用, 其中典型代表如灾情地图 (crisis mapping)、众包技术 (crowdsourcing)、贫穷地图 (poverty mapping)、地震感知手机应用 MyShake 等, 提高了应急救援能力, 促进了现代应急救援管理模式的变革和发展。

## 手机数据与定位技术

作为覆盖人群最广、使用最便捷的移动传感设备, 手机通信数据可以被用来在应急突发事件条件下对大规模人群进行定位和追踪 (图 1(a)), 进而提取出灾民的分布和流动信息, 为救援物资配置提供重要的决策基础。手机终端的定位一般可通过基站 (精度由基站密度决定, 几百米到几十公里)、GPS (10 米以内) 或 Wi-Fi (数十米左右) 来实现。由于手机在世界各国包括中低收入国家均得到普及, 而且各地运营商相对完备地采集和存储了相关数据, 一旦发生应急突发事件, 这类数据就能迅速地被用于人群撤离迁移行为的分析, 并为紧急疏散、应急救援提供决策指导。

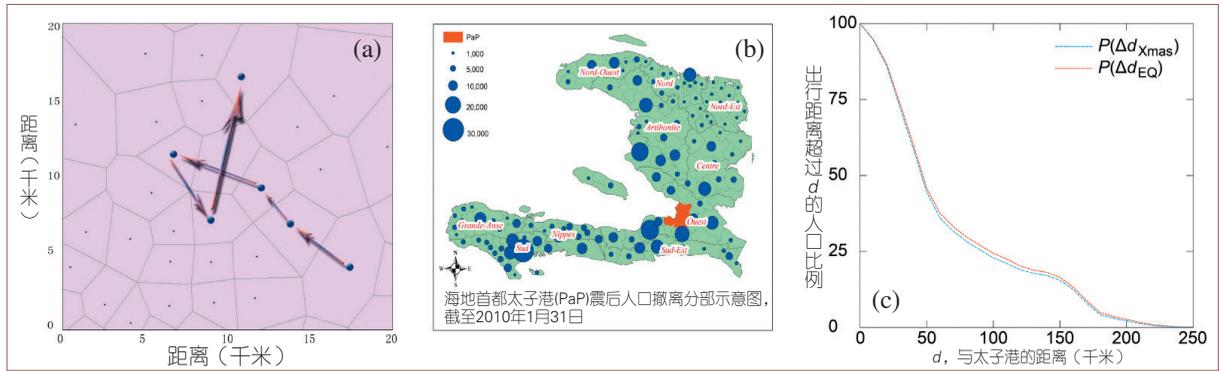


图1 (a)手机基站定位示意图；(b)从移动数据中提取的海地地震后难民疏散分布<sup>[5]</sup>；(c)从灾区撤离的难民移动距离 ( $P(d_{EQ})$ ) 与其在地震前圣诞节所处的位置 ( $P(d_{Xmas})$ ) 高度匹配<sup>[4]</sup>

作为手机定位数据在应急救援领域的开创性应用，笔者及其合作者在2010年海地地震（2010年1月12日， $M_w^1$  7.0级）发生后，通过海地最大的移动运营商 Digicel 获取了300多万匿名用户在地震前后共359天的通讯呼叫记录 (Call Detail Records, CDR) 数据。这些数据从时间和空间两方面精确记录了地震发生后的人群流动详细情况（图1(b)）。分析表明，海地首都太子港的原有居民在地震后大批逃离，在震后第19天达到极值，共有大约63万人逃离太子港。此后，灾民逐渐返回，直至2010年5月，太子港人口才逐渐恢复到平稳状态。此外，基于手机数据还能对灾民分布情况进行细致分析，从而有效地为救援机构提供决策支持，辅助救援物资分配与发放。这一技术在2015年尼泊尔地震（2015年4月25日， $M_w$  7.8级）发生后得到了快速部署，使得研究人员对1200多万名用户的定位信息进行快速的系统分析和整合，提取地震后每日的人群流动状态，做到与救灾工作同步，达到快速、准确、实时的要求。

以手机为代表的移动数据挖掘还能进一步应用于分析大规模人类行为及其与社会环境变化的关系。笔者通过对海地地震后用户行为的分析发现，大规模人群移动行为并不是杂乱无章的，而是具有高度的规律性和历史相似性，其可预测性（基于Fano不等式计算得到的根据时间和空间相关性能达到的理

论预测精度上限）高达85%，见图1。进一步的研究发现，逃离震区的灾民大多数都采取了“投亲靠友”的方式，来到他们曾经多次访问过的社会关系密切的亲友家中（图1(c)）。这一现象彻底否定了传统应急管理理论中关于灾害条件下人群行为是杂乱无章 (random dispersion) 的假设，从数据的角度证明了人类活动高度依赖于其历史行为，是有序的和可预测的，对突发事件应急处理具有重要的指导意义。

## 互联网数据与众包技术

作为一种分布式问题解决和生产组织模式，众包通过将自由自愿的大众参与者（通常是在互联网上）组织到一起，实现过去由特定人员执行的工作任务。这一做法彻底打破了专业人员和公众之间的界限，使得“人人都是传感器”。由于众包技术具有开源、动态、自主和广泛的特性，能充分发挥公众网络协作的力量，其汇聚知识的多元性适用于对信息需求量大、时效性高且难以由一个或几个机构完成的复杂信息交互情景，如突发事件处理等。随着互联网的发展，尤其是移动互联网覆盖率的不断提高，众包技术成为应急救援方法的一个重要补充，彻底变革了传统的自顶向下、集中式的应急管理模式，在应急突发事件感知、灾情评估、物资需求估计等领域得到了广泛应用。

应急领域的众包技术应用首见于开源赈灾管理

<sup>1</sup> 震级，一种震级标度，利用地震矩的大小确定震级。

软件系统开发, Sahana EDEN 和 Ushahidi (图 2(a)) 是两个典型案例。Sahana EDEN 是在 2004 年印度洋海啸发生之后, 由 IBM 志愿者组成的项目小组与兰卡 Software Foundation 合作开发的开源软件, 经过多年完善, 已经成为专门针对人道援助和灾后重建工作的解决方案, 在多个海啸、地震、飓风等重大灾害救援和重建中发挥了重要作用, 如帮助有效查找和管理失踪人口, 协调和平衡援助组织和志愿者的分工合作、登记、调配, 跟踪援助请求, 营地登记和跟踪管理, 救援物资协同管理, 提供灾难态势地理信息决策支持等。

Ushahidi 创建于 2007 年, 其初衷是为报道肯尼亚选举后爆发的大量暴力事件。Ushahidi 是一个免费开放的资源平台, 用户可以报道他们见证的新闻, 并将这些报道加载到在线地图上集中起来。这一方式对传统应急救援模式产生了深刻影响, 使得政府和公众均能通过大量自动收集的灾害或冲突信息, 更全面深刻地了解救援需求, 同时也避免了在极端的新闻审查体制下报道片面和不充分的问题。Ushahidi 很快成为国际重大灾害救援的流行平台之一, 已有超过 150 个国家使用其地图跟踪概念, 如: 刚果民主共和国国内暴力事件的追踪, 印度和墨西哥的投票地点监督及投票者作弊预防, 东非国家重要药品供应的报道, 以及海地和智利地震后伤员的搜救等。

类似系统的出现和应用促进了应急救援领域“灾情地图”概念的形成, 即将基于大众的、零散的分布式信息集成起来, 结合互联网在线平台、地理信息系统等技术, 整合出能全面反映应急救援需求的“灾害地图”<sup>[5]</sup>。这一领域走在前列的包括 OpenStreetMap<sup>2</sup> 的“Missing Maps”项目、脸书的“Disaster Maps”项目、谷歌的“Crisis Map”项目等。

## 卫星数据与灾害遥感

由于观测卫星利用星载遥感器从太空获取地表

信息, 具有覆盖区域广、持续时间长、不受空域国界限制等诸多优势, 卫星遥感数据在应急救援的不同阶段均能得到有效应用。在灾害发生之前, 能够大幅提高重大自然灾害的灾前预警与预评估的准确性和时效性; 在灾害发展过程中, 为制定灾害应急救援方案提供决策支持; 灾害形势稳定后, 为全面制定灾害救援方案提供科学依据。

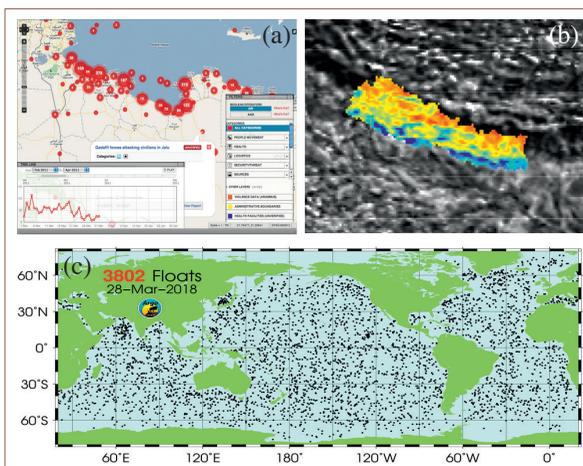


图2 (a)Ushahidi在2011年利比亚危机中被用于记录和报告各类灾害信息<sup>[7]</sup>; (b)Flowminder团队使用卫星数据监测2016年尼泊尔雨季洪水泛滥区域<sup>[6]</sup>; (c)截至2018年3月28日, Argo全球海洋观测网正常工作的3802个浮标分布情况<sup>[7]</sup>

在灾害监测预警方面, 卫星遥感数据主要应用于台风、洪水、森林火灾、环境污染等灾害事件。如在 2016 年 7 月尼泊尔雨季洪水爆发期间, Flowminder 团队就应用地球观测系统 (Earth Observing System, EOS) 的热带降雨测量任务卫星 (TRMM) 监测数据, 通过判断地表温度的变化, 建立异常监测模型来探测洪水淹没的区域 (图 2(b))。在灾害损失评估方面, 由于卫星观测的连续性, 通过对分析区域的数据在时序上进行对比, 能有效提取地表形变、山体滑坡、建筑物损毁等信息, 进而为灾害影响范围和破坏程度评估提供决策基础。例如, 在意大利阿马特里切地震 (2016 年 8 月 24 日, Mw 6.2 级) 后,

<sup>2</sup> OpenStreetMap (简称 OSM, 中文是公开地图) 是一个网上地图协作计划, 目标是创建一个内容自由且能让所有人编辑的世界地图。

美国国家航空航天局 (NASA) 喷气推进实验室和加州理工学院通过获取并使用地震受灾最严重地区的雷达影像, 基于地表形变雷达监测结果分析城内及周边地区地震和余震灾害受损程度。在 2017 年 9 月的超级飓风“厄玛 (Irma)”登陆后, 联合国训练研究所 (UNITAR) 迅速组织开展建筑物损毁评估工作, 通过对比 9 月 7~16 日的卫星遥感影像以及 OSM 数据, 发现在飓风肆虐的巴布达岛和圣马丁岛, 建筑物损毁率分别高达 89% 和 98%。

我国也在不断应用和发展卫星应急遥感技术。我国资源卫星应用中心目前负责运行管理资源系列、环境减灾系列、高分系列等十余颗卫星, 建成了多星综合管理系统, 拥有完备的陆地观测卫星地面数据处理系统和一整套卫星监测、数据回传、资料分析技术, 为防灾减灾工作带来了“天眼”。该中心成立了专业灾害监测研究团队, 通过制定《重大自然灾害应急响应监测预案》与《重大自然灾害卫星应急遥感监测流程规范》, 完善卫星测控运行管理机制, 加强灾害监测方法、技术的研究, 从制度、技术、人员、卫星资源等方面保障重大灾害的监测需求。

## 物联网与传感器网络

物联网 (Internet of Things, IoT) 是大数据技术的一个重要组成部分。通过射频识别标签、GPS 位置信息、激光扫描器等各种信息传感设备, 按照约定的协议, 物联网可以把任何物品与互联网相连接, 进行信息交换和通信, 并实现对物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。作为无线传感器网络的一个重要延伸, 物联网设备具有体积小、成本低、自组织性强、可快速部署、无须值守等特点, 被广泛应用于环境监测、公共安全、工业监控等, 在现代应急管理中发挥着举足轻重的作用。

早在 20 世纪 50 年代, 传感器网络就被美国海军应用于水声监视系统 (SOSUS) 来探测潜艇, 通过在洋底部署 1000 多套水下听音器, 将接收到的声音信号由导线传送给沿岸各收集站, 经由卫星传送到几座不同的监听站, 再由专业人员从数据中对

目标的波形特征进行识别, 并获取相关方位信息。自 1991 年, 这一系统被持续应用于监测太平洋底火山喷发和地震、追踪非法走私毒品和漂网捕鱼活动、研究海流运动和测定海啸等。海洋监测的相关应用还包括大规模浮标监测系统, 如美法联合研制的全球海洋监测计划 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography), 由多种自持式剖面循环探测浮标组成, 能够准确传输、接收远海的信息, 形成集卫星遥感、海洋浮标相结合的立体海洋监测系统。经过多年发展, 目前已有几十个国家加入该系统, 在全球范围内部署了近 4000 个卫星可跟踪浮标, 其浮标数据结合岸站、船舶、飞机、海洋卫星组成海洋环境立体监测系统, 在海洋环境保护、气候预测、海洋灾害监测中发挥越来越重要的作用 (图 2(c))。

智能手机目前已成为覆盖范围最广、使用最频繁的物联网终端设备。在应急救援领域, 智能手机被装载数模对讲、气体监测预警与酒精传感器、精确测绘、生物特征指纹识别、倒地报警等功能, 成为消防救援、应急救援、野外搜救、公共安全、安保防卫等便利的应急通讯和救援设备。此外, 普通智能手机的基本功能也被开发用于应急救援, 如 FireChat 等手机应用, 就可以脱离蜂窝网络, 基于蓝牙或 Wi-Fi 信号与附近的智能手机通信, 形成 P2P 的移动网络, 帮助人们在应急场景下进行通信。MyShake 等应用则能利用智能手机的加速度传感器来侦测地震产生的运动, 通过将大量的用户组成一张地震监测网络, 配合传统方法来提高地震早期预警的速度和精确度。对于没有地震监测网络的发展中国家和地区来说, 这类应用可以提供更快的地震早期预警信息和更精准的定位, 为用户节省几十秒的宝贵逃生时间。

## 无人机技术

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的无人驾驶飞行器的统称。无人机具有体积小、造价低、使用方便、对运行环境要求低、生存能力较强等优点, 而且能够携带一些重要的设备在空中完成特殊

任务,比如空中监测、空中转信、紧急救援等。这些特征使得无人机在应急救援领域具有传统方法无可比拟的技术优势:(1)具有较快的反应能力,能第一时间到达现场,迅速展开作业;(2)使用摄像机、热像仪等各种载荷将现场的音、视频信息实时传送到指挥中心,供指挥者进行判断和决策;(3)能够实现空中通信中继功能,快速恢复现场局部通信;(4)能灵活实现物资搭载,进行定点投送或喷洒防疫工作;(5)使用方便快捷,便于跟踪事件发展态势,辅助指挥中心不间断决策。

无人机在很多重大灾害事件中都发挥了重要的作用。如我国汶川大地震(2008年5月12日,Mw 8.3级)发生后,救援行动一度异常艰难。国家减灾中心使用“千里眼”无人机对受灾最为严重的北川地区进行实时监测,相关的图像数据经过卫星传输到救援管理中心,对于救援工作的顺利开展做出了重要的贡献,同时这些数据也被传送到各大媒体,使普通群众能及时了解灾区的状况,从而使整个社会都团结在一起,共同应对灾难。此外,MRS-D14与MRS-016微型无人机、“飞象一号”小型低空遥感无人机、TF-7测绘无人机等也在这次救援工作中做出了重大的贡献,成为我国地震救援无人机技术的真实战例。

汶川地震时,参与救援的无人机多是从遥感遥测、搜毒等其他用途临时转到救援工作上,作为卫星、航拍的补充。随着技术的发展和进步,近年来民用无人机得到了长足发展,在应急救援领域得到越来越频繁的应用。如九寨沟地震(2017年8月8日,Mw 7.0级)发生后,无人机出现在灾后救援的各项工作中,极大地提高了灾后搜救的效率。在基础设施抢修过程中,无人机被用来辅助电力设备的维修工作,还配合其他部门侦查受灾道路情况;在应急通信方面,中国移动投放的无人机高空基站,迅速实现了最大覆盖面积达100平方公里的通讯生命线的畅通,满足了应急抢险队伍以及灾民的需求。在灾情报道方面,媒体也在第一时间使用无人机航拍九寨沟县城向外界传递第一手灾情信息。在2017年湖南洪灾中,无人机还被用来进行物资投送,并

在洪灾后期应用于运载、喷洒消毒液,使其深入人为消毒不便的旷野、垃圾场等,大大提高了灾后防疫工作的效率。

## 前景展望

大数据技术在应急领域的广泛应用使得世界各国的灾害预测预警和应急响应能力得到了极大提高,在降低灾害风险、保障生命财产安全等方面发挥了重要作用。由于灾害事件的特殊性,应急救援过程中的大数据技术应用也具有一些与其他领域不同的特点,如数据来源多样化、对多源异构数据快速整合和分析能力的要求高、数据共享阻力相对较小、数据的公益和社会价值高、数据分析贯穿应急管理的各个阶段等。随着物联网、人工智能、无人机等技术的不断融合发展,大数据技术在应急救援领域的应用必将不断深入和拓展,在多源数据融合、应急数据保障、应急救援体系建设等方面发挥重要作用,进一步提高世界各国基础设施与社会民众的灾害抵御能力,推动应急管理体系的变革与发展。

**多源数据融合。**应急突发事件的发生和发展必然与整个社会物理系统产生交互,因此,多源数据融合能有效地从不同维度,更全面、及时地实现对灾害的预测预警和处置。在现代应急管理体系下,大量事件的感知均可以通过物联网传感器、卫星遥感、互联网、政企部门等多个渠道实现。然而,不同技术手段采集的感知数据在时空精度上存在巨大差别。因此,在应急救援过程中,对多源数据进行快速整合和处理,从时空、物理、社会等维度全面地对事件的发生发展过程进行监测和分析,是大数据技术在应急管理中需要不断完善的能力。

**应急数据保障。**应急救援事件的紧迫性对灾情数据的快速获取和处理具有极高的时间要求。然而,大量灾害事件往往会对通信、电力等物理设施造成极大破坏,从而造成大量关键数据无法获取。目前各级相关部门的应急数据保障一般是自顶向下的指挥联动,或由各组织机构出于社会责任自愿提供,在共享数据质量、数据范围等方面均存在较大

的不确定性。针对这一问题，世界各国均在不断提高基础物理设施的防灾水平。如联合国可持续发展目标就提出要增强穷人和弱势群体的抵御灾害能力，发展优质、可靠、可持续和有抵御灾害能力的基础设施。更重要的是，有必要完善和健全应急数据保障机制，使得应急部门能第一时间采取措施，协调相关数据机构和部门，实现快速响应。

**社会实验研究。**大数据技术的发展使得人们开始以前所未有的规模和准确性对灾害条件下的人类和社会行为进行量化和分析，研究灾害事件的影响、人类行为活动和社会运行状态的变化，进而总结规律，为应急的预防、准备、响应和恢复提供决策依据。灾害事件可以视为极端条件下人类行为研究的一种自然实验 (natural experiment)<sup>[8]</sup>。近年来，使用手机数据、在线社交网络数据等对灾害条件下人类行为模式的分析已经开始产生一批具有影响力的研究成果，如发现了灾害条件下人类移动行为的规律性和可预测性、网络社区演化的趋同性、社交网络的增强性等，见图 3。此外，灾害事件对于人类行为与灾后重建以及传染病传播过程的影响等也使得大量研究成果涌现。掌握人员伤亡、心理与行为在应急条件下的变化规律，对于完善应急指挥与协调、智能决策与控制理论方法，提升人员搜救、紧急医疗、心理与行为干预、人群疏导与约束控制等核心应急能力，具有重要的理论和实践意义。

**前沿技术应用。**应急救援领域一直是新技术开创和应用的前沿阵地。物联网、人工智能、无人机、微小卫星等技术近年来也在为实现应急管理更快速、更全面、更精确的需求不断发展完善。以卫星对地观测为例，从美国的陆地卫星计划 (LANDSAT) 到欧洲宇航局与欧盟的哥白尼计划 (Copernicus)，现代卫星系统开始向协同组网观测、公共数据免费的应用模式转变。此外，以美国行星实验室公司 (Planet Lab) 的“鸽子” (Dove) 为代表的体积更小、质量更轻的新型微小卫星近年来得到产业界的持续关注。飞行高度低、造价成本低廉和使用寿命短使得这类卫星的数量能够形成规模，拍摄分辨率更高的照片以及得到及时

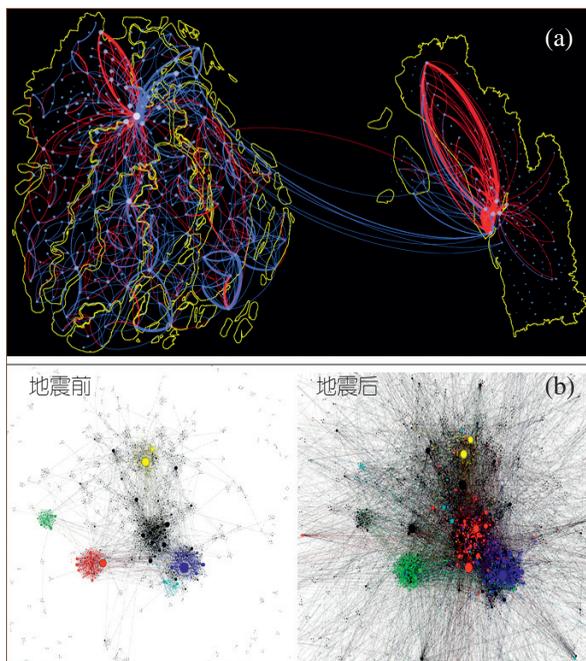


图3 (a)应用移动通信数据分析政府台风预警后城市居民的应对行为<sup>[11]</sup>; (b)Twitter日文用户社交网络结构在日本大地震前后的变化<sup>[10]</sup>

更新换代，对提高未来灾害场景下的应急预测预警和应急反应能力具有重大的应用价值。 ■

**致谢：**

本研究受国家自然科学基金(71771213,71522014, 71790615)资助。



**吕欣**

CCF 专业会员。国防科技大学系统工程学院副教授，国家优青获得者、青年长江学者，国际应急救援机构 Flowminder 基金会创建人、理事。主要研究方向为大数据挖掘与应急管理、人类行为动力学、复杂网络算法与抽样设计。  
xin.lu@flowminder.org

**参考文献**

[1] The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). World Disasters Report[R/OL]. (2016). <http://media.ifrc.org/ifrc/publications/world-disasters-report-2016/>.

- [2] Ford J D, Tilleard S E, Berrang-Ford L, et al .Opinion: Big data has big potential for applications to climate change adaptation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(39): 10729-10732.
- [3] Kenett D Y, Portugali J.Population movement under extreme events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(29): 11472-11473.
- [4] Lu X, Bengtsson L, Holme P.Predictability of population displacement after the 2010 Haiti earthquake[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(29): 11576-11581.
- [5] Bengtsson, L., et al., Improved Response to Disasters and Outbreaks by Tracking Population Movements with Mobile Phone Network Data: A Post-Earthquake Geospatial Study in Haiti. PLoS Med, 2011. 8(8): p. e1001083.
- [6] CrisisMappers - THE HUMANITARIAN TECHNOLOGY NETWORK[OL].<http://crisismappers.net/>.
- [7] Ushahidi. Available from: <https://www.ushahidi.com/>.
- [8] Flowminder, Nepal Floods July 2016 Population Mobility, Displacement and Impacted Areas Based on Analyses of Anonymized Mobile Network Data. 2016.
- [9] Argo - part of the integrated global observation strategy[OL].<http://www.argo.ucsd.edu/>.
- [10]Phan T Q, Airoidi E M.A natural experiment of social network formation and dynamics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(21): 6595.
- [11]Lu X, Wrathall D J, Sundsøy P R, et al. Detecting climate adaptation with mobile network data in Bangladesh: anomalies in communication, mobility and consumption patterns during cyclone Mahasen[J]. Climatic Change, 2016, 138(3-4):505-519.
- [12]Lu X, Brelsford C. Network structure and community evolution on Twitter: human behavior change in response to the 2011 Japanese earthquake and tsunami[J]. Scientific Reports, 2014, 4:6773.