

DOI: 10.5846/stxb201808101709

吴文菁, 陈佳颖, 叶润宇, 李杨帆. 台风灾害下海岸带城市社会-生态系统脆弱性评估: 大数据视角. 生态学报, 2019, 39(19): - - .

Wu W J, Chen J Y, Ye R Y, Li Y F. Vulnerability Assessment of Urban Socio-Ecological Systems in Coastal Zones under the Influence of Typhoons: Big Data Perspective. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - - .

台风灾害下海岸带城市社会-生态系统脆弱性评估: 大数据视角

吴文菁¹, 陈佳颖¹, 叶润宇¹, 李杨帆^{1,2,*}

¹ 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102

² 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 厦门 361102

摘要: 2016 年莫兰蒂台风对厦门城市社会-生态系统造成重创, 该系统在灾害影响下的脆弱性成为亟待研究的重要问题。基于新浪微博平台进行大数据挖掘, 结合统计年鉴及空间基础数据, 建立台风灾害影响下基于暴露-敏感-应对-恢复力体系的海岸带城市社会-生态系统脆弱性指标体系, 评估灾前灾后台风对厦门不同地区的影响; 同时根据微博大数据的定位信息, 对不同受灾信息进行灾情跟踪及分析, 结果表明, 在本次台风灾害中思明、湖里区表现出的脆弱性较低, 而海沧、集美区表现出的脆弱性较高, 主要是由于思明、湖里区的应对能力明显高于其他各区, 从大数据显示的恢复情况来看, 除海沧区外, 其他三区在电力方面的恢复速度都较为迅速。研究成果能够为台风灾害背景下的城市脆弱性评价提供新的方法与技术, 为灾前防治、灾后恢复提供决策参考。

关键词: 社会-生态系统; 脆弱性; “莫兰蒂”台风; 大数据

Vulnerability Assessment of Urban Socio-Ecological Systems in Coastal Zones under the Influence of Typhoons: Big Data Perspective

WU Wenjing¹, CHEN Jiaying¹, YE Runyu¹, LI Yangfan^{1,2,*}

¹ College of the Environment & Ecology of Xiamen University, Xiamen 361102, China

² Coastal and Ocean Management Institute (COMI), Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract: With the increase in the intensity and frequency of natural disasters, the risk and loss assessment of urban natural disasters and the construction of an urban security pattern are becoming more important. Based on social media data from the Sina microblogging platform, statistical yearbook data, and using the ArcGIS software, this study establishes a typhoon disaster vulnerability index for the rapid assessment of the impact of Typhoon “Meranti” on different districts of Xiamen at different stages. The location of a specific microblog information from the microblogging platform is used to track and analyze disaster information. The results show that when facing a typhoon disaster, the Siming and Huli District showed relatively low vulnerability, while Haicang and Jimei District showed higher vulnerability, which is mainly due to the quick response of local government and civil society organization in Siming and Huli District. From a perspective of recovery, except for the Haicang District, the speed of recovery of power in the other districts is relatively rapid. This study provides a new method and technology for the evaluation of typhoon disaster vulnerability, decision reference for pre-disaster control, and post-disaster recovery.

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502904); 厦门大学大学生创新创业训练计划项目 (103842017103)

收稿日期: 2018-08-10; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangf@xmu.edu.cn

Key Words: socio-ecological systems; vulnerability; typhoon “Meranti”; big data

在全球气候变暖的背景下,台风强度与破坏力呈现明显增强的趋势,超强台风所占比例显著增多^[1-3]。特别是 1995 年以来,大西洋与东太平洋飓风活动显著增强^[4],2005 年美国“卡特里娜”飓风、2007 年孟加拉国热带风暴“锡德”、2010 年台风“凡亚比”等均造成了严重的人员伤亡和经济损失。据统计,在“锡德”风暴潮下有 3000 多人死亡,受灾人口达 850 万人,直接经济损失二十亿美元以上^[5]。“莫兰蒂”是 2016 年全球最强的台风,对厦门市社会、经济、生态系统等方面造成了巨大的破坏。因此,认清气候变化趋势,逐步强化台风灾害评估在城市社会生态风险预警中的应用研究,是构建城市生态安全格局、建立可持续发展的弹性城市的基本保障。

近年来,国际对于台风灾害评估已有较多应用^[6-10],众多组织与机构也就气候变化发布了指南与读本,对城市规划与建设、弹性城市的设计提出相关建议,例如美国国际开发总署在海啸之后发布了《沿海社区弹性指南》;2009 年世界银行^[11]出版了《气候变化弹性城市:东亚城市降低气候变化脆弱性及增强灾害风险管理入门读本》^[12]。在城市规划建设、弹性城市的构建中,脆弱性分析与评价是重要依据^[13],脆弱性理论体系对于城市发展、城市规划、城市发展与环境之间的平衡关系具有巨大的借鉴和应用意义。虽然当前在计算脆弱性和适应能力指数以及评估假设适应方面已有相当多的研究成果,但是有关弹性城市的脆弱性分析亟待加强^[8]。

目前,台风灾前预评估已经基本具备高精度和高准确度的数据与方法^[14],但灾后脆弱性评估方法仍缺乏时效性数据,且评估过程较为繁杂;传统灾后调查,如在量化飓风卡特里娜对碳排放影响的研究中,需要采用综合方法结合详细的现场调查,并以经验为基础应用区域缩放模型^[15],同时统计数据采集存在效率低下、精度差等问题,并不适用于台风灾后脆弱性评估,由此,快速准确的灾后脆弱性评估已成为今后灾情评估工作的发展趋势。国外已有多个以大数据为背景的相关研究^[16-17],国内也有基于网络开放数据为政府的管理方案提供对策的研究^[18],验证了大数据在可行性、即时性、精度、公众参与等方面的优势。

本文以受“莫兰蒂”台风破坏严重的厦门市为研究区域,研发的网络信息资源拾取软件,结合遥感空间分析技术,构建了涵盖社会经济系统与生态系统的脆弱性评价指标综合体系,提出了将台风灾后快速统计的实时网络信息与传统调研收集的数据相结合的灾后损失评估新方法,有效提高信息的获取速度,对“莫兰蒂”台风灾害下厦门市各区社会-生态系统脆弱性进行高效便捷的评估。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

1.1.1 厦门市概况

厦门位于福建省东南部,辖思明区、湖里区、集美区、海沧区、同安区、翔安区 6 个市辖区,是福建省副省级城市、经济特区,东南沿海重要的中心城市、港口及风景旅游城市,2017 年,全年地区生产总值(GDP)4351.18 亿元,常住人口 401 万人。地形以滨海平原、台地和丘陵为主,地势由西北向东南倾斜。厦门属于亚热带海洋性季风气候,温和多雨,由于太平洋温差气流的关系,每年平均受 4—5 次台风的影响,且多集中在 7—9 月份。

1.1.2 台风“莫兰蒂”概况

超强台风“莫兰蒂”(Super Typhoon Meranti)是 2016 年全球海域的最强风暴之一。9 月 15 日在中国福建省厦门市翔安区登陆,登陆时中心最大风力 52 m/s,属于强台风级。“莫兰蒂”重创厦门,尤其对厦门电力设施造成巨大破坏,导致全市大面积停电、停水和通信中断;65 万棵行道树倒伏;市内交通瘫痪,机场航班大面积停航。因灾死亡 1 人,重伤 2 人,房屋倒损 17907 间,农作物受灾面积 7000 hm²,直接经济损失 102 亿元^[19]。

1.2 数据来源

1.2.1 大数据来源

网络信息资源拾取软件是自动地抓取互联网信息资源的程序,可以自动采集所有能够访问到的页面内容,以获取或更新这些网站的内容和检索方式^[20]。本文所采用的微博信息拾取程序是基于 Java 语言编写的桌面应用程序,主要根据用户的搜索条件拾取微博信息,通过输入关键词、时间和地点拾取微博相关信息,并将抓取结果用 Excel 导出,具体流程如图 1:

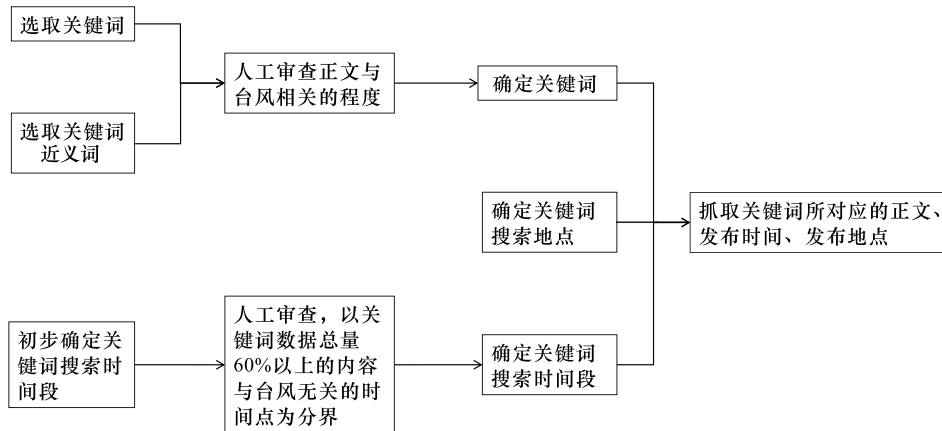


图 1 微博平台中有关台风灾害信息的关键词选取流程图

Fig.1 Keyword selection flowchart for typhoon disaster information in microblog platform

本研究中相关关键词选取参数如表 1 所示,所用的地理位置信息来源于微博用户的定位数据,同时经过人工审查也删除了由于转发或其他原因导致的重复数据。

表 1 厦门市台风灾害相关微博关键词选取参数

Table 1 Selection parameters of related microblog keywords about typhoon disasters in Xiamen

选取时间 Select Time	关键词 Keywords	选取原因 Reason for Selection	代表指标 Representative Indicators
2016.09.13—2016.09.30	停水	反映水力系统恢复情况	恢复力
	停电	反映电力系统恢复情况	恢复力
2016.09.14—2016.09.18	玻璃	反映物理系统恢复情况	恢复力
2016.09.14—2016.09.17	树	间接反映交通和生态系统恢复情况	恢复力
2016.09.14—2016.09.18	堵	反映交通恢复情况	恢复力
2016.09.14—2016.09.18	受伤	反映不同区域的暴露情况	暴露性

1.2.2 其他数据来源

本文采用美国 NASA 的 Landsat8 于 2015 年 10 月 13 日发布的影像,UTM-WGS84 投影坐标系,其分辨率为 30 m,用于计算厦门市的归一化植被指数,并根据计算结果进行分级,计算厦门市的植被覆盖度。所用统计数据来源于厦门市各行政区 2016 年统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 脆弱性评价指标体系的构建

脆弱性是由自然、社会、经济和环境因素及过程共同决定的系统对各种胁迫的易损性,是系统的内在属性,取决于系统的暴露程度、系统对外界干扰的敏感性和系统的适应能力 3 个方面^[8,21]。本文选择厦门市思明区、湖里区、海沧区、集美区四个区域的自然与社会系统作为承灾体,在充分考虑研究对象及本次台风灾害特征的基础上,参考崔胜辉等^[22],Huang 等^[23]归纳的气候变化主要风险因子和 Sajjad 等^[24]进行沿海城市脆弱性评价使用的评价因子,依据科学性、完备性、可行性与实用性原则,结合脆弱性的成因,从暴露性、敏感性、恢复力和应对能力四方面选择指标,建立“莫兰蒂”台风灾害下厦门各区的社会-生态系统脆弱性指标体系,如

表 2 所示。

表 2 厦门市台风灾害影响下社会-生态系统脆弱性评价指标体系

Table 2 Vulnerability assessment index system of urban socio-ecological systems under the influence of typhoon disaster in Xiamen

一级指标 Primary Indicators	二级指标 Secondary Indicators	一级指标 Primary Indicators	二级指标 Secondary Indicators
暴露性 Exposure	占地面积	应对力 Response	地区生产总值
	风力风速		城镇居民人均可支配收入
	人口密度		民生支出占比
敏感性 Sensitivity	第一产业占比	恢复力 Resilience	医疗卫生机构
	第三产业占比		供电恢复速度
	植被覆盖率		交通恢复速度
			倒伏树木清理速度

为评价台风对不同区域的危害程度,我们选取了占地面积、风力风速以及人口密度作为评价各区暴露在台风下的不同情况的指标;由于“莫兰蒂”台风主要因风力造成影响,导致农作物、水电系统等受损,因此第一、第三产业相对敏感;根据《大气科学辞典》,地面粗糙度表征的是地表与大气的相互作用,反映地表对风速的消减,植被覆盖率高的地区地面的粗糙度高^[25],因此植被覆盖率和台风登陆的强度呈负相关关系,即植被覆盖率越高,敏感性越小,从而选取第一、第三产业占比以及植被覆盖率用于评价敏感性;从不同区域的社会经济情况出发,选择代表地区和居民经济水平的两项指标以及代表该地区基础设施及社会保障完善程度的两项指标用于评价该区域应对台风灾害的能力;最后,基于大数据变化的趋势,从影响居民生活恢复的角度,选取了电力系统、交通系统和生态系统三方面的指标用于恢复力评价。

1.3.2 脆弱性综合评判模型

模糊综合评价法^[26]是一种能够对受到多种因素制约的事物或对象做出全面评价的决策方法。根据数据收集情况与分析需求,将其作为厦门市各区在“莫兰蒂”台风灾害下脆弱性评判模型的依据,并结合熵权法计算权重。首先将原始数据标准化,用熵权法建立各级指标的权重集,然后利用隶属度函数,结合标准化的数值与脆弱度评语集的分级标准构建评价矩阵,评语集为根据评价指标建立的评价集合。

本文将脆弱性程度划分为 3 个等级,以脆弱度表征,采用中位数法和平均值法确定评语集的分级标准^[27],即评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3\} = \{\text{低度脆弱度}, \text{中度脆弱度}, \text{高度脆弱度}\}$,脆弱度代表每一项一级指标的脆弱程度。本文最后将评价矩阵与权重集以矩阵计算加以合成,得到各一级指标脆弱度的评价结果,各一级指标的对应评价等级的数值相加后可表征脆弱性的综合评价结果。

2 结果与分析

2.1 大数据挖掘结果分析

经人工审查,含有某些关键词的微博数据在一定时间前后是由于其他原因发布,与“莫兰蒂”无关,所以本文以台风登陆日期为起始点,若在某个搜索日期对应的词条中有 60% 以上内容与台风无关,那么对于该时间点以前或以后的数据将不纳入搜索时段内,由此确定每个关键词选取的时间段。最终,确定 2016 年 9 月 13 日至 9 月 30 日所有关键词在不同时间段内的发布量。

所有关键词发布量在台风登陆当日达到峰值,次日发布量急剧下降,随着灾后重建工作的不断进展继续呈现下降的趋势,最后趋近于零,其中“停电”与“停水”两个关键词及其近义词的搜索时间跨度长,且随时间推移数据逐日降低,但在 9 月 26 日、27 日数据量出现较大的回升(图 2),这是台风“鲇鱼”于 2016 年 9 月 27 日在福建省登陆导致的结果,故分析时删去 2016 年 9 月 26 日以后的数据。

当关键词发布量为零时,代表与关键词相关的灾害已经得到恢复。根据表 1 提出的几个关键词进行微博词条搜索,依据搜索量的多少及其变化趋势等因素选取“停电”、“堵”、“树”三个关键词作为恢复力指标计算

依据。在与“停电”“交通”“树木倒伏”这三个脆弱性二级评价指标相关的关键词中,搜索量在 9 月 22 日、9 月 17 日、9 月 17 日分别达到最小,量化后的电力、交通和倒伏树木恢复速度分别为 0.11 天^{-1} 、 0.33 天^{-1} 和 0.3 天^{-1} 。

2.2 “莫兰蒂”台风综合脆弱性评价结果分析

利用关键词对微博大数据进行挖掘后,得到厦门市各区恢复力指标数据,建立综合脆弱性指标数据集进行模糊综合评价,评价结果如表 3 所示。

厦门市各区对“莫兰蒂”台风的脆弱性表现出明显的地域差异。思明区、湖里区脆弱性总体结果较弱,海沧区和集美区则较强。从影响脆弱性的一级指标上看,植被覆盖率较低与第三产业占比高是敏感性指标脆弱度低的主要原因;交通拥堵,受灾人群基数大是恢复力和暴露度指标脆弱度高的成因。应对能力评级结果的数值在综合评价上占据最大比重,直观地表明厦门各区脆弱性不同的主导因素是应对能力的差异。思明和湖里区的地区生产总值以及人均可支配收入明显高于其他地区,经济较为发达且社会保障投入较多,故而应对能力相对较强。另一方面,由于恢复速度以天数来评价,反映出的恢复力结果差异不明显,因此需要结合关键词的搜索结果进一步讨论分析。

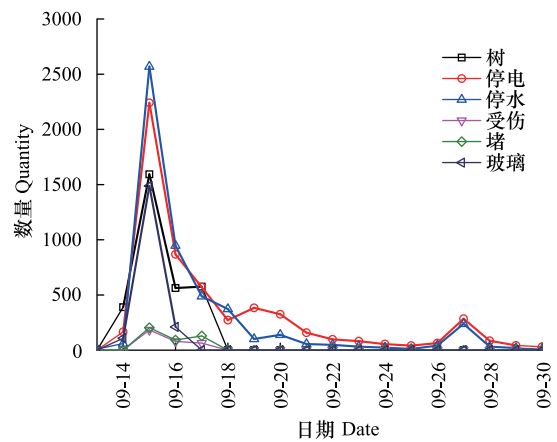


图 2 台风“莫兰蒂”前后微博关键词数量

Fig. 2 Number of microblogging keywords before and after Typhoon “Meranti”

表 3 厦门社会-生态系统脆弱性综合评价结果

Table 3 Xiamen socio-ecological systems vulnerability evaluation results

	低度脆弱度 V_1 Low Vulnerability Level	中度脆弱度 V_2 Medium Vulnerability Level	高度脆弱度 V_3 High Vulnerability Level	等级 Rating Level
思明区	0.56	0.13	0.32	低
湖里区	0.53	0.07	0.42	低
海沧区	0.37	0.09	0.56	高
集美区	0.47	0.13	0.53	高

3 讨论

3.1 关键词发布量的空间差异有效揭示了灾后各区恢复力强弱

关键词的发布与台风发生时间和救灾情况紧密相关。所有关键词的发布量在台风登陆厦门当天,即 2016 年 9 月 15 日达到峰值,次日关键词发布数量急剧下降,之后随时间的推移呈现平缓下降的趋势,最后数据量趋近于零(图 3)。

在同一天内,厦门岛内(思明区和湖里区)关键词数量大于岛外(集美区和海沧区),岛外集美区关键词数量又大于岛外其他行政区。台风登陆初期,厦门岛内及集美区的人口密集、微博用户多,相较人口密度小的其他岛外地区敏感性更强,所以受影响的人数多,关键词发布量大。到灾后重建阶段,厦门岛内的湖里区及岛外的集美区关键词的发布量下降幅度大,反映其恢复能力更强。岛外的海沧区对于关键词“停电”的数据发布量没有出现较大幅度的下降,说明其电力系统恢复力弱,灾后重建推进不理想。

由于本研究恢复力指标数据来源的特殊性,该结果在地理位置上的精度可以达到区县级别,对于灾后恢复可以针对各区开展相对精细化的评估,这一优势也可为灾后恢复提供更有针对性的参考意见。

3.2 岛内灾后水电系统恢复能力明显强于岛外及偏远郊区

综合大数据平台获取的关键词信息,公众对于水电的关注度远大于其他方面,因此水电恢复的数据信息

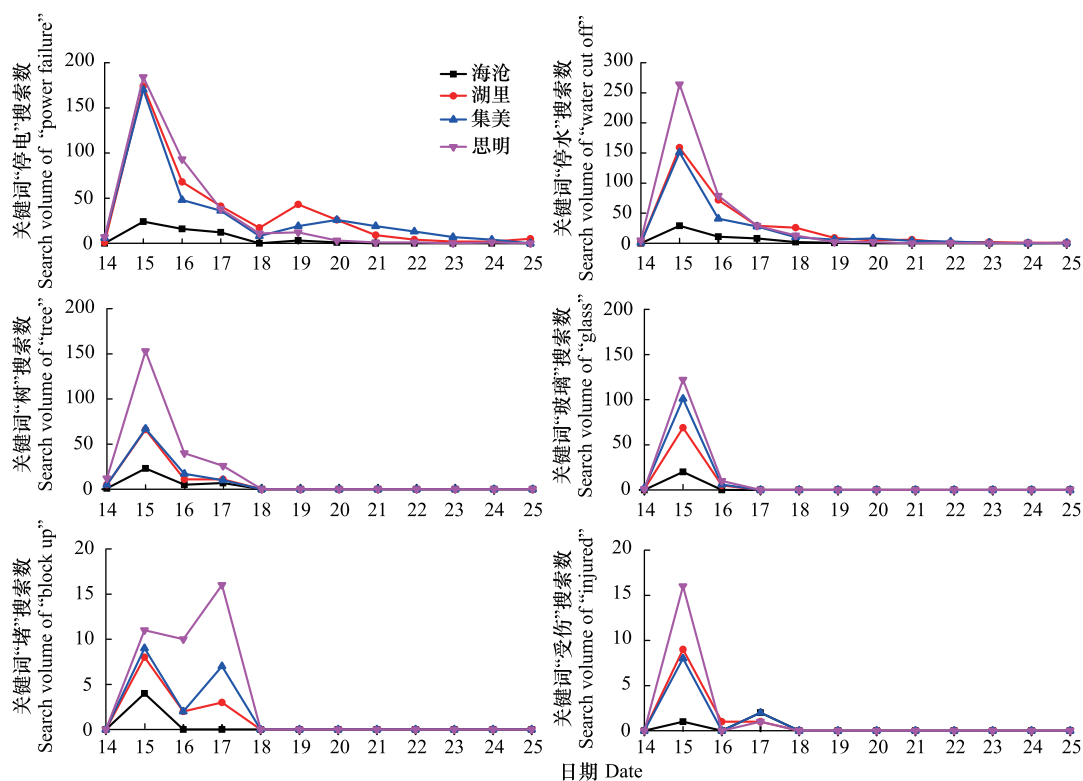


图3 台风灾后厦门各区微博关键词变化图

Fig.3 Change charts of microblog keywords in various districts of Xiamen

也相对准确。利用大数据平台获取的定位信息可以清晰地表示出水电恢复信息的动态变化,实现不同地点灾后恢复能力的可视化,更快速准确地对受灾区域的水电系统进行排查,有利于指导灾后恢复工作(图4)。

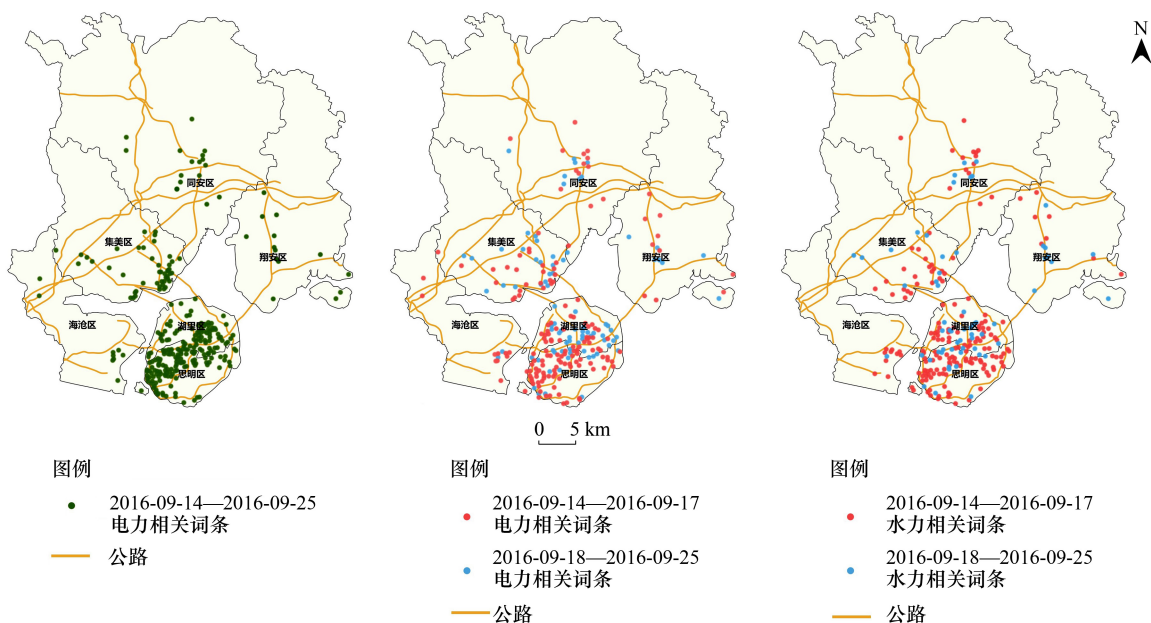


图4 台风“莫兰蒂”搜索量变化的两个阶段内电力、水力系统修复情况

Fig.4 The repair of power and hydraulic systems in two stages of typhoon Meranti's search volume change

根据 2016 年 9 月 14 日—9 月 25 日时段内新浪微博所检索出的因“莫兰蒂”台风造成的“停电”及其近义

词词条,发现主干道路附近多有停电,而由于人口密集、社会经济活动频繁,岛内的停电信息集中出现,原因主要是新浪微博的使用人群多分布于商业等密集地带。但整体来说,“莫兰蒂”台风使得厦门 6 个行政区均产生了多点、大面积停电,可见其对电力系统的破坏较大。

根据“停电”、“停水”两个关键词搜索量变化,我们将受灾时期分为两个阶段。截止 2016 年 9 月 17 日,岛内思明区已基本恢复供电,湖里区仍有部分区域处于停电状态,而岛外集美区的停电情况依然较为严重,同安、翔安区仍有多处未恢复供电,海沧区也存在少量未供电区域。与电力系统恢复对比发现,水力系统的恢复情况也呈现出相似的变化规律。

水电系统的破坏是台风对受灾人民生活最为直接和明显的影响,在大数据的帮助下,水电系统的破坏及恢复过程通过微博数据的形式加以展示,将其应用于脆弱性评估有利于水电系统的恢复工作的开展。

3.3 综合评价结果反映城市中小尺度脆弱性的差异

厦门市岛内(思明区和湖里区)整体脆弱性较岛外(集美区与海沧区)低,这是社会、经济与生态三个系统共同作用的结果。生态、经济系统共同作用于敏感性,植被覆盖率越低,第一、三产业占比越大,敏感性越高,整体脆弱性越大;同时,经济系统也作用于应对能力,经济越发达,基础设施建设越完善,民生支出越多,应对能力越大,整体脆弱性越小。社会系统作用于恢复力,灾后恢复速度越快,恢复力越强,整体脆弱性越小。依据评价结果,经济指标在应对能力上的作用大于在敏感性上的作用,而生态指标对整体脆弱性的影响较其他社会经济指标小,社会经济指标是影响整体脆弱性的主导因素,由于岛内在产业占比、基础设施建设、灾后恢复速度等方面都优于岛外,故而岛内脆弱性比岛外较低。

4 结论

本文以“莫兰蒂”台风背景下受灾严重的厦门市为研究对象,利用大数据挖掘技术对灾情进行跟踪,建立脆弱性评估模型分析了台风灾害下城市社会-生态系统的脆弱性特征及成因,得到以下主要结论:

(1)“莫兰蒂”台风对厦门地区造成了严重的影响,其危害涉及了整个社会、经济、生态系统,研究结果表明,在本次台风影响下,海沧区与集美区的灾后脆弱性较高,思明、湖里区较低,应对能力是导致各区台风灾害脆弱性具有显著差异的决定性因素。

(2)“莫兰蒂”台风灾害影响下,经济发达、地区产值较高和社会保障投入较多的思明区灾害应对能力最强;灾后恢复速度主要表现在水电恢复方面,岛内(思明、湖里区)水电恢复速度较快,岛外以及一些较为偏远的地区水电恢复速度较慢,抗灾防灾的能力有待增强。

(3)大数据相比于其他灾害数据具有可获取性、灵活性、多样性更高的特点,可减少时间成本及人力财力的支出;同时更加直观地显示灾害的分布特点,排查传统统计数据易忽视的地区和救灾方向,及时提出科学有效的防灾减灾建议。

本文对大数据的应用处于初步探索阶段,如所检索的关键词的有效性、网络信息的真实性、数据可获取性等方面存在一定的局限性,这些是下一步大数据应用灾害评估研究亟待解决的瓶颈问题。

致谢:厦门理工学院邓富亮博士对本研究软件研发工作给予大力支持,厦门大学环境与生态学院 Muhammad Sajjad 硕士、林静玉硕士对本研究初期思路提出建议,北京林业大学杨文涛博士、武汉大学方建博士、美国内布拉斯加大学林肯校区唐政洪博士、厦门大学环境与生态学院范冰冰雄博士生、杨奕硕士、陈雅君硕士和向枝远硕士生对论文提出修改意见,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] Webster P J, Holland G J, Curry J A, Chang H R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [2] Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.

- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Trenberth K. Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 2005, 308(5729): 1753-1754.
- [5] 王然, 连芳, 余瀚, 史培军, 王静爱. 基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析. *地理研究*, 2016, 35(5): 836-850.
- [6] Maiti S, Jha S K, Garai S, Nag A, Bera A K, Paul V, Upadhaya R C, Deb S M. An assessment of social vulnerability to climate change among the districts of Arunachal Pradesh, India. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 105-113.
- [7] Hinkel J, Klein R J T. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: the development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 2009, 19(3): 384-395.
- [8] Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [9] Wisner B, Blaikie P, Cannon T, Davis I. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. 2nd ed. London: Routledge, 2004.
- [10] Cutter S L, Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(7): 2301-2306.
- [11] Prasad N, Ranghieri F, Shah F, Trohanis Z. *Climate Resilient Cities: A Primer on Reducing Vulnerabilities to Climate Change Impacts and Strengthening Disaster Risk Management in East Asian Cities*. Washington, DC: The World Bank, 2010.
- [12] Saavedra C, Budd W W. Climate change and environmental planning: working to build community resilience and adaptive capacity in Washington State, USA. *Habitat International*, 2009, 33(3): 246-252.
- [13] 黄晓军, 黄馨. 弹性城市及其规划框架初探. *城市规划*, 2015, 39(2): 50-56.
- [14] 李彤玥, 牛品一, 顾朝林. 弹性城市研究框架综述. *城市规划学刊*, 2014, (5): 23-31.
- [15] Chambers J Q, Fisher J I, Zeng H C, Chapman E L, Baker D B, Hurtt G C. Hurricane Katrina's carbon footprint on U.S. gulf coast forests. *Science*, 2007, 318(5853): 1107-1107.
- [16] Meekan M G, Duarte C M, Fernández-Gracia J, Thums M, Sequeira A M M, Harcourt R, Eguíluz V M. The ecology of human mobility. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(3): 198-210.
- [17] Lin T, Liu X F, Song J C, Zhang G Q, Jia Y Q, Tu Z Z, Zheng Z H, Liu C L. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: a case study in China. *Habitat International*, 2018, 71: 88-96.
- [18] Zheng H, Hong Y, Long D, Jing H. Monitoring surface water quality using social media in the context of citizen science. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 949-961.
- [19] 王宏泽. 台风“莫兰蒂”造成厦门直接经济损失 102 亿元. (2016-09-20) [2018-07-20]. http://difang.gmw.cn/xiamen/2016-09/20/content_22058451.htm.
- [20] 陈珂, 蓝鼎栋, 柯文德, 黎树俊, 邓文天. 基于 Java 的新浪微博爬虫研究与实现. *计算机技术与发展*, 2017, 27(9): 191-196.
- [21] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Geneva: IPCC, 2007.
- [22] 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 黄葳. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1209-1218.
- [23] Huang Y F, Li F Y, Bai X M, Cui S H. Comparing vulnerability of coastal communities to land use change: analytical framework and a case study in China. *Environmental Science & Policy*, 2012, 23: 133-143.
- [24] Sajjad M, Li Y F, Tang Z H, Cao L, Liu X P. Assessing hazard vulnerability, habitat conservation, and restoration for the enhancement of mainland China's Coastal Resilience. *Earth's Future*, 2018, 6(3): 326-338.
- [25] 顾钧禧. *大气科学辞典*. 北京: 气象出版社, 1994.
- [26] 孟中, 张维功, 孟媛. 用模糊数学综合评价环境质量. *环境保护*, 1993, (8): 28-29, 19-19.
- [27] 杜鹃, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评价. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 38-44.