

刘洪良, 罗年学, 赵前胜. 基于灾害复杂网络的深圳台风灾害链风险分析[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 228–234. [LIU Hongliang, LUO Nianxue, ZHAO Qiansheng. Risk Analysis of Typhoon Disaster Chain Based on Complex Network in Shenzhen [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 228–234. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.035.]

基于灾害复杂网络的深圳台风灾害链风险分析*

刘洪良, 罗年学, 赵前胜

(武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 台风灾害是影响我国沿海地区最严重的自然灾害之一, 为了更加科学地认识台风灾害引发的各类风险与影响, 把握台风灾害演化的路径及其防控重点, 该文提出一种基于灾害复杂网络进行风险分析的方法。基于1980—2020年间对深圳市造成影响的台风灾害, 将灾害事件作为网络节点, 事件关联关系为网络连接边, 构建深圳市台风灾害复杂网络。引入复杂网络特征参数, 构造台风灾害演化网络的节点综合重要度和连接边脆弱度。基于灾害事件发生概率和风险减缓因子构建了深圳市台风灾害链风险评价模型, 对深圳市台风灾害演化过程中较为典型的灾害链条风险值进行了定量的评估。结果表明, 该方法能够识别出台风灾害网络中的重要环节, 得到风险较高的灾害演化链条, 为防灾减灾提供参考。

关键词: 台风灾害; 台风灾害链; 复杂网络; 灾害演化; 风险分析; 深圳市

中图分类号: X915.5; X43; P492 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)04-0228-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.035

台风灾害发生时, 在致灾因子如暴雨、大风、风暴潮等共同作用下, 常产生一系列次生灾害, 呈现链式结构演化的态势, 构成了台风灾害链^[1-2]。基于灾害链, 从台风事件演化的角度分析灾害风险, 能够厘清灾害发展过程中各要素之间的相互作用关系, 描述台风灾害的时空演化过程, 反映台风灾害引发的各类风险与影响, 从而协助减灾部门把握台风灾害演化路径及其防治的重点环节, 更加有效地为应急减灾提供决策支持, 减少灾害链式传播带来的损失^[3]。

灾害复杂网络理论作为系统学的研究范畴, 是研究链式风险的重要方法, 近年来, 其在电力网络、交通网络、管道网络、自然灾害等领域得到了广泛应用。如 MA 等^[4]利用复杂网络理论解释了自然灾害和社会极端事件对电力系统的影响, 对电力系统的结构稳定性进行了评估; 黄莺等^[5]基于复杂网络和城市韧性理论研究了城市地铁网络的最优恢复策略; 刘云海等^[6]运用复杂网络和灾害链理论对燃气管线破裂事件的风险度进行了耦合分析; 陈长坤^[7]建立了城市基础设施在暴雨情景下的灾害演化网络, 分析了暴雨灾害对城市基础设施的影响; 谢明峰等^[8]提出一种结合灾害演化网络和风险矩阵对灾害综合风险进行分析的方法。

基于此, 本研究将灾害链和复杂网络理论引入台风灾害的风险分析。以深圳市为研究对象, 通过对台风历史案例的统计与分析, 建立深圳市台风灾害演化网络, 选取复杂网络的节点和连接

边指标对灾害复杂网络进行特征分析, 引入灾害事件发生概率和风险减缓因子对深圳市遭受台风时产生的一系列链式灾害进行定量的风险评估, 识别台风灾害发展过程中的关键环节和关键路径, 为台风防灾减灾工作提供支持。

1 台风灾害复杂网络的构建

复杂网络是研究系统内部要素关系、几何性质和演化规律的工具^[9]。当将灾害的演化模式与发展机理抽象为复杂网络表示时, 便构成了灾害复杂网络: 灾害事件为复杂网络中的“节点”, 灾害链中的所有灾害事件构成了节点集合 $V(G)$; 灾害事件间的关联关系为复杂网络中的“连接边”, 灾害链中的所有灾害事件关联关系构成了连接边集合 $R(G)$, 且 $R(G)$ 中每条连接边对应的节点对均在点集 $V(G)$ 中。因此, 复杂网络的特征参数也适用于分析灾害演化网络的特性。

为了构建城市台风灾害演化网络, 本研究以深圳市为研究对象, 根据1980—2020年间对深圳市造成影响的82场台风历史案例, 对台风灾害造成的次生灾害事件和事件关联关系进行识别, 确定了30个深圳市台风灾害网络节点(表1), 结合台风灾害演化机理, 构建了深圳市台风灾害链演化网络(图1)。

* 收稿日期: 2023-02-11

修回日期: 2023-06-06

基金项目: “海洋环境安全风险感知与应急决策服务关键技术及装备研发”(2022YFC3105103)

第一作者简介: 刘洪良(1996-), 男, 汉族, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事GIS应急安全研究。E-mail: whulliu@whu.edu.cn

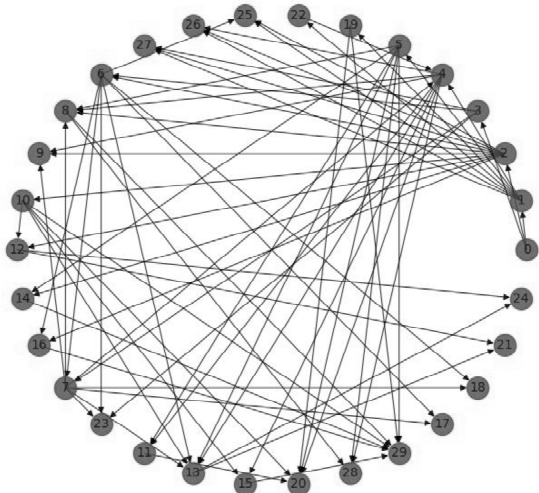


图1 深圳市台风灾害演化网络

表1 深圳市台风灾害复杂网络节点编号对应灾害事件表

节点 序号	节点 名称	节点 序号	节点 名称	节点 序号	节点 名称
V0	台风	V10	树木倒伏	V20	交通中断
V1	暴雨	V11	道路损毁	V21	通信中断
V2	大风	V12	线路损毁	V22	水库溃坝
V3	风暴潮	V13	设施损毁	V23	海堤损毁
V4	洪涝灾害	V14	工程损毁	V24	停水停电
V5	地质灾害	V15	车辆损毁	V25	停运停航
V6	巨浪	V16	船只受损	V26	停工停课
V7	海水倒灌	V17	渔业受损	V27	景区关闭
V8	房屋损毁	V18	码头受损	V28	人员被困
V9	农作物受损	V19	交通事故	V29	人员伤亡

2 灾害复杂网络特征参数的构建

2.1 灾害复杂网络节点综合重要度

本研究根据节点特性参数的适用范围, 选取反映复杂网络局部特征的度中心性以及反映复杂网络全局特征的节点介数中心性、聚类系数、节点紧密中心性4个指标量化复杂网络的节点特性。

(1)度中心性(DC_i)。节点的度 D_i 表示在复杂网络中与节点直接相连的边的个数。由于灾害复杂网络是一种有向图, 灾害事件节点的度可分为出度和入度, 出度体现了该事件节点对其他次生灾害的影响程度, 入度体现了该事件节点受影响的程度, 节点的度越大, 则该节点与其他节点的关联就越强。度中心性(DC_i)直观地量化了节点在网络中的重要性和影响力。 DC_i 越大, 该灾害节点事件在灾害复杂网络中的重要性和影响力也就越大。 DC_i 的计算公式如下:

$$DC_i = \frac{D_i}{N-1} \quad (1)$$

式中: D_i 为节点的度, N 为网络中的总节点数。

(2)介数中心性(BC_i)。最短路径指的是网络中两节点之间边数最少的路径, 在灾害复杂网络中代表了灾害从节点 V_i 发展为节点 V_j 的最快方式。网络节点的介数中心性(BC_i)指经过节点 V_i 的最短路径数目在所有最短路径数目中的占比, 反映了灾害事件作为中间连接点在灾害演化网络中对其他事件的影响程度, 能够度量灾害事件在灾害复杂网络中的风险扩散作用。 BC_i 越大, 灾害事件节

点 V_i 对其他节点的影响力越强, 对灾害整体风险传播的影响程度越大。 BC_i 的计算公式如下:

$$BC_i = \sum_{i \neq j \neq k \in V} \frac{n_{jk}^i}{n_{jk}} \quad (2)$$

式中: n_{jk} 表示节点 V_j 和节点 V_k 之间的最短路径数, n_{jk}^i 表示连接节点 V_j 和 V_k 的最短路径中经过 V_i 的最短路径数。

(3)紧密中心性(CC_i)。节点的紧密中心性(CC_i)表征了节点 V_i 与其他节点的接近程度。节点的紧密中心性越大代表该节点到达其余节点的最短距离越小, 该节点处于灾害复杂网络几何意义上的中心位置, 该灾害事件越容易传播至其他灾害事件。 CC_i 的计算公式如下:

$$CC_i = \frac{1}{d_i} = \frac{N-1}{\sum_{j=1}^N d_{ij}} \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为节点 V_i 到节点 V_j 的最短路径长度。

(4)聚类系数(C_i)。聚类系数(C_i)度量了灾害复杂网络中节点之间的聚集程度, 是指网络中与节点 V_i 邻接的两个节点也相邻的概率。聚类系数越大表示该事件节点与其他灾害事件之间的联系越紧密, 灾害事件的聚集化程度也就越高。 C_i 的计算公式如下:

$$C_i = \frac{2S_i}{n(n-1)} \quad (4)$$

式中: S_i 为节点 V_i 关联的邻接节点数, n 为具有邻接节点的节点数。

(5)基于灰色关联分析的节点综合重要度(r_i)。本研究基于复杂网络节点的4项指标, 采用灰色关联分析构建了节点综合重要度。灰色关联分析法计算量小, 非常适合小样本下的关联度评估, 其基本思想是通过确定参考序列和比较序列, 根据序列曲线的几何相似度来判断关联系数^[10]。在本文中, 利用各项节点指标的最大值构建参考序列, 计算每个节点指标序列与参考序列的关联度, 关联度越大则该节点的重要程度越高。关联系数的计算公式如下:

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}}, r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \quad (5)$$

式中: ξ_{ij} 为比较序列与参考序列第 j 项指标的关联系数, ρ 取 0.5, Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 分别为比较序列与参考序列在第 j 项的最小绝对差和最大绝对差, r_i 为灰色关联度也即是节点综合重要度。

2.2 灾害复杂网络连接边脆弱度

本研究在陈常坤^[7]、牟能治^[11]、谭跃进^[12]等学者给出的复杂网络演化过程中边参数特性分析的基础上, 选取了边介数、网络平均路径长度和网络连通度构建了连接边脆弱度指数。

(1)网络平均路径长度(L)。网络的平均路径长度(L)为网络中所有节点对之间最短路径长度的平均值。在灾害复杂网络中, 该指标反映了网络中灾害事件的演化速度。在灾害复杂网络中移除某条连接边 r 后, 网络结构与平均路径长度也会发生变化, 若平均路径长度增加, 说明移除 r 可以延缓灾害的演化过程, 该连接边在网络中处于较为关键的环节, 其灾害风险较大。因此, 可以通过对比移除网络中的不同连接边后的网络平均路径长度, 分析该边在灾害演化传播中的影响。计算公式如下:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j \in V} d_{ij} \quad (6)$$

式中: d_{ij} 为节点 V_i , V_j 之间最短路径长度。

(2)连接边的边介数(B_r)。 r 的边介数(B_r)是指网络中经过该边的最短路径数目,可以反映该连接边在网络中的影响范围。在灾害复杂网络中,连接边的边介数越大,则该边所影响的灾害演化路径越多,影响灾害演化过程的作用越大。其计算公式如下:

$$B_r = \sum_{j \neq k \in V} n_{jk}^r \quad (7)$$

式中: n_{jk}^r 即为节点 V_j 和 V_k 之间所有最短路径中经过连接边 r 的数目。

(3)网络的连通度(H)。网络的连通度 H 是指网络中连通的节点数在所有节点中的占比,反映了网络的连通性和稳定程度。若移除灾害复杂网络中的某条连接边后, H 减小,说明该边会影响后续灾害节点的发展,证明该连接边在灾害演化过程中的处于脆弱性较强的环节。 H 的计算公式如下:

$$H = \frac{N_i}{N} \quad (8)$$

式中: N_i 为去除某连接边后网络中连通的节点数目。

(4)连接边的脆弱度(V_r)。本研究构建连接边的脆弱度指标以刻画该边在灾害演化过程中重要程度。移除某连接边后,网络的拓扑结构会受到影响,因此,基于网络连接边的变化对灾害复杂网络拓扑结构的脆弱性进行分析能够评价灾害事件连接边的风险值。本研究基于网络平均路径长度、边介数和连通度三个指标来构建灾害复杂网络连接边的脆弱度指标,其中网络平均路径长度和边介数与连接边脆弱度呈正相关,连通度与连接边脆弱度呈负相关,由此按照式(9)计算连接边 r 的脆弱度 V_r 。 B_r 表示连接边 r 的边介数, L_r 和 H_r 表示移除连接边 r 之后的网络平均路径长度和网络连通度。

$$V_r = \frac{B_r L_r}{H_r} \quad (9)$$

3 城市台风灾害链风险分析

3.1 灾害链风险评估模型的构建

在台风灾害链中,灾害事件之间往往互相影响,灾害发生的概率是指灾害事件父节点引发子节点的概率,常见的概率确定方法有根据专家经

验打分法、根据数学模型和先验概率计算法、根据历史资料观测法;在灾害复杂网络中,灾害事件造成的损失受到其关联事件的影响^[13],而节点的度是衡量其在网络中与其他节点关联程度的重要指标,因此在灾害复杂网络中,节点的综合重要度能够在一定程度上反映该灾害事件的危害程度;在灾害发展过程中,人为地干预灾害事件节点之间的关系、剔除灾害节点连接边能够改变复杂网络的拓扑结构,从而致使网络特性发生变化,连接边的脆弱度反映了其对灾害复杂网络的影响程度,能够作为评价灾害链风险值的重要指标。对于一条完整的灾害链,其风险评估模型如表达式所示:

$$R = \sum_{i=1}^n P_{i,i+1} \times Q_i \times V_{i,i+1} \quad (10)$$

式中: R 为灾害链的风险值, $P_{i,i+1}$ 为灾害事件 V_i 引起灾害事件 V_{i+1} 的连接边发生概率通过计算事件的共现频率得到, Q_i 为灾害事件 V_i 在灾害复杂网络中的综合重要度即式(5)中的 r_i 值, $V_{i,i+1}$ 为灾害事件 V_i 到灾害事件 V_{i+1} 连接边的边脆弱度即式(9)中的 V_r 值。

为了抵御自然灾害的影响,在城市建设过程中减灾部门会采取一系列防灾减灾措施切断或抑制灾害链中灾害事件间的关联关系。本研究根据台风灾害应急处置的特点,引入风险减缓因子 M 来分析城市防灾减灾能力对灾害风险的减缓作用。对于台风灾害, M 因子主要从城市建设的抗风能力、防洪能力、防潮能力和地质灾害防治能力四个方面构建指标,其中:抗风能力主要参考城市基础设施的设计抗风等级标准;防洪能力主要参考城市基础设施建设时的防洪标准;防潮能力主要参考海堤为抵御风暴潮、巨浪等灾害建设的防潮标准;地质灾害防治能力主要参考城市建设的地质灾害防治标准所应对的地质灾害规模。 M 的取值主要根据《热带气旋等级:GB/T 19201-2006》^[14]、《防洪标准:GB50201-2014》^[15]、《海堤工程设计规范:SL435-2008》^[16] 等标准规范并结合城市建设的特点,参考已有文献和专家经验^[17-19] 按表 2 至表 5 所示标准进行等级划分。

在灾害链风险表达式(10)的基础上引入风险减缓因子后,减缓后的灾害链风险表达式如下:

$$R' = \sum_{i=1}^n P_{i,i+1} \times Q_i \times V_{i,i+1} \times (1 - M) \quad (11)$$

表 2 城市重要设施设计抗风能力等级划分

等级	1	2	3	4	5
指标描述	<12 级	12 级	13 级	14 级	≥15 级
M 取值	[0, 0.2]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.6, 0.8]	[0.8, 1]

表 3 城市防洪标准能力等级划分

等级	1	2	3	4	5
指标描述	<20 年一遇	20~50 年一遇	50~100 年一遇	100~200 年一遇	>200 年一遇
M 取值	[0, 0.2]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.6, 0.8]	[0.8, 1]

表 4 海堤防潮防浪标准能力等级划分

等级	1	2	3	4	5
指标描述	<20 年一遇	20~30 年一遇	30~50 年一遇	50~100 年一遇	>100 年一遇
M 取值	[0, 0.2]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.6, 0.8]	[0.8, 1]

表 5 城市建设抵御地质灾害能力的等级划分

等级	1	2	3	4
指标描述	抵御小型地质灾害	抵御中型地质灾害	抵御大型地质灾害	抵御特大型地质灾害
M 取值	[0, 0.25]	[0.25, 0.5]	[0.5, 0.75]	[0.75, 1]

3.2 城市台风灾害链的风险评估

3.2.1 台风灾害连接边的发生概率分析

在本研究中, 灾害事件连接边的发生概率指的是灾害事件 i 引起灾害事件 j 的概率, 也可以认为是灾害事件 i 和灾害事件 j 共同发生的可能性, 即两灾害事件的共现率。本文采用 Jaccard 指数对两灾害事件的共现率进行评价, 从而能够更好地对台风灾害复杂网络进行动态演化, 使风险评价更具有说服力, 具体方法为基于深圳市的历史台风灾害案例资料, 分别统计灾害事件发生的频次和两两灾害事件共同发生的频次, 计算公式如下所示^[20]:

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_i + C_j - C_{ij}} \quad (12)$$

式中: P_{ij} 表示连接边的发生概率, C_{ij} 表示灾害父节点 V_i 和灾害子节点 V_j 共同出现的频次, C_i 表示灾害父节点 V_i 出现的频次, C_j 表示灾害子节点 V_j 出现的

频次。概率分布情况如表 6 所示。

3.2.2 城市台风灾害演化网络节点与连接边特征分析

利用节点重要度的计算方法, 得到深圳市台风灾害演化网络中节点综合重要度表 7, 各节点指标参数如图 2 所示。

暴雨(V2)、洪涝灾害(V4)、巨浪(V6)和海水倒灌(V7)四个节点的度中心性较大(见图 2a), 均大于 0.3, 其中暴雨的入度为 1, 出度为 10; 洪涝灾害的入度为 3, 出度为 8; 巨浪的入度为 2, 出度为 7; 海水倒灌的入度为 2, 出度为 7。这四个节点的连接性较强, 出度比较大, 对后续灾害事件的引发具有比较重要的影响, 说明在城市台风灾害演化过程中, 暴雨、巨浪、洪涝和海水倒灌是需重点关注的灾害事件, 宜采取相关手段针对其展开灾害治理工作。

表 6 深圳市台风灾害链节点演化网络连接边概率统计

连接边	概率/%	连接边	概率/%	连接边	概率/%	连接边	概率/%
V0 - V1	85.4	V2 - V26	22.2	V5 - V20	72.7	V8 - V29	85.7
V0 - V2	72.0	V2 - V27	18.2	V5 - V28	54.5	V10 - V12	54.5
V0 - V3	67.1	V3 - V6	17.8	V5 - V29	42.0	V10 - V13	45.4
V1 - V4	67.8	V3 - V7	15.6	V6 - V7	37.5	V10 - V15	36.4
V1 - V5	39.6	V3 - V23	17.8	V6 - V13	37.5	V10 - V20	35.4
V1 - V19	2.2	V3 - V27	13.3	V6 - V16	31.3	V10 - V29	36.3
V1 - V22	15.6	V4 - V8	76.9	V6 - V17	75.0	V11 - V20	90.9
V1 - V25	30.3	V4 - V9	73.1	V6 - V18	62.5	V12 - V21	66.7
V1 - V26	13.3	V4 - V11	19.2	V6 - V23	37.5	V12 - V24	66.7
V1 - V27	13.3	V4 - V13	26.9	V6 - V25	87.5	V13 - V21	66.7
V2 - V6	72.7	V4 - V15	15.4	V7 - V4	85.7	V13 - V24	66.7
V2 - V8	48.1	V4 - V20	46.2	V7 - V8	53.8	V14 - V29	46.2
V2 - V9	70.4	V4 - V26	23.1	V7 - V9	36.8	V15 - V29	33.3
V2 - V10	37.0	V4 - V28	3.8	V7 - V13	85.7	V16 - V29	33.3
V2 - V12	18.5	V5 - V8	42.0	V7 - V17	85.7	V19 - V20	81.9
V2 - V14	22.2	V5 - V11	72.7	V7 - V18	71.4	V19 - V29	66.7
V2 - V16	12.9	V5 - V13	63.6	V7 - V23	85.7	V22 - V4	85.7
V2 - V25	37.0	V5 - V14	54.5	V8 - V28	92.3		

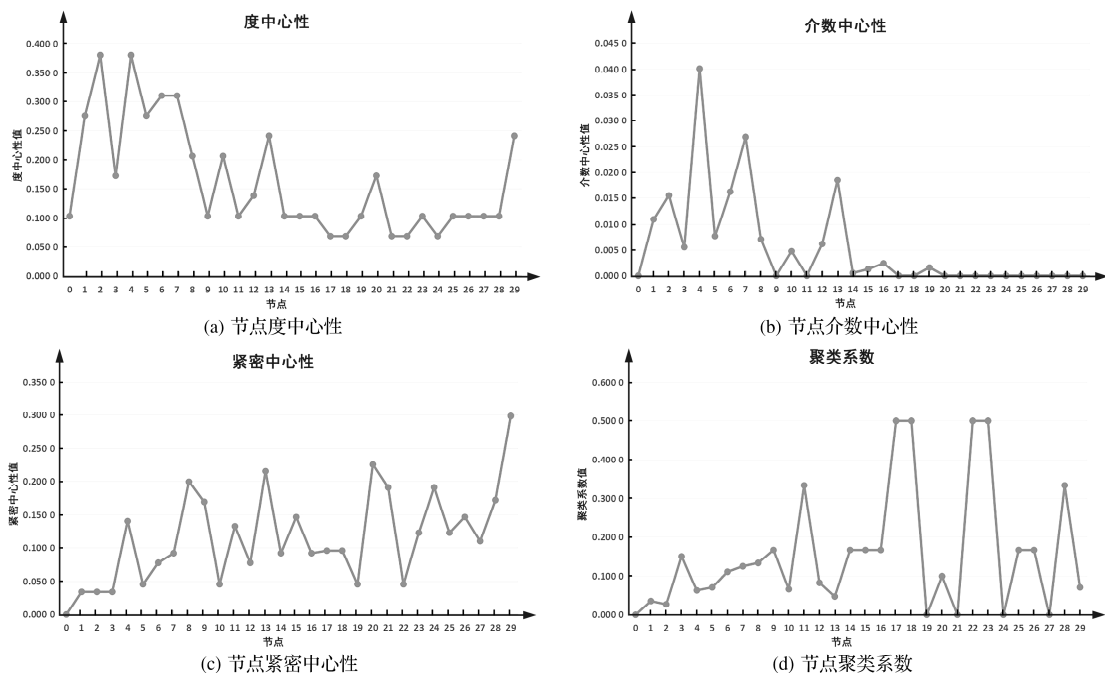


图 2 深圳市台风灾害演化网络节点参数灰度图

洪涝灾害(V4)和海水倒灌(V7)节点的介数中心性较大(见图2b),说明这两个节点在灾害演化路径上作为中间连接点对其他灾害的影响较大。对这两个灾害节点进行预防,可以很大程度上实现灾害链的断链减灾,最大程度减少灾害造成的损失。

人员伤亡(V29)、交通中断(V20)和设施损毁(V13)的紧密中心性较大(见图2c),均大于0.2,说明这3个节点到达其余节点的最短距离较小,不依赖其他节点进行传播。这3个均是台风灾害链中较下游的节点,是灾害发展过程中较容易造成的灾情结果,是灾后应急救灾需重点关注的灾害节点。

渔业受损(V17)、码头受损(V18)、水库溃坝(V22)、海堤损毁(V23)的聚类系数最大(0.5)(见图2d),这4个节点之间的集聚程度较强,容易互相影响,均与风暴潮、巨浪灾害相关,是城市沿岸地区需重点关注的灾情结果。整体上,深圳市台风灾害复杂网络的聚类系数较小,网络中节点的集团化程度低,因此对灾害发展过程中的

关键节点和连接边进行治理,可以很好地控制灾害整体风险的传播,有效降低或避免后续的危害损失。

基于灰色关联度分析法得到节点的综合重要度后。结果表明,洪涝灾害(V4)的节点综合重要度最大为0.770 9,巨浪(V6)和海水倒灌(V7)次之,分别为0.707 1,0.686 1,因此洪涝、巨浪、海水倒灌作为台风灾害网络的关键节点,是深圳市台风灾害风险防控工作中的重要节点。

利用连接边脆弱性的评估方法,得到深圳市台风灾害链网络中各连接边脆弱度表8。可知,在深圳市的台风灾害链演化过程中,脆弱性较大的连接边有V0-V1(台风-暴雨)、V0-V2(台风-大风)、V2-V6(大风-巨浪)、V3-V7(风暴潮-海水倒灌)、V6-V7(巨浪-海水倒灌)、V7-V4(海水倒灌-洪涝灾害),其中,V0-V2-V6-V7-V4可以构成一条完整的灾害链(台风-大风-巨浪-海水倒灌-洪涝灾害),可看作深圳市台风灾害演化过程中最为脆弱的一个灾害链条。

表7 深圳市台风灾害链节点综合重要度列表

节点	重要度	节点	重要度	节点	重要度	节点	重要度
V0	0.520 1	V8	0.620 3	V16	0.557 1	V24	0.551 5
V1	0.597 9	V9	0.572 7	V17	0.560 8	V25	0.568 7
V2	0.599 1	V10	0.569 3	V18	0.560 8	V26	0.572 7
V3	0.569 8	V11	0.574 7	V19	0.537 9	V27	0.540 2
V4	0.770 9	V12	0.555 0	V20	0.597 5	V28	0.620 2
V5	0.598 6	V13	0.645 2	V21	0.551 5	V29	0.649 4
V6	0.707 1	V14	0.554 9	V22	0.648 1		
V7	0.686 1	V15	0.568 2	V23	0.653 4		

表8 深圳市台风灾害链节点演化网络连接边脆弱度列表

连接边	脆弱度	连接边	脆弱度	连接边	脆弱度	连接边	脆弱度
V0-V1	31.899 9	V2-V26	3.436 0	V5-V20	2.846 5	V8-V29	6.984 5
V0-V2	36.542 9	V2-V27	3.411 4	V5-V28	3.415 8	V10-V12	3.413 6
V0-V3	15.878 7	V3-V6	16.390 2	V5-V29	3.415 8	V10-V13	6.822 8
V1-V4	18.778 5	V3-V7	27.497 9	V6-V7	33.293 4	V10-V15	5.996 2
V1-V5	17.694 8	V3-V23	3.423 2	V6-V13	15.558 6	V10-V20	5.139 6
V1-V19	10.011 5	V3-V27	2.560 2	V6-V16	7.454 9	V10-V29	2.704 2
V1-V22	3.518 0	V4-V8	7.078 7	V6-V17	7.481 1	V11-V20	1.706 8
V1-V25	3.421 0	V4-V9	6.363 5	V6-V18	7.481 1	V12-V21	6.342 9
V1-V26	3.423 2	V4-V11	14.054 0	V6-V23	5.146 2	V12-V24	6.342 9
V1-V27	2.560 2	V4-V20	11.510 7	V6-V25	3.411 4	V13-V21	17.326 7
V2-V6	37.177 0	V4-V26	10.114 8	V7-V4	38.203 2	V13-V24	17.326 7
V2-V8	9.321 0	V4-V28	8.558 0	V7-V8	13.887 7	V14-V29	2.702 4
V2-V9	5.000 0	V4-V13	14.479 4	V7-V9	7.984 3	V15-V29	3.413 6
V2-V10	16.042 2	V4-V15	15.871 9	V7-V13	9.368 0	V16-V29	6.442 5
V2-V12	8.595 5	V5-V8	3.413 6	V7-V17	3.944 6	V19-V20	2.844 7
V2-V14	12.804 2	V5-V11	3.840 3	V7-V18	3.944 6	V19-V29	3.413 6
V2-V16	6.254 2	V5-V13	9.204 3	V7-V23	1.706 8	V22-V4	21.803 6
V2-V25	2.561 9	V5-V14	4.690 7	V8-V28	8.566 0		

3.2.3 城市台风灾害链风险值的定量计算

为了对风险值展开定量评估, 本研究对风险减缓因子 M 的取值展开计算。根据深圳市气象局发布的《深圳市防汛防台风预案》, 深圳市建成海堤 8 处, 总长 46 km。其中宝安西海堤约 25.8 km, 防御标准为 100 年一遇的风暴潮; 福田、南山、盐田区海堤约 10.6 km, 防御标准为 50 ~ 100 年一遇的风暴潮; 龙岗区海堤约 9.6 km, 防御标准为 20 ~ 50 年一遇的风暴潮, 且防潮达标率为 85.9%。利用加权平均计算得到深圳市防潮减灾因子 M 为 0.712。深圳市内涝防治能力在全市范围内达到 20 ~ 50 年一遇, 且防洪达标率为 94%, 深圳市防洪减灾因子 M 经计算取为 0.376。根据吴新桥^[21]等人提出的沿海输电线路防风能力评估结果, 深圳市防风区域内重要供电设备以及线路可抵御风速 37 ~ 42 m/s、风力 13 级的强台风, 防风减灾因子 M 经计算取为 0.6。重点电力设施可抵御重现期 50 ~ 100 年一遇的洪涝灾害, 重点设施对内涝灾害的减灾因子 M 取为 0.6。根据《深圳市地质灾害防治规划(2016—2025)》^[22], 深圳市的地质灾害建设标准以抵御中小型灾害为主, 取地质灾害减灾因子 M 为 0.5。

本研究基于灾害链节点和连接边的特性, 选择了 25 条较为典型的灾害链对其风险进行识别分析, 计算结果见表 9。可以看出深圳市由暴雨、海水倒灌引发的洪涝灾害具有较高的风险值, 这与深圳市历史案例中洪涝事件频繁高发的特征一致, 说明该灾害链风险评估模型具有一定的可靠性。减灾手段能够使灾害链的风险值呈现明显的减小特征, 引入减灾因子后的深圳市“台风-大风-巨浪-海堤损毁”灾害链, 风险值降低了 44.62%。

同样以“台风-大风-巨浪-海堤损毁”灾害链为例, 本研究对深圳市各区不同建设等级的海堤的灾害风险值进行了计算, 宝安区海堤以防潮 100 年一遇为建设标准, 减缓后的风险值为 12.186, 风险降低率为 56.40%; 福田、南山、盐田区海堤以防潮 50 ~ 100 年一遇为建设标准, 减缓后的风险值得 15.690, 风险降低率为 43.87%; 龙岗区海堤以防潮 20 ~ 50 年一遇为建设标准, 减缓后的风险值得 20.945, 风险降低率为 25.07%, 可以看出建设具有更高防潮防浪等级的海堤, 对于提升抗灾减灾能力具有非常显著的效果。

由于灾害链上的风险值是根据灾害节点重要度和连接边脆弱性叠加的, 一条灾害链传播得越长, 则该链条的风险值会越大。通过切断或抑制灾害事件之间的诱发关系实现断链减灾能够有效降低灾害链风险。以灾害链“台风-大风-线路损毁-停水停电”和“台风-大风-树木倒伏-线路损毁-停水停电”为例, 在台风灾害发生前通过对树木进行剪枝、加固等处理, 降低树木倒伏造成的线路损毁的可能性, 能够使灾害风险值从 22.522 降低至 18.993, 风险降低率达 15.67%。

4 结论

本文以深圳市为例, 对城市台风灾害展开风险评估, 辨析了台风灾害演化过程中的主要风险节点和环节, 得出如下结论。

(1) 根据深圳台风灾害历史案例和灾害演化机理, 确定次生衍生灾害事件和事件的关联关系, 构建深圳市台风灾害演化网络。

表 9 深圳市典型台风灾害链风险值减缓前后结果

编号	灾害链	减缓前风险值	减缓后风险值	风险降低率/%
1	台风-暴雨-洪涝-人员被困	26.305	22.615	14.03
2	台风-暴雨-洪涝-交通中断	29.281	25.590	12.61
3	台风-暴雨-洪涝-房屋损毁	29.480	25.789	12.52
4	台风-暴雨-洪涝-设施损毁	28.616	23.418	18.16
5	台风-暴雨-洪涝-设施损毁-停水停电	34.990	29.792	14.86
6	台风-暴雨-洪涝-农作物受灾	28.767	25.077	12.83
7	台风-暴雨-地质灾害-人员伤亡	21.414	18.269	14.69
8	台风-暴雨-地质灾害-房屋损毁	22.261	19.116	14.13
9	台风-暴雨-地质灾害-道路损毁-交通中断	25.348	22.202	12.41
10	台风-暴雨-交通事故-人员伤亡	17.885	-	-
11	台风-暴雨-水库溃坝-洪涝-房屋损毁-人员被困	39.350	33.708	14.34
12	台风-大风-巨浪-海堤损毁	27.951	15.480	44.62
13	台风-大风-巨浪-海水倒灌-洪涝-房屋损毁	63.360	48.062	24.14
14	台风-大风-巨浪-船只损毁-人员伤亡	29.280	-	-
15	台风-大风-停运停航	16.200	-	-
16	台风-大风-农作物受损	17.779	-	-
17	台风-大风-线路损毁-停水停电	18.993	16.463	13.32
18	台风-大风-树木倒伏-线路损毁-停水停电	22.522	-	-
19	台风-大风-树木倒伏-车辆损毁	20.382	-	-
20	台风-大风-工程损毁-人员伤亡	17.344	-	-
21	台风-风暴潮-巨浪-海堤损毁	9.326	8.355	10.41
22	台风-风暴潮-巨浪-船只受损	9.262	-	-
23	台风-风暴潮-巨浪-海水倒灌-洪涝-房屋损毁	44.735	29.437	34.20
24	台风-风暴潮-海水倒灌-洪涝-交通中断	37.291	25.805	30.80
25	台风-风暴潮-海水倒灌-渔业受损	10.770	8.774	18.53

(2) 基于灾害复杂网络的特征参数, 从节点和连接边两方面分析了灾害演化网络的特性。选择复杂网络节点的度中心性、介数中心性、聚类系数和紧密中心性四项指标, 利用灰色关联分析法确定了复杂网络节点的综合重要度; 选择网络平均路径长度、连接边的边介数和网络连通度三项指标计算了灾害复杂网络连接边的脆弱度。分析可知“洪涝”“巨浪”“海水倒灌”是深圳市台风灾害网络的关键节点, 是台风防控工作中的重要环节, 而“台风-大风-巨浪-海水倒灌-洪涝”灾害链可看作深圳市台风灾害演化过程中最为脆弱的一个灾害链条。如2018年9月15日至17日, 深圳市受台风“山竹”影响全市广下暴雨, 深圳沿海地区出现3.5~5.5 m巨浪, 导致大鹏区和盐田区发生海水倒灌事件, 内涝积水80余处, 紧急转移1500余人, 影响较为严重^[23]。

(3) 引入灾害事件发生概率和风险减缓因子, 构建灾害链风险模型, 计算了典型的台风灾害链风险值。通过加强城市的防灾减灾建设提升风险减缓能力, 切断或抑制灾害事件之间的诱发关系来实现断链减灾能够有效地降低灾害链的风险。例如可提升、更新城市基础设施的抗风能力, 以切断强风和设施、线路损坏间的引发关系; 城市园林绿化建设选择抗风能力强的树种, 在台风来临前对树木进行加固和合理修剪, 切断强风与树木倒伏的引发关系; 加强城市中部分老旧排水系统的整治, 切断暴雨与洪涝的引发关系等, 这些都是深圳市针对台风灾害减灾可行的政策。

参考文献:

- [1] LIU D, SHI H, PANG L. Disaster prevention design criteria for the estuarine cities: New Orleans and Shanghai T he lesson from Hurricane Katrina[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(4): 131-142.
- [2] 王静爱, 雷永登, 周洪建, 等. 中国东南沿海台风灾害链区域规律与适应对策研究[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2012(2): 130-138.
- [3] 刘爱华, 吴超. 基于复杂网络的灾害链风险评估方法的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 466-472.
- [4] MA X, ZHOU H, LI Z. On the resilience of modern power systems: A complex network perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 1-17.
- [5] 黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32-36.
- [6] 刘海云, 韩晓松, 翟振岗, 等. 基于复杂网络的燃气管线破裂灾害链风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 37-42.
- [7] 陈长坤, 孙凤琳, 赵冬月. 暴雨灾害下城市基础设施的事故演化风险分析[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 12-16, 28.
- [8] 陈长坤, 谢明峰, 赵冬月. 基于风险矩阵的灾害演化网络定量分析方法[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 13-17.
- [9] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 409-410.
- [10] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [11] 牟能治, 康秋萍, 贾程方. 突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评估[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 125-132.
- [12] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络抗毁性研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 653-668, 508.
- [13] 陈建均. 地铁灾害链风险评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 热带气旋等级: GB/T 19201-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 防洪标准: GB 50201-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海堤工程设计规范: GB/T 51015-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [17] 张风华, 谢礼立. 城市防震减灾能力指标权重确定研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 23-29.
- [18] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理 with 适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [19] 龚晓峰. 台风灾害链分析及其对城市生命线系统脆弱性影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [20] 吴双阳. 基于复杂网络的暴雨灾害链时序性风险评估研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.
- [21] 吴新桥, 张志强, 章东鸿, 等. 沿海老旧输电线路防风能力评价方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 39-44.
- [22] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市地质灾害防治规划(2016-2025年)[EB/OL]. (2018-07-13). http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/ghjh/csgn/zxgh/content/post_1317024.html.
- [23] 傅静怡. 深圳通报受灾: 海水倒灌、供电中断、市政设施受损, 目前2人受伤[EB/OL]. (2018-09-17). <http://www.credercom/news/20011219/200112190019.html>.

Risk Analysis of Typhoon Disaster Chain in Shenzhen Based on Complex Network

LIU Hongliang, LUO Nianxue, ZHAO Qiansheng

(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Typhoon is one of the most serious natural disasters affecting the coastal areas of China. In order to scientifically understand the various risks and impacts caused by typhoon disasters, identify the evolution process of typhoon disaster and the key points of prevention, a risk analysis method based on disaster complex network is proposed. Taking Shenzhen as an example, based on the historical cases of 2018-2020, the complex network of typhoon disaster in Shenzhen is constructed by taking disaster events as network nodes and event relations as network connecting edges. The network characteristic parameters of complex network theory are introduced to quantitatively analyze the importance of the nodes and the vulnerability of the edges in disaster evolution network. The risk assessment model of typhoon disaster in Shenzhen was established by introducing the probability of disaster events and risk mitigation factors, and the risk of typical disaster chain during the typhoon evolution in Shenzhen was quantitatively evaluated. The results show that the method can obtain the key nodes in the urban typhoon disaster evolution process, and identify the disaster evolution chain with high risk, providing reference for typhoon disaster prevention and reduction.

Keywords: typhoon disasters; typhoon disaster chain; complex network; disaster evolution; risk analysis; Shenzhen