

# 气象灾害下的油气站场设备脆弱节点辨识方法

胡瑾秋\*, 韩子从, 董绍华

中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249

\* 通信作者, hujq@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-01-15

国家自然科学基金(52074323)、中石油战略合作科技专项(ZLZX2020-05-02)和中国石油大学(北京)科研基金(ZX20200137)联合资助

**摘要** 油气站场是保障我国石油与天然气等能源运输、储存体系的重要组成部分, 油气站场的安全稳定运行是油气系统, 乃至国家经济发展的重要一环。我国面积较大, 包含多种气候地区, 不同地域易发暴雨、雷电、台风等气象灾害。气象灾害发生在油气站场及其附近时可能会对相关设施造成破坏, 导致站场处于异常工况中运行, 甚至引发事故。常见的石油及相关液态加工产品的储运站场, 介质除本身具有易燃易爆特性外, 一般还具有一定的挥发性, 易形成可燃气体云团。天然气站场常伴随高压运行条件, 站场一旦出现异常工况或事故会使厂区内工作人员的生命安全及周边环境都承受较大风险。气象灾害往往难以避免, 但可以通过有针对性地增加安全措施加强站场在气象灾害条件下的稳定性, 降低气象灾害带来的风险。为了达到上述目的, 综合考虑油气站场的设备在遇到暴雨、雷暴等气象灾害时, 更容易发生油气泄漏、爆炸等事故的情况, 本文根据气象灾害发生场景, 及相关场景下可能发生的灾害演化路径提出了一种定量的脆弱节点辨识方法。面对不同的环境风险, 现有方法对于站场设备脆弱节点辨识缺乏精细度与准确度, 错误辨识脆弱节点不仅会导致防护过程中人力物力的浪费, 更可能导致储罐管道的泄漏, 甚至引发爆炸。本文对重力模型进行改进, 结合鲁汶算法, 提出基于社团分析模型的设备脆弱节点辨识方法。通过实验分析, 得到暴雨天气、雷暴天气下的脆弱节点, 并利用提出模型对历史案例进行分析, 得到结果与实际调查情况较为吻合。相较于其他分析方法, 社团分析模型精细度提高了10%以上, 分析结果准确率提高了10%以上, 召回率提高了14%以上。实验结果表明, 本文所提方法可以实现多种极端天气下的脆弱节点辨识, 且能对节点进行更精准的定位。

**关键词** 油气站场; 风险辨识; 脆弱节点辨识; 气象灾害; 复杂网络; 社团分析

中图分类号: TE88; TE48

## Identification method of vulnerable nodes of oil and gas station equipment under meteorological disasters

HU Jinqiu, HAN Zicong, DONG Shaohua

School of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** The oil and gas station is an important part of the transportation and storage system of oil and natural gas in China. The safe and stable operation of the oil and gas station is an important part of the oil and gas system and even the national economic development. China has a vast territory with diverse climate types, including storm, lightning, typhoon and other

引用格式: 胡瑾秋, 韩子从, 董绍华. 气象灾害下的油气站场设备脆弱节点辨识方法. 石油科学通报, 2024, 02: 297-306

HU Jinqiu, HAN Zicong, DONG Shaohua. Identification method of vulnerable nodes of oil and gas station equipment under meteorological disasters. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 297-306. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.021

meteorological disasters. When meteorological disaster occurs in and around oil and gas stations and yards, it may cause damage to relevant installations, leading to abnormal operation of stations and yards, and even accidents. The medium in the oil and gas stations usually has significant characteristics of flammability and explosion. In the common situations, petroleum and related liquid processing products are generally volatility and easy to form flammable gas clouds. Natural gas stations are often accompanied by high pressure operation conditions. Once abnormal working condition or accident occurs, the life safety of staff inside the station area and the surrounding environment will bear risks. That's difficult to avoid totally meteorological disasters, but targeted safety measures can be taken to strengthen the stability of stations to resist meteorological disasters and reduce the loss. Here, considering the equipment of oil and gas station often has more oil and gas leakage, explosion and other accidents when encountering meteorological disasters such as rainstorm and thunderstorm, this paper proposed a quantitative vulnerable node identification method according to the occurrence scenario of meteorological disasters and the possible disaster evolution path in related scenarios. The methods often adopted at present lack fineness and accuracy in identifying vulnerable nodes of station equipment, which may cost a lot to protect the wrong nodes and vulnerable nodes, but still lead to leakage of storage tank pipelines, or even high risk of explosion. Based on the improvement of gravity model and the Leuven algorithm, this paper proposed a method to identify vulnerable nodes of equipment in community analysis model. This paper revealed five vulnerable nodes, including automatic fire extinguishing system, ranking highest in rainstorm, and five vulnerable nodes, including lightning rod, ranking highest in thunderstorm. Compared with other analysis methods, the precision of community analysis model increased by more than 10%, the accuracy of analysis results increased by more than 10%, and the recall rate increased by more than 14%. The fragile nodes in historical cases can be identified, and more vulnerable nodes can be identified.

**Keywords** oil and gas station; risk identification; vulnerable nodes identification; meteorological disaster; complex network; community analysis

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.021

## 0 引言

油气系统中设备与运输介质多具有高温、高压、易燃易爆等特性,及时对油气系统设备中存在的风险进行预警可预防事故发生、减少损失、提高生产安全性<sup>[1]</sup>。气象灾害是一种非常严重的自然灾害,会为油气系统的安全生产带来一定的隐患,而油气系统中的隐患一般是相互关联的,对隐患以及其中关联的辨识可有效提高系统安全性<sup>[2-3]</sup>。气象灾害一般表现为雷暴、大风、短时间内的强降雨等天气形式,不同于正常情况,在极端天气下油气系统中设备存在的风险以及事故事件的演化方式都可能随之变化,甚至会出现演化速度更快、后果更严重的变化趋势<sup>[4-5]</sup>。

目前对油气站场设备设施中的脆弱节点进行分析辨识的方法有很多。我国对油气站场中脆弱节点的辨识展开了多项研究。青海油田利用深度学习的方法,对生产设备的运行图像进行处理及分析,从而实现设备的早期故障预警和智能化监测<sup>[6]</sup>;中国石油大学(北京)的研究人员将最大相关最小冗余特征选择方法与支持向量机相结合,对设备焊缝进行故障识别与诊断,完成站场典型设备的脆弱性评价<sup>[7]</sup>。国外研究人员也对脆弱节点的辨识展开了工作。俄国研究人员从天然气供应网络的方向,对系统中的供应设备进行分析,并得出网络中关键设施排名<sup>[8]</sup>;纽芬兰纪念大学的研

究人员提出了一种火灾爆炸协同效应模型,来分析化学处理设备系统中的脆弱性<sup>[9]</sup>。上述方法主要适用正常天气状况下的站场,但暴雨、雷暴等气象灾害会改变站场环境,引发一系列问题。鉴于此,本文提出一种气象灾害条件下,基于社团分析的油气站场中设备设施脆弱节点的识别分析方法,在提高分析精度的同时,保证辨识的准确率。

## 1 基本理论

复杂网络理论可通过已知、易获取的关系获取潜在的、不易发现的知识<sup>[10]</sup>。在安全工程领域,复杂网络方法已经应用于燃气网络分析<sup>[11]</sup>、电力系统脆弱性分析<sup>[12]</sup>、信息传输关键节点分析<sup>[13]</sup>、涡轮机故障模式识别<sup>[14]</sup>等多个研究方向。在油气安全领域,复杂网络也应用于海底长输管线泄漏事故,水下井喷事故等方面的风险演化评估<sup>[15]</sup>。

### 1.1 节点重要度分析方法

节点重要度分析是为了发现网络中对局部或全局影响较大的节点。通过对这类节点的强调或消除以达到促进传播或抑制传播的目的。

受到物理学中万有引力定律的启发,重力模型被提出并应用于复杂网络的节点重要度分析中来<sup>[16]</sup>。其

核心思想是将每一个节点视为重力场中的一个质点,将各个节点之间的最小路径记为节点之间的距离。某一节点对网络中其他节点的吸引作用越大,则认为该节点的重要度越高。根据重力模型的节点重要度计算公式如下:

$$G_w(i) = \sum_{j \neq i} \frac{k_i k_j}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

式中,  $G_w(i)$ 表示利用重力模型计算得节点*i*的重要度,  $k_i$ 为节点*i*的度数,  $d_{ij}$ 为节点*i*到节点*j*的最小路径。

特征向量中心度(Eigenvector Centrality, EC)模型不仅考虑被分析节点和与之相连点的关系,更增加了对于周围节点的关联性分析<sup>[18]</sup>。对复杂网络进行运算,通过迭代运算获取特征向量中心度,将每个事件与其他事件间的关系抽象为 $n \times n$ 的矩阵 $A$ ( $n$ 为网络 $G$ 中节点的个数),提取最大特征向量的值作为每个节点的权值,计算 $\lambda$ 为最大特征值作为节点权重。

为了评价网络的完整性,提出网络质量的计算公式为:

$$I = \sum_{i,j} \frac{d_{ij}}{n(n-1)} \quad (2)$$

有效距离(Effective distance)是一种用来解释复杂网络中节点间深层几何关系的距离。其思想是将2个节点之间的路径进行枚举,分别计算其可能通过路径的概率,并将其转化为距离<sup>[19]</sup>。该计算公式为:

$$De_{p|q} = 1 - \log_2(P_{p|q}), (p \neq q) \quad (3)$$

式中,  $De_{p|q}$ 为计算得到的有效距离,  $P_{p|q}$ 为由事件*n*引起事件*m*的概率。若对事件间的概率进行实际计算,则需要引入贝叶斯等方法计算后验概率,这会导致较大的工作量,且有可能因为历史数据的缺失导致无法计算。所以在复杂网络中,通常使用可分析事件间的联系对概率进行计算,计算公式为:

$$P_{p|q} = \frac{nei_{pq}}{k_p} \quad (4)$$

式中,  $k_p$ 是节点的度数,  $nei_{pq}$ 是网络 $G$ 中邻接矩阵中的元素。当点*n, m*之间存在多条路径时,分别计算路径的有效距离 $De_{p|q}$ ,并取最小值。

## 1.2 社团分析

复杂网络中的节点往往呈现出集群特性,即相互之间关系较密切或相似度较高的节点间会有更多的连接,且将网络分为不同社团之后,相同社团内的节点联系性强,不同社团间的节点联系性差。虽然复杂网

络的节点之间一般具有社团性,但由于建立的网络一般不会直接表现出社团的聚合,所以在对节点间的联系进行探究时,往往需要进行社团检测的工作<sup>[17]</sup>。

为了评判社团分析工作的优劣,研究人员提出了多种分析标准,其中最经典且应用最广泛的是Newman提出的模块度。这一指标是评估社团内部节点的关系是否紧密的一个标准<sup>[28]</sup>。其表达式为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left( a_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta_{ij} \quad (5)$$

式中,  $\delta_{ij}$ 表示两个节点是否在一个社区中,若在一个社区中则为1,否则为0。

鲁汶算法(Louvain algorithm)是一种贪婪优化方法,对每一步都追求最优解,从而得到全局最优<sup>[20]</sup>。在运行鲁汶算法时,先将每个节点都作为一个独立社团看待,再尝试将节点分别与它的邻居节点划分为一个社团,并计算模块度变化 $\Delta Q$ ,当完成所有的划分后,存在 $\max \Delta Q > 0$ ,则遵从 $\max \Delta Q$ 时的划分。重复上述步骤直到所有节点不发生变化。但由于其寻求每一步最优的贪婪特性,在运算 $\Delta Q$ 往往需要很高的时间代价,尤其是在第一轮运算中<sup>[20]</sup>。为了减少模型运算代价,研究人员提出了一种基于小概率事件优化的自适应鲁汶算法,根据小概率事件不会在抽样实验中发生的原理,随机选取节点*i*周围的点来进行聚类。对节点*i*随机选取邻居节点数量 $L_i$ 的计算公式如下:

$$L_i = \min [L_{small}^i, L_{large}^i] \quad (6)$$

$$L_{small}^i = (1 - p_{est}) n_i + 1 \quad (7)$$

$$L_{large}^i = \log_{(1-p_{est})} \alpha \quad (8)$$

式中,  $L_{small}^i$ 为与节点*i*相连接的节点较少时选用的数量,  $L_{large}^i$ 为较多时的数量;  $p_{est}$ 为各节点的邻居节点中必然包含有至少一个适宜划分为一个社群的概率;  $n_i$ 为点*i*相连接的节点数量;  $\alpha$ 为小概率事件发生的置信域值。

## 2 油气站场设备脆弱节点辨识方法

本文提出一种基于改进重力模型和鲁汶算法的社团分析模型,用来分析识别气象灾害条件下,油气站场设备设施中存在的脆弱节点。

### 2.1 设备设施风险演化复杂网络模型建立

由于每个设备设施以及其中的子系统在不同状态下可能具有不同的风险,在风险演化的过程中可能出现不同的意外事件或事故,例如变压器受雷击后可能

导致变压器失效、变压器功能退化、变压器起火、变压器掉落等事件。为了更加全面地分析,在建立网络时,本文没有建立设备设施的关联网络,而是以设备设施作为依托,将其中可能发生的意外事件或事故作为分析对象,建立风险演化网络模型。

根据企业HSE分析、HAZOP分析结果、事故调查报告等相关文件,分析出气象灾害可能导致的意外事件或事故(以下统称为“事件”),以及站场设备设施在气象灾害条件下可能发生的事件,并分析事件在设备之间的影响关系。根据分析结果构建站场风险演化复杂网络模型 $G(N, E)$ ,其中 $V$ 为节点,节点个数为 $n$ ,代表站场中的设备设施在气象灾害条件下潜在的事件; $E$ 为边,边的个数记为 $m$ ,代表事件之间的关联关系。

## 2.2 风险演化网络节点重要度分析

### 2.2.1 事件节点权重计算

由于不同的设备设施在站场中的功能、位置不同,对于整个油气系统的影响不可忽视。为了更好地考虑单个的设备设施和事件对站场整体的影响,本文引入特征中心度来计算复杂网络中的节点权重。应用到风险演化网络模型分析时,该计算方法认为,对风险传播的作用很大程度取决于与它直接相关的事件,当某一事件直接相关的事件传播性强或后果严重时,该事件相较于其他事件而言重要度高。

### 2.2.2 风险演化路径有效距离计算

油气站场的风险演化并非沿着确定的路径进行,在重力模型应用于站场设备设施脆弱节点辨识的过程中,利用最短路径 $d_{ij}$ 计算时认为风险沿着确定的路径演化,显然不符合实际情况。为解决此问题,引入有效距离代替最短路径来计算不同事件之间关联的强弱。

在风险演化网络中,由于事件在传播时存在一定的不确定性,所以一个事件是否传播至相邻节点具有一定的概率,在网络传播的过程中,从一个事件引发另一个事件的概率可以作为风险演化网络中两事件之间的距离度量。根据第1.1节中公式(3)和公式(4)计算得出风险演化网络中,事件之间的有效距离 $De_{piq}$ 。

### 2.2.3 基于改进重力模型的风险演化网络

本文在经典重力模型的基础上,为了更加有效地计算节点之间的距离,引入有效距离替换最短路径。同时,在保持重力模型全局思想的前提下,强化网络中节点本身对于整个网络的影响,在特征向量中心度模型的启发下,引入节点的最大特征值作为节点的权

重。

在公式(1)的基础上,引入有效距离和节点权重后,利用改进的重力模型对节点重要度进行分析公式如下:

$$IG_i = \lambda \cdot \sum_{j \neq i} \frac{k_i k_j}{D_{ij}^2} \quad (9)$$

式中 $IG_i$ 为利用改进重力模型计算的点 $i$ 的节点重要度; $\lambda$ 为点 $i$ 的最大特征值; $D_{ij}$ 为点 $i$ 与点 $j$ 之间的有效距离。

## 2.3 风险演化网络社团分析

无论是传统的节点重要度分析方法还是改进的重力模型,在应用于风险演化网络时,对事件节点的分析都更加强调对全局的影响。但在工程实际中,事件发生后,事件会首先引发与其直接关联的事件,且更容易引发和该事件局部关联性强的事件。而在风险传播控制的过程中,事件节点的局部影响应当强化,所以本文以社团分析方法为基础,结合改进重力模型的分析结果,对风险演化网络中的事件节点进行评价,来获得更加符合油气站场中设备设施的风险演化规律,提出一种基于改进重力模型和鲁汶算法的社团分析模型的脆弱节点辨识方法。

计算过程中,利用气象灾害条件下站场设备设施的事件及其关联建立的风险演化模型,合理设置置信域并带入公式(6),公式(7),公式(8)进行迭代,利用公式(5)评价对事件社团划分结果是否理想。最终获得事件节点之间的关联关系,作为进一步对脆弱节点分析评价的基础。

## 2.4 基于社团分析模型脆弱节点辨识方法

本文提出的社团分析模型的建立步骤如下所述。

步骤1:建立气象灾害条件下的风险演化网络模型。根据已有的企业HSE文件、HAZOP分析结果、过往事故案例等资料,利用事故树、事件树等分析方法,得出气象灾害条件下可能发生的意外事件和事故。将得到的事故事件作为节点,事故事件之间的联系作为边,建立网络模型。

步骤2:利用改进的重力模型计算节点重要度。以重力模型为基础,计算各个节点的最大特征值作为事件节点的权重,强化事件本身对整体风险演化的作用;利用公式(3),公式(4)计算节点之间有效距离;将计算所得事件节点的权重、事件节点间有效距离以及节点度数带入公式(9),得到各个事件在站场设备设施风险演化网络中的重要度。

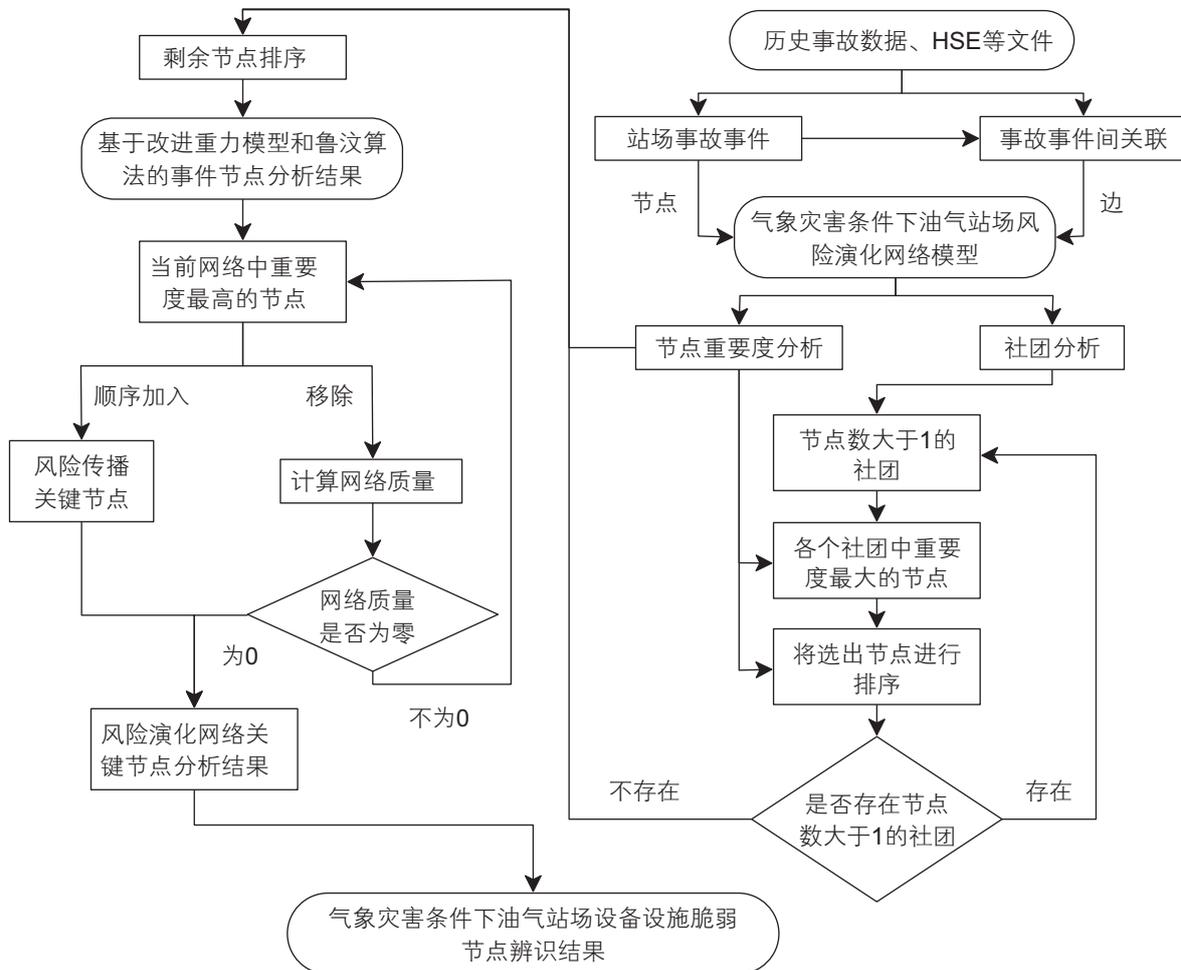


图 1 基于社团分析模型脆弱节点辨识流程图

Fig. 1 Identification flow chart of vulnerable nodes in community analysis model

步骤 3: 利用基于小概率事件的鲁汶算法对网络进行社团划分。运算时选定阈值  $\alpha = 0.005$ , 利用公式 (6), 公式 (7), 公式 (8) 进行迭代, 直至公式 (5) 计算的社团模块度稳定, 即得到网络的社团分析结果。

步骤 4: 进行基于社团分析的网络节点重要度排序。利用公式 (9) 计算基于改进 GM 模型的网络节点重要度, 遍历包含不少于两个节点的社团, 选出其中重要度最大的节点选出并排序, 再将原社团中的该节点删去。

步骤 5: 重复步骤 4, 每次循环获得的新节点都在原有的节点的顺序后继续排列。

步骤 6: 当所有社团均只有一个节点时, 将剩余的节点按重要度顺序放在原有序列后, 即完成基于改进重力模型和鲁汶算法的网络分析。得到在风险演化传播网络中, 不同气象灾害条件下各类事件的影响程度。

步骤 7: 根据步骤 6 中所得结果, 按着事件节点的影响程度从高到低依次对风险传播网络进行攻击,

删去相应节点并利用公式 (2) 计算网络完整性。当网络完整性降至 0 时, 完成攻击的事件节点为风险传播网络中的关键节点, 即相较于其他事件而言, 该类事件的发生, 会引起更多更严重的后果。将这些事件节点破坏, 即可保证在气象灾害条件下, 其他事故无法引起风险进一步的传播和恶化。

步骤 8: 根据步骤 7 分析所得风险传播网络中的重要节点, 分析该类节点代指的事故所涉及的设备设施, 得到气象灾害条件下设备设施脆弱节点。

本文提出的基于复杂网络模型的气象灾害下油气站场设备设施脆弱节点辨识方法实施流程如图 1 所示。

### 3 案例分析

为了评价所提出的基于社团分析模型的气象灾害下油气站场设备设施脆弱节点辨识方法的有效性, 本节将从案例情景模拟分析和历史案例分析 2 个方面分

别对提出的模型进行评价。对于气象灾害条件下事故演化更快的特点,可以通过设置节点与节点之间的直接连接方式体现;对于气象灾害条件下导致更严重的事后后果则可以通过设置事故节点,并从原有事故节点延伸,模拟事故发展来体现。利用不同方法对情景模拟的案例进行分析,通过与其他方法的分析结果进行对比来评价基于社团分析模型方法在分析的精细度和准确性方面的能力;利用社团分析模型对真实的历史案例进行分析,将分析结果与真实案例中存在的脆弱节点进行对比来评价该方法的有效性。

### 3.1 气象灾害下的情景模拟分析

情景模拟案例分析采用对气象灾害条件下的油气站场设备设施进行情景模拟。本文选取暴雨和雷暴2种气象灾害进行情景模拟,在原有的4个系统之外加入气象灾害相关的事件节点,建立复杂网络模型并进行分析。建立网络模型时,设置网络节点的过程中,不能盲目细化节点,提高分析粒度。以自动灭火系统为例,“自动灭火系统”、“火灾报警系统”等自动监测系统、安全系统可以被细分为很多子系统与节点,但由于复杂网络自身性质,对某一系统过分细化则有可能导致某些节点的重要度被夸大,从而影响分析准确性。所以,在保证可以分析系统安全性以及脆弱节点可辨的情况下,对一些子系统进行简化,不进行细分。如有需求,且可以获得足够充分地系统信息时,可以在保证分析精度的前提下将节点细化,扩大网络规模,降低节点粒度,使分析得出的脆弱节点更加精确,得到的风险分析结果更加细致,并更加有效的指导风险控制工作的开展。

本文建模所用的气候灾害、设备节点等基础数据主要来源于研究人员根据既往历史案例的分析与评价,通过已有的事故调查报告和经验分析,结合专家评价得出网络中相应的节点以及节点之间的影响演化关系。不同气候灾害场景下,站场存在的风险与可能发生的故事有所区别。而发生的事件是否被定义为事故的标准一般取决于是否导致人员伤亡、发生财产的直接或间接损失<sup>[21]</sup>,这一标准可以应用到不同的气候灾害情况下。考虑到这一点,本文在建立网络时,认为设备发生火灾、漏电等可能导致人员伤亡的事故,或未发生类似事故但由于某种原因发生损坏而停止工作时,失效事件发生。

常见的气象灾害有主要有暴雨、雨涝、干旱、干热风、高温、热浪、冻雨、结冰、风害、雷暴、连阴雨、浓雾等。对于站场运行而言,不同气象灾害作为

外因,可能引发的后果严重程度不同,本文选取暴雨、雷暴2种气象灾害作为情景模拟的对象进行分析,以验证提出模型的有效性。

本文利用基于可变模糊聚类的节点脆弱性分析方法<sup>[21]</sup>和基于节点重要度的复杂网络脆弱性分析方法<sup>[22]</sup>进行对比,以评价提出方法的效果。

#### 3.1.1 暴雨天气事故分析

根据既往案例分析可以发现,暴雨天气下边坡防护,电力系统,泄漏防护为油气站场系统中主要存在的脆弱节点<sup>[22]</sup>。

针对暴雨天气下的站场设备设施建立风险演化复杂网络模型。本文提出的社团分析模型可应用于带有节点重要度的复杂网络脆弱性分析方法,故不再单独进行建模。基于可变模糊聚类的节点脆弱性分析方法不引入气象灾害带来的事件节点,故单独建立模型。为了说明不同网络模型对站场系统分析的精细程度,在对网络模型进行分析时引入信息颗粒度来评价网络中的节点粒度,节点粒度计算公式为: $\phi = \frac{n_{\text{sys}}}{n}$ ,其中 $n$ 为网络中节点数目, $n_{\text{sys}}$ 为站场设备设施中子系统的数目。暴雨天气下,建立的2个网络模型的信息以及可视化结果如表1、图2所示。利用3种模型分别对建立的灾害演化网络模型进行分析,根据不同模型分析得到的事件节点顺序对网络进行攻击直至网络质量下降至零,得到站场设备设施脆弱节点。从图2中可以看出,暴雨天气中风险演化网络可以完成分类并完成各节点重要的计算。网络中的节点被划分为5种不同的社团,在图2(a)中网络可视化结果中利用不同颜色标出,可以看出,利用改进的社团分析方法获取的社团分析结果并不完全由节点位置决定。如图2(b)所示,网络中各节点随着重要度的增加颜色逐渐变深,改进的社团分析模型分析得出的节点重要性与其位置有一定关系,但同时也与其所在社团以及邻近节点的连接方式有一定关系。

为了更加客观地量化评价分析结果,本文引入准确率和召回率2个指标对模型分析结果进行评价,3种脆弱节点辨识方法得出的分析结果如表2所示。

利用社团分析模型得出暴雨天气下的脆弱节点中,脆弱性排名前5的节点为:电力系统绝缘层、边坡防护、泄漏报警器、SCADA系统、备用电源。

#### 3.1.2 雷暴天气事故分析

由既往事故案例分析可以发现,雷暴天气下储罐、管道防护层,静电屏蔽设施,密封系统,防雷系统中主要包含油气站场的脆弱节点<sup>[23]</sup>。

针对雷暴天气下的站场设备设施建立风险演化复杂网络模型，建模方式、模型评价指标和模型分析与3.1节中相同。雷暴天气下，建立的2复杂网络模型的信息以及分析结果如表3所示。利用社团分析模型得到雷暴天气下的脆弱节点中，脆弱性排名前5的节点为：罐体景点屏蔽、避雷针、储罐防护层、密封垫片、压力泄放阀。可以发现，辨识出前5个脆弱节点涵盖了既往事故案例中包含的站场脆弱节点，并将其中一部分脆弱节点更加明确的辨识出来，例如密封系统中密封垫片需要重点关注。

### 3.2 历史案例分析

为了验证模型的有效性，本文选择“黄岛油库‘8·12’火灾爆炸事故”作为历史案例进行分析。事故由雷击地面导致的感应火花引燃油气引发，在事故发展过程中，多个油罐的泄漏油气相继被引燃，并引发多处爆炸。经过104 h的消防战斗，火灾被扑灭。事故导致包括14名消防战士在内的19名人员死亡，100多人受伤，直接经济损失达3千万元人民币以上。经过分析，认为本次事故中，黄岛油库中存在的脆弱节点主要包括

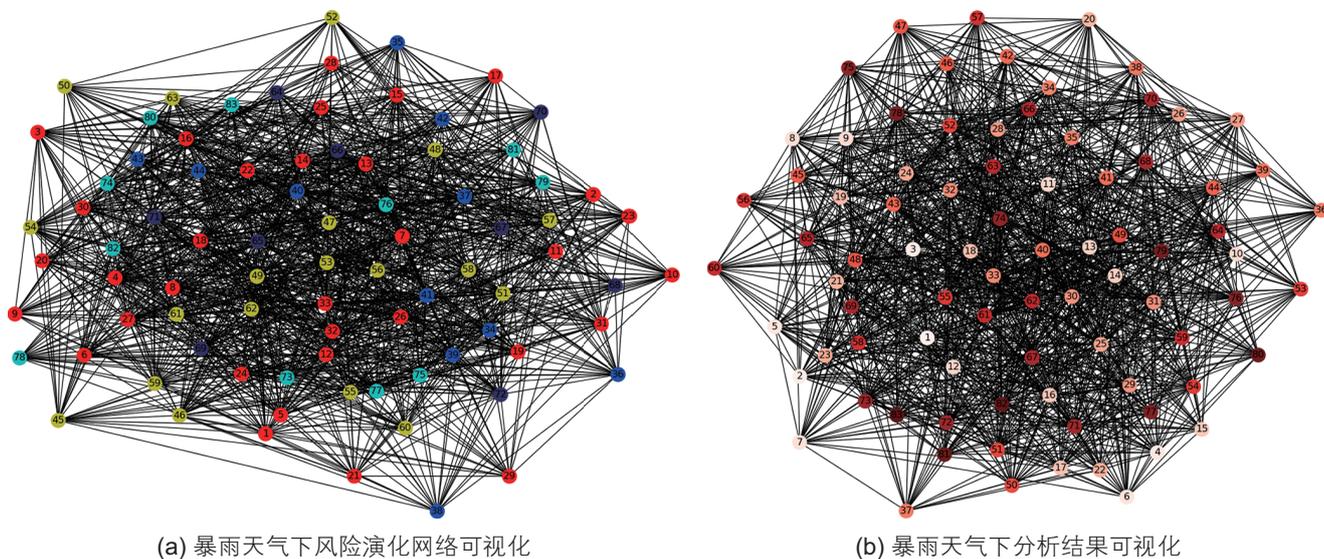


图2 站场暴雨天气下网络可视化

Fig. 2 Network visualization of station under rainstorm

表1 暴雨天气下油气站场设备设施风险演化网络模型信息

Table 1 Information risk evolution network of oil and gas station equipment under rainstorm

分析模型	网络节点数	网络连接数	网络度数	平均最短路径	节点粒度
社团分析模型	83	158	3.784	3.651	0.193
可变模糊聚类模型	67	114	3.405	3.947	0.224

表2 不同分析模型得出暴雨天气下油气站场设备设施脆弱节点辨识结果前5个节点

Table 2 The first five vulnerable nodes of oil and gas station equipment and facilities in rainstorm

分析模型	脆弱节点	准确率	召回率
社团分析模型	电力系统绝缘层、边坡防护、泄漏报警器、SCADA系统、备用电源	81.8%	83.3%
节点重要度模型	边坡防护、电力系统绝缘层、备用电源、边坡防护网、泄漏报警系统	70.0%	50.0%
可变模糊聚类模型	电力系统绝缘层、备用电源、边坡防护、泄漏报警系统、SCADA系统	63.6%	66.7%

表3 雷暴天气下油气站场设备设施风险演化网络模型信息

Table 3 Information risk evolution network of oil and gas station equipment under thunderstorm

分析模型	网络节点数	网络连接数	网络度数	平均最短路径	节点粒度
社团分析模型	91	163	3.571	3.425	0.176
可变模糊聚类模型	72	121	3.392	3.721	0.208

防雷设施、储罐、消防安全系统3部分<sup>[24]</sup>。

针对本次事故建立模型并进行分析。建立的黄岛油库风险演化网络模型的信息如表5所示,利用社团分析模型对该次事故进行分析发现,站场设备设施脆弱性排名前5的为:避雷针、储罐静电屏蔽、泄漏防护系统、紧急报警系统、压力泄放阀。建立事故树分析模型,通过事故的演化事故树,分析最小径集和最大割集发现的防雷设置、储罐防护层与自动灭火系统为该起事故中存在的脆弱节点。

本文提出方法的分析结果更加精确的指出防雷设施和静电屏蔽系统中,避雷针自动灭火系统为重点。同时,根据事故调查报告可以发现,5号储罐起火的原因是雷击大地引发的感应火花引发油气爆炸,储罐静电屏蔽器可以有效地阻止感性火花的产生,从而防止事故的发生;5号储罐起火后,其他储罐发生泄漏并引发泄漏油气燃烧,使事故进一步扩大,完善的泄漏防护系统可以阻止泄漏的发生,避免出现泄漏油气点燃烘烤其他设施的现象。而压力泄放阀正常动作可以在系统内压力激增的情况下对压力进行泄放,防止事故的进一步恶化。

对比上述两种分析方法可以发现,事故树分析方法对脆弱节点的分析较为笼统,不够全面,利用社团分析模型获得的节点更加精细准确,可以为优化系统安全性能提供精准的意见和有效的指导。

### 3.3 分析与讨论

在3.1节模型分析的过程中,可以发现同一个站

场在不同的气候灾害条件下,辨识出的脆弱节点是不同的。这是因为系统内部设备的自身状况与设备之间的关联关系是一定的,这决定了站场的自身内因是固有的。当气象灾害发生变化时,站场所受的影响不尽相同,气象灾害作为外因对站场设备产生的影响会发生变化,进而导致了系统中节点脆弱性发生了变化。在内因与外因的综合作用下,不同气象灾害条件下,站场中节点脆弱性以及引发的失效场景均会发生变化。

从3.2节网络模型建立情况来看,在对同一情景进行模拟时,相较于可变模糊聚类模型而言,本文提出的社团分析模型在建立风险演化网络时,节点粒度更低,暴雨天气和雷暴天气的精细度分别提高了13.8%和16.4%。

从模型的分析结果来看,社团分析模型相较于其他2个模型的准确性都有提高,各模型准确性如图3所示。对暴雨天气的案例中,社团分析模型相较于节点重要性模型,准确率提高11.8%,召回率提高33.3%,相较于可变模糊聚类模型而言,准确率提高18.2%,召回率提高16.6%;对雷暴天气的案例中,社团分析模型相较于节点重要性模型,准确率提高9.9%,召回率提高14.3%,相较于可变模糊聚类模型而言,准确率提高16.7%,召回率提高28.6%。

根据3.2节中社团分析模型对黄岛“8·12”事故的分析结果来看,本文提出的方法在保证准确全面地辨识事故脆弱节点的同时,对脆弱节点可以实现更加精确细致的定位。此外,本文提出方法在已有辨识结果的基础上,还发现了通风系统、静电屏蔽系统、泄

表4 不同分析模型得出雷暴天气下油气站场设备设施脆弱节点辨识结果前5个节点

Table 4 The first five vulnerable nodes of oil and gas station equipment and facilities in thunderstorm

分析模型	脆弱节点	准确率	召回率
社团分析模型	罐体静电屏蔽、避雷针、储罐防护层、密封垫片、压力泄放阀	91.7%	100%
节点重要度模型	罐体静电屏蔽、防浪涌设施、避雷针、储罐防护层、管道防护层	81.8%	85.7%
可变模糊聚类模型	罐体静电屏蔽、避雷针、储罐防护层、密封垫片、管道防护层	75.0%	71.4%

表5 黄岛油库案例风险演化网络模型信息

Table 5 Information of risk evolution network in Huangdao Oil Depot case

网络节点数	网络连接数	网络度数	平均最短路径	节点粒度
69	131	3.087	2.981	0.188

表6 黄岛油库案例脆弱节点分析结果

Table 6 Vulnerable nodes in Huangdao Oil Depot case

分析方法	分析得出脆弱节点
事故树法	防雷设施、储罐防护层、静电屏蔽系统
社团分析模型	避雷针、储罐静电屏蔽、泄漏防护系统、紧急报警系统、压力泄放阀

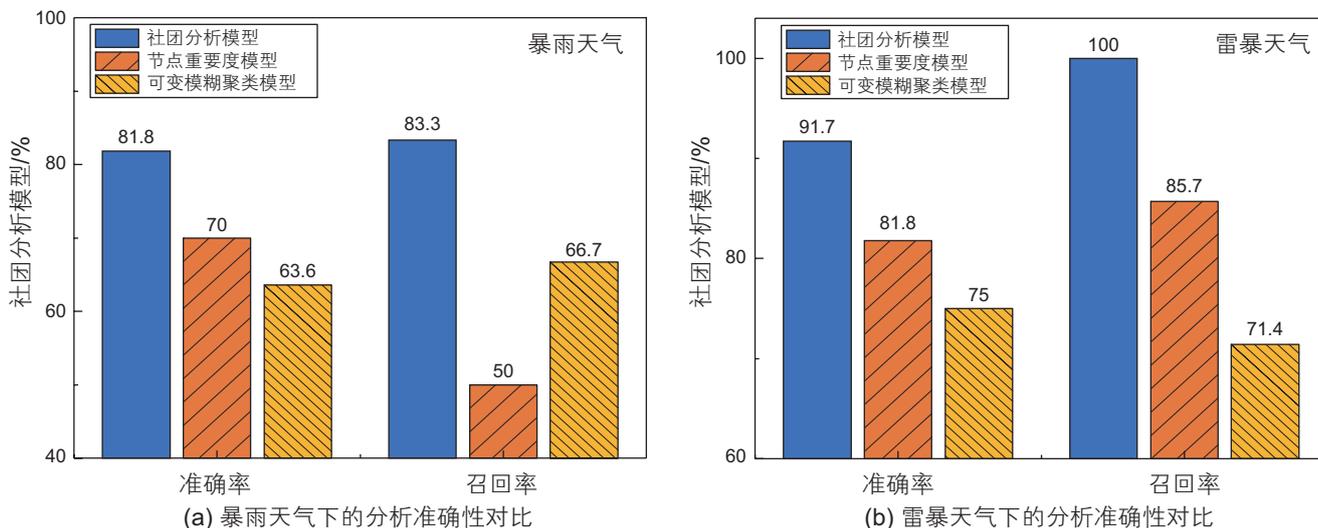


图 3 本文提出的社团分析模型分析结果与其他模型分析结果准确性对比

Fig. 3 Comparison of accuracy between the community analysis and other methods

漏报警器等脆弱节点, 辨识结果更加全面。分析结果可以为提高站场设备设施系统的安全性能提供指导。

## 4 结论

气象灾害的发生对油气站场设备设施带来较大的危害, 不同的气象灾害会为油气生产系统引入不同的风险因素, 设备设施中的脆弱节点也会随时改变。通过对情景模拟和真实历史事故案例分析, 得出如下结论:

(1) 实验证明, 本文提出的基于社团分析模型的气象灾害条件下油气站场脆弱节点辨识方法, 可以完成对情景模拟与实际案例下的气候灾害中油气站场脆弱节点的辨识与定位, 并可以根据需求调整分析网络, 实现对系统节点分析粒度的调整。

(2) 相较于其他方法, 本文提出的社团分析模型可以更加精准地定位站场各个系统中存在的脆弱性节点,

提高了分析的节点粒度。同时, 社团分析模型可以对脆弱节点进行更加准确地定位, 准确率相较于其他模型提高 10% 以上, 召回率提高 14% 以上。

(3) 利用社团分析方法发现油气站场设备设施中的脆弱节点, 在暴雨气象灾害下排名前 5 的为: 电力系统绝缘层、边坡防护、泄漏报警器、SCADA 系统、备用电源; 雷电气象灾害下排名前 5 的为: 罐体静电屏蔽、避雷针、储罐防护层、密封垫片、压力泄放阀。从对黄岛爆炸事故分析的结果来看, 社团分析方法不仅可以完成脆弱节点的分析, 同时可以发现更多之前未被辨识的脆弱节点。

(4) 本文提出方法为站场设备设施系统安全性能的提升提供了新的分析方法, 在气象灾害发生较为频繁的地区, 相关工作人员可以利用该方法充分的考虑不同气候条件的影响并进行脆弱节点的辨识, 完成系统风险辨识。

## 参考文献

- [1] BADIDA P, BALASUBRAMANIAM Y, JAYAPRAKASH J. Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2019, 66: 284–292.
- [2] QX/T 531–2019. 气象灾害调查技术规范 气象灾情信息收集[S]. 北京: 中国气象局, 2019. [QX/T 531–2019. Technical specifications for meteorological disasters investigation–Meteorological disasters information collection[S]. Beijing: China meteorological administration, 2019. (in Chinese)]
- [3] 胡瑾秋, 张曦月, 吴志强. 结合 TF-IDF 的企业生产隐患关联预警及可视化研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(07): 170–176. [HU J Q, ZHANG X Y, WU Z Q. Research on associated early-warning and visualization of hidden danger in enterprise production based on TF-IDF[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(07): 170–176. (in Chinese)]
- [4] 朱高庚, 陈国明, 张玉飞, 等. 风暴灾害下海洋油气工业重大事故演化层次研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 172–179. [ZHU G G, CHEN G M, ZHANG Y F, et al. Research on evolution hierarchy of major accidents in offshore oil and gas industry in storm

- disasters[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(7): 172–179. (in Chinese)]
- [5] HU J Q, DONG S H, Zhang L B, et al. Cyber-physical-social hazard analysis for LNG port terminal system based on interdependent network theory[J]. *Safety Science*, 2021, 137(2): 105180.
- [6] 张秀英. 油气生产单位的设备故障智能诊断分析系统研究[C]. 2021IPPTC国际石油石化技术会议论文集. 2021: 676–681. [ZHANG X Y. The study of equipment faults intelligent diagnosis analytic system of oil and gas production unit[C]. 2021 IPPTC international petroleum and petrochemical technology conference. (in Chinese)]
- [7] 武琳玉, 梁伟, 沙夺林. 油气站场典型设备的焊缝缺陷检测与识别方法[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(11): 108–113. [WU L Y, LIANG W, SHA D L. Weld defect detection and identification method of typical equipment in oil-gas station[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(11): 108–113.]
- [8] SENDEROV S M, SMIRNOVA E M, Vorobev S V. Analysis of vulnerability of fuel supply systems in gas-consuming regions due to failure of critical gas industry facilities[J]. *Energy*, 2020, 212.
- [9] LONG D, FASISAL K, JIE J. A novel vulnerability model considering synergistic effect of fire and overpressure in chemical processing facilities[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 217: 108081.
- [10] HW A, JMM B, JW C, et al. The distinct roles of initial transmission and retransmission in the persistence of knowledge in complex networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 392.
- [11] 陈刘瑜, 李希建, 尹鑫, 等. 复杂网络理论下燃气管网节点重要性分析方法[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(09): 74–80. [CHEN L Y, LI X J, YIN X, et al. Complex network theory-based analysis of importance of urban gas pipeline network nodes[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(09): 74–80. (in Chinese)]
- [12] ZHANG Q, YANG Z, CHEN Z. Adaptive synchronization of complex dynamical networks with unknown parameters[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2010, 43.
- [13] ALSAADI F E, WANG Z, Alkhateeb A F. Two approaches to partial-nodes-based state estimation for delayed complex networks with intermittent measurement transmissions[J]. *Information Fusion*, 2021(1).
- [14] ZHANG K, TANG B, DENG L, et al. Fault source location of wind turbine based on heterogeneous nodes complex network[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 103: 104300.
- [15] 孟祥坤, 陈国明, 郑纯亮, 等. 基于风险熵和复杂网络的深水钻井井喷事故风险演化评估[J]. *化工学报*, 2019, 70(1): 388–397. [MENG X K, CHEN G M, ZHENG C L, et al. Risk evaluation model of deep-water drilling blowout accident based on risk entropy and complex network[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(1): 388–397. (in Chinese)]
- [16] LI Z, REN T, MA X, et al. Identifying influential spreaders by gravity model[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8387.
- [17] WANG J, LI K. Community structure exploration considering latent link patterns in complex networks[J]. *Neurocomputing*, 2021.
- [18] SHANG Q, DENG Y, KANG H C. Identifying influential nodes in complex networks: Effective distance gravity model[J]. *Information Sciences*, 2021.
- [19] BROCKMANN D, HELBING D. The hidden geometry of complex, network-driven contagion phenomena[J]. *Science*, 2013, 342(6164): 1337–1342.
- [20] ZHANG Z, PU P, HAN D, et al. Self-adaptive Louvain algorithm: Fast and stable community detection algorithm based on the principle of small probability event[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, 506.
- [21] 李天华, 袁永博, 张明媛. 基于可变模糊聚类的地震作用下电网节点脆弱性分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(18): 126–130. [LI T H, YUAN Y B, ZHANG M Y. Analysis of power grid vulnerability in the earthquake based on variable fuzzy clustering[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(18): 126–130. (in Chinese)]
- [22] 班组安全. “6种事故情景+11起重特重大事故案例” 讲透台风暴雨对企业的影响! [EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/481481139\\_121123871](https://www.sohu.com/a/481481139_121123871). 2021-08-03/2021-09-23. [Team safety. “6 Accident scenarios and 11 major accident cases” explain the impact of typhoon and rainstorm on enterprises! [EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/481481139\\_121123871](https://www.sohu.com/a/481481139_121123871). 2021-08-03/2021-09-23. (in Chinese)]
- [23] 众纳科技. 石油化工和石油化工企业雷电灾害事故案例[EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/399875216\\_120441688](https://www.sohu.com/a/399875216_120441688). 2020-06-05/2021-09-23. [Zona Technology. Case of lightning accident in petrochemical and petrochemical enterprises [EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/399875216\\_120441688](https://www.sohu.com/a/399875216_120441688). 2020-06-05/2021-09-23. (in Chinese)]
- [24] 张瑞. 事故树法进行黄岛油库安全评价研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2011, 37(04): 23–25. [ZHANG R. Study on safety evaluation of Huangdao Oil Depot by accident tree method[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2011, 37(04): 23–25. (in Chinese)]
- [25] 伍星光, 侯磊, 刘芳媛, 等. 安全思维和事故模型研究分析与展望[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(02): 254–268. [WU X G, HOU L, LIU F Y, et al. The analysis and prospects of safety thinking and accident models[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 02: 254–268. 10.3969/j. issn.2096–1693.2020.02.022]