

基于 STAMP-偏序集的非煤矿山爆炸事故系统 风险评估模型*

郭梨, 姚相杰, 赵江平, 罗梦娟, 杨震

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:通过提出一种基于 STAMP 偏序集的系统性风险评估模型,揭示非煤矿山爆炸事故的发生机理,并为爆炸事故的有效预防和控制提供参考。首先,利用 STAMP 模型构建了非煤矿山爆炸事故的系统层次结构,确定了事件集及其层次关系,并从系统设计和安全控制的角度分析了事故的致因因素;然后,采用排序质心法计算了事件集的初始概率,并将概率矩阵作为偏序集评价模型的输入,得到了因素间的聚类关系和节点脆弱性;最后,通过一个实例验证了该模型的有效性和可行性。该模型能够图形化地描述各致因因素间的聚类关系、节点重要度以及系统各组件间的关系,从而能够有效识别系统的脆弱性节点,并为爆炸事故预防提供科学合理的控制措施。

关键词:非煤矿山;爆炸事故;系统风险评估;STAMP 模型;偏序集

0 引言

非煤矿山爆炸事故是一种严重的安全事故,不仅造成人员伤亡和财产损失,还影响矿山的正常生产和社会的稳定。根据应急管理部的统计数据,2019年至2021年,我国非煤矿山共发生爆炸事故112起,造成死亡人数为183人,占非煤矿山事故死亡人数总数的14.8%。因此,如何有效预防和控制非煤矿山爆炸事故,提高矿山的安全水平,是当前矿山安全管理的重要课题。

非煤矿山爆炸事故的发生是一个复杂的系统性过程,涉及多个因素和多层次的相互作用。传统的风险评估方法,如故障树分析(FTA)^[1]、事件树分析(ETA)^[2]等,通常只能从线性因果关系的角度分析事故的发生路径和概率,忽略了系统内部的动态变化和反馈机制,难以揭示系统的本质特征和风险源。因此,需要一种能够综合考虑系统结构、功能、行为和环等多方面因素的风险评估方法,以更好地理解非煤矿山爆炸事故的发生机理,并为事故预防提供有效的指导。

STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes) 是一种基于系统论的事故模型,由

LEVESON 等^[3]于2004年提出。STAMP 认为事故是由于系统内部或外部环境变化导致安全控制结构失效或不适应而引起的系统失效过程。STAMP 强调系统的层次结构、约束条件、控制回路、反馈机制等方面,能够从系统整体性、动态性、适应性等角度分析事故的形成过程和影响因素。STAMP 已经被广泛应用于航空^[4-5]、核电^[6]、化工^[7]等领域的风险评估和安全管理中,取得了良好的效果。

偏序集(Partially Ordered Set)^[8]是一种数学工具,用于描述集合中元素之间存在着偏序关系(即不完全排序关系)的情况。偏序集可以用有向无环图(Directed Acyclic Graph)来表示,其中每个节点代表一个元素,每条边代表一个偏序关系。偏序集可以用于分析集合中元素之间的相互依赖性、优先级、重要度等属性,并可以通过聚类算法将元素划分为不同的层次或类别。偏序集在多属性决策、数据挖掘、知识表示等领域有着广泛的应用。

本文提出了一种基于 STAMP 偏序集的系统性风险评估模型,旨在揭示非煤矿山爆炸事故的发生机理,并为事故的有效预防和控制提供参考。本文首先利用 STAMP 模型构建了非煤矿山爆炸事故的系统层次结构,确定了事件集及其约束条件,然后根

* 收稿日期:2023-04-26

基金项目:陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-274)。

作者简介:郭梨(1982—),女,湖北潜江人,博士,讲师,主要研究方向为采矿安全工程、矿业经济学、计算智能在矿业中的应用,E-mail:guoli@xauat.edu.cn。

据偏序集理论,分析了各事件之间的因果关系和时间顺序关系,从而得到了非煤矿山爆炸事故的偏序集表示。最后,本文通过一个实例验证了该模型的有效性和可行性,并给出了相应的风险评估结果和改进建议。

1 STAMP-ROC-HASSE 模型构建

为了对非煤矿山爆炸事故进行风险分析,本文提出了一种基于偏序集评价模型的系统可靠性评估模型,所采用的方法流程如图 1 所示。

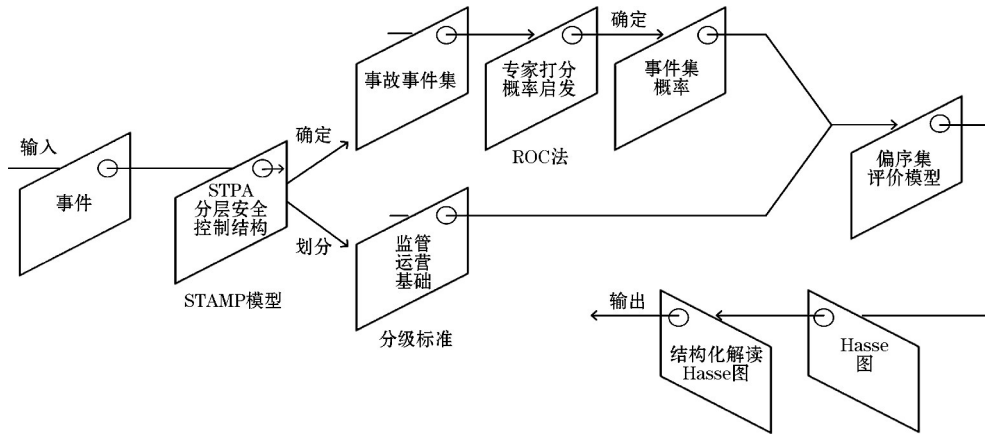


图 1 STAMP-ROC-HASSE 模型流程

1.1 STAMP 模型

STAMP 模型是由美国工程院院士南希·莱文森^[9]教授提出的一种新的事故致因模型,其将组件交互列为事故致因因素之一,把安全问题转换为控制问题,将系统安全重点由防止失效转到实施行为的安全约束。

构成 STAMP 的 3 种基本结构包括安全约束、分层安全控制结构和过程模型。安全约束是控制动作及反馈的具体且必要措施;在系统理论中,系统被视为一种分层结构,每层给其下层施加约束,如图 2 所示;过程模型是高层根据低层反馈信息进行决策的过程,如图 3 所示。

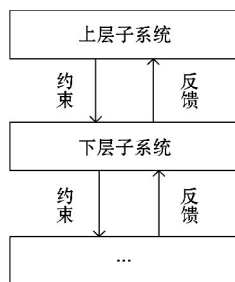


图 2 分层控制结构

1.2 ROC 方法

ROC 方法是一种基于数值排序来获取概率导出的方法。通过 ROC 方法可以获得准则权重,并将序数判断转化为比率尺度信息。只需要专家根据事件的可能性对其进行排序。事件的概率随后通过基于最大熵原理的算法从排名中近似地

获取^[10]。

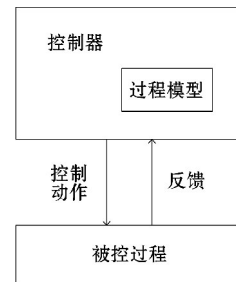


图 3 过程模型

1.2.1 互斥的二元事件

通过使用 ROC 方法,得到的平均向量包含每个事件的概率。式(1)给出了每个概率的等价计算:

$$P_i = \frac{\sum_{k=i}^n \frac{1}{k}}{n} \quad (1)$$

1.2.2 含有一个变量的概率密度函数的事件

关于含有一个变量的概率密度函数的事件,与式(1)中的算法一致,并无程序上的不同。

1.2.3 随机独立的二元事件

在由专家给出的事件是随机独立的二元事件的情况下,可以通过式(2)计算事件发生的概率:

$$P_i = \frac{n+1-i}{n+1} \quad (2)$$

1.2.4 低概率的二元事件

通过对 1.2.1 和 1.2.3 的方法进行修改来推导出低概率二元事件的概率。 φ 值(φ 值类似于

LUDKE 等^[11]使用式(3)计算相对似然度:

$$\varphi_i = \frac{\sum_{k=i}^n \frac{1}{k}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{j}} \quad (3)$$

当事件随机独立时,应使用式(4):

$$\varphi_i = \frac{n+1-i}{n} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)计算得出的度量 φ_i 并不是概率,但是概率 P 也是一个事件可能性的比例尺度度量,所以二者可以通过乘法变换相互映射。若将 i 和 j 的似然比表示为 b_{ij} ,则有:

$$b_{ij} = \frac{P_i}{P_j} = \frac{\varphi_i}{\varphi_j}$$

当 $j=1$ 时,有:

$$b_{i1} = \frac{\varphi_i}{\varphi_1} = \frac{\varphi_i}{1} = \varphi_i$$

由此可得:

$$P_i = \varphi_i P_1 \quad (5)$$

通过对 φ 值归一化得出各个事件的概率。对于互斥事件,由所有事件概率之和等于 $1 - P_0$ 得出:

$$P_i = (1 - P_0) \frac{\varphi_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i} \quad (6)$$

对于随机独立事件有:

$$\prod_{i=1}^n (1 - \varphi_i P_1) - P_0 = 0 \quad (7)$$

1.3 偏序集因果推理方法

偏序集定义为:设 \leq 是非空集合 A 上的 1 个二元关系,若 \leq 满足:自反性、反对称性、传递性,则称 \leq 为 A 上的偏序关系。集合 A 和其上的偏序关系 \leq 一起称为偏序集,记为 (A, \leq) 。

对于含有 n 个方案 m 个指标的决策问题,岳立柱等^[12]给出了一种简便的隐式赋权方式,即在各指标的权重秩次满足 $\omega_{11} > \omega_{12} > \dots > \omega_{1m}$ 的条件下,用矩阵形式表示蕴含权重信息的方案决策问题:

$$D = (d_{ij})_{n \times m} = X \cdot E = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{11} + x_{12} & \dots & x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1m} \\ x_{21} & x_{21} + x_{22} & \dots & x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n1} + x_{n2} + \dots + x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{式中, } X \text{ 为评价矩阵; } E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}。$$

(1) 由 D 矩阵获得关系矩阵 A 的方式如下:矩阵 D 中任意两行 x 行与 y 行。当矩阵值 $d_{x1} > d_{y1}$ 且 $d_{x2} > d_{y2}$ 且 $d_{x3} > d_{y3}$ 且 \dots 且 $d_{xm} > d_{ym}$, 记作:

$$PS_{(x)} > PS_{(y)}$$

偏序关系矩阵记作 $A = (a_{xy})_{n \times n}$

(2) 哈斯矩阵的获得。由比较关系矩阵得到哈斯矩阵,再由哈斯矩阵绘制哈斯图。通过哈斯图能够清楚地表述事件间的传递路径和结构关系。范懿^[13]给出了比较关系矩阵和哈斯矩阵之间的转换公式:

$$\begin{cases} B = (A + I) \\ B^{(k-1)} \neq B^{(k)} = B^{(k+1)} = R \\ HS = S = R - (R - I)^2 - I \end{cases} \quad (9)$$

式中, A 为原始矩阵; I 为单位矩阵; B 为相乘矩阵; R 为可达矩阵; S 为骨架矩阵; HS 为哈斯矩阵。

2 实例应用与分析

以山东栖霞笏山金矿“1.10”特别重大矿山爆炸事故为例对本文模型进行验证,根据山东栖霞金矿事故调查报告^[14]进行案例分析。

2.1 确定指标集与分级标准

通过 STAMP 模型可以将“1.10”事故分层为:监管层、运营层和基础层,同时结合“1.10”事故调查报告绘制分层安全控制结构图,如图 4 所示。根据分层安全控制结构图确定事故的事件集,见表 1。

2.2 指标数据的获取

确定事件集后,通过 ROC 方法获得每个事件可能发生的初始概率。由于缺乏该领域的的数据,本文整合专家意见,对事件集从高到低进行排名。由 10 组专家进行事件排名。使用式(4)、式(5)和式(7),对每个事件进行了排序,并得出了科学合理的初始概率表(见表 2)。因此,我们根据式(7)将乘法调整为 0.1633。最后,通过式(5)计算每个事件的概率。

2.3 哈斯矩阵

对表 2 中的初始数据进行累加变换,得到的矩

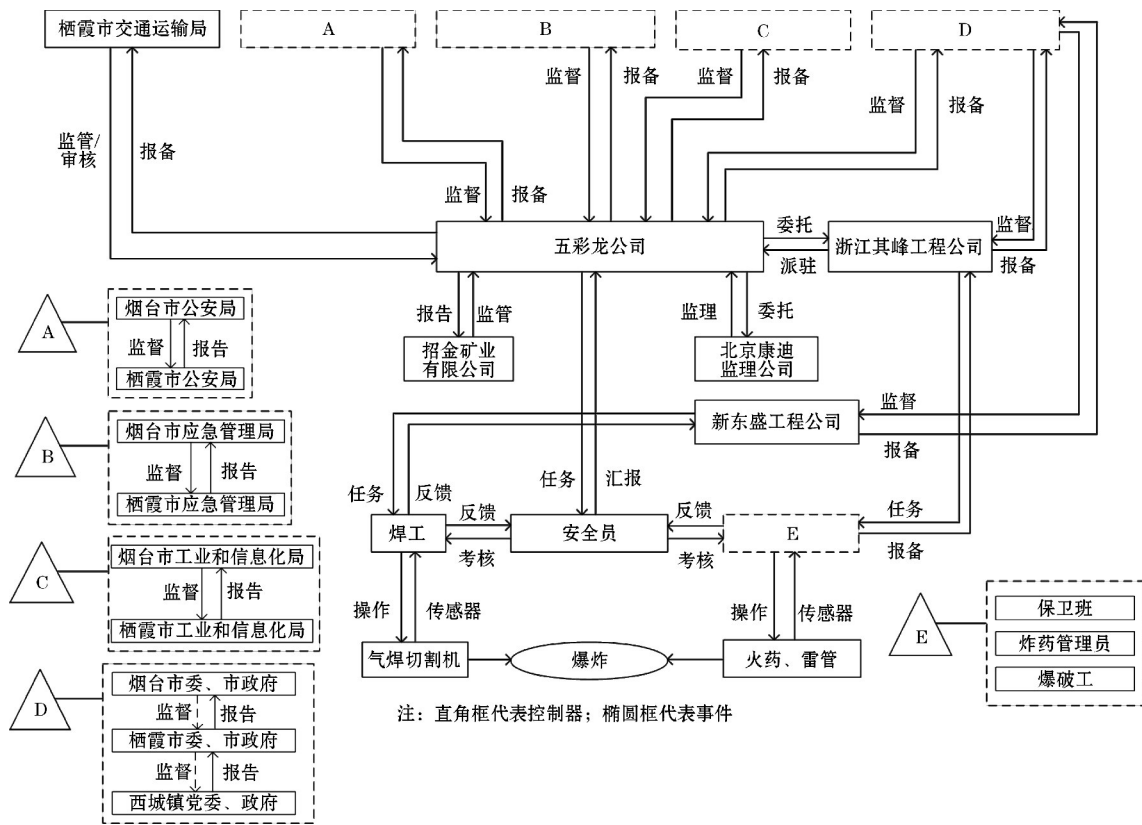


图4 “1.10”事故发生的分层安全控制结构

表1 非煤矿山爆炸事故事件集

层级	事件
基础层	E1 焊工无证上岗
	E2 安全员监督检查工作失职
	E3 爆破工无证上岗
	E4 爆破工、炸药管理员、保卫班的炸药管理存放混乱
运营层	E5 新东盛公司对外派焊工管理失职
	E6 浙江其峰工程公司对外派爆破工、炸药管理员管理失职
	E7 五彩龙公司对矿山民用炸药与建设项目外包二者的管理极其混乱
监管层	E8 应急管理部门对所在地区非煤矿山安全监督检查不力
	E9 公安部门对所在地区的非煤矿山和爆破公司的监管不力
	E10 工业和信息化部门对所在地区爆破企业的监管不力
	E11 交通运输部门对所在地区非煤矿山的监管执法不力
	E12 烟台市委、市政府监管失察;地方政府安全监管薄弱

阵进行行向量比较,若矩阵第 x 行大于第 y 行,则 $a_{xy} = 1$, 否则 $a_{xy} = 0$, 得到关系矩阵。再应用式(9)计算得到哈斯矩阵,如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

2.4 哈斯图

通过哈斯矩阵可绘制哈斯图,如图5所示。哈斯图能够直观地体现出各个指标之间的聚类信息,更方便对比分析。偏序集评价方法具有上层级优于下层级的特点,即越处于上面的层级,表明其在事故中的重要性越高。例如,E2指向E6,这表明E2的重要性高于E6。它也具有传递性。例如,E2

高于 E6, E6 高于 E10, 因此 E2 高于 E10。则说明安全员监督检查工作失职, 重要于浙江其峰工程公司对外派爆破工、炸药管理员管理失职, 且重要于

工业和信息化部门对所在地区的爆破企业的监管不力。因此, 位置越低, 图中的事件重要性越高, 这意味着事件的风险越高。

表 2 案例研究结果

事件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	0.1633	0.0136	0.1497	0.1497	0.0272	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1361
E2	0.0544	0.1497	0.1225	0.1633	0.1361	0.1361	0.1497	0.1361	0.1497	0.1497
E3	0.0272	0.1633	0.1633	0.0136	0.1633	0.1497	0.0408	0.1497	0.0272	0.1633
E4	0.1497	0.1361	0.1361	0.1361	0.1497	0.1089	0.1089	0.1089	0.1361	0.1225
E5	0.1361	0.1089	0.0953	0.1225	0.1225	0.1225	0.1361	0.1225	0.1089	0.0953
E6	0.1225	0.1225	0.0817	0.1089	0.1089	0.0953	0.1225	0.0953	0.1225	0.0817
E7	0.0136	0.0680	0.1089	0.0272	0.0953	0.0272	0.0272	0.0272	0.0408	0.1089
E8	0.0953	0.0817	0.0680	0.0680	0.0817	0.0680	0.0817	0.0817	0.0817	0.0680
E9	0.1089	0.0953	0.0544	0.0953	0.0680	0.0817	0.0953	0.0680	0.0953	0.0544
E10	0.0817	0.0272	0.0136	0.0817	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136
E11	0.0272	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0544	0.0408	0.0680	0.0408
E12	0.0680	0.0544	0.0272	0.0544	0.0544	0.0544	0.0680	0.0544	0.0544	0.0272

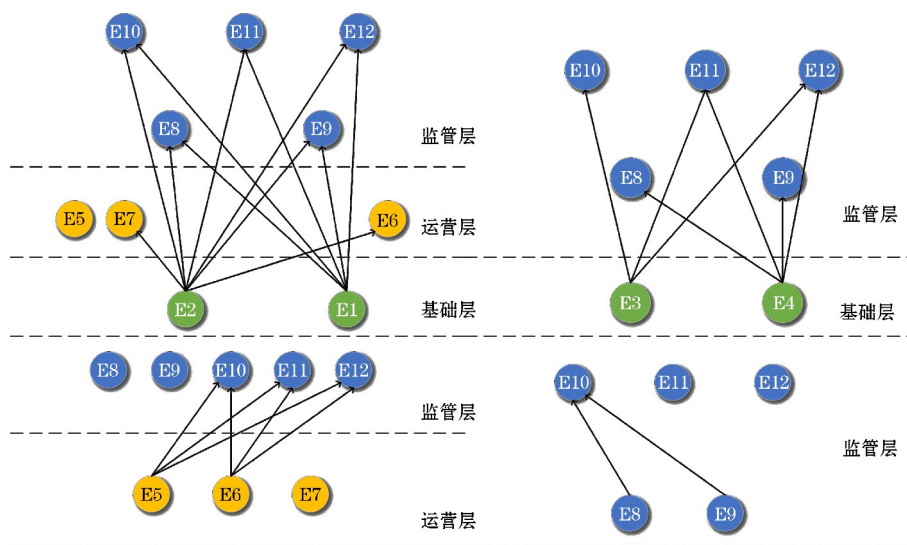


图 5 非煤矿山爆炸事故哈斯图

哈斯图的性质是, 如果事件在两个级别之间, 则属于下一个级别。事件之间的排名关系可以通过分为不同级别的哈斯图直观呈现。例如, E8、E9 指向 E10, 则说明在监管层中应急管理部门对所在地区非煤矿山安全监督检查和公安部门对所在地区的非煤矿山和爆破公司的监管重要于工业和信息化部门对所在地区的爆破企业的监管。总而言之, 基础层事件重要性最高, 运营层事件次之, 监管层事件重要性最低。

3 结论

本文提出了一种基于 STAMP 偏序集的系统性风险评估模型, 用于分析非煤矿山爆炸事故的发生机理和致因因素。该模型综合了 STAMP 模型和偏序集评价模型的优点, 能够从系统的角度考虑事故的多元性、动态性和复杂性, 以及各因素间的相互作用和影响。该模型能够图形化地展示系统各组件间的层次结构和聚类关系, 以及各节点的脆

弱性和重要度,从而能够有效识别系统的风险源和风险点,并为事故预防提供科学合理的策略。本文通过一个实例验证了该模型的有效性和可行性,为非煤矿山爆炸事故的系统风险评估提供了一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 施书磊. 基于模糊事故树的兴利煤矿爆炸危险性评价研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
- [2] 胡剑波,李俊,郑磊. 航空四站气体保障过程的 STAMP 建模与 STPA 安全性分析[J]. 航空工程进展,2017,8(4):408-415.
- [3] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems[J]. Safety Science,2004,42(4):237-270.
- [4] LEVESON N G. A systems-theoretic approach to safety in software-intensive systems[J]. IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing, 2004,1(1):66-86.
- [5] 陈芳,韩美佳. 空中危险接近事件中的空管风险因素识别[J]. 安全与环境学报,2021,21(4):1583-1591.
- [6] 刘杰,阳小华,余童兰,等. 基于 STAMP 模型的核动力蒸汽发生器水位控制系统安全性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(5):78-83.
- [7] 赵江平,刘小龙,东淑,等. STAMP 模型在危化品道路运输事故分析中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(5):160-165.
- [8] 陈金全,王继仁,岳立柱. 基于偏序集的采空区煤自燃可能性评价模型[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(2):89-93.
- [9] 南希·莱文森. 基于系统思维构筑安全系统[M]. 唐涛,牛儒,译. 北京:国防工业出版社,2015.
- [10] JOHANNES G J, GILBERTO M. Probability Elicitation Under Severe Time Pressure: A Rank - Based Method[J]. Risk Analysis,2015,35(7):1317-1335.
- [11] LUDKE R L, STAUSS F F, GUSTAFSON D H. Comparison of five methods for estimating subjective probability distributions[J]. Organizational behavior and human performance, 1977,19(1):162-179.
- [12] 岳立柱,张志杰,闫艳. 蕴含权重的偏序集多准则决策法[J]. 运筹与管理,2018,27(2):26-31.
- [13] 范懿. 一个有关哈斯图的解析方法[J]. 上海第二工业大学学报,2003(1):17-22.
- [14] 中华人民共和国应急管理部. 山东栖霞笏山金矿“1.10”爆炸事故调查报告[EB/OL]. (2021-2-23)[2021-8-26]. http://yjt.shandong.gov.cn/zwgk/zdly/aqsc/sgxx/202102/t20210223_3536726.html.