

中文引用格式:孙逸林,郑小强. 基于fsQCA的瓶装LPG事故条件变量及组态路径[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):114-121.

英文引用格式:SUN Yilin,ZHENG Xiaoqiang. Research on conditional variable and configuration paths of bottled liquefied petroleum gas accidents based on fsQCA[J]. China Safety Science Journal,2025,35(11):114-121.

# 基于fsQCA的瓶装LPG事故条件变量及组态路径<sup>\*</sup>

孙逸林<sup>1,2,3</sup>讲师, 郑小强<sup>\*\*1,2,3</sup>教授

(1 西南石油大学 经济管理学院,四川 成都 610500;

2 能源安全与低碳发展四川省哲学社会科学重点实验室,四川 成都 610500;

3 西南石油大学 中国能源指数研究中心,四川 成都 610500)

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0248

基金项目:国家社会科学基金重大项目资助(24&ZD106)。

**【摘要】** 为遏制瓶装液化石油气(LPG)事故发生,保障其安全生产,首先,基于中国大陆2013—2024年间50起典型事故案例建立瓶装LPG多主体事故致因模型;然后,从案例中提炼7项核心事故诱因作为条件变量;最后,运用模糊集定性比较分析法(fsQCA)探究事故组态路径。结果表明:瓶装LPG事故不仅多因素并发特点鲜明,而且具有多样化的形成机制;事故共有8条组态路径,可进一步归纳为多元致灾、违规用气与设备失效耦合、违规用气、组织缺欠、违规经营、设备失效6种类型;安全生产管理体系缺欠、安全检查与隐患整改不到位、违规经营、安全监管与执法检查不力等组织致因在事故涌现与演化过程中扮演关键角色;唯一覆盖率相对最高的组态1a、组态5和组态6a应视作事故防治重点。

**【关键词】** 模糊集定性比较分析(fsQCA); 瓶装液化石油气(LPG); 城镇燃气; 条件变量; 组态路径

## Research on conditional variable and configuration paths of bottled liquefied petroleum gas accidents based on fsQCA

SUN Yilin<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Xiaoqiang<sup>1,2,3</sup>

(1 School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 2 Sichuan Key Laboratory of Philosophy and Social Sciences on Energy Security and Low-Carbon Development, Chengdu Sichuan 610500, China; 3 China Energy Index Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

**Abstract:** In order to curb the occurrence of bottled LPG accidents and ensure the safety production, firstly, a multi-agent accident causation model for bottled LPG was established based on 50 typical cases in mainland China from 2013 to 2024. Secondly, seven core accident causal factors were extracted from it as conditional variables. Finally, fsQCA method was applied to explore the configuration paths of accidents. The analysis results indicate that the bottled LPG accidents are not only characterized by distinctive multi-

\* 文章编号:1003-3033(2025)11-0114-08; 收稿日期:2025-07-05; 修稿日期:2025-09-05

\*\* 通信作者:郑小强(1981—),男,四川宜宾人,博士,教授,博士生导师,主要从事能源安全与风险管理等方面的研究。E-mail: zhengxiaoqiang@163.com。

factorial complications, but also have diverse formation mechanisms. In total, there are eight configuration paths of accidents, which are further categorized into six types, namely the multiple risk coupling, coupling of illegal applied behaviors and equipment failure, illegal applied behaviors of bottled LPG, organizational deficiencies, illegal operation of bottled LPG, and equipment failure. The organizational factors, such as deficiencies in safety production management systems, inadequate safety inspections and rectification of hidden dangers, illegal operation of bottled LPG, and ineffective safety supervision and law enforcement play key roles in the emergence and evolution of accidents. The conclusion indicates that three configuration paths with relatively the highest unique coverage, configuration 1a, configuration 5, and configuration 6a, should collectively be regarded as priorities for accident prevention and control.

**Keywords:** fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA); bottled liquefied petroleum gas (LPG); urban gas; conditional variable; configuration path

0 引 言

液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG) 与天然气共同组成中国城镇燃气的核心气源<sup>[1]</sup>。既是能源消费结构清洁、低碳转型的可靠支撑,又是助力乡村振兴和消除能源贫困的重要抓手<sup>[2]</sup>。目前,国内 LPG 主要以钢质气瓶为载体进行储存、运输、配送和使用。凭借来源丰富、热值高昂、供应灵活、储运便利等诸多优势,LPG 消费量近年来持续增长,特别是在城乡接合部、乡镇地区和餐饮行业等表现突出。但受制于行业整体发展质量不高和小散乱等突出问题,瓶装 LPG 事故呈现频发态势,不仅造成了严重的人员伤亡和经济损失,更对行业发展、消费信心和公共安全产生极大的负面影响。相关统计表明:瓶装 LPG 事故是中国城镇燃气行业发生频率最高、后果最严重的事故<sup>[3]</sup>。因此,探讨瓶装 LPG 事故的核心诱因与组态路径,对保障公共安全具有重要意义。

城镇燃气风险管控和事故预防相关研究聚焦于采用统计学方法分析事故致因及影响关系。例如:LAM 等<sup>[4]</sup>构建了考虑风险因素特征的概率网络模型,研判出日本民用天然气和 LPG 消费端事故的因果链与关键致因;田彬等<sup>[5]</sup>统计分析了“十三五”期间中国城镇燃气爆炸事故的一般性规律,发现 LPG 事故的数量和概率均为最高,胶管失效是导致其泄漏与爆炸的首要原因;ZHANG Xiaoliang 等<sup>[6]</sup>采用 24 Model 统计分析了中国大陆 160 起城镇燃气事故,得出隐患排查与整改落实不力是导致事故的主要因素,占比高达 76%。此外,有学者采用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 等工程技术手段量化了 LPG 爆炸事故的灾害范围及后果<sup>[7]</sup>。总体而言,既有文献不仅极大丰富了城镇燃

气安全生产的研究内容,而且奠定了扎实的理论基础,但尚有如下不足亟待解决:①研究对象上,现有文献普遍关注以天然气为主要储运介质的燃气管道事故,对瓶装 LPG 这一高概率、高后果事故关注不够、重视不足,常将其与其他类型的燃气事故作并列分析,忽略了瓶装 LPG 事故自身特点;②研究视角上,现有研究更侧重对事故特点与事故致因的多维统计,但缺乏对核心诱因综合影响及其与事故严重程度间复杂关系的实证检验;③研究内容上,未通过组态路径分析解释事故构成要素及涌现机制,事故的多样性特征仍有待说明。

模糊集定性比较分析法 (fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis, fsQCA) 立足集合论与布尔代数,能够在考虑个体案例异质性与复杂性基础上有效处理多因素间的交互关系<sup>[8]</sup>,对分析具有多因素并发特质的复杂系统问题优势显著<sup>[9]</sup>。该方法在人文与社科领域应用甚广<sup>[10]</sup>,近年来在安全科学研究中也得到成功实践<sup>[11]</sup>,用于探讨应急物流能力<sup>[12]</sup>和实验室<sup>[13]</sup>、煤矿<sup>[14]</sup>、燃气管网<sup>[15]</sup>等多种事故的组态路径。因此,笔者拟在剖析典型事故案例基础上,结合国内 LPG 行业实际,构建多主体事故致因模型,来辨识核心诱因,并将其作为条件变量,采用 fsQCA 探讨事故致因的组态构型,以期为深化城镇燃气行业安全专项整治力度,加速燃气安全管理长效机制构建、助力“事故零死亡”目标实现等提供理论依据和实践支撑。

1 条件变量及组态路径研究设计

1.1 fsQCA 方法及其适用性

定性比较分析方法认为特定结果由多个原因条件组合形成,因此,以案例和变量为导向分析不同的条件组合,能够为解释具有多因素并发特征的复杂

因果关系问题提供可靠思路,现主要有清晰集、多值集、模糊集等具体工具。其中,fsQCA 将变量值置于  $[0,1]$  区间内,既可有效弥补 QCA 二分变量的不足,又能减少主观变量在数据化过程中的误差,适用于 10~60 个中小规模样本分析,能够辨识引发结果最典型、最核心、最精简的原因组合<sup>[16]</sup>。瓶装 LPG 事故属于多种风险耦合作用的结果,各类线性与非线性影响路径间交叉重叠,具有典型的多样性、非对称性和多元并发性特征,因此,有必要在整体视角下研究不同要素的联动作用,并归纳事故类型。与 CFD、贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)、社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)等事故建模与研究方法相比,fsQCA 的多因果等效和条件组合解释等独特优势对探讨事故组态路径这一问题具有较好适用性。

1.2 研究案例选择

根据 fsQCA 的要求,选择研究案例时应遵循如下标准和原则:①代表性,案例应具有强典型性和社会影响力,曾被多家权威媒体公开报道,能够反映事故痛点。②多元性,案例应在事故类型、时间、地点、主要诱因、后果等方面呈现多维特征。③完整性,案例应有官方发布的事故调查报告等查证资料支撑,事故信息清晰完整,可追溯性强。④延续性,事故案例时间范围应囊括中国城镇燃气和瓶装 LPG 行业的主要发展周期,以体现社会变迁对事故的潜在影响。

因国内目前暂无由官方开源发布的城镇燃气事故数据库,故通过各地政府部门官网、中国城市燃气协会与部分纸质文献等<sup>[17]</sup>,共收集到中国大陆地区 19 个省/直辖市/自治区 2013—2024 年间 60 起瓶装 LPG 事故案例;再根据上述原则,筛选 50 起典型案例作为研究样本。其中,城镇、乡村地区各 40、10 起;特别重大、重大、较大、一般事故各 1、2、10、37 起。因篇幅所限,部分案例见表 1。

表 1 中国大陆近年部分瓶装 LPG 事故案例

Table 1 Cases of bottled LPG accidents in mainland China in recent years (partial)

| 序号 | 时间              | 地点   | 等级 | 死亡人数 | 受伤人数 |
|----|-----------------|------|----|------|------|
| 1  | 2013 年 6 月 11 日 | 江苏苏州 | 重大 | 12   | 8    |
| 2  | 2013 年 7 月 24 日 | 北京   | 一般 | 2    | 22   |

续表 1

| 序号 | 时间               | 地点     | 等级   | 死亡人数 | 受伤人数 |
|----|------------------|--------|------|------|------|
| 3  | 2014 年 1 月 18 日  | 河北三河   | 一般   | 1    | 34   |
| 4  | 2014 年 9 月 19 日  | 福建厦门   | 较大   | 5    | 18   |
| 5  | 2014 年 11 月 25 日 | 福建厦门   | 较大   | 4    | 3    |
| ⋮  |                  |        |      |      |      |
| 46 | 2023 年 6 月 21 日  | 宁夏银川   | 特别重大 | 31   | 7    |
| 47 | 2023 年 7 月 17 日  | 上海     | 一般   | 0    | 1    |
| 48 | 2023 年 7 月 31 日  | 福建福州   | 一般   | 0    | 3    |
| 49 | 2024 年 5 月 18 日  | 贵州毕节   | 一般   | 2    | 4    |
| 50 | 2024 年 9 月 20 日  | 内蒙古阿荣旗 | 一般   | 2    | 0    |

1.3 瓶装 LPG 多主体事故致因模型构建

fsQCA 未提供变量选择与赋值指南,需要结合案例特点和相关理论选择条件变量。一般地,对于 10~60 个中等规模样本,需要从中识别最具代表性的 4~7 个条件变量<sup>[18]</sup>。故在构建瓶装 LPG 多主体事故致因模型基础上辨识各主体核心诱因,提炼条件变量。

分析 50 份事故调查报告可知:①瓶装 LPG 事故一般涉及政府、经营企业、用户 3 类主体,其中政府包括各级党委、地方政府和有关部门,肩负安全监管与执法检查的职责。②瓶装 LPG 经营企业数量众多,且拥有大量合作单位与下属站点,与拥有特许经营权的管道天然气企业差异显著。此类企业及其从业人员既要承揽瓶装 LPG 生产、充装、储运、销售和配送等业务,还对用户负有供气管理、用气指导和安全检查等责任。③瓶装 LPG 用户分为企业与个体 2 类,餐饮企业占前者中的大多数,后者大多为居民,有关人员违规用气(如使用完毕后未关紧瓶阀)和违规操作(如更换气瓶的程序错误)通常是事故的直接诱因。综上所述,参考郑小强等<sup>[19]</sup>的研究,借鉴人-设备-环境-管理和复杂社会-技术系统相关思想,建立如图 1 所示的瓶装 LPG 多主体事故致因模型。

1.4 条件变量选择与赋值

分析图 1 可知:事故涉及各级党委与地方政府

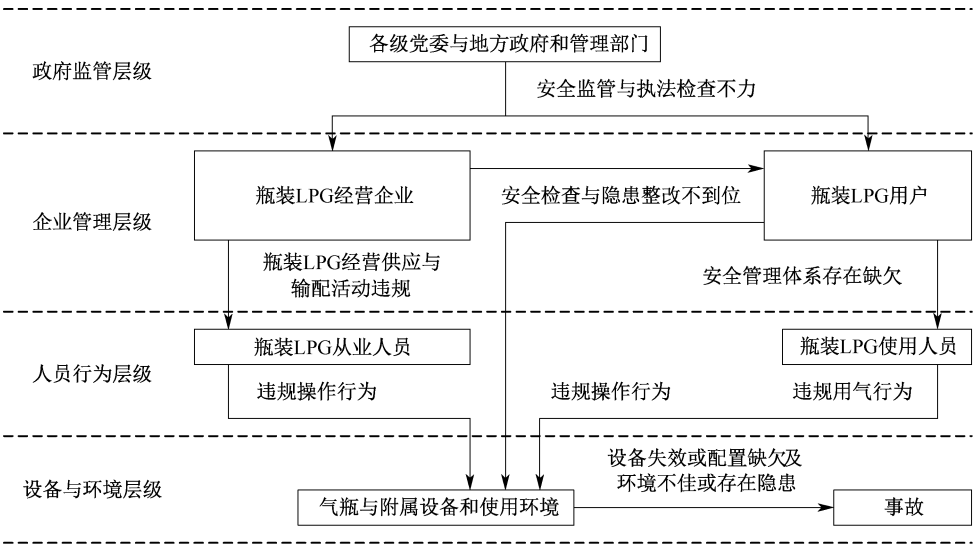


图 1 瓶装 LPG 事故多主体致因模型

Fig. 1 Multi-agent causal model for bottled LPG accidents

和管理部门、瓶装 LPG 经营企业、瓶装 LPG 用户、瓶装 LPG 从业人员、瓶装 LPG 使用人员、气瓶与附属设备和使用环境等 6 项主体,拥有安全监管与执法检查不力、瓶装 LPG 经营供应与输配活动违规、安全检查与隐患整改不到位、安全管理体系存在缺欠、违规操作行为、违规用气行为、设备失效或配置缺欠及环境不佳或存在隐患 7 项核心诱因。确定如下条件变量:

1) 用气行为 (Application Behaviors, AB)。该变量的主体是瓶装 LPG 的使用人员。因国内瓶装 LPG 主要采用气瓶供应、室内存放、用户自行管理的经营模式,故用户使用行为对事故直接影响甚大。如果用户安全意识淡薄、用气行为错误或违规、用气习惯不佳或应急处置不当等,则将其赋值为 1,否则为 0。

2) 操作行为 (Operation Behaviors, OB)。该变量的主体兼具瓶装 LPG 从业人员和使用人员。此类人员的违规充装、运输、配送瓶装 LPG 或违规更换气瓶、违规应急处置等行为均有可能直接诱发事故。如果其存在违规操作行为或不具备从业资质,则将其赋值为 1,否则为 0。

3) 气瓶、附属设备及周边环境 (Cylinders, Ancillary Equipment and Surroundings, CAES)。该变量的主体如下:①气瓶系统,包括气瓶、阀门、软管、三通等;②安全伺服系统,包括自闭阀和燃气泄漏报警器等;③周边环境,国内禁止在露天环境存储和使用瓶装 LPG。如果存在气瓶材质不合格或超期未检验,阀门、软管、三通与安全伺服装置失效或配置存

在缺欠,未设置气瓶间或设置不合理及周边环境存在潜在危险源等问题,则将其赋值为 1,否则为 0。

4) 安全生产管理体系 (Work Safety Management System, WSMS)。该变量的主体为瓶装 LPG 用户企业,涉及安全培训和教育、应急管理、气瓶管理、使用管理等多项制度体系,其缺欠往往是诱发不安全行为和物态等的根源。如果安全管理体系存在漏洞和缺陷,或实践执行不到位,则将其赋值为 1,否则为 0。

5) 安全检查与隐患整改 (Safety Inspection and Hazard Management, SIHM)。该变量的主体为瓶装 LPG 经营企业与用户。瓶装 LPG 经营企业对用户负有指导用气和入户安检等责任,需协助用户及时整改隐患;用户出于保障自身安全的考虑,应在贯彻落实安全主体责任、履行安全管理职责的基础上及时排查和消除隐患。如果安全检查与隐患整改不到位,则将其赋值为 1,否则为 0。

6) 瓶装 LPG 经营、供应与输配 (Operation, Supply, Transportation and Distribution of bottled LPG, OSTD)。该变量主体是瓶装 LPG 经营企业。根据《城镇燃气管理条例》规定,瓶装 LPG 经营企业应具备气源保障、气瓶充装、供气服务、安全指导的规模化经营能力。但大多数企业属于小微企业,经营管理能力有限,为争取更多的市场份额,普遍通过挂靠建立分销渠道,易诱发无资质和违规经营等问题。如果瓶装 LPG 经营企业存在无资质或违规经营、供应、运输、配送瓶装 LPG 等现象,则将其赋值为 1,否则为 0。

7) 安全监管与执法检查 (Safety Supervision and Law Enforcement, SSLE)。该变量主体包括各级党委、地方政府和住建、城管、市监、交运、商务、公安、消防等瓶装 LPG 管理部门,该主体既是瓶装 LPG 安全生产的顶层保障,更是其事故防治的核心内驱。如果安全监管与执法检查严格有力,则将其赋值为 1,否则为 0。

1.5 结果变量选择与赋值

参考《生产安全事故报告和调查处理条例》事故等级划分标准、fsQCA 四值集划分原则以及文献 [11-15]:选择以事故严重程度为结果变量。鉴于特别重大和重大事故数量较少且负面影响深远,故合并赋值为 1;同理,赋值较大事故为 0.67;因瓶装 LPG 事故后果的严重程度更甚管道天然气事故,一般事故亦常造成人员死亡,故分别赋值造成和未造成人员死亡的一般事故为 0.33 和 0。综上所述,变量赋值标准见表 2。

2 事故组态路径分析

2.1 单因素必要性分析

基于表 2 和事故案例实际,构建真值表用于实证分析。在分析条件组态前,首先应检验单个因素是否构成事故的必要条件,主要通过一致性和覆盖率来判断。一般地,如果条件变量一致性大于 0.9,则认为其是构成结果变量的必要条件<sup>[8-15]</sup>。在一致性检验通过后,需进一步分析覆盖率,覆盖率指给定条件能够在多大程度上解释结果的能力,与条件变量对结果的解释能力成正比。一般地,当覆盖率低于 0.8 时,说明单一条件变量无法完全解释结果变量。

单因素必要性分析结果见表 2,其中,~ 表示

“否”。分析表 2 可知:7 项条件变量的一致性均低于 0.9,即单一条件变量无法构成事故的必要条件,应从组态视角剖析事故致因的多元并发性。

表 2 单因素必要性检验结果

| Table 2 Results of single factors necessity test |       |       |
|--------------------------------------------------|-------|-------|
| 条件变量                                             | 一致性   | 覆盖率   |
| AB                                               | 0.548 | 0.680 |
| ~AB                                              | 0.452 | 0.560 |
| OB                                               | 0.355 | 0.524 |
| ~OB                                              | 0.645 | 0.690 |
| CAES                                             | 0.645 | 0.645 |
| ~CAES                                            | 0.355 | 0.579 |
| WSMS                                             | 0.774 | 0.686 |
| ~WSMS                                            | 0.226 | 0.467 |
| SIHM                                             | 0.516 | 0.727 |
| ~SIHM                                            | 0.484 | 0.536 |
| OSTD                                             | 0.677 | 0.700 |
| ~OSTD                                            | 0.323 | 0.500 |
| SSLE                                             | 0.774 | 0.800 |
| ~SSLE                                            | 0.226 | 0.350 |

2.2 组态路径分析

在 fsQCA 3.0 中设置案例阈值为 1,原始一致性阈值为 0.8, PRI (Proportional Reduction in Inconsistency) 一致性为 0.8,求解得到复杂解、中间解、简约解。考虑中间解复杂度适中、代表性更强,相对优于复杂解和简约解,故以中间解为主、简约解为辅分析事故组态路径<sup>[15]</sup>,结果见表 3。其中,●和·分别表示核心条件与边缘条件存在,○和⊗分别表示核心条件与边缘条件缺失,空白处则表示该条件出现与否对结果均没有影响;核心条件是指同时出现在中间解和简约解中的变量,边缘条件是指仅出现在中间解而未出现在简约解中的变量。

表 3 瓶装 LPG 事故组态路径

Table 3 Configuration paths of bottled LPG accidents

| 组态路径/<br>条件变量 | 多元致灾型 |       | 违规用气与设备<br>失效耦合型 | 违规用气型 | 组织欠缺型 | 违规经营型 | 设备失效型 |       |
|---------------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 路径 1a | 路径 1b | 路径 2             | 路径 3  | 路径 4  | 路径 5  | 路径 6a | 路径 6b |
| AB            | ○     | ·     | ●                | ●     | ⊗     | ⊗     | ●     | ○     |
| OB            | ●     | ●     | ○                | ⊗     | ●     | ●     | ○     | ○     |
| CAES          | ●     | ●     | ●                | —     | ○     | ○     | ●     | ●     |
| WSMS          | ●     | ●     | ●                | ●     | ●     | ○     | ○     |       |
| SIHM          | ●     | ●     | ○                | ○     | ⊗     | ○     | ●     | ●     |
| OSTD          | ●     | ●     | —                | ⊗     | ⊗     | ●     | ⊗     | ●     |
| SSLE          | ●     | ●     | ●                | ●     | ●     | —     | ⊗     | ⊗     |
| 原始覆盖率         | 0.161 | 0.097 | 0.097            | 0.129 | 0.065 | 0.129 | 0.323 | 0.065 |

续表 3

| 组态路径/<br>条件变量 | 多元致灾型  |        | 违规用气与设备<br>失效耦合型 | 违规用气型  | 组织缺欠型  | 违规经营型  | 设备失效型  |        |
|---------------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | 路径 1a  | 路径 1b  | 路径 2             | 路径 3   | 路径 4   | 路径 5   | 路径 6a  | 路径 6b  |
| 唯一覆盖率         | 0. 161 | 0. 097 | 0. 065           | 0. 097 | 0. 065 | 0. 129 | 0. 323 | 0. 065 |
| 一致性           | 1. 000 |        |                  |        |        |        |        |        |
| 总体覆盖率         | 0. 742 |        |                  |        |        |        |        |        |
| 总体一致性         | 1. 000 |        |                  |        |        |        |        |        |

分析表 3 可知:①各组态路径的一致性和所有组态路径的总体一致性均为 1,大于 0.9,说明任意条件变量组合及其整体均为结果变量的充分条件。②总体覆盖率为 0.742,说明上述组态路径能够解释 74% 以上的事故,解释能力较强。③7 项条件变量均曾作为核心条件存在于组态路径,说明任一条件变量对事故均有突出贡献。④8 条组态路径可归纳为多元致灾型、违规用气与设备失效耦合型、违规用气型、组织缺欠型、违规经营型与设备失效型 6 种。具体说明如下:

1) 多元致灾型。对应组态 1a 和 1b,其核心条件是除 AB 外所有条件变量所映射的缺陷,区别是违规用气行为在 1b 中作为边缘条件存在。该事故是瓶装 LPG 事故中成因最复杂、后果最严重的一种,不仅涉及政府监管缺失、经营企业违规供气、用户安全管理缺失等组织致因,更与违规用气和操作、应急处置不当等不安全行为有关;同时设备与环境等不安全物态也不容忽视。

2) 违规用气与设备失效耦合型、违规用气型、组织缺欠型。分别对应组态 2、3、4,因其相似程度较高,故作合并分析。其中,组态 2 的核心条件是违规用气、设备失效与不良环境、安全生产管理体系和政府监管与执法检查存在缺陷;而组态 3 相较组态 2 不涉及设备与环境缺欠;组态 4 则仅有安全生产管理体系和政府监管与执法检查存在缺陷 2 项组织致因作为核心条件。上述 3 类事故大多发生在餐饮行业。受管道天然气安装条件和开户费用等影响,瓶装 LPG 相对更受餐饮企业欢迎,加之国内餐饮企业具有分布广泛、数量众多、规模不一、人员密集、流动复杂等特点,政府监管难度和事故后果等均高于管道天然气。此外,国内 LPG 气瓶供应、室内存放、用户自行管理的经营模式也很容易诱发如下问题:①气瓶在室内使用隐患大。瓶装 LPG 用完后需要重新更换,一旦操作失误,极易在密闭空间内造成爆炸。②用户要求高。如果用户未经专业培训,安全意识淡薄,不仅难以及时发现和正确处置安全隐患,

而且极可能购买或使用不合格的气源及配套产品。

3) 违规经营型。对应组态 5,核心条件是违规操作和违规经营瓶装 LPG。事故主体一般为瓶装 LPG 经营企业,通常由相关人员非法从事瓶装 LPG 经营和充装活动所致,与属地政府安全监管不力等深层问题亦有直接关联。

4) 设备失效型。对应组态 6a 和 6b,核心条件是设备失效与不良环境以及安全检查和隐患整改不足,事故主体兼具瓶装 LPG 经营企业和用户。其直接原因通常为软管老化、破裂、未有效连接灶具等;瓶装 LPG 经营企业不具备从业资质、违规向不符合条件的用户供气、未履行入户安检职责则往往是诱发事故的根本原因。

2.3 稳健性检验

为保证条件变量解释力充分,采用调整一致性阈值的方式进行稳健性检验,将一致性阈值从 0.8 提升至 0.85 并进行对比分析<sup>[20]</sup>。结果表明:一致性阈值提高后,组态路径、一致性和覆盖率均未发生明显变化,研究结论稳健。

2.4 面向关键驱动路径的事故防治对策与建议

视唯一覆盖率排序前 3 的路径为关键驱动路径,依次为组态 6a、组态 1a、组态 5。经对比分析可知:CAES、SIHM、OB、OSTD 作用显著。应聚焦上述条件变量,遵循政府主导—企业主责—社会参与的逻辑,优先实施如下协同防治对策:

1) 强化安全监管与执法检查。各级党委、地方政府和有关部门一要加强监管力度,建立多部门协同监管机制,强化问题气/瓶/阀/管专项整治和对典型事故及执法案例的信息披露,形成震慑效应;二要加强市场准入管理,淘汰落后主体,规范行业秩序;三要推动技术标准更新升级,重点完善城镇燃气管理条例、事故判定和设备标准,并转化部分推荐性标准为强制性标准;四要顺应 LPG“城市降、乡镇升”的消费趋势与燃气下乡、乡村微管网建设等政策要求,深化城镇地区瓶改管,同时推动瓶装 LPG 下沉乡镇,补齐农村能源基础设施短板,缓解能源贫困,

助力三农现代化,同时构建统一大市场监管体系,促进城乡燃气事业协同发展。

2) 深化安全检查与隐患整改。各地方政府与监管部门一要切实执行《全国城镇燃气安全专项整治工作方案》等文件要求,深入排查和整治属地内瓶装 LPG 经营企业的上游风险,二要以餐饮企业、群租户、商业综合体为重点,对其用气环境、设备、操作等下游隐患加强突击检查。经营企业应聚焦瓶装 LPG 全业务链,严格签订与执行供气合同,加强实名制销售和入户安检力度,建立并完善气瓶管理档案。瓶装 LPG 的各类用户必须落实安全主体责任,使用合格的气源、气瓶、胶管、灶具等,定期自主开展隐患排查与治理。

3) 实化安全培训和应急演练。一是瓶装 LPG 经营单位与用户企业必须在修订、完善和切实执行安全管理制度的基础上,加强对从业与使用人员的安全培训教育和应急演练,提升其安全知识、意识和能力,遏制不安全行为涌现及演化;二是政府和燃气企业应借助多元媒体工具加强对社会公众的安全用气宣传,督促个体居民用户培养良好的用气习惯,严格杜绝违规用气和操作等不安全行为,从一次性行为与习惯性行为耦合视角阻断风险,形成群防群治

的安全氛围。

3 结 论

1) 瓶装 LPG 事故多因一果和多元并发特征显著,7 项条件变量和 1 项结果变量共计形成 8 条组态路径,又可聚类为多元致灾、违规用气与设备失效耦合、违规用气、组织缺欠、违规经营和设备失效 6 种不同事故类型。

2) 组织致因对于瓶装 LPG 事故的涌现及演化具有突出作用;唯一覆盖率最高的多元致灾、违规经营、设备失效 3 种组态路径的代表性较强,发生频率较高,驱动作用显著,是事故防治工作的重点;建议结合其核心条件变量,协同政府、经营企业和用户等主体,积极践行强化安全监管与执法检查、深化安全检查与隐患整改、实化安全培训和应急演练 3 类 9 项事故防治对策。

3) 未来可采用多时段 QCA 等探讨事故的时空演变特征,并根据事故类型与特征差异制订靶向管控措施进而评估其干预效果。此外,可借鉴 STAMP/STPA 模型思想,立足多主体事故致因模型建立安全控制结构,对致灾机理推演及防治体系建设等开展有益探索。

参 考 文 献

[1] 张正利. 城市供气管道泄漏事故的成因及处置对策探讨[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(5): 724-727.  
ZHANG Zhengli. Discussion on causes and countermeasures of urban gas supply pipeline leakage accidents[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(5): 724-727.

[2] 北京大学能源研究院, 中国城市燃气协会液化石油气专业委员会. 液化石油气行业发展报告[R], 2024.

[3] TIAN Bin, ZHAO Zhanfei, CUI Xiaojun, et al. Characteristics of malignant urban gas accidents in China from 2013 to 2022[J]. Heliyon, 2024, 10(14): DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34568.

[4] LAM C Y, CRUZ A M. Risk analysis for consumer-level utility gas and liquefied petroleum gas incidents using probabilistic network modeling: a case study of gas incidents in Japan[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 185: 198-212.

[5] 田彬, 张亦雯, 崔晓君, 等. 2016—2020 年我国城镇燃气爆炸事故统计与规律分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 1993-2002.  
TIAN Bin, ZHANG Yiwen, CUI Xiaojun, et al. Statistics and law analysis of urban gas explosion accidents in China from 2016 to 2020[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 1993-2002.

[6] ZHANG Xiaoliang, LIANG Fanjie, XU Surui, et al. Building urban gas process safety management (UG-PSM) system: based on root cause analysis with 160 urban gas accidents in China[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 84: DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105101.

[7] KANG Yong, WU Zhuang, MA Shuye, et al. CFD-based assessment and visualization of the failure consequences of LPG tankers[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 82: DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105008.

[8] 杜运周, 刘秋辰, 陈凯薇, 等. 营商环境生态、全要素生产率与城市高质量发展的多元模式: 基于复杂系统观的组态分析[J]. 管理世界, 2022, 38(9): 127-145.  
DU Yunzhou, LIU Qiuchen, CHEN Kaiwei, et al. Ecosystem of doing business, total factor productivity and multiple patterns of high-quality development of Chinese cities: a configuration analysis based on complex system view[J]. Journal

of Management World, 2022, 38(9): 127-145.

[9] LEI Yu, ZHANG Guirong, LU Shan, et al. Revealing the generation mechanism of cross-regional emergency cooperation during accidents and disasters rescue[J]. Safety Science, 2023, 163:DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106140.

[10] PAPPAS I O, WOODSIDE A G. Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA): guidelines for research practice in information systems and marketing[J]. International Journal of Information Management, 2021, 58: DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2021.102310.

[11] 王如冰, 万欣, 毛鹏, 等. 乘客不安全行为与地铁事故关联性的 fsQCA[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 152-158.

WANG Rubing, WAN Xin, MAO Peng, et al. Relevance study between unsafe behaviors of passengers and metro accidents based on fsQCA[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 152-158.

[12] 孙庆兰, 王芝怡, 田水承. 国家中心城市应急物流能力组态影响路径[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 214-220.

SUN Qinglan, WANG Zhiyi, TIAN Shuicheng. Configuration impact path of emergency logistics capacity of national central cities[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 152-158.

[13] 阳富强, 尹航, 黄宗侯, 等. 基于 fsQCA 方法的高校实验室事故影响因素分析[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(3): 257-262.

YANG Fuqiang, YIN Hang, HUANG Zonghou, et al. Study on factors influencing university laboratory accidents using fsQCA method[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(3): 257-262.

[14] 李琰, 冯园. 基于 TOE 框架的煤矿事故致因组态研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2): 244-249.

LI Yan, FENG Yuan. Research on causative configuration of coal mine accidents based on TOE framework[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(2): 244-249.

[15] SUN Yilin, ZHENG Xiaoqiang, LIU Linxuan. Research on generation paths of production safety accidents in urban gas pipeline networks: a fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA) based on Chinese data[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 90: DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105353.

[16] 孙宁, 杜运周, 陈凯薇. 混合方法研究的原理与设计:以 QCA 与多案例研究的混合为例[J]. 南开管理评论, 2024, 27(9): 185-196.

SUN Ning, DU Yunzhou, CHEN Kaiwei. Principles and designs of mixed methods research: take the mixing of QCA and multi-case study as an example[J]. Nankai Business Review, 2024, 27(9): 185-196.

[17] 伍荣璋, 金国平, 邹笃国, 等. 燃气行业生产安全事故案例分析与预防[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 125-235.

[18] 申霞. 基于 fsQCA 的灾害事故跨域协同治理共同体研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 205-213.

SHEN Xia. Research on disaster and accident trans-regional collaborative governance community based on fsQCA[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 205-213.

[19] 郑小强, 孙逸林. 复杂社会技术系统视角下民用瓶装 LPG 爆炸事故致因分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4 808-4 819.

ZHENG Xiaoqiang, SUN Yilin. Analysis of causal factors in civilian bottled liquefied petroleum gas (LPG) explosion accidents from the perspective of complex socio-technical systems[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12): 4 808-4 819.

[20] 刘林, 吴金南, 梅强. 复杂性理论视角下员工安全生产违规的前因组态研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 9-19.

LIU Lin, WU Jinnan, MEI Qiang. Research on configuration causes of employee work safety violations: from complexity theoretical perspective[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 9-19.



作者简介: 孙逸林 (1996—),男,安徽合肥人,博士,讲师,主要从事复杂社会-技术系统风险分析、能源系统安全生产等方面的研究。E-mail:SYLSWPU@163.com。