

李乔楚, 陈军华. 岩溶区燃气管道灾害系统多因素耦合作用机理研究[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 228–234. [LI Qiaochu, CHEN Junhua. Study on the Multifactor Coupling Action Mechanism of Gas Pipeline Disaster System in Karst Area[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 228–234. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.035.]

岩溶区燃气管道灾害系统多因素耦合作用机理研究^{*}

李乔楚, 陈军华

(西南石油大学 经济管理学院, 四川 成都 610500)

摘要: 基于灾害系统理论, 从“孕灾环境–灾害因子–承灾体–灾情”系统性视角出发, 结合系统动力学模型, 探讨岩溶区燃气管道灾害系统各子系统内部以及子系统间的耦合关系, 考虑多因素间的差异化传导路径, 深度剖析灾害演化过程中多因素耦合作用机理和影响规律。研究表明: ①孕灾环境活跃性与人员、管道、环境不安全状态以及管理漏洞密切相关; 灾害因子风险性受到火灾和爆炸危害的概率、强度、范围、持续时间共同作用; 承灾体脆弱性受到社会–经济–自然承灾体三者耦合影响; 灾情严重性包含人员伤亡程度、经济损失程度及环境破坏程度三个维度。②岩溶区燃气管道灾害的孕育和演化是四个子系统共同作用的结果, 子系统两两之间以及三者之间的耦合作用表征灾害不同阶段, 而四个子系统间的耦合作用是对整个灾害过程的描述。

关键词: 岩溶区; 燃气管道; 灾害系统; 多因素耦合; 作用机理

中图分类号: X43; X915.5; U455.43; TU457; TG139.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2024)01–0228–07
doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2024.01.035

岩溶塌陷主要源于地下土洞向上的逐步拓展, 因此呈现显著的“隐蔽性”和“突发性”特征^[1], 对于通常采用埋地敷设的燃气管道工程, 其日常运行不可避免地受到此类地质活动影响, 在诸多自然、人为因素影响下若诱发岩溶塌陷则极易导致管道灾害, 对燃气管道的安全平稳运行和沿线人民的生命财产造成极大影响^[2]。岩溶区燃气管道灾害系统的多因素耦合作用是指系统中各种自然–社会–经济因素在灾害链上逐步蔓延, 激励和阻碍作用同时存在, 且多元因素不断发生交互并改变自身对灾害演化的影响程度和方向^[3], 造成灾害系统行为呈现复杂性和多样性, 并最终导致岩溶区燃气管道致灾可能性和后果严重性增加或降低的现象。

岩溶区燃气管道灾害系统是由孕灾环境、灾害因子、承灾体、灾情4大子系统构成的大型复杂结构, 各子系统内部又呈现差异化的层次结构, 因此子系统之间以及各子系统内部的多元因素均存在相互的耦合作用, 并伴随穿插于灾害演化的全过程^[4]。明晰灾害系统多因素耦合作用机理, 对于遏制灾害链的形成, 降低灾害后果严重程度, 提高岩溶区燃气管道灾害的风险管控水平, 具有

研究价值。本文基于灾害系统理论, 从“孕灾环境–灾害因子–承灾体–灾情”系统性视角出发, 结合系统动力学(System Dynamics, SD)模型探讨岩溶区燃气管道灾害系统各子系统内部及子系统间的耦合关系, 考虑多因素间的差异化传导路径, 深度剖析灾害演化过程中多因素耦合作用机理和影响规律, 以期为岩溶区燃气管道灾害的安全管理提供理论依据。

1 岩溶区燃气管道灾害系统多因素耦合作用机理分析

考虑到系统动力学模型对于多元因素因果回路关系的分析优势, 选用SD理论中的因果回路图(图中“+”“–”分别表示因素间存在正向促进、负向抑制作用), 针对岩溶区燃气管道灾害系统各子系统内部及子系统间的耦合关系进行分析。

1.1 子系统内多因素耦合作用机理

1.1.1 孕灾环境子系统

孕灾环境是灾害因子的孕育场所, 孕灾环境活跃性与人员、管道、环境不安全状态以及管理漏洞密切相关, 其耦合作用关系见图1。

^{*} 收稿日期: 2023–04–06 修回日期: 2023–07–17

基金项目: 国家社会科学基金西部项目“‘双碳’目标下我国城市群能源系统碳达峰预测及差异化减排路径研究”(22XGL019); 国家社会科学基金重大项目“能源革命驱动下的天然气产业高质量发展路径研究”(22&ZD105)

第一作者简介: 李乔楚(1995–), 男, 汉族, 江苏新沂人, 讲师, 主要从事石油工程管理、油气灾害防治研究。

E-mail: 252651625@qq.com

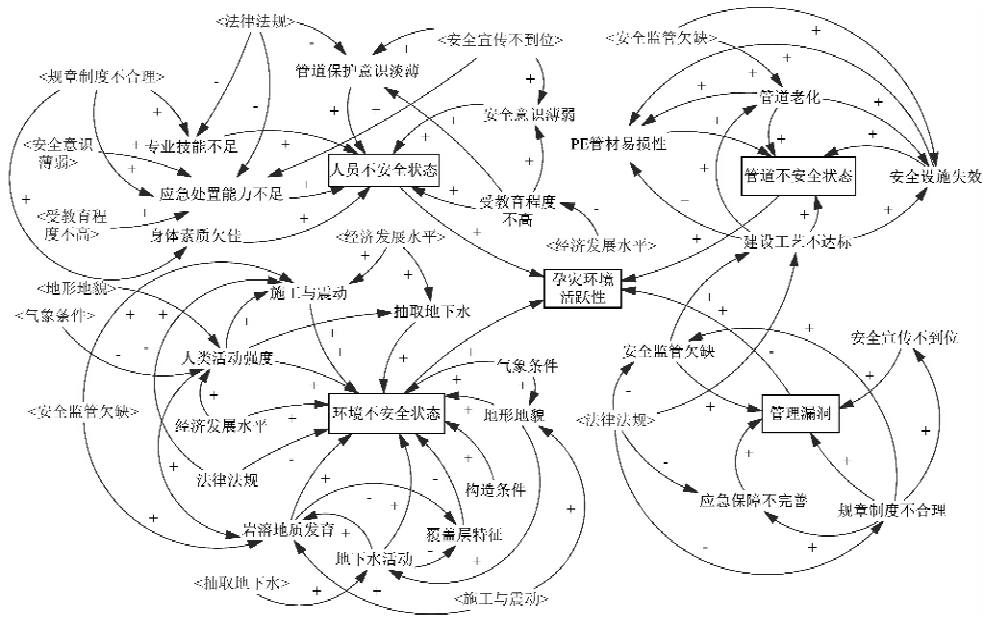


图1 孕灾环境子系统多因素耦合关系示意图

1) 针对环境不安全状态的耦合关系。自然环境方面,地下水活动、构造条件、地形地貌、气象条件会影响岩溶地质发育速度,同时构造条件、地形地貌、气象条件会改变地下水活动;社会环境方面,较高的经济发展水平会带动施工与震动、抽取地下水、交通运输荷载等因素的出现^[5],而良好的法律法规环境可以有效限制不合理施工、违规地下水开采等行为,减少违规占压现象。与此同时,岩溶区脆弱的自然环境极易受到社会环境影响,城镇化推进引发的施工活动,以及居民日常生活行为均会扰乱自然环境的稳定性;自然环境也会限制或者促进社会环境的形成,例如岩溶地质发育程度较强的峰林平原、孤峰平原、一二级阶地等地区,是城镇化建设发展的主要用地^[6],为人类活动创造良好的外部环境,而风、云、雨、闪电、打雷等自然气象会减小人类活动强度。

2) 针对人员不安全状态的耦合关系。受教育程度欠缺不仅会从知识水平、社会责任、接纳能力、沟通能力等方面直接影响人员不安全状态,还可能导致管道保护意识淡薄和安全意识薄弱,从而增大风险水平;而安全意识薄弱、安全宣传不到位等,则会导致相关人员缺乏忧患和防范意识,缺乏参与灾害应急培训的主观能动性,从而难以掌握有效的自救与他救能力,均会造成应急处置能力不足。

3) 针对管道不安全状态的耦合关系。施工工艺不达标的耦合活跃度较高,会加剧PE管材易损性、管道老化以及安全设施失效;投产时间长短与安全设施隐患相挂钩,同时缺乏有效的安全设施保护以及表面老化问题,会显著降低PE管材的抗外载能力。PE管材易损性对孕灾环境活跃性的耦合驱动最强,一方面作为其他因素驱动作用的有效媒介,另一方面对管道不安全状态产生关键的直接影响。

4) 针对管理漏洞的耦合关系。企业规章制度通常涉及安全宣传机制、日常监管办法和应急保障措施,规章制度不合理将不可避免地导致对应工作流程的欠缺,因此其耦合活跃度最高,通过与其他因素的自发耦合,推动孕灾环境的形成;安全监管欠缺、安全宣传不到位、应急保障不完

善则在耦合关系中主要呈现依赖特性,与其他因素产生联动。

5) 整体孕灾环境的耦合关系中,管理漏洞与人员不安全因素的耦合,会显著加剧岩溶区燃气管道的不安全状态,例如培训制度不完善不利于提高工作人员的专业技能、安全防护以及应急处置能力,安全宣传不到位不利于在后天弥补沿线居民管道保护意识淡薄等问题;管理漏洞还会因安全监管的欠缺,与管道和环境因素发生耦合,例如高后果区评价或巡线制度的欠缺,不利于及时发现强岩溶发育地段、第三方违规施工等环境风险,或者忽略管道老化、工艺缺陷、安全设施失效等隐患。与此同时,以法律法规为代表的环境因素也会与管理因素发生耦合,针对不达标管道工程的实际处罚力度有助于显著控制施工工艺缺陷;同时,有效的法律法规约束有助于推动企业重视安全监管欠缺的问题,从而提升应急保障能力并建立更加完善的规章制度^[7],成为弥补管理漏洞的关键驱动力。

1.1.2 灾害因子子系统

岩溶区燃气管道灾害因子的风险性主要受到火灾和爆炸危害的概率、强度、范围、持续时间等的共同作用与影响,其耦合作用关系见图2。岩溶区燃气管道失效泄漏所导致的各类灾害因子中,单一灾害的发生均能够导致其他次生灾害的相继发生,故岩溶区燃气管道灾害因子呈现链式的形成过程。火灾与爆炸风险性均受到“危害性-发生概率-影响范围”三者的耦合影响。火源与燃气泄漏是火灾与爆炸发生的必要条件,而空间受限情况与延迟点燃则针对不同灾害因子存在差异化的影响作用。当空间受限与延迟点燃时,更容易导致爆炸,反之则更容易导致火灾。火灾危害性受到热辐射通量、辐射时间、烟尘以及有毒烟气四者的耦合影响,爆炸危害性受到冲击波超压、噪声、有毒烟气三者的耦合影响^[8]。火灾与爆炸的耦合作用将推动彼此的影响范围持续蔓延,并均随着燃气泄漏量的增大而不断扩大。可以看出,火源、空间受限情况、燃气泄漏类型、延迟点燃是影响两类灾害因子发生概率的联合致因,而距离灾害的远近则是影响危害性的共同因素,上述因素即为控制灾害因子的首要抓手。

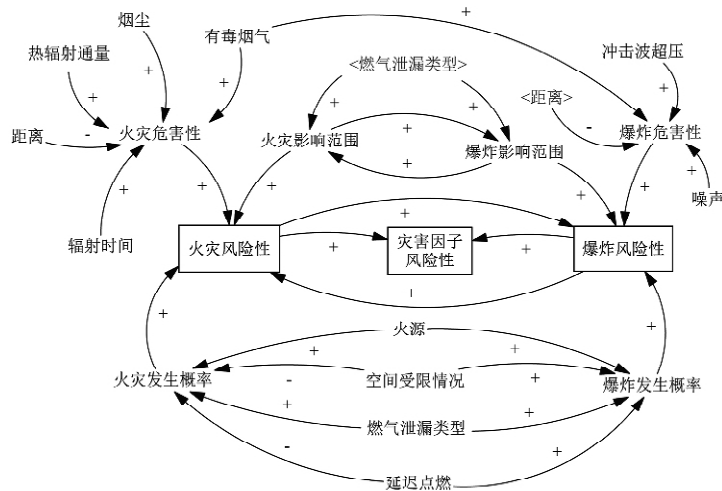


图2 灾害因子子系统多因素耦合关系示意图

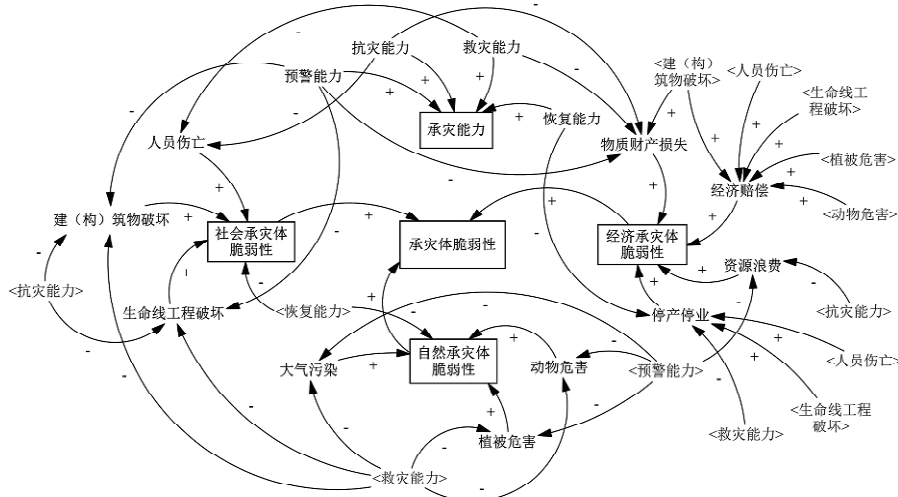


图3 承灾体子系统多因素耦合关系示意图

1.1.3 承灾体子系统

承灾体脆弱性主要受到“社会-经济-自然承灾体”三者的耦合影响，同时考虑到承灾能力对于降低承灾体脆弱性的有效作用，其耦合作用关系见图3。社会承灾体脆弱性是最薄弱的环节，自然承灾体脆弱性是基本组成部分，两者的恶化会联动加剧经济承灾体的脆弱性^[9]。经济承灾体脆弱性的耦合作用最为强烈，岩溶区燃气管道灾害影响社会承灾体导致的人员伤亡、建(构)筑物破坏，以及影响自然承灾体导致的动植物危害，均会面临相应的经济赔偿，同时生命线工程破坏则易诱发停产停业，影响居民日常生活、增大工商业销售额损失。承灾能力的提升则是弥补承灾体脆弱性的重要因素，主要包括灾前预警、灾中救灾和抗灾，以及灾后恢复能力。预警能力包括用于岩溶评估的地球物理勘探技术，用于管道失效评价的应力应变监测装置，用于火灾识别的烟雾报警装置等，有效的预警能力有助于从源头遏制灾害发生，通过预先解耦，降低危害影响^[10]。抗灾能力包括紧急截断阀等管道安全保护装置，沿线居民的紧急处置能力，企业的专业维修能力，以及健全的应急管理值班机制等；救灾能力则包括当地的消防和医疗能力，受灾人员的自救与他救能力，完善的抢险救灾队伍、预案以及物资等^[11]。救灾和抗灾能力与政府、企业的资源投入密切相关，通过及时断链，有效降低各类人员伤亡损失、资源浪费和环境破坏，控制灾害蔓延^[12]。

灾后恢复能力主要通过多元承灾体发生耦合，加快沿线自然环境、工商业活动和居民日常生活的灾后恢复。

1.1.4 灾情子系统

灾情严重性主要包含人员伤亡、经济损失及环境破坏程度三个方面，其耦合作用关系见图4。灾情与承灾体相对应，人员伤亡、经济损失、环境破坏中任一灾情的加剧，均可能诱发其他灾情的相继加剧。人员伤亡程度取决于危害半径和人口密度，并与经济损失程度耦合密切，伤亡情况会直接影响伤亡赔偿及误工赔偿额度，以及由于劳动力健康受损所导致的营业中断时间；人口密度较大的区域通常财产密度相应较大，且人口密度能够通过改变地区消费能力影响沿线商户的日营业收入，以及与市场相关联的燃气价格，从而进一步影响营业中断和燃气泄漏造成的经济损失；人员伤亡程度也通过人口密度变量对环境破坏程度产生耦合影响，人类具有主观能动性，历史发展进程即为由野生动植物为主导的自然环境，进化到以人类为主导的社会环境，人口密度越大则自然生物密度相应越小^[13]。与此同时，人口密度越大的区域日常生活要素越活跃，越容易诱发火源、提供可燃物，从而进一步推动灾情扩大。灾害破坏半径的增大在直接影响人员伤亡财产数量的同时，还可能加剧燃气泄漏与燃烧，从而产生更多CO₂、CH₄、N₂O等温室气体，通过增强区域“温室效应”加剧环境破坏程度^[14]。

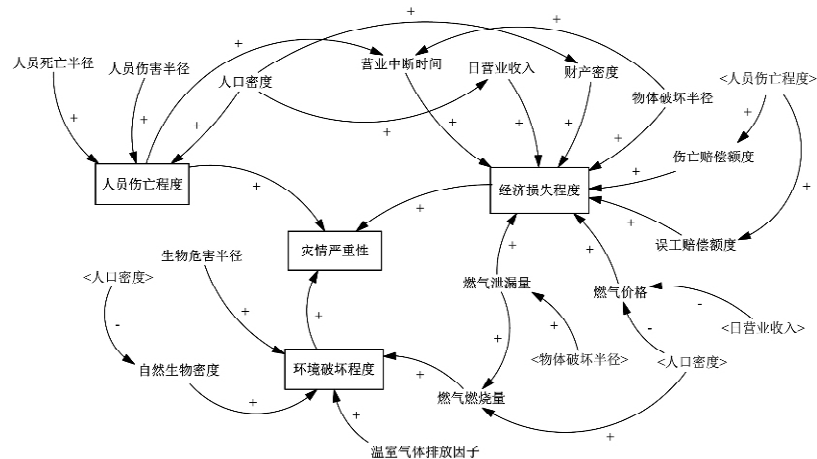


图4 灾情子系统多因素耦合关系示意图

1.2 两个子系统间多因素耦合作用机理

1.2.1 孕灾环境-灾害因子子系统

灾害因子时刻受到孕灾环境影响,孕灾环境活跃度越高,灾害因子风险性也随之增加。两者间的耦合作用表现为:①孕灾环境活跃度的增加,导致火灾爆炸危险性、发生概率及影响范围相应提升。例如人员安全意识淡薄、PE管材易损性、环境中的施工震动、管理中的安全宣传不到位等,均会加剧灾害的发生概率;沿线居民应急处置能力不足、工作人员专业技能欠缺、企业应急保障机制不完善等,则会限制灾害应对能力,进一步加剧灾害的危险性以及影响范围;灾害在经济发达区域表现出来的危害性显著大于人烟稀少区域;气象因素一方面可能通过降雨减小灾害发生概率,另一方面可能通过风加剧火灾蔓延从而扩大危害范围。②灾害因子风险性的提升,会反作用于孕灾环境。例如火灾、爆炸造成的热辐射与冲击波超压危害,会降低沿线人员对灾害的反应与抵抗能力,通过二次破坏增大管道的失效损伤程度,从而加剧人员和管道的不安全状态;灾害造成的人员伤亡、交通瘫痪、工商业停产等会降低社会环境活跃度,在一定程度上限制灾害进一步演化或者灾害链形成^[15];灾害的发生不可避免地造成社会影响,严重灾情会引起人们对燃气安全的重视并带动国家政策改变、行政体制完善、企业运行制度革新等^[16],从而有效弥补管理漏洞,降低孕灾环境活跃度。

1.2.2 孕灾环境-承灾体子系统

承灾体通常处于孕灾环境中,在承受灾害损伤的同时通过耦合作用影响灾害发生的外部环境。两者间的耦合作用表现为:①人员不安全状态会直接加剧社会和经济承灾体的脆弱性,同时从人的层面限制系统的承灾能力。②PE燃气管道及其附属设施的不安全状态会加剧灾害过程中的燃气泄漏量和“停气”时间,从而增大经济承灾体的脆弱性,降低承灾体的预警和抗灾能力。③环境不安全状态与承灾体脆弱性的耦合作用尤为复杂,一方面经济-社会-人口发展水平越高,灾害可能造成的损失也就越大,但发展水平较高时人类保护自身生命财产安全的需求更为强烈,往往通过主动提高资源投入,以进一步完善承灾能力;另一方面岩溶区特殊的地质构造具有显著脆弱性,在灾害过程中将加剧建筑设施损坏和动植物危害,即增大社会与自然承灾体的脆弱性;与此同时,法律法规的约束与激励作用有助于增强相关主体的承灾能力。④管理漏洞与承灾体的耦合作用主要表现为由于应急保障、安全监管、安全宣传、

规章制度的欠缺,导致承灾体预警、抗灾、救灾以及恢复能力的相应降低。值得注意的是,在孕灾环境-承灾体子系统的耦合关系中存在交互耦合路径,例如“温室效应”会诱发极端气候变化进而危害自然承灾体,而雨、雪等气候现象则有助于降低大气环境中的污染气体浓度,对粉尘颗粒也起到有效的清除作用;如经济社会活动强度越高,对自然环境的影响破坏也就越大,环境承载力相应降低,环境脆弱性增强诱发的气候恶化和自然灾害等,又会反过来限制经济社会发展,由此可以看出,协同推进区域高质量发展与生态环境高水平保护具有重要意义。

1.2.3 孕灾环境-灾情子系统

孕灾环境活跃性与灾情严重性相互影响、相互促进。两者间的耦合作用表现为:①人员不安全状态会直接加大灾害造成的人员伤亡程度,应急处置能力和专业技能不足所导致的抗灾、救灾能力欠缺会扩大灾害破坏范围,同时难以有效制止燃气泄漏燃烧,甚至还会由于安全意识薄弱、未及时规避明火等危险因素,诱发更为严重的灾害。②管道的不安全状态尤其是脆弱的PE管材会加剧管道力学失效后的损伤破裂程度、增大燃气泄漏量,造成更多的资源浪费,并且导致维修难度加大,增加“停气”持续时间。③环境不安全状态一方面由于经济发展水平、人类活动强度等社会因素带动人口密度、财产密度、营业收入的增加,从而加剧灾害后的经济损失程度;另一方面可能由于气象条件、岩溶地质发育等自然因素影响灾情严重性,例如风、雨、雪等气象条件会直接促使系统状态远离火灾爆炸极限,而岩溶塌陷则易与火灾、爆炸危害产生叠加作用,在链式效应下造成更为严重的人员财产损失与环境破坏。④管理漏洞与灾情严重性的耦合作用涉及灾害全过程,在灾前由于识别能力不足易忽略重要风险因素、推动灾害演化;在灾中易导致缺乏应对能力,难以采取有效措施;在灾后则易限制系统的恢复能力。与此同时,较为严重的灾情又会营造更为活跃的孕灾环境,例如沿线人员的应灾处置能力会随着自身伤亡程度的增大而相应降低,有限的应急保障能力也难以匹配灾情持续扩大带来的严峻挑战。

1.2.4 灾害因子-承灾体子系统

灾害因子-承灾体子系统的耦合作用体现了灾害发生的直接过程。两者间的耦合作用表现为:岩溶区燃气管道灾害因子主要包括火灾、爆炸等,其直接作用于“社会-经济-自然”承灾体,造成人员伤亡、物体损坏、财产损失、社会停摆、大

气污染、生物危害等影响,与此同时,较为脆弱的社会和自然承灾体更有利于灾害因子发育,导致火灾、爆炸的影响范围进一步扩大。然而,灾害因子的影响效应并非毫无限制地增长,作为社会承灾体核心的人类具有主观能动性,能够根据灾害演化的实际阶段及时采取针对性的控制措施,即综合承灾能力为不同阶段承灾体反作用于灾害因子的重要表现:①灾前的预警能力。有效规避火源等重要诱导因素,及时检测管道失效缺陷,将灾害遏制于萌芽阶段;②灾中的救灾和抗灾能力。通过及时维修减少燃气泄漏时间,采取有力措施削减热辐射、冲击波超压、有毒烟气等的危害强度,同时保证有效的安全距离,将火灾、爆炸的影响区域控制在可接受的范围内。

1.2.5 灾害因子-灾情子系统

灾害因子-灾情子系统的耦合作用表征了灾害后果及其危害程度的关联关系。两者间的耦合作用表现为:火灾、爆炸危险性与灾害严重性同步提升,灾害影响范围扩大会带动人员伤亡、物体破坏和环境危害半径增大,更大的损失程度需要更多的维修与恢复时间,从而加剧营业中断事件的严重性;火源的出现增大火灾、爆炸发生概率的同时,易造成更多的泄漏燃气燃烧,从而排放更多的温室气体及粉尘,加剧大气环境污染。与此同时,灾情的严重程度也会对灾害因子产生一定影响,环境破坏程度提升可能推动灾害因子进一步发育,例如灾害诱发的地面土壤及植被破坏会显著降低外部环境对燃气扩散的限制作用,从而加剧火灾、爆炸等灾害因子的影响范围。因此,灾害因子-灾情子系统的耦合作用加剧了岩溶区燃气管道灾害演化的复杂性。

1.2.6 承灾体-灾情子系统

承灾体-灾情子系统的耦合作用表征了灾害影响程度与危害主体间的对应关系,以及灾情严重性的关联因素如何与承灾体的脆弱程度产生联动。两者间的耦合作用表现为:在岩溶区燃气管道灾害演化的过程中,人员伤亡、建(构)筑物破坏、动植物危害等社会-环境脆弱性因素的受灾程度直接对应于各种危害半径范围,同时还通过与停产营业、经济赔偿等经济脆弱性因素的耦合作用,加剧灾害造成的社会停摆时间、损失赔偿额度等,而承灾能力则是降低灾情严重性的关键抓手。但与此同时,灾情严重性的关联因素也将通过耦合作用影响承灾体的脆弱程度,例如通过控制人口、财产以及自然生物密度,可以直接降低承灾体脆弱性,由此说明管道高后果区识别及管理工作的必要性;控制温室气体排放因子能够减缓气候变暖对环境脆弱性的激励作用,由此说明碳捕捉与封存等先进技术研发普及的紧迫性;燃气泄漏与燃烧的及时控制有助于增强承灾体稳定性,限制灾害承受体演化为灾害激发体,确保有效的承灾能力,由此说明安全保护装置和应急保障机制的重要性。

1.3 三个子系统间多因素耦合作用机理

1.3.1 孕灾环境-灾害因子-承灾体子系统

岩溶区特殊的地质构造导致外部环境复杂脆弱,同时燃气管道通常位于人口、财产稠密区,活跃的孕灾环境更易造成管道失效泄漏、加剧燃气扩散,并进一步诱发火灾、爆炸等灾害因子,在承灾能力的限制下单独、先后或者同时作用于承灾体,最终诱发灾害链的形成。三者间的关键耦合路径包括:①孕灾环境活跃性→灾害因子风险性(+)→社会/经济/自然承灾体脆弱性(+)路径,反映岩溶区燃气管道灾害从孕育、形成到作用于承灾体的具体过程。例如,在岩溶塌陷作用

下,埋地 PE 燃气管道发生断裂泄漏,接触到外部火源后诱发火灾事故,危害沿线居民的生命财产安全。②承灾能力→孕灾环境活跃性(-)→灾害因子风险性(-)路径,反映承灾能力能够通过对致灾关联因子的有效预测及应对,降低孕灾环境的活跃性,控制灾害因子的形成、严重程度以及影响范围。例如,通过智能监测发现管道破损后,及时通过截断阀遏制燃气的进一步泄漏,或者灾害发生后第一时间开展消防及救援响应,最大化降低人员财产损失。③社会/经济承灾体脆弱性→孕灾环境活跃性(+)→灾害因子风险性(+)路径,反映承灾体受到危害后,通过反作用营造更为活跃的孕灾环境,从而进一步推动火灾、爆炸等灾害因子的形成与蔓延,即链式灾害的形成过程。例如,人员受伤后,其应灾响应与自救他救能力显著降低;又如,火灾、爆炸会增大管道破损面积或破坏安全保护措施,加剧燃气泄漏、提供更多燃烧源,从而扩大灾害影响范围。

1.3.2 孕灾环境-灾害因子-灾情子系统

岩溶区燃气管道灾害的危害情况受到孕灾环境活跃性和灾害因子风险性的耦合作用,同时灾情对社会及自然环境造成的影响又将推动新的孕灾环境和灾害因子形成。三者间的关键耦合路径包括:①孕灾环境活跃性/灾害因子风险性→灾情严重性(+)路径,反映灾害因子的直接作用和孕灾环境的外部激励对于加剧灾害后果严重程度的联动作用。例如,人员伤亡程度不仅受到热辐射、冲击波超压等外在因素的直接影响,同时还取决于安全意识、身体素质、应急能力等内在因素。②灾情严重性→孕灾环境活跃性(-)→灾害因子风险性(-)路径,反映严重灾情的警示作用将带动人员心理、企业管理和社会体制的变化,从而显著降低灾害的发生概率和严重程度。③灾情严重性→灾害因子风险性(+)→孕灾环境活跃性(+)路径,反映岩溶区燃气管道灾害自身的延展性,灾害后果越严重,造成的危害范围越大,灾害诱发因子也相应增加,从而增大已产生灾害因子的风险性,并进一步营造更为活跃敏感的孕灾环境,即形成灾害演化的恶性循环。

1.3.3 孕灾环境-承灾体-灾情子系统

孕灾环境-承灾体-灾情子系统间耦合关系复杂且紧密,灾害危害程度受到孕灾环境活跃性和承灾体脆弱性的共同影响,同时严重灾情又将推动新的孕灾环境形成并加剧承灾体状态恶化。三者间的关键耦合路径包括:①孕灾环境活跃性→承灾体脆弱性(+)→灾情严重性(+)路径和孕灾环境活跃性→灾情严重性(+)→承灾体脆弱性(+)路径,反映孕灾环境既能通过加剧承灾体易损水平,间接增大灾害危害程度,又能直接引发更为严重的灾情,从而进一步危害承灾体,即导致“灾情严重性加剧⇌承灾体脆弱性加剧”相互激发的恶性循环。②灾情严重性→孕灾环境活跃性(-)→承灾体脆弱性(-)路径,反映严重灾情引发的社会舆论与变革能在一定程度上削减孕灾环境的活跃性,进而增强承灾体的抵抗能力,由此凸显了灾害调查制度的重要性。通过查明灾害发生的经过、原因、人员伤亡和经济损失情况,提出针对性的风险防范措施,能够有效规避灾害的再次发生。

1.3.4 灾害因子-承灾体-灾情子系统

灾害因子风险性和承灾体脆弱性直接影响灾害危害程度,同时严重灾情又将推动新的灾害因子形成,对承灾体造成链式破坏。三者间的关键耦合路径包括:①灾害因子风险性→承灾体脆弱性(+)→灾情严重性(+)路径,反映高风险灾害

因子直接作用于脆弱承灾体,并进而引发严重灾情的演化逻辑。②灾情严重性→社会/自然承灾体脆弱性(+)→灾害因子风险性(+)路径和灾情严重性→承灾能力(+)→灾害因子风险性(-)路径,反映“灾情严重性→承灾体脆弱性→灾害因子风险性”耦合作用的差异化传导效应。一方面,灾害造成的人员伤亡和环境破坏程度越严重,越有可能导致本就脆弱的承灾体发生进一步恶化。例如,灾害引发人员健康水平和身体素质降低、外部环境对燃气扩散的限制作用减弱等因素的出现,会促使灾害因子风险性进一步增大;另一方面,针对严重灾情的调查认定和责任追溯,将有效激发公众安全意识提升和企业应急保障机制完善,从而增强承灾能力并降低灾害因子的危害强度。

1.4 四个子系统间多因素耦合作用机理

岩溶区燃气管道灾害的孕育和演化是孕灾环境活跃性、灾害因子风险性、承灾体脆弱性和灾情严重性共同作用的结果,子系统两两之间以及三者之间的耦合作用主要表征灾害的不同阶段,而四个子系统间的耦合作用则是对整个灾害过程的描述。

岩溶区燃气管道灾害系统内部多因素耦合作用强烈,孕灾环境促进灾害因子的形成及发育,灾害因子作用于承灾体产生各种危害效应,危害程度则以灾情的形式表征。孕灾环境是灾害发生的基础,其中人员不安全状态主要源于沿线居民和燃气工作人员在思想意识、专业技能、身体素质等方面的不足,管道不安全状态主要源于PE燃气管道及其附属设施先天或后天存在的缺陷,环境不安全状态主要源于社会经济发展引发的人类活动、社会氛围等,以及自然环境演化引发的地质特征、气象条件等,管理漏洞主要源于燃气企业在安全应急层面的运行机制和规章制度缺陷,活跃的孕灾环境是诱发灾害的外在原因。灾害因子是灾害发生时异变能量的直接来源,火灾、爆炸造成的热辐射和冲击波超压是导致危害后果的直接原因。承灾体是灾害因子能量的主要接收者,承灾体脆弱性主要取决于灾害影响下承灾对象可能出现的破坏形式及其本身对于灾害的抵御能力,提升承灾能力能够有效遏制灾害发生,但其依赖于足够的人力、物力及财力投入,然而不合理的资源投入会影响区域经济社会发展进程。灾情的严重性是衡量灾害危害水平的重要标准,孕灾环境越活跃、灾害因子越危险、承灾体越脆弱,灾害的破坏程度也就越大。

2 结论与建议

1)岩溶区燃气管道灾害的孕育和演化是孕灾环境活跃性、灾害因子风险性、承灾体脆弱性和灾情严重性共同作用的结果。其中,孕灾环境是灾害因子的孕育场所,其活跃性与人员、管道、环境不安全状态以及管理漏洞密切相关;灾害因子风险性主要取决于火灾、爆炸的危害强度-影响范围-发生概率-持续时间四者共同组成的客观现实;承灾体脆弱性主要受到社会-经济-自然承灾体三者脆弱性的耦合影响;岩溶区燃气管道灾情严重性主要包含人员伤亡程度、经济损失程度及环境破坏程度三个维度。

2)灾害因子时刻受到孕灾环境的影响,孕灾环境的活跃度越高,灾害因子风险性也随之增加;承灾体通常处于孕灾环境中,在承受灾害损伤的同时通过耦合作用影响灾害发生的外部环境;孕灾环境活跃性与灾情严重性相互影响、相互促进;

灾害因子与承灾体的耦合作用体现了灾害发生的直接过程;灾害因子与灾情的耦合作用表征了灾害后果及其危害程度的耦合关系;承灾体与灾情的耦合作用表征了灾害影响程度与危害主体间的对应关系,以及灾情严重性的关联因素如何与承灾体的脆弱程度产生联动。

基于以上对灾害系统多因素耦合作用机理的研究,提出以下岩溶区燃气管道灾害风险管控建议:

1)厘清多元耦合致灾机理,夯实灾害监测防控基础。推进岩溶塌陷勘探评估工作,降低自然孕灾环境不安全状态;提升PE燃气管道应险能力,降低管道本体易损性水平;加强岩溶区燃气管道灾害监测,精准控制孕灾环境活跃性;推动信息化管理设施建设,破解岩溶塌陷“隐蔽性”和管道灾害“突发性”难题;建立抢险抢修组织机构,弥补应急保障管理漏洞;开展灾情评估分析,明确抗灾设防新要求。

2)遏制灾害链式演化进程,提升灾害应急处置能力。加强岩溶区燃气管道巡查管理,切断多元致灾演化风险萌芽;控制火灾、爆炸等关键灾害因子,遏制灾害形成蔓延;制定灾害应急救援预案并定期演练,及时阻止灾害势态扩大;开展灾后恢复处理,推动承灾体正常运转,控制灾情子系统要素共振。

3)发挥多方主体协调作用,营造良好防灾减灾环境。加强管道保护行政执法力度,降低社会孕灾环境不安全状态;增强人员安全意识和管道保护意识,破解承灾体脆弱性与人员不安全状态的恶性循环;推动专业技能提升和队伍建设,增强承灾主体抗灾救灾能力;做好灾后相关主体安抚工作,减弱严重灾情与承灾体间的耦合激励。

参考文献:

- [1] LI Q C, HE S. Research on effect factors of mechanical response of cross-fault buried gas pipeline based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2021, 143(6): 061402.
- [2] 李乔楚,何沙.基于单元生死技术的岩溶区域PE管道应力分析[J].应用力学学报,2021,38(4):1512-1522.
- [3] 付姗姗,张悦,席永涛,等.多因素耦合下长江口水域交通事故致因链分析[J].中国安全科学学报,2023,33(3):60-67.
- [4] 郭跃.灾害复杂性的地理学阐释[J].灾害学,2020,35(3):1-7.
- [5] 王文和,刘林精,董传富,等.城市埋地燃气管道泄漏火灾致因耦合分析[J].消防科学与技术,2019,38(3):430-433.
- [6] 吴远斌,刘之葵,殷仁朝,等.湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律[J].中国岩溶,2022,41(5):759-772,807.
- [7] 孙增芹,顾伶俐.我国油气管道突发事件应急法律制度的困境与完善路径[J].中国石油大学学报(社会科学版),2022,38(6):79-87.
- [8] 亢永,吕鹏飞,庞磊.城市燃气管道泄漏爆炸事故三维风险数值模拟[J].安全与环境学报,2016,16(4):112-115.
- [9] 岳清瑞,陆新征,许镇,等.基于“风险源+承灾体+减灾体”的城市安全表征“库-网-流-谱-法”理论框架[J].工程力学,2022,39(11):52-62.
- [10] 孔锋.四论灾害防御能力的基本定义与特征探讨[J].灾害学,2023,38(2):37-41.
- [11] 张博骥,马东辉,王威.城市控规单元防灾能力评价的有向加权图模型研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(3):13-19.
- [12] 李天祺,赵振东,余世舟.城市危险源爆炸灾害应急损失评估研究[J].安全与环境学报,2012,12(1):260-264.
- [13] 纪北,王向阳,向阳.基于FDS的危险化学品仓库池火灾模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(S1):81-85.
- [14] IPCC. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kyoto: IGES, 2019.
- [15] 王树山.终点效应学(第2版)[M].北京:科学出版社,2019.
- [16] 蔡勤禹,姜志浩.新中国成立以来我国应对重大灾害体制变迁考察[J].中国应急管理科学,2021(3):22-30.

Study on the Multifactor Coupling Action Mechanism of Gas Pipeline Disaster System in Karst Area

LI Qiaochu, CHEN Junhua

(School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on the disaster system theory, from the systematic perspective of disaster pregnant environment, disaster factors, disaster bearing body and disaster condition, the system dynamics model is used to explore the coupling relationships within and among subsystems of the gas pipeline disaster system in karst area. Considering the differential transmission path among multiple factors, the action mechanism and influence rules of multiple factors coupling in the disaster evolution process are deeply analyzed. The results show that: The activity of disaster pregnant environments is closely related to the unsafe state of personnel, pipelines, and the environment, as well as management vulnerabilities; the risk of disaster factors is affected by the combined effects of the probability, intensity, scope, and duration of fire and explosion hazards; the vulnerability of disaster bearing body is affected by the coupling of society, economy and nature disaster bearing body; the severity of the disaster includes three dimensions: the degree of casualties, the degree of economic losses, and the degree of environmental damage. The incubation and evolution of gas pipeline disasters in karst areas is the result of the combined action of four subsystems. The coupling between two or three subsystems represents different stages of disasters, while the coupling of four subsystems describes the entire disaster process.

Keywords: karst area; gas pipeline; disaster system; multi factor coupling; action mechanism

(上接第 227 页)

- [21] 雷楠, 汪妮, 解建仓, 等. 城市河流脆弱性诊断体系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(1): 39–45.
- [22] 陈长坤, 孙凤琳. 基于熵权-灰色关联度分析的暴雨洪涝灾情评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6): 1067–1073.
- [23] 洪烽, 曾智勇, 周琬婷, 等. 基于主观赋权法的控制系统优化研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(15): 20–21, 73.
- [24] 俞立平. 客观赋权法本质及在科技评价中的应用研究: 以学术期刊为例[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(2): 50–56.
- [25] 夏文飞, 苏屹, 支鹏飞. 基于组合赋权法的高新技术企业创新能力评价研究[J]. 东南学术, 2020(3): 153–161.
- [26] 方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 234–247.
- [27] 南京市统计局, 国家统计局. 南京市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2008–2019.
- [28] 孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 609–623.
- [29] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 1–10.
- [30] 侯纯光, 程钰, 任建兰, 等. 环渤海地区城市脆弱性时空格局演变及其障碍因素研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(1): 1–9.
- [31] 倪龙臻, 陈文汇. 黄河流域国有林场综合发展水平评价与障碍因子分析[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2022(4): 24–32.

Assessment of Urban Vulnerability in Extreme Rainstorm Scenarios

CHENG Yaya, GAO Yuqin, LIU Yunping, XU Longsheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In recent years, the frequency of extreme rainstorms has been on the rise, and in the face of the huge property losses and casualties brought by extreme rainstorms to cities, evaluating urban vulnerability and determining the city's ability to cope with heavy rainfall is an important direction in vulnerability research. By elaborating the connotation and characteristics of urban vulnerability, we analyze the main influencing indicators of urban vulnerability under extreme rainstorm scenarios, construct an urban vulnerability assessment index system under extreme rainstorm scenarios from three aspects: sensitivity, vulnerability and response capacity, and constructs a grey correlation evaluation model based on AHP-entropy weight method by using AHP, entropy weight method and grey correlation method, and finally takes Nanjing area in the Qinhuai River Basin as an example for case analysis. The results showed that the urban vulnerability of Nanjing under extreme rainstorm conditions was medium to low. Among the indicators related to extreme rainstorm conditions, the longest flood inundation duration and peak flood storage capacity are the main factors affecting the urban vulnerability of Nanjing. The main obstacles to urban vulnerability in Nanjing are: per capita local fiscal expenditure, built-up area drainage pipe density, centralized urban sewage treatment rate, and per capita gross regional product.

Keywords: extreme rainstorm; urban vulnerability; AHP-entropy weight method; grey relational degree; obstacles