

Natech 风险研究: 现状、理论及展望

马宗伟, 高 越, 毕 军*

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏南京 210023)

【摘要】 由自然灾害引发的工业企业环境安全事故又称为自然灾害诱发的技术事故 (Natech)。我国是工业大国, 重化工业是我国的主导产业之一; 同时我国还是世界上自然灾害严重的国家之一, Natech 风险不容忽视。开展 Natech 风险识别、评估和管理研究, 有助于我国 Natech 风险管理体系的完善, 防范和降低区域 Natech 风险。目前, 我国 Natech 风险基础研究尚处于起步阶段, 难以支撑我国 Natech 风险防控实践。本文从 Natech 风险发生机制、风险评估、风险感知与最大可接受风险水平、风险管理体系等四个方面回顾了国内外 Natech 风险研究现状, 初步梳理了 Natech 风险的基本理论, 并对我国未来 Natech 风险的研究方向进行了展望, 为我国 Natech 风险研究领域的发展提供参考。

【关键词】 自然灾害; 技术事故; Natech 风险; 研究现状; 研究展望

【中图分类号】 U445.7+5; TM623.8; X820.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2020) 02-0069-07

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.02.069

引言

近 40 年来, 我国社会与经济高速发展, 工业化和城市化取得了举世瞩目的成就。与此同时, 由于环境安全防控体系不完善, 各类突发环境事故频发, 对群众生命财产、生态环境、社会稳定造成了严重的威胁。在引发工业企业环境安全事故的众多因素中, 自然灾害是一个重要的诱因。自然灾害极易引发次生的区域性安全生产事故以及大气、水、土壤等污染事故, 从而增加工业企业的环境安全风险。这种风险被称为自然灾害诱发的技术事故 (Natural hazard triggered technological accident) 风险 (简称 Natech 风险)。Natech 风险事件往往后果严重、破坏性强、应对复杂, 近年来逐渐成为人们关注的风险问题。

我国幅员辽阔, 自然灾害种类多, 发生频率高, 分布地域广, 是世界上自然灾害严重的国家之一。同时, 我国也是一个工业大国, 重化工业是我国的主导产业之一, 重大风险源布局不合理的现象仍然存在。许多重化工业布局在自然灾害频发的区域, 使得区域面临自然灾害和环境安全事故双重风险的叠加, 由各种自然灾害诱发的次生环境安全事故风险不容忽视。开展 Natech 风险的识别、评估和管理研究对于完善我国 Natech 风险管理体系、防范和降低区域 Natech 风险有重要意义。

近年来, 我国针对自然灾害风险和环 境安全风险 管理分别开展了大量的工作, 但两者的管理是相对脱节的, 没有形成专门的、系统的 Natech 风险管理制度和体系。其中一个重要原因是我国的 Natech 风险基础研究还十分缺乏, 尚处于起步阶段, 难以支撑我国 Natech 风险防控实践。为此, 本文对国内外 Natech 风险研究现状进行了综述, 在此基础上初步梳理了 Natech 风险研究的基础理论, 并对我国未来 Natech 风险研究方向进行了展望, 以期为我国 Natech 风险研究领域的发展提供参考。

1 国内外 Natech 风险研究现状

在过去几十年中, 全球 Natech 事件的发生频率和严重程度均有所增加, 并且重大 Natech 事件时有发生, 如 2005 年美国卡特里娜飓风和丽塔飓风导致的工厂储罐大量原油泄漏和扩散^[1], 2008 年中国汶川地震造成的大片化工厂管道断裂、化学品泄漏^[2], 2011 年日本地震引发的福岛核泄漏事故^[3]等。Natech 事件的频发使得 Natech 风险成为国内外研究重点之一^[4]。目前与 Natech 风险相关的研究涉及范围较广, 大致可归纳为以下四个方面。

1.1 Natech 风险发生发展机制研究

典型风险事故案例剖析是研究风险发生发展机制

资助项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目 (71921003); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (71761147002)。

作者简介: 马宗伟 (1981—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为环境风险管理, E-mail: zma@nju.edu.cn。

*** 责任作者:** 毕军 (1967—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为环境风险防控、环境管理, E-mail: jbi@nju.edu.cn。

的重要手段之一,一些学者针对典型的重大 Natech 事件开展了研究。如 2005 年美国卡特里娜飓风和丽塔飓风,引发了陆上工业设施、仓储码头以及墨西哥湾近海油气生产设施的有害物质大量释放,一些学者针对该 Natech 事件过程及应急响应开展了研究,为以后更好地应对飓风 Natech 风险提供了参考^[1,5]。Yu 等通过实地访问和调查等方式,研究了 2011 年日本东部大地震和海啸事件对工业园区的影响过程^[6]。典型的 Natech 案例研究还包括 1999 年土耳其科贾埃利省地震^[7]、2002 年中欧洪水^[8]、2017 年美国哈维飓风^[9]等。

针对我国的典型 Natech 事件,有学者研究了 2008 年汶川地震^[2]对工业设施的影响,包括大片化工厂管道断裂、化学品泄漏等。但总体看,我国典型 Natech 事件案例研究较少。对区域风险案例库的剖析,也是理解区域风险发生机制的重要手段之一。Cao 等基于 2006—2015 年 1369 起原环境保护部参与调度的突发环境事件案例库资料,从风险源特征(风险物质及所属国民经济行业)、风险控制机制失效原因、事件造成损害等方面进行讨论,归纳总结出我国突发环境事件风险的特征规律^[10],其中风险控制机制失效原因中包括了自然因素,但并未进行进一步的深入分析。

总体而言,目前国内外针对 Natech 事件案例有着较多的研究,这些案例对于理解 Natech 风险发生发展机制及提出防控措施有着重要作用,但仍需要在理论上进行进一步的梳理总结。盖程程等在 Natech 风险评估文献回顾基础上,梳理了灾害链和灾害链式理论研究进展^[11];薛晔等提出了一个耦合不同灾害风险的形成机理^[12],但并未对 Natech 风险的形成机理进行有针对性的探讨。由于 Natech 风险类型众多,不同自然灾害类型引发的技术事故的发生发展机理都有差异,因此仍然需要累积更多的案例研究,并在此基础上针对不同类型 Natech 事件特征,开展系统性的总结研究,以在理论上提升对 Natech 风险发生发展机制的认识。

1.2 Natech 风险评估研究

风险评估是风险优先级识别及实现风险优先管理的重要基础,在过去的研究中,许多学者开展了不同层面的 Natech 风险评估研究。

在企业层面, Chiaia 等研究了地震引发意大利某炼油厂和石油矿床 Natech 事件的潜在风险,提出了一个评估框架对地震 Natech 风险进行建模和量化,并应用于意大利 250 多个项目的地震 Natech 风险评估^[13]。

Antonioni 开发了一种 Natech 风险定量评估的方法,用于识别地震引发的企业次生事故中的关键工业设施设备^[14]。导致企业 Natech 风险事件发生的可能是单致灾因子,也可能是多致灾因子,不同致灾因素会对企业产生不同的影响。Antonioni 等提出地震和洪水引发的 Natech 风险评估框架,用来识别工艺设备不同的损坏模式及可能触发的意外情况,从而为风险管控提出建议^[15]。

在区域层面, Cruz 和 Okada 提出了一种定性方法来评估城市地区的 Natech 风险,以便告知居民自然灾害可能导致的技术事故^[16]。Cozzani 和 Antonioni 等提出了一种定量评估的方法,对工业区的 Natech 风险和多米诺效应开展研究^[17,18]。Alvarado-Franco 等评估了区域滑坡引发的潜在管道故障风险,并实现了风险水平的可视化^[19]。一些研究则基于空间分析模型和地球观测技术对 Natech 风险的趋势和规律进行探索和研究。例如,有学者利用森林火灾的空间参数来建模预测和评估火灾引发的 Natech 风险^[20],通过 GIS 辅助对 Natech 风险的空间扩散分布进行研究,进而识别潜在的高风险区域。Di Franco 等利用地球观测技术来评估分析区域 Natech 风险,通过不同遥感平台获取地球观测数据来评估风险的时空分布特征,研究认为这在灾害监测、Natech 风险防范和风险管理中有重要作用^[21]。

在我国,也有许多学者开展了不同层面的 Natech 风险评估。Han 等借助层次分析法和模糊评估模型开发了一种 Natech 风险评估指标体系,以浙江某化工厂为例探讨各种因素对 Natech 风险的影响,提出加强应急准备对降低 Natech 风险至关重要^[22]。陈国华等以某化工园区为例,应用统计数据及数学模型,通过对比不同网络节点对系统扰动值的影响程度,对园区开展断链减灾分析^[23]。程玉龙等开发了化工园区 Natech 风险定量评价方法,提出地震灾害引发的 Natech 事故中设备泄漏的概率模型^[24]。马海关等对连云港地震的 Natech 风险开展了评估,识别了高风险区域并提出了风险应对措施^[25]。Yang 等以四川为例评估了地震导致的点源和非点源水污染,结合水质指数和震害指数方法构建了综合水污染评估框架,研究结果对于城市规划和企业战略选址具有重要意义^[26]。盖程程等则从损失模型、评估指标体系和预警时间指标等三个方面,比较系统地回顾了国内外 Natech 风险评估研究进展^[11]。

从现有的 Natech 风险评估研究看,绝大部分研究重点关注了风险失效关键节点的识别与风险直接后

果。由于区域 Natech 风险会引发连锁反应, 进一步影响社会经济各要素; 同时, 社会经济系统的响应方式反过来也会影响 Natech 风险水平。所以结合社会经济要素对 Natech 风险评估是 Natech 风险管理政策制定中的重要一环, 然而目前这一方面的研究还比较欠缺。另外, 现有研究主要针对企业和小尺度区域的典型 Natech 风险评估开展了研究, 针对较大尺度(如流域、全国尺度)、多致灾因子(洪水、地震、台风等)的综合性 Natech 风险评估与识别研究还处于空白, 开展此类研究有助于我国宏观层面的 Natech 风险管理, 可以识别区域 Natech 风险管理的热点区、重点管理灾害类型、重点保护人群等, 为 Natech 风险优先管理提供支撑。

1.3 公众 Natech 风险感知及最大可接受风险水平研究

风险感知是用来描述人们对客观风险的态度和判断的一个概念, 由于公众主观的风险感知与客观风险水平可能存在着偏差, 这会直接影响风险管理决策和防治措施的实施。目前学界对很多风险类型的公众风险感知开展了研究。对于 Natech 风险感知, Yu 等针对 2011 年日本大地震和海啸期间仙台一个工业园区 Natech 风险, 对区域住户的风险感知和自我保护行为进行了调查, 结果发现居住在 Natech 事件附近的人倾向于立即撤离, 而居住在较远的人则倾向于就地避难^[27]。这项研究提高了对 Natech 事件中家庭行为的认识, 可以帮助应急管理人员更好地制定疏散策略。总体而言, 目前国内外对 Natech 风险感知的相关研究都还十分缺乏。

公众可接受风险水平也是风险研究的重要方面, 是风险管理目标制定的基础。如美国食品药品监督管理局综合考虑社会、科学和经济利益三者之间的关系后, 将可接受致癌风险水平定为 10^{-6} ^[28]。不同国家分别制定了各自土壤污染健康风险的可接受风险水平^[29]。在我国, 最大可接受风险水平也有了初步应用^[30], 原国家安全总局 2014 年发布《危险化学品生产、存储企业的个人可接受风险标准和社会可接受风险标准(试行)》, 给出了不同类型区域新建、在役装置的可接受风险水平标准。此外, 2014 年发布的《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014) 提出了污染场地推荐的可接受非致癌风险商为 1, 可接受致癌风险水平为 10^{-6} 。但目前针对 Natech 风险的可接受风险水平研究还处于空白。

从现有研究看, 目前针对 Natech 风险感知和可接受风险水平的研究和实践还十分有限, 亟待开展相关

研究, 为 Natech 风险管理及目标制定提供支撑。公众风险感知和最大可接受风险水平是一个动态概念, 在不同风险类型之间会存在差异, 在不同国家和地区、同一国家和地区的不同时段也是不同的^[31], 所以在 Natech 风险感知和可接受风险水平研究中需综合分析 Natech 风险的时空动态特征、不同 Natech 风险类型的差异。

1.4 Natech 风险管理体系研究

国外关于 Natech 风险的研究相对比较早, 也较为成熟, 因此对 Natech 风险管理的重视程度也相对较高。欧盟出台了相关涉及 Natech 风险的法律规范, 例如, 塞维索关于控制重大事故危害的指令(Directive 2012/18/EU)中, 提出了工业企业安全评估文档中必须包括自然灾害的影响。欧盟还针对 Natech 风险预防、应急准备和响应等需求, 对各成员国提供了详细的指导, 通过这些指导使 14 个欧盟成员国的 Natech 风险水平得到了不同程度的降低^[32]。经济合作与发展组织在“预防、准备和应对化学品事故指导原则”中, 制定了 Natech 事件的预防和应对指导原则^[33]。

相较于国际上 Natech 风险管理, 我国尚未形成专门的管理机制和管理政策。当前我国涉及 Natech 风险的相关管理体系主要包括自然灾害管理体系、安全生产管理体系、环境风险管理体系等。因为 Natech 事件的复杂性, 现有自然灾害、安全生产和环境风险管理体系在应对 Natech 风险管理时会存在局限性。总体而言, 我国尚未形成专门的 Natech 风险管理体系, 缺乏 Natech 风险的预警、快速响应机制和应急体系, 上下级政府、城市之间也缺乏相关的整合机制。

2 Natech 风险基础理论初探

Natech 风险基础理论是开展 Natech 风险研究、风险管理的重要基础。虽然国内外学者针对 Natech 风险已经开展了一系列的研究, 但对 Natech 风险基础理论还缺乏系统梳理和总结。本文在 Natech 风险研究现状总结的基础上, 结合其他相关风险理论(如自然灾害及环境风险理论)等, 对 Natech 风险的相关基础理论进行梳理, 为 Natech 风险基础理论的深入研究抛砖引玉。

2.1 风险系统理论

任何一类风险都是一个独特的系统, 理解风险系统的组成对于风险研究和管理至关重要。从 Natech 风险定义来看, 其涉及自然灾害和由自然灾害诱发的

次生环境安全事故,因此了解灾害系统和环境风险系统理论,可以在一定程度上理解 Natech 风险系统的内涵。

史培军提出了灾害系统理论^[34,35],他认为灾害是地球表层孕灾环境(主要指孕育产生灾害的自然环境与人文环境的变化,如气候与地表覆盖的变化、物质文化环境的变化等)、致灾因子(包括自然致灾因子如地震、火山、台风、洪水等,也包括人为致灾因子如战争、动乱、危险品爆炸、核外泄等)、承灾体(致灾因子作用的对象,是人类及其活动所在的社会与各种资源的集合)综合作用的产物。毕军等提出了环境风险系统理论^[31,36],该理论把环境风险系统分为风险源、风险控制机制(包括初级和次级控制机制)和风险受体三大部分。该理论提到,引发风险初级控制机制失效的众多原因中就包括了自然灾害,因此,环境风险系统理论在一定程度上是适用于 Natech 风险的。

结合灾害系统和环境风险系统理论,可以认为 Natech 风险系统包括自然致灾因子、风险源、控制机制、风险受体等四大部分。Natech 风险实际上是一个链发事件,自然灾害首先影响风险源致使其控制机制的失效。因此风险源在自然灾害系统中实际上一个承灾体,在次生的环境安全灾害系统中则是一个致灾因子。而风险受体则是指次生环境安全事件所影响的对象如人、生态环境等。这是本文的初步判断,还需要对 Natech 风险系统的组成及各部分之间的作用机理进行深入研究。

2.2 风险场与风险全过程理论

上面提到,Natech 风险是自然灾害引发的次生事故,实际上是一个灾害链。因此,灾害链是理解 Natech 风险危害形成和发展的重要理论。史培军^[34,37]将灾害链定义为由某一种致灾因子或生态环境变化引发的一系列灾害现象,分为串发和并发两类。关于灾害链,国内外许多学者都有较为深入和系统的讨论^[11]。毕军等首次提出了环境风险场概念,从“风险场”角度探讨了环境风险的发生发展规律^[31],认为环境风险在时空上以“场”的形式存在,并会呈现一定的时空变化规律,风险源释放的风险因子呈现有规律的时空分布并与受体叠加,从而产生不同的危害。此外,多个风险事件的风险场在时空上叠加会呈现不同的效应,包括空间维度上的“协同”“加和”“拮抗”“独立”等效应,以及时间维度上的“链发”“群发”“次生”“时滞”“放大”等效应等。“风险场”理论包含

了灾害链理论,但内涵更广泛,这为我们更深入地认识 Natech 风险机制提供了一个更广泛、更深入的理论基础。

毕军等还在风险场理论的基础上,进一步提出了涵盖“社会需求—风险源形成—风险因子释放与传播—受体暴露—风险损害后果”的环境风险全过程理论^[10,31]。该理论同样适用于 Natech 风险分析与管理,但针对自然灾害如何影响风险源,从而造成风险因子释放和传播这一过程,不同自然灾害的风险传递机理和过程是不一样的,还需要开展进一步的研究。此外,由于自然灾害对地表空间的破坏,风险因子的传播过程、受体空间分布特征均不同于非自然灾害时的状况,这也需要进行深入探讨。

2.3 风险优先管理理论

Natech 风险类型复杂多样,不同地区、不同时段的风险形势也存在较大差异;同时,风险管理的人力、物力、财力等各类资源是有限的,因此在 Natech 风险管理时需要树立优先管理的理念,而 Natech 风险分析与评价则是识别区域 Natech 风险管理优先序的重要基础。毕军等根据管理对象、管理空间尺度的不同,将环境风险管理的优先序分为四类^[38]:①优先管理的风险类型;②优先管理区;③优先管理风险源(企业);④优先管理环节。该理论同样适用于 Natech 风险优先管理,但需要多尺度、多致灾因子的 Natech 风险评估的支撑。

3 我国未来 Natech 风险研究展望

目前,国内外学者针对 Natech 风险已经开展了一系列的研究。与国外研究相比,国内研究总体来看还比较薄弱,尚处于起步阶段,亟须进一步开展 Natech 风险研究,提升我国 Natech 风险研究水平,为我国 Natech 风险管理体系的构建提供技术支撑。为此,本文在对现有研究存在问题进行总结的基础上,对我国未来 Natech 风险研究进行了展望。

3.1 Natech 风险成因机制和基础理论研究

在我国,目前有关自然灾害风险以及区域环境安全风险这两类风险的成因机制及管理理论均有着较为成熟的研究,但是针对两者的耦合,即 Natech 风险的成因机制及基础理论的系统性研究则较少。不同类型的 Natech 风险成因机制有何特征和差异?当前自然灾害风险和区域环境安全风险的相关理论方法是否适用于 Natech 风险?本文虽然初步梳理了 Natech 风险的

基础理论，但还亟待系统性的总结以及理论上的提升研究。因此，需要在对典型 Natech 事件案例研究的基础上，结合 Natech 风险评估、Natech 风险与社会经济关系、公众风险感知研究等，对 Natech 风险发生发展过程机制及基础理论展开系统的研究，为我国 Natech 风险研究及管理提供理论基础。

3.2 大尺度、多致灾因子 Natech 风险评估与管理优先级识别研究

风险评估是风险管理优先序识别、实现风险优先管理的重要基础，过去研究大多针对企业和小尺度区域的典型 Natech 风险评估开展，而针对较大尺度（如流域、全国尺度）、多致灾因子（洪水、地震、台风等）的综合性 Natech 风险评估与识别研究还处于空白。在我国当前经济快速发展、自然灾害多发的大背景下，需要开展大尺度、多致灾因子的 Natech 风险综合性评估，特别是对于长江经济带这样高度工业化并且自然灾害频发的区域。通过风险评估可以厘清我国 Natech 风险水平现状特征，识别 Natech 风险管理优先级（如风险管理的热点区、重点管理灾害类型、重点保护人群等），为 Natech 风险优先管理决策提供科学依据，为国家和区域宏观层面的 Natech 风险管理提供支撑。

3.3 耦合社会经济要素的 Natech 风险评估研究

Natech 事件往往会产生多米诺效应，通过一系列的连锁反应对社会经济要素产生影响，而社会经济因素又会对 Natech 风险水平造成影响。从现有 Natech 风险评估研究看，绝大部分研究重点关注了风险失效关键节点识别与风险直接后果，耦合社会经济要素的 Natech 风险评估研究仍然比较缺乏。这主要包括两个方面的研究：一方面需要研究多尺度 Natech 风险对社会经济系统各要素的影响，包括对经济、文化、社会稳定、公众心理等方面的影响；另一方面，需要研究社会经济驱动力对 Natech 风险水平的影响，包括产业结构与布局、政府治理体系、公共管理水平等方面。

3.4 Natech 风险感知与可接受风险水平研究

在 Natech 风险管理中，不仅要考虑实际风险水平，还必须考虑公众 Natech 风险感知和可接受风险水平，这是因为公众主观的风险感知与客观风险水平可能会存在偏差，从而影响风险管理决策。因此，需要在我国 Natech 风险评估和管理优先级筛选的前提下，选择需要优先管理的 Natech 风险类型，综合考虑不同

区域、不同年龄、性别、受教育水平、职业等人群的差异性，开展多尺度的公众风险感知和可接受风险水平研究。

3.5 Natech 风险管理目标研究

风险管理目标的确定是风险管理的基础，科学合理的管理目标有利于合理地分配资源、提出科学的管控措施。目前我国 Natech 风险管理目标研究还处于空白，也尚未形成 Natech 风险管理目标体系。由于 Natech 风险的复杂性，Natech 风险管理目标与 Natech 风险评估结果、社会经济因素、公众风险感知、公众最大可接受风险水平等都有直接的关系。当前我国对于 Natech 风险还没有开展过系统性的研究，从而也限制了 Natech 风险管理目标的研究。为此，需要在 Natech 风险评估、社会经济影响、公众风险感知与可接受风险水平等研究的基础上，为不同区域、不同发展阶段、不同类型的 Natech 风险管理寻求一套具有差异性的风险管理目标体系。

3.6 Natech 风险管理体系及管理战略研究

相较于发达国家对 Natech 风险管理程度，我国 Natech 风险管理尚处在初步阶段，没有形成专门的管理机制和政策措施。因此，亟须在厘清我国当前涉及 Natech 风险的相关管理体系和政策制度现状的基础上，开展国内外 Natech 风险管理体系比较研究。通过研究分析国内外 Natech 风险管理的差异性以探索出适合我国的 Natech 风险管理政策措施，进一步研究构建和完善我国的 Natech 风险管理体系。此外，风险管理体系的构建与完善是一个长期的过程，需要进一步研究我国 Natech 风险管理体系构建与完善的路线图，形成我国 Natech 风险管理战略。

3.7 重大突发事件冲击下环境风险链研究

Natech 风险是指由自然灾害诱发的环境风险，其本质性上是一个风险链问题。在现实社会中，除了自然灾害以外，往往还存在其他可能诱发环境风险的重大突发事件。例如，2019 年末至 2020 年初爆发的新冠肺炎疫情，在疫情应对过程中产生了大量的医疗危险废物，形成了供水系统的风险压力等，如何防范和应对短时间内产生的大量特殊胁迫所造成的环境风险，是对政府环境风险应急能力的一个重大考验。因此，有必要研究各类重大突发事件（包括突发自然灾害、公共卫生事件、社会安全事件等）冲击下的环境风险系统的演化机制，识别不同类型环境风险链中的

敏感因子, 建构环境风险抗压力和恢复体系, 形成多环境风险优先序分析方法和协同管理机制, 提升我国环境风险防控和应急能力。

4 结语

开展 Natech 风险研究有助于我国 Natech 风险管理体系的完善, 防范和降低区域 Natech 风险; 了解 Natech 风险国内外研究现状和进展, 找出国内 Natech 风险研究存在的问题与差距, 对于推进我国 Natech 风险领域的研究有着参考意义。本文从 Natech 风险发生机制、风险评估、风险感知与最大可接受风险水平、风险管理体系等四个方面对国内外 Natech 风险研究现状进行了梳理, 在此基础上初步总结了 Natech 风险管理的基础理论, 提出了我国未来 Natech 风险的研究方向, 为我国 Natech 风险研究领域的发展提供参考。

参考文献

[1] CRUZ A M, KRAUSMANN E. Hazardous-materials releases from offshore oil and gas facilities and emergency response following Hurricanes Katrina and Rita[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2009, 22(1): 59-65.

[2] KRAUSMANN E, CRUZ A M, AFFELTRANGER B. The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2010, 23(2): 242-248.

[3] TEN HOEVE J E, JACOBSON M Z. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident[J]. *Energy & environmental science*, 2012, 5(9): 8743-8757.

[4] SUAREZ-PABA M C, PERREUR M, MUNOZ F, et al. Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades[J]. *Safety science*, 2019, 116: 58-77.

[5] RUCKART P Z, ORR M F, LANIER K, et al. Hazardous substances releases associated with Hurricanes Katrina and Rita in industrial settings, Louisiana and Texas[J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 159(1): 53-57.

[6] YU J L, CRUZ A M, PIATYSZEK E, et al. A survey of impact on industrial parks caused by the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2017, 50: 317-324.

[7] STEINBERG L J, CRUZ A M. When natural and technological disasters collide: lessons from the Turkey earthquake of August 17, 1999[J]. *Natural hazards review*, 2004, 5(3): 121-130.

[8] ULBRICH U, BRÜCHER T, FINK A H, et al. The central European floods of August 2002: Part 1 – Rainfall periods and flood development[J]. *Weather*, 2003, 58(10): 371-377.

[9] MISURI A, CASSON MORENO V, QUDDUS N, et al. Lessons learnt from the impact of hurricane Harvey on the chemical and process industry[J]. *Reliability engineering & system*

safety, 2019, 190: 106521.

[10] CAO G Z, YANG L, LIU L X, et al. Environmental incidents in China: Lessons from 2006 to 2015[J]. *Science of the total environment*, 2018, 633: 1165-1172.

[11] 盖程程, 翁文国, 袁宏永. Natech 事件风险评估研究进展 [J]. *灾害学*, 2011, 26(2): 125-129.

[12] 薛晔, 刘耀龙, 张涛涛. 耦合灾害风险的形成机理研究 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 44-50.

[13] CHIAIA B, DE BIAGI V, ZANNINI QUIRINI C, et al. A framework for NaTech seismic risk assessment in industrial plants[J]. *International journal of forensic engineering*, 2016, 3(1-2): 86-105.

[14] ANTONIONI G, SPADONI G, COZZANI V. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events[J]. *Journal of hazardous materials*, 2007, 147(1-2): 48-59.

[15] ANTONIONI G, BONVICINI S, SPADONI G, et al. Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events[J]. *Reliability engineering & system safety*, 2009, 94(9): 1442-1450.

[16] CRUZ A M, OKADA N. Methodology for preliminary assessment of Natech risk in urban areas[J]. *Natural hazards*, 2008, 46(2): 199-220.

[17] ANTONIONI G, SPADONI G, COZZANI V. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2009, 22(5): 614-624.

[18] COZZANI V, ANTONIONI G, LANDUCCI G, et al. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2014, 28: 10-22.

[19] ALVARADO-FRANCO J P, CASTRO D, ESTRADA N, et al. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides[J]. *Engineering geology*, 2017, 222: 212-224.

[20] NADERPOUR M, RIZEEI H M, KHAKZAD N, et al. Forest fire induced Natech risk assessment: a survey of geospatial technologies[J]. *Reliability engineering & system safety*, 2019, 191: 106558.

[21] DI FRANCO S, SALVATORI R. Current situation and needs in man-made and natech risks management using Earth Observation techniques[J]. *Remote sensing applications: society and environment*, 2015, 1: 72-84.

[22] HAN R R, ZHOU B H, AN L Y, et al. Quantitative assessment of enterprise environmental risk mitigation in the context of Na-tech disasters[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2019, 191(4): 210.

[23] 陈国华, 邹梦婷. 化工园区多灾种耦合关系模型及断链减灾模式 [J]. *化工进展*, 2018, 37(8): 3271-3279.

[24] 程玉龙, 罗云, 师立晨, 等. 化工园区 Na-Tech 风险定量评价方法 [J]. *化工进展*, 2019, 38(S1): 283-287.

[25] 马海关, 刘付程, 孟耀斌. 地震引发环境灾害风险示例研究——

- 以连云港市化工园区为研究区域 [J]. 淮海工学院学报 (自然科学版), 2018, 27(3): 49-54.
- [26] YANG Y, LI L, ZHAN F B, et al. Probabilistic analysis of earthquake-led water contamination: a case of Sichuan, China[J]. Pure and applied geophysics, 2016, 173(6): 1859-1879.
- [27] YU J L, CRUZ A M, HOKUGO A. Households' risk perception and behavioral responses to natech accidents[J]. International journal of disaster risk science, 2017, 8(1): 1-15.
- [28] 尚志海, 刘希林. 国外可接受风险标准研究综述 [J]. 世界地理研究, 2010, 19(3): 72-80.
- [29] 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 等. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 [J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1667-1678.
- [30] 毕军, 马宗伟, 曲常胜. 我国环境风险管理目标体系的思考 [J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 1-5.
- [31] 毕军, 杨洁, 李其亮. 区域环境风险分析和管理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [32] KRAUSMANN E. Analysis of Natech Risk Reduction in EU Member States Using a Questionnaire Survey[R]. Report EUR, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [33] OECD. Addendum Number 2 to the OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response (2nd Ed.) to Address Natural Hazards Triggering Technological Accidents (Natechs)[R]. Series on Chemical Accidents. Paris: OECD, 2015.
- [34] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
- [35] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [36] 毕军, GREENE G. 生态环境风险管理研究 [R]. 北京: 中国环境与发展国际合作委员会专题政策研究项目报告. 2015.
- [37] 史培军. 论灾害研究的理论与实践 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 1991(11): 37-42.
- [38] 毕军, 马宗伟, 杨蕾, 等. 中国环境风险优先管理: 现状及未来战略 [M]// 李金惠. 中国环境管理发展报告 (2017). 北京: 社会科学文献出版社, 2017.

Natech Risk Research: Status, Theory and Prospect

MA Zongwei, GAO Yue, BI Jun*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Environmental and safety incidents of industrial enterprises caused by natural disasters are also called natural hazard triggered technological accidents (Natech). China is a highly industrialized country and the heavy chemical industry is one of the leading industries. At the same time, China is one of the countries with severe natural disasters in the world. The Natech risk in China could not be ignored. To carry out relevant studies on Natech risk identification, assessment and management will help to improve the Natech risk management system, and prevent and reduce regional Natech risks in China. At present, Natech risk research in China is still in its early stage, which cannot support the practice of Natech risk management in China. In this paper, we reviewed the research status of Natech risk at home and abroad from four aspects, namely, the risk occurrence mechanism, risk assessment, risk perception and maximum acceptable risk level, and risk management system. On this basis, we preliminarily summarized the basic theories for Natech risk management. We then proposed the research prospects of Natech risk, so as to provide references for the development of Natech risk research in China.

Keywords: natural hazard; technological accident; Natech risk; research status; research prospects