

胡丽条, 高越, 倪平, 等. 我国沿海地区台风引发的工业企业 Natech 风险评估 [J]. 灾害学, 2021, 36(3): 227–234.
[HU Litiao, GAO Yue, NI Ping , et al. Natech Risk Assessment of Industrial Enterprises Triggered by Typhoon in Coastal Regions of China [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 227–234. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.039.]

我国沿海地区台风引发的工业企业 Natech 风险评估^{*}

胡丽条¹, 高 越¹, 倪 平¹, 毕 军¹, 曹国志², 马宗伟¹

(1. 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;
2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 为了解我国沿海台风引发的工业企业 Natech 风险总体特征, 对我国沿海台风 Natech 风险进行评估, 以期为环境风险管理、防灾减灾规划提供科学依据。基于风险系统理论, 建立致灾因子危害性、风险源危险性、受体敏感性及控制机制有效性四个维度的风险评估指标体系, 运用层次分析法得到我国沿海台风 Natech 综合风险评估结果。研究发现, 我国沿海台风 Natech 综合风险为高风险及以上的地市占 36.84%, 中等风险占 21.93%。邻近南海和东海的地市受台风影响最大, 加之工业企业与人口密集, 珠三角、长三角及福建沿海部分地市台风 Natech 综合风险极高。

关键词: 台风; 工业企业; Natech; 风险评估; 层次分析法; 我国沿海地区

中图分类号: X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)03–0227–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.039

由自然灾害导致的次生环境安全事故又称为自然灾害诱发的技术事故(简称 Natech)^[1]。Natech 研究重点关注储存危险物质的工业企业, 当工业企业受到自然灾害的破坏, 会引发级联效应^[2–3], 造成有毒有害危险物质的释放, 引起火灾、爆炸等次生环境安全事故, 影响人群健康, 造成生态破坏、财产损失, 对经济社会的正常运转产生危害^[3–5]。Natech 事件与其他技术事故(如机械故障等)相比发生频率低, 但因级联效应具有重大影响和高复杂度^[6]。近年来, 我国受台风灾害影响较大、工业企业安全生产事故频发, 而东部沿海地区人口密集、工业企业多, 一旦发生台风引发的工业企业 Natech(简称台风 Natech)事件, 将造成严重的后果。

国内外有较多学者已对 Natech 事件展开了综述研究^[6–8], 总结了 Natech 案例与形成机理, 提出了降低 Natech 风险的挑战与研究展望。Natech 研究逐渐从以地理灾害为主转变为以水文气象灾害为主^[7]。

台风 Natech 风险的研究多集中于台风对工业设施的破坏、Natech 的机理性研究, 以及化工园区受到台风破坏后的风险评估等方面的研究^[9–13]。

但较少关注大尺度的台风 Natech 空间分布特征, 难以满足国家对于台风 Natech 风险的宏观管理和政策制定的需求。为此, 本研究开展沿海大尺度下以地级市为单元的综合风险评估, 以期为 Natech 风险优先管理提供支撑^[8]。

1 研究方法与指标体系

1.1 区域 Natech 环境风险指标体系的理论框架

环境风险系统包括风险源、风险控制机制和风险受体三部分, 但引发风险控制机制失效的原因还包括各种自然灾害^[14], 因此区域 Natech 风险可结合环境风险系统理论和自然灾害进行研究^[8]。本研究基于传统的环境风险系统模型^[14–15], 耦合自然灾害作为致灾因子, 构建 Natech 环境风险系统内各要素间的关系, 并描述区域 Natech 环境风险发生全过程。

构建区域 Natech 环境风险系统内各子系统之间的关系图(图 1), 其中风险源指可能产生危害的源

* 收稿日期: 2021–01–19 修回日期: 2021–05–09

基金项目: 国家自然科学基金(71921003); 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2018ZX07208–003、2018ZX07208–004)

第一作者简介: 胡丽条(1998–), 女, 汉族, 江西瑞金人, 博士研究生, 主要从事环境风险管理研究. E-mail: litiao_hu@outlook.com

通讯作者: 毕军(1967–), 男, 汉族, 江苏溧阳人, 博士, 教授, 主要从事环境风险防控、环境管理研究. E-mail: jbi@nju.edu.cn

共同通讯作者: 曹国志(1982–), 男, 汉族, 山东济宁人, 博士, 副研究员, 主要从事环境风险评估与管理、环境应急管理、环境规划研究. E-mail: caogz@caep.org.cn

头^[16]，即风险孕育和产生的场所；灾害控制包括对自然灾害的预警、防控等，源控制在工业源防控方面包括污染治理、工业企业安全生产监管等，过程控制包括生态修复等，受体抗性则体现在医疗救援、生态承载力等。各子系统间相互作用、相互影响，区域 NATECH 环境风险发生全过程如图 2 所示。致灾因子直接作用于灾害控制机制，如果灾害控制机制有效，那么 NATECH 危害暂时消失。反之，如果自然灾害控制机制失灵，那么危害会传递给风险源（如台风对工业园区的影响），此外危害还会直接作用于源控制机制（如台风对工业储罐的破坏）；如果源控制机制对致灾因子、风险源失灵，危害则会作用于风险场（即环境介质），由过程控制机制进行制约；最后如果过程机制失灵，危害最终作用于风险受体，而风险受体自身的恢复力与暴露程度决定了风险受体遭受危害的程度。

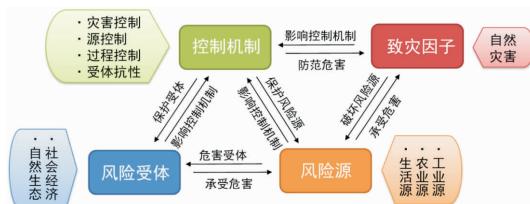


图 1 区域 NATECH 环境风险系统内各子系统的关系

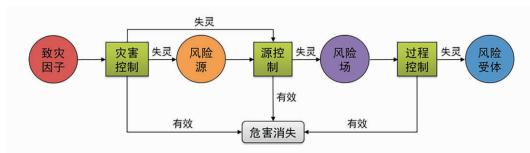


图 2 区域 NATECH 环境风险发生全过程

1.2 指标体系

1.2.1 评估指标

根据 1.1 的区域 NATECH 环境风险模型，构建台风 NATECH 风险评估指标体系（表 1）。

台风的影响频次越高、强度越大，可能次生的环境污染危害越大。对于沿海省市，除了台风伴随的大风、降雨外，还需要考虑台风巨大能量引发的风暴潮^[17]。因此，用台风影响频数、引起的最大降水量、风暴潮增水情况和最大风速极值等指标来表征致灾因子的危险性。

工业企业风险物质存储量越高、毒性越大，风险物质释放的潜在危害越大。用单位面积环境风险企业数量和单位面积 Q 值（风险源环境风险物质最大存在量与临界量的比值）等指标来表征风险源危险性^[18]。

受体敏感性越强，受到风险物质释放导致的暴露危害越大。选用人口和 GDP 产值为大气敏感受体，风险企业周边的国家级自然保护区（NNR）为水敏感受体。^[18-19]

区域的 NATECH 环境风险控制机制越有效，NATECH 环境风险事故发生的概率及后果越小；反之，控制机制越薄弱则 NATECH 环境风险越大。选用自救能力（每千常住人口医疗卫生机构床位数）、环境管理能力（节能环保支出占地区财政支出）、工业企业风险管理能力（工业固体废弃物综合利用率、违规企业占总企业数比重、安全生产监管支出决算占一般公共预算支出比重）、自然灾害防控能力（气象事务支出决算占一般公共预算支出比重）等指标来表征风险防控能力。

表 1 台风 NATECH 风险评价指标权重

目标层	准则层	权重	准则层相对于 目标层指向	方案层	权重	方案层相对于 准则层指向
台风 NATECH 风险	致灾因子 危险性 C1	0.375	+	气旋频数 C11	0.075 6	+
				台风的最大降水量(日累积值) C12	0.174 1	+
	风险源 危险性 C2	0.375	+	台风风暴潮增水超警戒潮位最高情况 C13	0.033 3	+
				台风风暴潮最大增水值 C14	0.016 4	+
	受体敏感 性 C3	0.125	+	台风大风的最大风速极值 C15	0.075 6	+
				单位面积环境风险企业数量 C21	0.187 5	+
				单位面积环境风险物质存量与临界量的比值 C22	0.187 5	+
	控制机制 有效性 C4	0.125	-	风险企业周边人口总数 C31	0.069 6	+
				风险企业周边 GDP 产值 C32	0.040 1	+
				风险企业周边自然保护区面积 C33	0.015 3	+
				每千常住人口医疗卫生机构床位数 C41	0.057 3	+
				节能环保支出占地区财政支出比重 C42	0.017 5	+
				工业固体废弃物综合利用率 C43	0.010 5	+
				违规企业占总企业数比重 C44	0.028 2	-
				安全生产监管支出决算占一般公共预算支出比重 C45	0.006 4	+
				气象事务支出决算占一般公共预算支出比重 C46	0.005 1	+

表 2 台风 Natech 风险评价指标分级标准

方案层 指标	单位	时间	指标分级				
			极低	低	中	高	极高
C11	次	1951–2018	<20	[20, 60]	(60, 100]	(100, 200]	>200
C12	mm	2000–2018	<50	[50, 100)	[100, 200)	[200, 250)	≥250
C13	–	2001–2017	白色	蓝色	黄色	橙色	红色
C14	cm	2001–2017	<100	[100, 200]	(200, 300]	(300, 400]	>400
C15	m/s	1986–2018	<17.2	[17.2, 24.5)	[24.5, 32.7)	[32.7, 41.5)	≥41.5
C21	个/km ²	2015	[0, 0.02]	(0.02, 0.04]	(0.04, 0.06]	(0.06, 0.1]	>0.1
C22	–	2015	≤25	(25, 50]	(50, 100]	(100, 200]	>200
C31	万人	2015	<150	[150, 250]	(250, 450]	(450, 750]	>750
C32	千万元	2015	<0.6	[0.6, 1)	[1, 1.6)	[1.6, 3)	≥3
C33	km ²	2018	<10	[10, 60)	[60, 160)	[160, 360)	≥360
C41	张/千人	2018	≥4	[3, 4)	[2, 3)	[1, 2)	<1
C42	–	2016	≥5%	[3.5%, 5%)	[2%, 3.5%)	[1%, 2%)	<1%
C43	–	2018	≥95%	[90%, 95%)	[70%, 90%)	[50%, 70%)	<50%
C44	–	2015	<0.1	[0.1, 0.15)	[0.15, 0.3)	[0.3, 0.45)	≥0.45
C45	–	2018	≥0.426%	[0.257%, 0.426%)	[0.170%, 0.257%)	[0.100%, 0.170%)	<0.100%
C46	–	2018	≥0.175%	[0.120%, 0.175%)	[0.075%, 0.120%)	[0.040%, 0.075%)	<0.040%

1.2.2 指标权重的确定

本研究采取层次分析(AHP)法确定权重。AHP 法是一种能对复杂、模糊的问题进行定量化决策的简易方法^[20]。本文根据既往的研究, 结合本研究的特点, 构造出均满足一致性比例 $CR < 0.1$ 的判断矩阵, 通过一致性检验, 最终计算得指标权重(表 1)。

1.2.3 指标分级与赋分

通过查阅文献[21–22]与相关标准规范、规划纲要^[18,23–24], 本研究对各指标划分了等级标准(表 2)。为统一评价标准, 将指标等级从极低到极高依次赋值为 1~5。

1.3 综合评价法

本研究认为 Natech 综合风险评价指数为致灾因子危险性(H_1)、风险源危险性(H_2)、受体敏感性(H_3)和风险控制机制有效性(H_4)四个准则层指标指数之和, 评价模型如下:

$$\begin{cases} H_i = \sum_{j=1}^k F_{i,j} \times W_{i,j}; \\ R = \sum_{i=1}^4 H_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为准则层 H_i 的指数个数; $F_{i,j}$ 、 $W_{i,j}$ 分别为 H_i 的第 j 个指标的得分与权重; R 为灾害综合风险指数。

2 数据处理与来源

2.1 台风数据处理

本研究使用的西太平洋台风路径数据资料包含 1951–2018 年 1 782 次台风的轨迹点、路径, 以及 1986–2018 年各个轨迹点的最大风力。

2.1.1 缓冲区划分

本研究同时考虑了登陆台风和未登陆台风对

研究区域的影响。考虑登陆台风带来的影响, 以行政区域几何中心为圆心, 200 km 为半径做缓冲圆^[25–26], 当台风落到缓冲圆内时, 认为该台风对研究区域有影响, 统计落在该缓冲圆的台风频数和台风的最大风速。

计算未登陆台风造成的影响时, 将台风影响半径是否覆盖研究区域作为台风是否对研究区域产生影响的判定^[27]。本研究考虑以台风中心 200 km 范围内的气象站点所记录的日累计降水量作为此次台风引发的降水。

2.1.2 线性插值方法

为满足空间精度, 依据每 6 h 台风轨迹点中心位置和风速大小, 沿台风轨迹线对轨迹点进行六等分内插运算, 得到间隔 1 h 的数据^[28]。假设单位观测时间内, 台风的移动路径和风速大小呈线性变化, B 点为 A 点移动后的相邻轨迹点, 计算过程如下:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_B - x_A}{n} \times i + x_A; \\ y_i = \frac{y_B - y_A}{n} \times i + y_A; \\ v_i = \frac{v_B - v_A}{n} \times i + v_A. \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_A 、 x_B 为 A 、 B 点的经度; y_A 、 y_B 为 A 、 B 点的纬度; v_A 、 v_B 为 A 、 B 点的台风中心最大风速; (x_i, y_i) 为插值后的第 i 个轨迹点坐标, i 为 1~5; n 为等距分段数, 本研究 $n=6$ 。

2.2 Q 值处理

根据生态环境部 2010 年在全国开展的“重点行业企业环境风险及化学品调查”数据与江苏省、天津滨海新区等其他区域调查数据, 筛选与 2015 年环境统计数据中相对应的企业; 其他企业 Q 值取与具有相同企业规模、相同行业已有企业 Q 值

的平均值。该数据已成功应用于我国 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的分辨率下空间解析环境事件的风险评估以及长江经济带突发水污染风险分区研究^[29-30]。

2.3 风险受体数据处理

本研究以风险企业为缓冲圆心，针对大气和水环境敏感受体分别设置不同的缓冲半径^[18-19]，选用 5 km 范围内的人口和 GDP 产值为大气敏感受体，10 km 范围内的国家级自然保护区(NNR)为水敏感受体。

2.4 数据来源

数据资料及来源如表 3 所示。考虑到行政区面积与数据获取情况，北京市、天津市、海南省采用直辖市或省级数据，不涉及香港、澳门和台湾。

表 3 数据资料来源

数据资料	数据来源
NNR、人口数与 GDP 产值 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$)、台风路径、中心 降水	中国科学院资源环境科学数据 http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=230
风暴潮数据	《中国海洋灾害公报》
地级市面积、工业固体废 弃物综合利用率、每千常 住人口医疗卫生机构床 位数	《中国城市统计年鉴》
节能环保支出	各省统计年鉴
违规企业数量	公众环境研究中心 http://www.ipe.org.cn/index.html
总企业数	中国微观经济数据查询系统 http://microdata.sozdata.com/
安全生产监管支出决算、 气象事务支出决算、一般 公共预算支出	各地市人民政府或财政厅网 站的年度决算报表

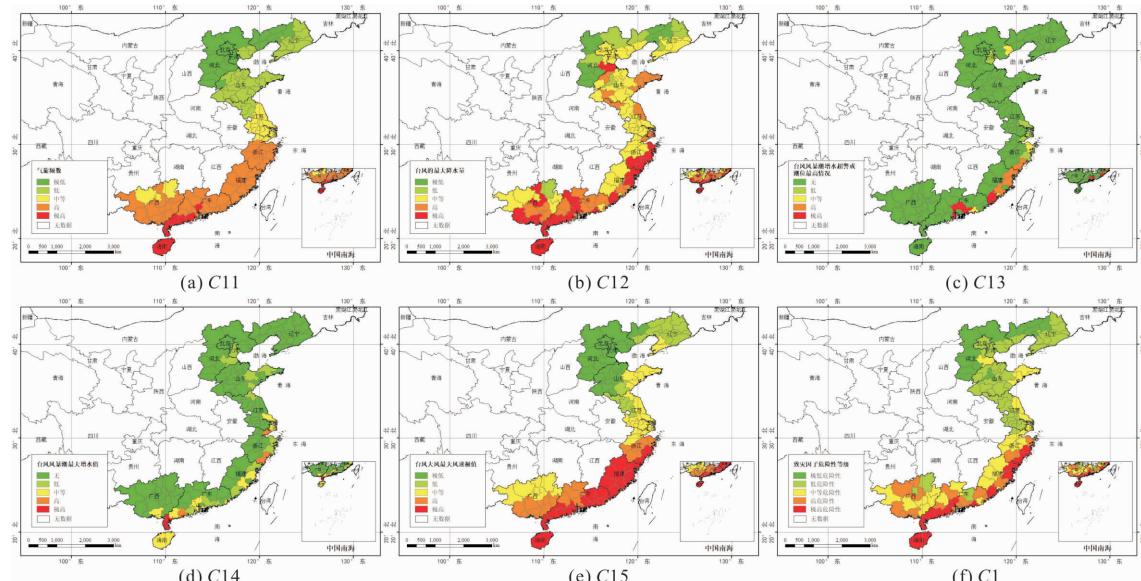


图 3 我国沿海台风致灾性分析图
(以国家标准地图为底图制作，审图号：GS(2020)4619 号，下同)

3 结果分析

运用综合评价法得到我国沿海台风 Natech 风险综合评价指数后，再通过 ArcGIS 10.8 软件绘制灾害风险指数图，采取自然间断点分级法划分风险等级。

3.1 致灾因子危险性评价

通过分析我国沿海台风致灾性(图 3)可知：①台风的影响频次随纬度升高而降低，但位于同一省份的地市台风影响频数差别不大；②台风日累计最大降水量极高的区域集中于海南、广西、广东、福建和浙江。差异值不仅体现在纬度的高低，还体现在临海的距离上。纬度越低、距海越近的地市，台风带来的日累计最大降水量越大；③南海和东海引发风暴潮超警戒潮位和最大增水值较高，渤海次之，黄海未受到明显影响；④台风最大风速极值变化与台风日累计最大降水量规律一致。极高值位于海南、广东、福建和浙江，极低值位于京津冀、山东北部和辽宁西北部。

3.2 风险源危险性评价

对我国沿海风险源危险性分析(图 4)，结果表明，由于工业企业和 Q 值分布密度较低，海南、广西、广东的东北部、福建西北部、河北北部和辽宁北部等风险源危险性较低。由图 4c 可知珠三角、长三角、京津冀和辽中南地区风险源危险性较高，这与 JIANG 等^[15]研究结果基本一致。

3.3 受体敏感性评价

通过我国沿海地区风险企业周边受体敏感性分析图(图 5)可以看出：①风险企业周边 5 km 内受到影响的人口数较多的区域为京津冀、山东半岛、长三角、珠三角等。相应地，在这些区域同样

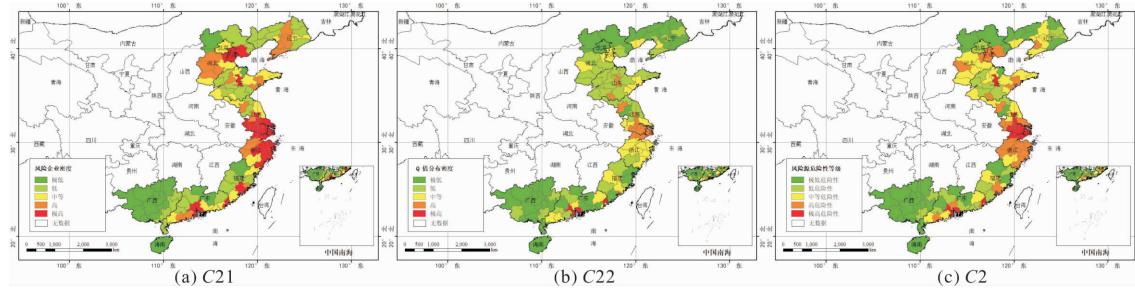


图4 我国沿海风险源危险性分析图

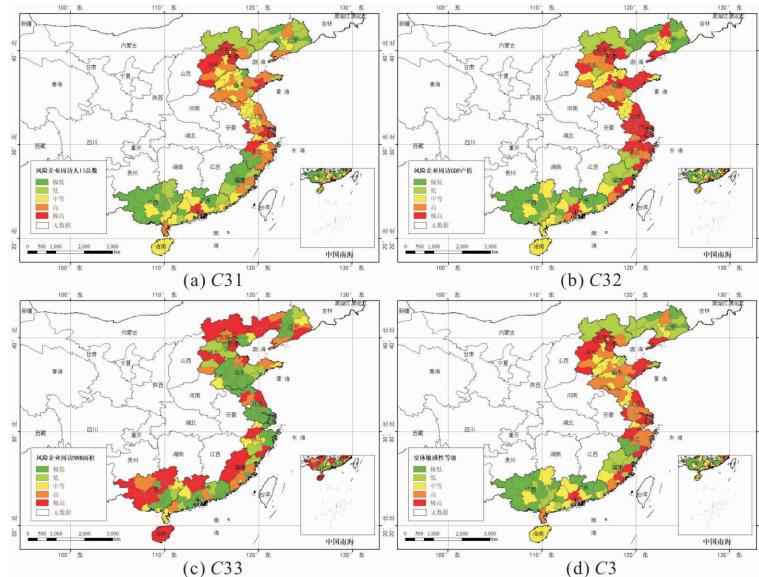


图5 我国沿海风险企业周边受体敏感性分析图

也面临GDP产值极高的情况,这意味着人口分布与地区经济发展状况密切相关,人口的密集为工业发展提供了大量劳动力,工业的发展促进了地区经济的增长。②我国沿海以平原、丘陵为主,生态脆弱性较高。图5c表明在风险企业周边受到严重影响的NNR面积较小,主要分布在海南及靠近内陆的地市。

图5d表明受体敏感性极高的区域与风险源危险性较高的区域大体一致,包括珠三角、长三角和京津冀地区。这可解释为“城市群效应”,这些地区集中了一批我国最发达的城市,包括北京、天津、上海、深圳、广州等。这些地区风险企业也较多,人口密集,因此受体敏感性极高。此外,山东、江苏、河北的受体敏感性普遍高于海南、广西、广东、福建,这也体现了在沿海省市,长江以北的地市受体敏感性相对较高。

3.4 风险控制机制有效性评价

通过分析我国沿海地区风险控制机制有效性(图6),可知广西、广东部分地市医疗救援能力较差,过程控制水平较低,工业企业污染治理水平较低,风险管理能力较弱。这也与图6g的结果相吻合,广西、广东、福建的大部分地市控制机制

有效性较低。而控制能力最高的地区是北京、天津、上海、深圳、海南等地,它们的共同特征是经济发达,自救能力高。然而这些地区安全生产监管与气象事务支出决算相对于一般公共预算支出较低,考虑到本研究只取了2018年的财政数据,并非年均投入。加之这些地区基础设施完善,只需投入日常的运营维护,无需大量的支出,因此占比相对较低。

3.5 综合风险评价

根据综合风险评价指数范围,在1.41~4.40区间用自然间断点分级法划分风险等级。从各等级风险比例图(图7)可以看出我国沿海地市对台风Natech影响多为低风险,其次为中等、高风险,极低、极高风险占比最少。

从我国沿海台风Natech综合风险等级分布图(图8)可以看出,台风Natech综合风险在珠三角、长三角及福建东南沿海部分地市极高,这些地区的共同特点是致灾因子危害性大,风险源危险性和受体敏感性高;但这些地区控制机制有效性较好,因此需及时调整产业结构,合理规划城市布局,降低风险企业的聚集程度。淄博市虽位于山东的中部,受台风的影响较小,但风险企业与Q

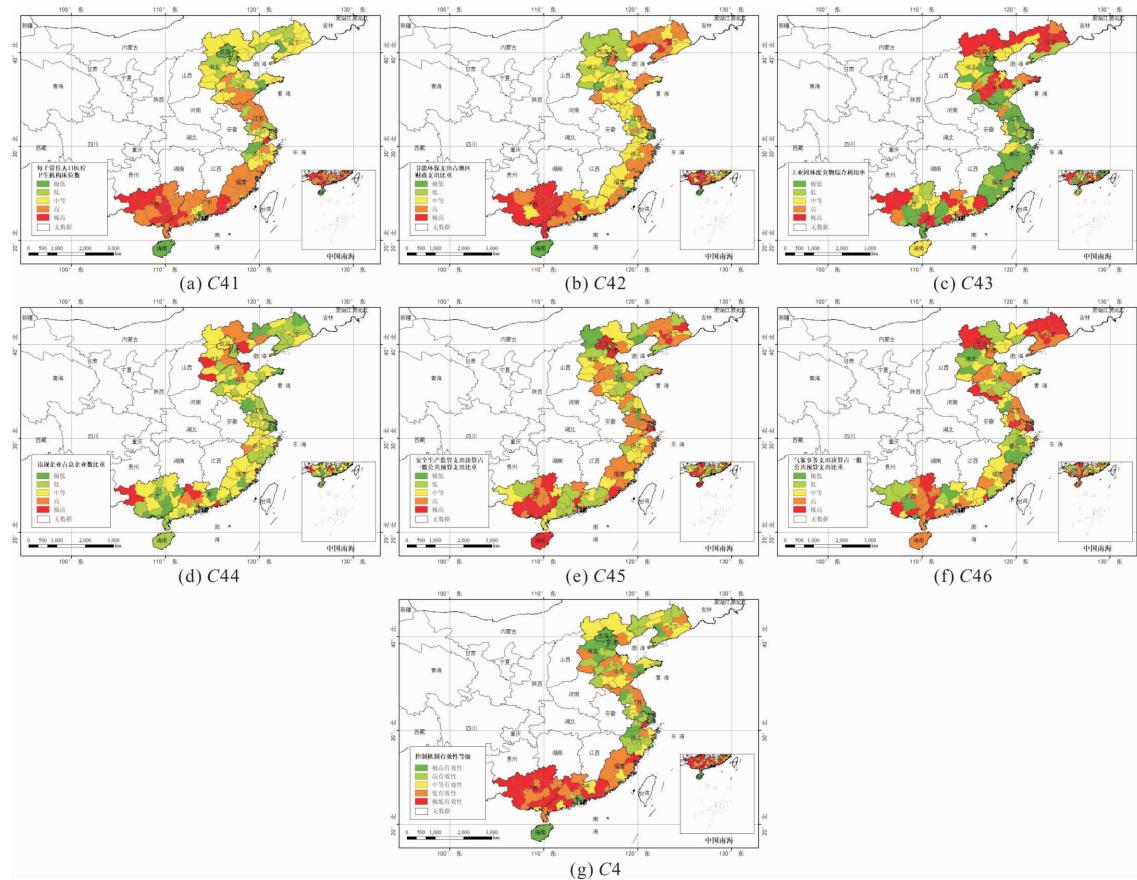


图6 我国沿海地区风险控制机制有效性分析图

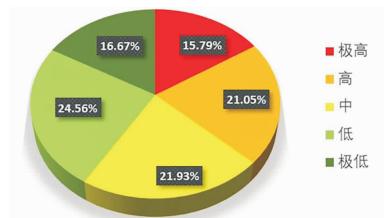


图7 我国沿海台风 Nataech 各等级综合风险比例

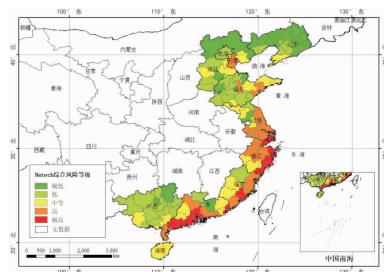


图8 我国沿海台风 Nataech 综合风险等级分布图

值密度较高，导致风险源危险性较高，并且受体敏感性也相对较高，因此台风 Nataech 综合风险较高。广西、广东北部、江苏的连云港和淮安、山西西部、河北、北京、辽宁等地台风 Nataech 综合风险等级较低，主要原因是这些地区台风的影响较弱，在风险源危险性、受体敏感性、控制机制有效性的综合影响下风险较低。

4 讨论与结论

Nataech 风险不仅与自然灾害的破坏性有关，而且与城市的产业结构、规划布局等因素密切相关。我国沿海地区经济发达，人口密集，城镇化率和风险源危险性均较高，并且全球气候变化极有可能导致台风登陆频次变高、强度增大^[31]，因此台风 Nataech 事件危害较大。

本研究是首个开展我国沿海范围大尺度、以地级市为单元分析的台风 Nataech 风险的研究。基于环境风险系统理论耦合了自然灾害、工业企业、社会经济以及防控能力之间的关系，运用层次分析法进行综合评价，得出的主要结论有：①我国沿海台风 Nataech 综合风险为高风险及以上的地市占 36.84%，中等风险占 21.93%。②从地理位置来看，邻近南海和东海台风危害最大，临海越近、纬度越低的地市台风 Nataech 综合风险相对越高，加之工业企业与人口分布密集，珠三角、长三角及福建沿海部分地市台风 Nataech 综合风险极高。本研究识别了不同等级的台风 Nataech 风险区域，有利于各地市制定相应的政策，这对我国沿海台风 Nataech 的环境风险管理与防灾减灾规划具有重

要意义。

值得说明的是, 受限于数据可获得性, 本研究仅用 Q 值代表风险场强, 未考虑自然灾害事故下突发风险事故污染物的实际释放量, 并且在控制机制有效性方面忽略了城市间的援助应急能力以及城市群之间的联系。此外, 本研究未进一步考虑多米诺效应, 这对于 Natech 风险的评估结果有一定偏差。但本研究同时考虑了登陆台风与未登陆台风的影响, 并且在计算风险受体敏感性时, 考虑受体位于风险企业周边可能的影响范围内, 结果更为准确合理。本研究开发的方法可以应用全国第二次污染源普查数据进行更新评估, 以保证结果的时效性, 进而反映最近社会经济与产业调整状况下的风险水平。

参考文献:

- [1] SHOWALTER P S, MYERS M F. Natural disasters in the United States as release agents of oil, chemicals, or radiological materials between 1980 – 1989: Analysis and recommendations [J]. *Risk Analysis*, 1994, 14 (2): 169 – 182.
- [2] KRAUSMANN E, CRUZ A M. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry [J]. *Natural Hazards*, 2013, 67 (2): 811 – 828.
- [3] KUMASAKI M, HARA T, NAKAJIMA N, et al. The classification of physical effects from natural hazards for Natech risk assessment based on a Japanese database [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 50: 308 – 316.
- [4] LESTARI F, PELUPESSY D, JIBIKI Y, et al. Analysis of complexities in Natech disaster risk reduction and management: A case study of Cilegon, Indonesia [J]. *Journal of Disaster Research*, 2018, 13 (7): 1298 – 1308.
- [5] BENALI N, ABDELKAFI I, FEKI R. Natural – disaster shocks and government's behavior: Evidence from middle – income countries [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 27: 1 – 6.
- [6] NASCIMENTO K R D S, ALENCAR M H. Management of risks in natural disasters: A systematic review of the literature on NAT-ECH events [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 44: 347 – 359.
- [7] CRUZ A M, SUAREZ – PABA M C. Advances in Natech research: An overview [J]. *Progress in Disaster Science*, 2019, 1: 100013.
- [8] 马宗伟, 高越, 毕军. Natech 风险研究: 现状、理论及展望 [J]. *中国环境管理*, 2020, 12 (2): 69 – 75.
- [9] SANTELLA N, STEINBERG L J, AGUIRRA G A. Empirical estimation of the conditional probability of natech events within the United States [J]. *Risk Anal*, 2011, 31 (6): 951 – 968.
- [10] GIRGIN S, KRAUSMANN E. Historical analysis of US onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 578 – 590.
- [11] 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.
- [12] HAN R, ZHOU B, AN L, et al. Quantitative assessment of enterprise environmental risk mitigation in the context of Na – tech disasters [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191 (4): 1 – 13.
- [13] 陈柏封. 多灾种耦合下化工园区安全风险评估技术 [D]. 三河: 华北科技学院, 2019: 7 – 8.
- [14] 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.
- [15] JIANG S, ZHAI Y, LENG S, et al. A HIVE model for regional integrated environmental risk assessment: A case study in China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, 22 (4): 1002 – 1028.
- [16] 顾传辉, 陈桂珠. 浅议环境风险评价与管理 [J]. *新疆环境保护*, 2001, 23 (4): 38 – 41.
- [17] 霍光中, 蔡志林. 浙江乐清湾台风风暴潮灾害及防御对策 [J]. *灾害学*, 1999, 14 (3): 64 – 69.
- [18] 生态环境部. 行政区域突发环境事件风险评估推荐方法(环办应急[2018]9号) [Z]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [19] 生态环境部. 企业突发环境事件风险分级方法(HJ941 – 2018) [Z]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [20] SAATY T L, VARGAS L G. Estimating technological coefficients by the analytic hierarchy process [J]. *Socio – Economic Planning Sciences*, 1979, 13 (6): 333 – 336.
- [21] 殷杰. 中国沿海台风风暴潮灾害风险评估研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011: 47 – 64.
- [22] 刘朔涛. 环境治理的财政政策研究 [D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2018: 64 – 74.
- [23] GB/T 28592 – 2012 降水量等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [24] 国务院办公厅. 全国医疗卫生服务体系规划纲要(2015—2020年) [Z]. 北京: 国务院办公厅, 2015.
- [25] 陈文方, 方建, 徐伟, 等. 长三角地区台风危险性定量分析 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21 (1): 1 – 8.
- [26] LIN N, EMANUEL K A, SMITH J A, et al. Risk assessment of hurricane storm surge for New York City [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115 (D18): 1 – 11.
- [27] 李倩, 俞海洋, 李婷, 等. 京津冀地区台风危险性评估——基于 Gumbel 分布的分析 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37 (7): 933 – 945.
- [28] 张春艳. 中国沿海登陆台风灾害风险特征分析 [D]. 南昌: 江西理工大学, 2019: 21 – 23.
- [29] CAO G Z, GAO Y, WANG J N, et al. Spatially resolved risk assessment of environmental incidents in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 856 – 864.
- [30] 周夏飞, 曹国志, 施方, 等. 长江经济带突发水污染风险分区研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40 (1): 334 – 342.
- [31] 顾成林, 康建成, 闫国东, 等. 全球变暖背景下西北太平洋热带气旋活动的时空变化特征及潜在风险分析 [J]. *灾害学*, 2019, 34 (2): 89 – 96.

Natech Risk Assessment of Industrial Enterprises Triggered by Typhoon in Coastal Regions of China

HU Litiao¹, GAO Yue¹, NI Ping¹, BI Jun¹, CAO Guozhi² and MA Zongwei¹

(1. State Key Lab of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: To learn more about Natech risk characteristics and provide helpful information for disaster prevention and mitigation, we assessed the typhoon-triggered Natech risk of industrial enterprises in coastal cities of China. We first built a four-dimension indicator system containing natural hazard factors, risk source, the vulnerability of risk receptor, and effectiveness of control mechanism. We then applied the analytic hierarchy process to calculate the comprehensive index of Natech risk triggered by typhoons. The results showed that 36.84% of Natech risks in coastal cities are at a high level or above and 21.93% are at an intermediate level. The cities near the South China Sea and the East China Sea were vulnerable to typhoons. In addition, due to the dense industrial enterprises and population distribution, Natech risks are at high and above levels in Pearl River Delta, Yangtze River Delta, and some coastal cities in Fujian Province.

Key words: typhoon; industrial enterprises; Natech; risk assessment; AHP; costal regions of China

(上接第 173 页)

Research on Operation risk Assessment of Zhongnanshan Tunnel based on Fuzzy Comprehensive Evaluation method

ZHANG Yang¹, XU Zhisheng², CHU Kunkun² and ZHAO Jiaming²

(1. Shaanxi Transportation Holdings Group Co Ltd Xizhen branch, Xi'an 710000, China; 2. Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In view of the characteristics of high flow, long mileage and deep buried, taking the tunnel, road network, human, vehicle, environment and management factors as the risk assessment indicators of safe operation. A multi-level segmented structure model is proposed. Based on the fuzzy comprehensive evaluation theory, the multi-level fuzzy comprehensive evaluation is carried out for the operation risk of Zhongnanshan tunnel. The analysis results provide a theoretical basis for the determination of the reasonable risk prevention and control measures for the safety operation of Zhongnanshan tunnel and play a role in promoting the operation safety management of the re Service Super Long Tunnel in China.

Key words: Zhongnanshan tunnel; operation risk; fuzzy comprehensive evaluation; risk prediction