

何如,唐忠莲,苏志,等.广西某核电站周边地区龙卷风调查与评价[J].灾害学,2016,31(1):153-156,169.[He Ru, Tang Zhonglian, Su Zhi, et al. Survey and Evaluation of Tornadoes around a Nuclear Power Plant in Guangxi[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 153-156, 169.]

广西某核电站周边地区龙卷风调查与评价*

何如^{1,3},唐忠莲²,苏志^{1,3},林振敏³

(1. 广西壮族自治区气象服务中心, 广西 南宁 530022; 2. 民航珠海空管站气象台, 广东 珠海 519040;
3. 广西壮族自治区气候中心, 广西 南宁 530022)

摘要:龙卷风是核电站在选址和设计阶段需要考虑的最重要的极端气象参数之一。通过调查和收集广西某核电站周边 300 km × 300 km 区域范围内 1962 - 2012 年的龙卷风资料,对龙卷风的时空分布、灾害特征、强度定级以及最大设计基准等级等进行了分析和评价。结果发现:龙卷风富士达风力等级集中出现在 F_0 、 F_1 级,最强龙卷风等级为 F_3 级;主要分布在厂址附近和广东沿海一带,东北和西北部的内陆地区也时有发生;一年之中主要出现在春、夏两季,以 4 月最多;1 d 之中白天比夜间多,傍晚 18 时段最多;推荐龙卷风设计基准等级为 F_3 级,采用最大设计风速为 75 m/s。

关键词:核电站;龙卷风;强度分级;设计基准等级;时空分布;广西

中图分类号: P445+.1; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)01-0153-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.01.029

龙卷风是一种尺度范围较小的强烈涡旋天气现象,具有生消快、风力强、破坏性大等特点^[1-2]。龙卷风的危害主要是由于它会带来极大的阵风,中心气压极低,常伴有雷暴、冰雹、暴雨等灾害性天气^[3-4]。核电站是对安全要求极高的建筑物群体,龙卷风则是核电站在选址和设计阶段需要考虑的最重要的极端气象参数之一^[5-6]。龙卷风一旦袭击核电站,极易导致建筑物被推倒或扭曲,大型容器产生瞬间爆裂以及其他严重的损害,甚至会对核电站造成致命的影响^[7]。因此,对核电站厂址周边区域开展龙卷风调查与评价是十分必要的。

本文研究的核电站厂址地处广西沿海地区,由于海、陆下垫面的共同影响,气候相对较为复杂,强对流天气较频繁,龙卷风灾害时有发生,其超强的破坏力会对核电站的安全造成巨大的威胁。本文严格按照核安全导则^[8]的要求,对核电站周边地区的龙卷风事件开展了详细的调查,对其时空分布和灾害特征进行了分析,并对龙卷风事件进行了强度定级,通过其可能出现的概率做出了推算,在此基础上推荐了龙卷风设计基准等级和最大设计风速,为本核电站工程的科学选址和安全设计提供了科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

根据核安全导则的规定^[8],龙卷风的评估区

域以厂址为中心,经纬度均为 3° 以内所包含的方形区域为典型调查区。本研究的调查区域为以核电站为中心 300 km × 300 km 的区域范围^[9],该范围共覆盖 38 个县(市),其中,广西壮族自治区 22 个,广东省 15 个。

龙卷风调查年限为 1962 - 2012 年共 51 年,基础资料依据《中国气象灾害大典(广西卷)》^[10]、《中国气象灾害大典(广东卷)》^[11]《中国气象灾害年鉴》(2001—2012 年)^[12]、地面气象观测记录、气象灾情数据库、气候影响评价等文献资料记载,以及民政、三防等相关部门的灾情调查记录和媒体报道等。龙卷风的调查内容包括以下部分:发生的日期、时间、地点;持续的时间历程、长度、宽度、破坏面积、强度的估计;灾情以及目击者的描述、照片和录像等^[13]。经过调查,收集到调查区域内共 82 次龙卷风灾情记录。

考虑到核电站的绝对安全性^[7],同时为了满足概率分析样本的可靠性,调查获得的 51 年中的 82 个龙卷风事件样本,无法再细分为更小范围的子区来进行评估;另外,在确定龙卷风调查区域时已充分考虑到调查区的气象均匀性。因此本文采用全区域(即 300 km × 300 km 的范围)的总样本事件为依据开展龙卷风调查和评价。

1.2 研究方法

1.2.1 龙卷风强度评级方法

龙卷风等级划分采取专家组评级方式对龙卷风进行定量评级^[14]。其中,“风速判定”专家组由

* 收稿日期: 2015-08-04 修回日期: 2015-09-12

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFA018008)

作者简介: 何如(1983-),女,广西柳州人,硕士研究生,工程师,从事气象能源开发与气候应用服务研究。

E-mail: past014@163.com

来自天气预报、大气物理和大气环境、灾害学、工程气象学、结构抗风设计、核电、电力规划设计、环境科学等专业的15名专家组成。专家组经过资料审核，对照富士达风力等级(F等级)分类表，其对应的风速区间和破坏程度可参阅文献[8]，将龙卷风的定性灾情描述经过定量判断后，对每一个台风个例进行F级别评定，选取众数确定为其等级。

1.2.2 龙卷风风险度方法^[8]

龙卷风的风速和等级关系：

$$V_{F_X} = 6.30(X+2)^{1.5} \tag{1}$$

式中： F_X 为富士达风力等级； V_{F_X} 是富士达风力等级为 F_X 时最大风速的下限(m/s)。

龙卷风的频次和强度关系：

$$\ln(n_i) = -cu_i + k \tag{2}$$

式中： n_i 是最大风速超过阈值风速 u_i 的龙卷风发生的累积次数； u_i 是F等级为 i 的阈值风速； c 、 k 为根据最小二乘线性回归分析得到的常数。

龙卷风的面积和强度关系：

$$\ln(a_i) = c'\ln(\bar{V}_i) - k' \tag{3}$$

式中： a_i 为 i 等级龙卷风的平均破坏面积； \bar{V}_i 为等级为 i 时的中位值风速； c' 、 k' 是拟合系数。

在实际调查中，资料记录的破坏面积可能包含暴雨、雷暴、狂风等其他灾害造成的破坏，与风强度的关系比较离散且难以确定。另外，在本次调查中获得长度、宽度等资料的个例较少，不足以满足参数拟合的要求。为此引用皮尔森路径长度、宽度公式进行换算：

$$A_i = L_{pi} \cdot W_{pi} = (1.609)^2 \times 10^{(i-3)} \tag{4}$$

式中： A_i 为龙卷风破坏面积， i 为龙卷风的等级。

龙卷风风速概率关系：最大强度为 i 的龙卷风破坏路径内的面积，相应于富士达等级 F_j 的风速区间 V_j 到 V_{j+1} 所扫过的面积，其公式为：

$$a_{ij} = 2(R_j - R_{j+1}) \cdot L_i = 33.5a_i \frac{V_{j+1} - V_j}{V_j \cdot V_{j+1}}, (j \leq i) \tag{5}$$

那么，调查区域内一年内经受 F_j 等级风速的概率为：

$$P(V_j, V_{j+1}) = \frac{\sum_{i=j}^n \lambda_i \cdot a_{ij}}{A} \tag{6}$$

式中： λ_i 为局部区域 i 等级龙卷风每年发生的次数， A 为调查区域的面积， n 为该区域出现的最强龙卷风等级。最后可以得到，调查区域内一年内经受超过强度 K 等级风速的概率为：

$$P_E(V_K) = \sum_{j=K}^n P(V_j, V_{j+1}) \tag{7}$$

2 龙卷风强度分级

根据调查区域82次的龙卷风记录，采取专家组依照富士达风力等级分类表的评级方法，对龙卷风强度进行分级^[14]。经过对分级结果的统计，得到调查区域出现的等级和次数：调查区域内的龙卷风可划分为 F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 四个等级，其中 F_0 级48次， F_1 级21次， F_2 级10次， F_3 级3次。调查区域多以低级别(F_0 、 F_1)为主，占总数的84.1%， F_2 级占12.2%， F_3 级较少，仅占3.7%。

3 龙卷风时空分布特征

3.1 龙卷风的空间分布

统计1962-2012年核电站调查区域内各地发生龙卷风事件的个数和出现的最强龙卷风等级，由图1可见，龙卷风样本大致集中分布在厂址附近和东南部的广东沿海一带，以及厂址东北部的广西内陆地区较多，西北部的内陆地区也时有发生。曾经发生龙卷风次数最多的地区在湛江，为10次，其次在合浦县，为9次，钦州和电白分别发生过7次；调查区域内最强等级龙卷风(F_3)曾经出现在合浦和电白， F_2 级龙卷风曾出现在防城、遂溪、茂名、阳江、博白、南宁、桂平等地。值得一提的是，核电站厂址所在地不但是龙卷风灾害的多发地，同时也是受龙卷风灾害影响较为严重的地区之一。

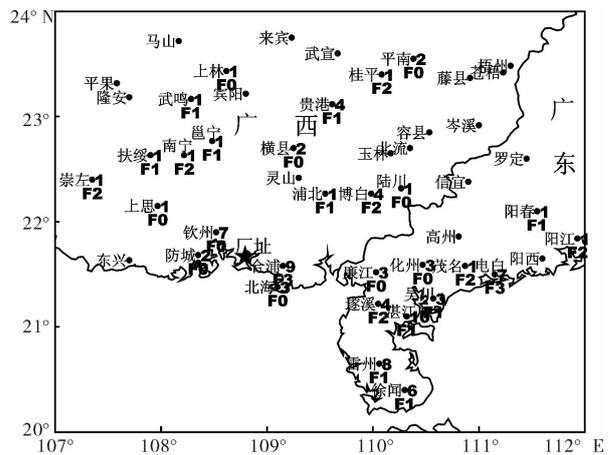


图1 核电站调查区域龙卷风次数和等级分布图

3.2 年及年代际变化

调查区域的龙卷风平均每年出现1.6次，出现龙卷风的年份占总年数的70.6%；其中1981年最多，出现了8次，其次是1986年、1987年、2008年，各出现了5次，分别占总年数的2.0%和5.9%(图2)。其年代际变化较明显，龙卷风出现最多是80年代，次多是00年代，分别为28次和26次，各占总次数的34.1%和31.7%；70年代、90年代次多，分别为12次和8次；60年代相对较少，仅有5次，这可能与早期资料记载不完整有关。

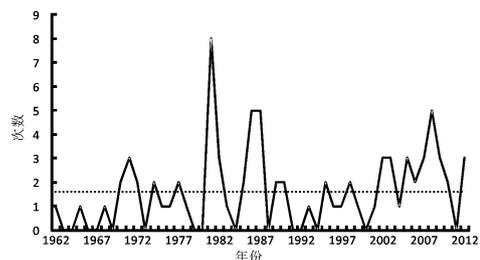


图2 核电站调查区域龙卷风次数的逐年变化(横线为平均值)

3.3 月及季变化

从调查区域龙卷风次数逐月变化来看(图3)，

除 10 月份无龙卷风记录外, 其余月份均有龙卷风出现, 4-7 月为龙卷风出现的高峰期, 出现的次数占龙卷风总数的 68.3%, 其中 4 月份出现次数最多, 占 26.8%, 5 月次之, 占 17.1%。按季节来看, 春季最多, 出现了 42 次, 占总数的 51.2%, 夏季次之, 出现了 27 次, 占总数的 32.9%。这是由于核电站厂址地处北部湾, 具有明显的海洋性季风气候特点, 春夏之交气温升降率较大, 气流变化猛烈, 下垫面局地受热不均匀, 强对流天气出现频繁, 较易出现龙卷风。

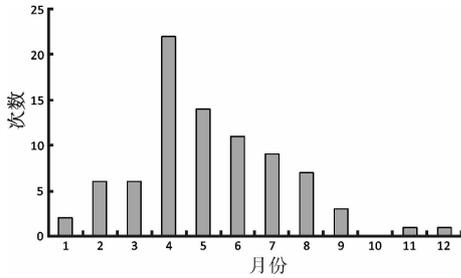


图 3 核电站调查区域龙卷风次数逐月变化

3.4 日变化

本次调查共有 50 次记录了龙卷风确切的发生时间。调查区域内龙卷风绝大部分出现白天 07-20 时之间, 共出现 37 次, 占总数的 74.0%, 其中 18 时段出现次数最多, 为 6 次, 其次是 08 和 14 时段, 各出现了 4 次(图 4)。龙卷风白天多于夜间, 这是由于龙卷风多产生于强对流天气, 白天日出后下垫面受辐射增温, 导致大气上下对流旺盛, 有利于强对流天气形成, 易龙卷风的发生。

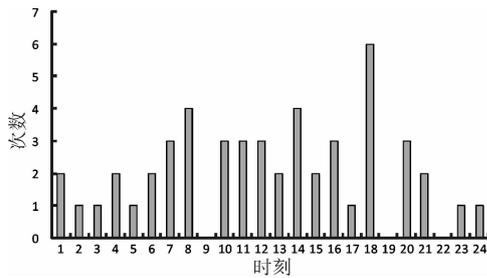


图 4 核电站调查区域龙卷风次数的日变化

3.5 持续时间

本次调查共有 34 次确切记录了龙卷风从发生到结束的具体时间。从龙卷风的持续时间来看(图 5): 持续时间在 0~10 min、11~20 min、21~30 min、31~40 min、41~50 min、51~60 min、60 min 以上的龙卷风分别为 13、9、2、5、0、1、4 次, 其中 20 min 之内的共出现 22 次, 占 64.7%, 60 min 之内共出现 30 次, 占 88.2%。龙卷风持续时间最短仅为 1 min。

4 龙卷风的强度分析

4.1 最强龙卷风的破坏程度

在调查区域内收集到龙卷风中, 破坏力最强的达到了 F_3 级, 其破坏程度如下: 刮走拖拉机、刮平房屋、打翻渔船、吹断桅杆、人、畜伤亡等

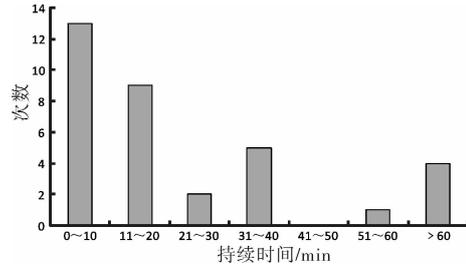


图 5 核电站调查区域龙卷风持续时间

(表 1)。

4.2 各级龙卷风出现概率

由于能够准确记录龙卷风灾情数据的个例较少, 因此需要将 F 等级与风速的关系式进行样本扩充。根据式(1), 采取分辨率为 0.2 的等级对龙卷风样本进行扩充^[15], 得到各细化等级龙卷风对应的风速下限值以及累积次数(表 2)。

根据表 2 结果进行曲线拟合(图 6), 可见, 用经验公式(2)的函数形式来描述核电站调查区的龙卷风出现概率分布是合理的, 相关系数 R 为 0.989, 得到参数 c 和 k 的拟合值分别为 0.063 和 5.599。

表 1 最强龙卷风造成的灾情

发生地点	发生时间	灾情
合浦	1965 年 7 月 22 日 18:52-19:01	龙卷风到地直径约 100 m, 拖拉机被刮走 10 余米远, 死 9 人, 伤 129 人, 糖果厂厂房被刮平、损失物资约值 50 万元。
合浦	1974 年 7 月 23 日	受灾范围长约 1 km, 打翻 10 多吨位石灰船 3 艘, 吹断桅杆, 死 1 人, 伤 8 人, 吹倒公路树木约数百棵。
电白	1977 年 7 月 21 日	龙卷风开始宽度约 50 m, 结束时宽度约 30 m。龙卷风经过的地方飞沙走石, 500 kg 的铁板被卷上天空, 在 200 m 外的地方落下。房屋崩塌 7 间, 损坏 28 间, 伤 8 人, 其中重伤 5 人。

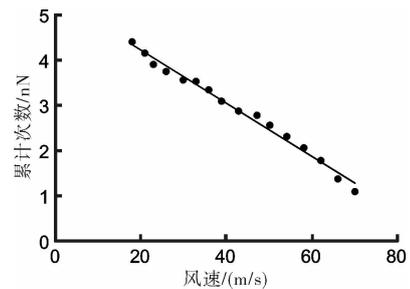


图 6 核电站调查区龙卷风风速与累积次数的关系

4.3 超过额定风速的概率

根据式(3)和式(4)推导得到调查区域龙卷风的面积和强度公式为

$$\ln(a_i) = 5.508 \ln(\bar{V}_i) - 23.0225 \quad (8)$$

表2 核电站调查区域龙卷风各细化等级和累积次数

等级	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
风速	18	21	23	26	30	33	36	39	43	47	50	54	58	62	66	70
次数	82	63	50	42	35	34	28	22	18	16	13	10	8	6	4	3

调查区域总面积为 $A = 90\ 000\ \text{km}^2$ ，再根据式(5)~式(7)计算得到调查区域一年中各等级龙卷风出现的平均次数分别为 $\lambda_0 = 1.704$ 、 $\lambda_1 = 0.662$ 、 $\lambda_2 = 0.227$ 、 $\lambda_3 = 0.064$ 。由此计算得到区域内一年中各等级(对应不同区间风速)龙卷风出现的概率和超过某 K 等级龙卷风下限风速的概率，结果见表3和表4。

表3 一年中遭遇不同区间风速的概率

区间	$P_{0,1}$	$P_{1,2}$	$P_{2,3}$	$P_{3,4}$
概率	1.07×10^{-3}	1.02×10^{-3}	5.00×10^{-6}	5.00×10^{-8}

表4 一年中超过 K 级龙卷风下限风速的概率

K	0	1	2	3
$P_E(V_K)$	2.09×10^{-3}	1.02×10^{-3}	5.05×10^{-6}	5.00×10^{-8}

4.4 设计基准龙卷风

根据表4所示的结果绘制核电站调查区域遭遇超过 K 等级龙卷风风速的概率分布图(图7)。由图7可见，图中 10^{-7} 概率水平对应的龙卷风设计基准风速为 $70\ \text{m/s}$ ，结合在调查区域内曾出现过定级为 F_3 的龙卷风样本事件，从核安全的保守性角度考虑，推荐核电站设计基准龙卷风风速取 $75\ \text{m/s}$ ，并建议以 F_3 级为龙卷风设计基准等级^[7,15]。

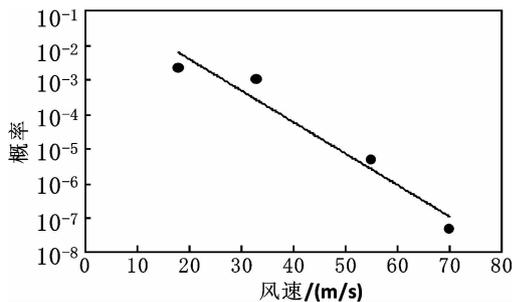


图7 核电站调查区域龙卷风概率曲线

5 结论

(1)核电站调查区域在1962-2012年共51年期间共出现82次龙卷风，其中 F_0 级48次， F_1 级21次， F_2 级10次， F_3 级3次。调查区的龙卷风多以低级别(F_0 、 F_1)为主，占总数的84.1%， F_2 级占12.2%， F_3 级较少，占3.7%。

(2)龙卷风主要集中分布在厂址附近和东南部的广东沿海一带，以及厂址东北部的广西内陆地区较多，西北部的内陆地区也时有发生。调查区域内发生龙卷风次数最多的在湛江和合浦，分别为10次和为9次，最强等级龙卷风(F_3)曾经出现在合浦和电白。可见，厂址所在地不但是龙卷风灾害的多发地，同时也是受龙卷风灾害影响较为

严重的地区之一。

(3)近51年来，龙卷风平均每年出现1.6次，80年代龙卷风出现最为频繁；一年之中，主要集中在春、夏两季，以4-7月出现的龙卷风最多；1d之中，白天比夜间多，傍晚18时段最多；持续时间大多在60min之内，其中20min之内的占64.7%，持续时间最短仅为1min。

(4)龙卷风累计出现的次数和风速变化的分布符合经验指数分布；本核电站区域 10^{-7} 概率值对应的设计基准风速为 $70\ \text{m/s}$ ；考虑到在调查区域内曾出现过定级为 F_3 的龙卷风事件，从核安全的保守性角度考虑，推荐本核电站龙卷风设计基准风速取 $75\ \text{m/s}$ 。

(5)依据在调查区域内最强龙卷风等级为富士达 F_3 级，分别在合浦和电白共出现过3次，结合推荐的龙卷风最大设计风速为 $75\ \text{m/s}$ ，建议核电站工程设计基准龙卷风等级采用 F_3 级。

参考文献:

- [1] 《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 398.
- [2] 雷向杰, 李亚丽, 杜继稳, 等. 陕西龙卷、尘卷风时空分布和日变化规律分析[J]. 灾害学, 2005, 20(2): 99-101.
- [3] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [4] 栾远刚. 龙卷风动力源新解[J]. 科协论坛, 2009(3): 87-88.
- [5] 薛德强, 李长军. 一次强龙卷风过程破坏力的估计[J]. 气象, 2002, 28(12): 50-52.
- [6] 刘德稳, 谭平, 周福霖, 等. 核电站工程防灾减灾研究[J]. 灾害学, 2014, 29(5): 149-153.
- [7] 陈正洪, 刘来林, 袁业畅. 湖北大坂核电站周边地区龙卷风参数的计算与分析[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 333-337.
- [8] 国家安全局政策法规处. 核电厂厂址选择的极端气象事件(HAD101/10)附录VI//核电厂安全导则汇编[M]. 北京: 中国法制出版社, 1992: 764-767.
- [9] 马德栗, 陈正洪, 靳宁, 等. 湖北浠水核电站周边地区龙卷风特征[J]. 气象科技, 2011, 39(4): 520-524.
- [10] 《中国气象灾害大典》编委会. 中国气象灾害大典(广西卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [11] 《中国气象灾害大典》编委会. 中国气象灾害大典(广东卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [12] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2001-2012.
- [13] 谢欣荣. 湘北龙卷风研究[J]. 湖南水利水电, 2009(6): 44-47.
- [14] 陈家宜, 杨慧燕, 朱玉秋, 等. 龙卷风风灾的调查与评估[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(4): 111-117.
- [15] 孔新红. 万安核电厂址区域龙卷风分布特征及设计基准[J]. 能源研究与管理, 2012(3): 59-62.

(下转第169页)

namical risk management unveil productivity improvements [J].
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22
(1): 25-34.

[52] Jens Rasmussen. Risk management in a dynamic society: a modeling problem[J]. Safety Science, 1997, 27(2/3): 183-213.

Research Status and Prospects of Coupled Disaster Risk for City Gas Pipeline Network

Yang Kai, Lv Shuran and Zhang Yuan

(School of Safety and Environmental Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: The city as a complex system and its development is inseparable from energy, such as oil and natural gas. Potential risk factors including human error, equipment failure, adverse environment, management deficiencies and other aspects are existence in running city gas pipeline network. At the same time the development of social and economic in city, highlight its vulnerability. Various risks of gas pipeline network coupled to each other and lead to disasters, and it will give rise to great damage and serious consequences. Accidents are common in China and abroad. In order to reduce the incidence of city gas pipeline network disasters from the perspective of multi-factor coupling, literature analysis of research status of city gas pipeline network disaster risk is adopted to uncover the deficiency. Based on analyzing a large number of domestic and overseas literatures about city gas pipeline network multi-factor coupling disaster risk, it is found that ①Research on the multi-factor coupling mechanism for disaster risk of city gas pipeline network are relatively sparse; ②Research on the evolution of multi-factor coupling disaster risk about city gas pipeline network are lacking; ③There are little research on assessment model of multi-factor coupling disaster risk about city gas pipeline network; ④It is lack of research on the dynamic disaster risk management and control strategy of city gas pipeline. Finally, with the aim of addressing those problems, the paper puts forward the research direction on multi-factor coupling disaster risk of the city gas pipeline network in future, it provide a catalytic role for the development of disaster risk coupling theory and city safe operation and management.

Key words: city; gas pipeline network; coupled disaster risk; law of evolution; risk assessment; management and control measures

(上接第 156 页)

Survey and Evaluation of Tornadoes around a Nuclear Power Plant in Guangxi

He Ru^{1,3}, Tang Zhonglian², Su Zhi^{1,3} and Lin Zhenmin³

(1. Guangxi Meteorological Service Center, Nanning 530022, China; 2. Meteorological Observatory of Zhuhai Air Traffic Management Station, Zhuhai 519040, China; 3. Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China)

Abstract: Tornado which is one of the most important extreme meteorological parameters must be concerned during the nuclear power plant siting and designing stage. The temporal and spatial distribution, disaster characteristics, intensity gradation and the maximum design basis category for tornado wind velocity of tornado events around the nuclear plant of Guangxi Autonomous Region are analyzed and evaluated, based on the tornado data from the area of 300 km × 300 km around the nuclear power plant from 1962 to 2012. The results show that: the wind speed category of Fujita tornado scale is F0 or F1 mostly. The maximum of category is up to F3. The tornadoes are mainly distributed around the nuclear plant and coastal area of Guangdong. They also occur in the northeast and northwest of mainland occasionally. The tornadoes concentrated mostly in spring and summer, especially in April, and occurred frequently in daytime, especially from 18:00 to 18:59 at afternoon. The design basis standard wind speed category is F3 (Fujita tornado scale), design maximum wind speed is 75m/s.

Key words: nuclear power plant; tornado; intensity gradation; design basis category for tornado wind velocity; temporal and spatial distribution; Guangxi