

湖北省雷电灾损特征评估

贺姗¹ 龚明翔¹ 乐辉²

(1 湖北省防雷中心, 武汉 430074; 2 湖北天宏检测科技集团有限公司, 武汉 430074)

摘要: 基于2000—2020年湖北省雷电灾害资料, 统计了雷电灾害的等级、经济损失、人员伤亡以及受灾行业等信息, 分析了不同等级雷电灾害变化特征、受灾行业以及生命和经济损失特征。结果表明: 2000—2020年湖北省雷灾以一般和较大等级为主, 占比达96.31%, 重大、较大、一般等级雷灾均呈先上升后降低的特征; 鄂东地区为雷灾高发区, 江汉平原常发生较大及以上等级的雷灾, 而鄂西地区以一般等级雷灾为主; 农、林、牧、渔业最易遭受雷灾, 其伤亡和设备损坏也最严重, 但呈下降趋势; 制造业因雷灾造成的经济损失最大, 尤其是在鄂东北地区; 全省生命损失指数呈东高西低的分布特征, 高至较高生命、经济损失指数主要集中在鄂东中部地区, 少量散布在鄂西北和江汉平原局地。

关键词: 雷灾事故, 等级, 行业, 生命损失指数, 经济损失指数

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.04.005

Characteristics of Lightning Disasters in Hubei Province

He Shan¹, Gong Mingxiang¹, Le Hui²

(1 Lightning Protection Center of Hubei Province, Wuhan 430074; 2 Hubei Tianhong Detection and Technology Group (Stock) Co. Ltd, Wuhan 430074)

Abstract: Lightning disaster data in Hubei from 2000 to 2020 are utilized for calculating the lightning disaster grades, losses, casualties and affected sectors and for analyzing the variation characteristics of lightning disasters with different grades as well as the characteristics of losses in different sectors and in life and economy. The results show that the lightning disasters in Hubei from 2000 to 2020 were mainly of general and large grades, accounting for 96.31%. Lightning disasters with major, large and general grades all showed the trend of increasing firstly and then decreasing. The eastern part of Hubei was the region frequently hit by lightning disasters, and lightning disasters with large and higher grades often occurred in Jianghan Plain, while the lightning disasters in the western part of Hubei mainly belonged to the general grade. Agriculture, forestry, animal husbandry and fishery were the four sectors that were most vulnerable to lightning disasters, with the most serious casualties and equipment damages. However, the situation exhibited a downward trend. The manufacturing industry suffered the most serious economic loss due to lightning disasters, especially in the northeast Hubei. The life loss index was high in the east and low in the west. The life and economic loss indexes with high and even higher grades were mainly concentrated in the central region of Eastern Hubei, and a few scattered in Northwest Hubei and Jianghan Plain.

Keywords: lightning disaster, grade, sector, life loss index, economic loss index

0 引言

雷电时空尺度小、突发性强, 易对人身和财产安全造成严重危害。据统计, 雷电每年造成全球超过10亿美元的经济损失和1万以上的人员伤亡^[1]。全球对雷电造成的人员伤亡和经济损失做了大量研究。国外, 美国学者López等^[2]研究了雷电死亡人数的长期变化; 澳大利亚、印度等国学者^[3-5]分析了雷电伤亡的时空特征, 并指出农村是伤亡多发地。国内, 马明等^[6]揭示

了我国1997—2006年雷电灾害分布和损失特征; 针对各省雷电灾害特征开展了不少研究, 例如: 新疆雷灾伤亡事故的主体是农牧民^[7], 1998—2007年安徽省雷灾呈抛物线分布^[8], 内蒙古雷灾呈上升趋势^[9]。这些研究表明, 我国地域广阔, 气候复杂多变, 各地雷电灾害存在差异, 故深入探索湖北省雷电灾害特征具有现实意义。

黄小彦等^[10]揭示了2000—2006年湖北省雷电灾害频次、直接经济损失等的时空分布特征。金晨路等^[11]和朱传林等^[12]分别根据1998—2009年、2000—2009年湖北省雷电灾害资料对17个地市的雷电灾害易损度进行了区划。这些研究集中在2009年之前, 且空间分析精细化不足。随着气候变化和社会发展, 雷电灾害

收稿日期: 2023年2月6日; 修回日期: 2024年1月31日

第一作者: 贺姗(1987—), Email: 1256650699@qq.com

资助信息: 湖北省气象局科技发展基金项目(2022Z05-12); 湖北省防雷中心科技项目(FL-Y-2021005); 湖北省自然科学基金(2022CFD123)

特征可能发生变化。有研究指出, 19世纪末至20世纪末英美雷灾发生数和死亡数均有显著变化^[13-14]; 我国2000年前后雷电灾害呈上升趋势^[6], 而之后却呈减少趋势^[15], 对河北^[16-17]、江西^[18]、浙江^[19]等地的研究也是如此。因此, 对湖北省雷电灾害进行长序列的研究非常必要。基于湖北省2000—2020年雷电灾害资料, 本文以全省103个区县(包括县级市, 下同)为研究单元, 精细化地分析了不同地区不同等级雷灾的分布特征, 并计算了各区县的生命、经济损失指数, 揭示湖北省雷电灾损特征。

雷电对不同行业, 如电力^[20-21]、交通运输业^[22]、畜牧业^[23]等造成的危害是本研究的另一个重点。彭相瑜等^[17]、刘兆旭等^[24]和蔡永祥等^[25]将雷电受灾行业主要划分为6~8类, 并分析了各行业遭受雷灾次数占比; 黄小彦等^[10]揭示了湖北省12类行业的直接经济损失特征。本文详细统计了19类受灾行业的事故数、伤亡、经济损失及设备损坏情况, 全面揭示不同行业遭受雷灾的损失特征, 为湖北省各行业有针对性地开展雷电防灾减灾工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

使用资料包括: 1) 2000—2020年湖北省雷电灾害资料, 来源于中国气象局雷电防护管理办公室等编写的《全国雷电灾害汇编》。2) 2000—2020年湖北省各区县的人口、经济等信息, 来源于湖北省统计局编写的《湖北省统计年鉴》。3) 地理信息数据, 湖北省各区县行政边界数据(比例为1:250000), 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)^[26]。

根据《雷电灾情统计规范》(QX/T 191—2013)^[27]、《雷电灾害调查技术规范》(QX/T 103—2017)^[28]提取每起雷灾发生的时间、地点、受伤或死亡人数、直接或间接经济损失、设备损坏情况、受灾行业等要素进行统计。主要处理如下: 1) 剔除缺乏明确时间或地点信息的雷灾, 实际统计雷灾总数为1420起。2) 依据QX/T 103—2017规定(表1), 将未记录经济损失的389起雷灾标注为“损失不确定”, 剩余1031起雷灾划分为4个等级。3) 根据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)^[29]规定的20类行业, 将未记录行业信息的138起雷灾标注为“行业不确定”, 对剩余1282起雷灾进行了行业分类。4) 资料的可靠性与完整性是雷灾特征研究的关键, 由于统计时对早期少量雷灾资料进行了剔除, 而近些年则存在雷灾上报不全面的情况, 故本文所得湖北省2000—2020年雷电灾损特征是不完全统计的结果。

表1 雷灾等级划分标准

Table 1 Classification criteria for lightning disaster grades

等级	雷灾伤、亡人数或直接经济损失(单位: 万元)条件
特大	亡≥4; 或亡=3且伤≥5; 或亡=0且伤≥10; 或直接经济损失≥500
重大	2≤亡≤3; 或亡=1且伤≥4; 或亡=0且5≤伤≤9; 或100≤直接经济损失<500
较大	亡=1; 或亡=0且2≤伤≤4; 或20≤直接经济损失<100
一般	伤=1; 或直接经济损失<20

注: 各等级内满足一项条件即可。

1.2 方法

生命损失和经济损失是雷电灾害风险评估的两个重要指标, 分别利用雷灾造成的人员伤亡、直接经济损失与发生的雷灾数加权求和构建损失指数如下:

$$S = \sum_{i=1}^2 (0.5 \times X_i^*), \quad (1)$$

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2)$$

式中, S 表示雷灾造成的生命、经济损失指数; X_i^* 表示第 i 个因子按式(2)进行归一化处理后的值; X_i 、 X_{\max} 、 X_{\min} 分别表示第 i 个因子的实际值、最大值以及最小值。

2 雷灾变化特征

2.1 各等级雷灾时间变化特征

2000—2020年湖北省各等级雷灾年变化见图1。2000—2020年湖北省雷灾以一般等级为主, 其次为较大雷灾, 占比分别为69.25%、27.06%。2000—2008年一般和较大雷灾年变化趋势一致, 均波动增加至2007年达到峰值, 继而波动减少。特大雷灾共3起, 均发生在2002年前。重大雷灾主要出现在2004—2009年, 其中峰值出现在2006年。重大、较大、一般雷灾均呈先升后降的特征。结合各等级雷灾变化趋势可知, 2007年前湖北省雷灾呈增加趋势, 此后波动减少。湖北省气象部门2006年开始布设闪电定位系统, 2014

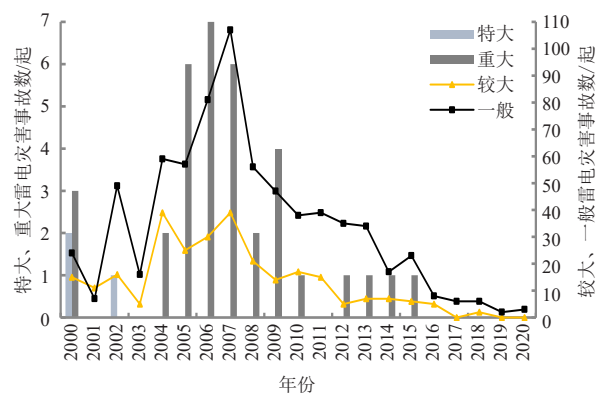


图1 2000—2020年湖北省各等级雷灾年变化
Fig. 1 Annual changes of lightning disasters of different grades in Hubei from 2000 to 2020

年加密了设备,逐步完善了雷电监测网络,获取了更丰富的雷电监测数据^[30],从而能更精确及时地向公众发布雷电预报预警信息。监测资料显示,湖北省2007—2020年雷击频次整体呈减少趋势,与同期雷灾数相关系数达0.791,表明雷灾减少可能与雷击频次减少有关。

2.2 雷灾空间分布特征

利用ArcGIS绘制2000—2020年湖北省较大及以上等级和一般等级雷灾的空间分布图(图2),可知全省

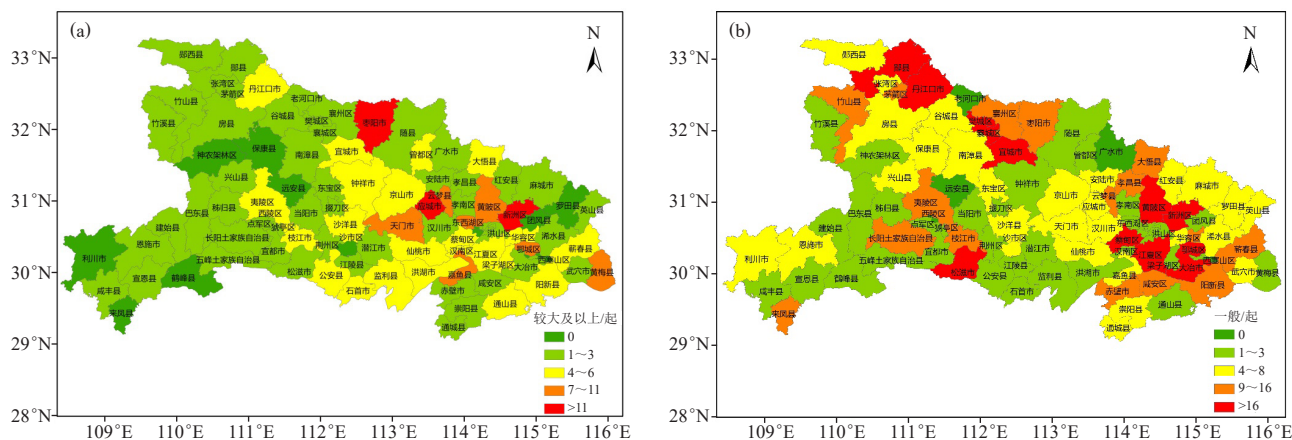


图2 2000—2020年湖北省较大及以上等级(a)和一般等级(b)雷灾数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of lightning disasters with major and higher grade (a) and general grade (b) in Hubei from 2000 to 2020

3 雷灾受灾行业损失特征

3.1 受灾行业概况

根据GB/T 4754—2017对雷电受灾行业进行统计得到表2。结果表明:1) 19类行业有雷灾发生,表2中前5类行业易遭受雷击,其和占统计行业雷灾总数的73.87%,其中农、林、牧、渔业最多,占比达30.73%。2) 雷灾导致了8类行业人员的伤亡,83.76%来自农、林、牧、渔业,该行业平均每起雷灾造成0.84人伤亡,平均人员伤亡第二和第三位的是文化、体育和娱乐业(0.67人/起)和建筑业(0.64人/起)。3) 制造业遭受的经济损失最严重,其直接经济损失也最大。这一结果不同于内蒙古石油化工及矿业遭受直接经济损失最大^[9],表明雷灾对行业的影响存在地域性差异;也与2000—2006年湖北雷灾对电力业造成的直接经济损失最大^[10]不同,表明雷灾对行业经济的影响,随着气候变化与社会发展有了一定改变。电力、热力、燃气、水生产和供应业的经济损失次之,其遭受的间接经济损失最大。水利、环境和公共设施管理业平均每起雷灾造成的经济损失最高,为17.1万元/起。4) 农、林、牧、渔业的设备受灾最严重,且

86.4%的区县发生过较大及以上等级雷灾(图2a),多发区位于鄂东的新洲区、东西湖区、黄陂区、云梦县、鄂城区、嘉鱼县、黄梅县等地和江汉平原地区,其中最多的为新洲区和应城市,均为15起;鄂西发生较大及以上等级雷灾较少;全省除5个区县外均发生过一般雷灾(图2b),一般雷灾多发区较分散,主要位于鄂西北、鄂西南东部以及鄂东大部分地区。在重点区域开发或工程建设时,应考虑当地雷灾分布特征,必要时开展可行性论证。

家用电器占比达95.86%,故雷雨来临之前,宜断开家用电器的电源以保护设备安全。信息传输、软件和信息技术服务业次之,但该行平均每起雷灾造成的设备损坏最多,达26.58件/起。

3.2 时间分布特征

由2000—2020年湖北省雷灾最多、人员伤亡最惨重、设备损坏最多行业(农、林、牧、渔业)以及经济损失最严重行业(制造业)的年变化(图3)可知:1) 农、林、牧、渔业遭受雷灾数和设备损坏均呈单峰分布,峰值均在2007年,该年遭受雷灾58起,设备损坏数占该行业总数的48.63%。该行业伤亡整体呈波动减少趋势,2000—2003年伤亡骤减,虽2004—2007年有所增长,但此后呈明显减少趋势。这一变化趋势除与雷灾的减少有关外,还可能与湖北省产业转型,第一产业占比逐年降低^[31]有关。2) 制造业的经济损失呈双峰分布,2000—2004年经济损失变化较小,2005年剧增,主峰出现在2006年(约675万元),次峰在2012年(约247万元)。

3.3 空间分布特征

统计各区县遭受雷灾数最多及各类损失最严重

表2 2000—2020年湖北雷灾受灾行业^[29]统计

Table 2 Statistics of sectors affected by lightning disasters in Hubei from 2000 to 2020

受灾行业	事故数/起	伤亡数/人	直接经济损失/万元	间接经济损失/万元	设备损坏/件
农、林、牧、渔业	394	330	410.5	104.0	2153
电力、热力、燃气、水生产和供应业	165	2	1191.4	767.9	702
公共管理、社会保障和社会组织	154	3	473.8	79.0	1540
制造业	132	16	1457.5	563.9	585
教育	102	23	161.1	29.1	559
信息传输、软件和信息技术服务业	80	0	339.3	103.6	2126
金融业	64	0	346.1	30.4	212
卫生和社会工作	40	0	176.3	36.8	293
交通运输、仓储和邮政业	27	0	199.5	3.1	96
批发和零售业	23	0	73.0	62.4	133
住宿和餐饮业	22	0	33.5	11.0	58
科学研究和技术服务业	17	0	29.5	11.0	82
水利、环境和公共设施管理业	15	0	106.1	150.4	148
文化、体育和娱乐业	12	8	6.1	3.0	89
建筑业	11	7	42.5	0.2	39
采矿业	10	5	8.6	4.0	44
租赁和商业服务业	7	0	8.8	10.0	96
房地产业	5	0	36.0	0.5	56
居民服务、修理和其他服务业	2	0	16.8	1.2	12

注：因国际组织无雷灾发生，故未放入统计表中。

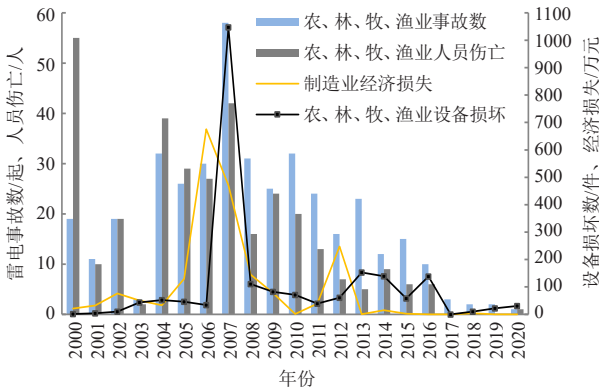


图3 2000—2020年湖北省农、林、牧、渔业雷灾数、人员伤亡和设备损坏以及制造业经济损失的年度分布

Fig. 3 Annual change of lightning disasters, casualties, equipment damages of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery sector and economic loss of manufacturing industry in Hubei from 2000 to 2020

行业情况可知，全省有44.66%的区县因雷灾对农、林、牧、渔业造成了设备损坏，武穴市最严重。全省有38.83%的区县因雷灾对制造业造成了经济损失，高值区主要位于鄂东北地区，前三位分别为汉南区（350.1万元）、新洲区（310.5万元）以及云梦县（291.1万元）。农、林、牧、渔业雷灾高发区、人员高伤亡区主要位于鄂东地区（图4），少量分散在江汉平原和鄂西局地。该行业发生雷灾数在10起以上的有6个区县，黄陂区、蔡甸区、鄂城区均有20起。全省仅27个

区县该行业人员未因雷灾造成伤亡，鄂西地区人员伤亡较少，华容区雷灾伤亡最多，达38人。

4 生命、经济损失指数分布特征

据统计，2000—2020年湖北省雷灾共造成440人的伤亡和约5626万元直接经济损失。将各区县单位面积上的年平均雷灾数、人员伤亡数以及直接经济损失根据公式（2）进行归一化处理（最大、最小值见表3），将归一化后的年平均雷灾数分别与人员伤亡数、直接经济损失按公式（1）进行加权计算，即可得到2000—2020年湖北省雷灾生命、经济损失指数，均可划分为4级：低（0.00~0.01），中（0.01~0.05），较高（0.05~0.20），高（>0.20）。

由图5a可知，湖北省生命损失指数整体呈现东高西低的分布特征，高至较高生命损失指数主要位于鄂东中西部地区，以及鄂西北和江汉平原东北部局地，包括江夏外的武汉其他各区，鄂州各区，黄冈市的黄梅县、黄州区，黄石市的下陆区、黄石港区、铁山区，孝感市的云梦县、应城市，咸宁市的嘉鱼县，襄阳市的襄城区、樊城区，十堰市的张湾区、茅箭区以及宜昌市的猇亭区、伍家岗区、西陵区。江汉区生命损失指数最大，为0.73。江汉平原和鄂东南大部分地区生命损失指数为中等。鄂西大部分地区以及鄂东北边界地区生命损失指数均较低。

由图5b可知，经济损失指数空间分布不均衡，高

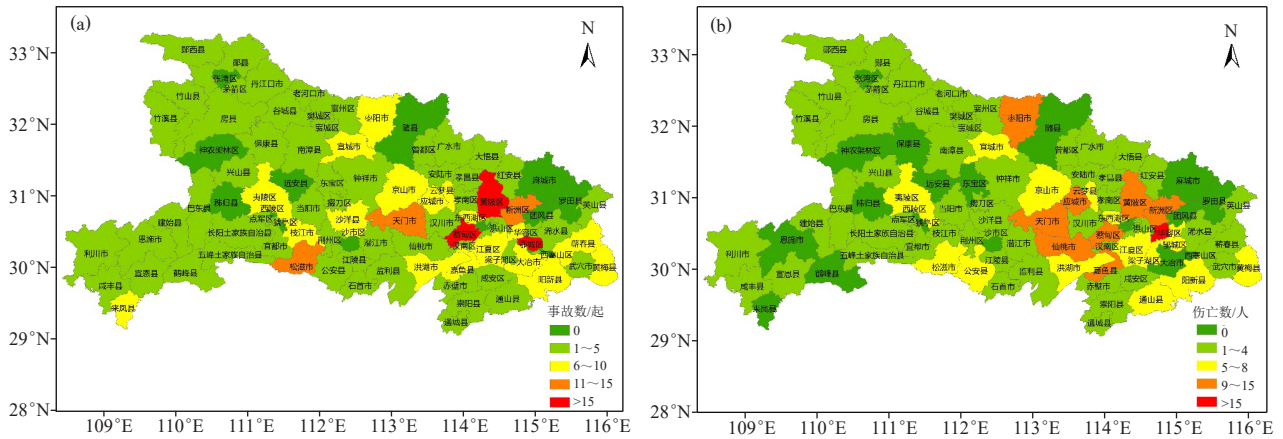


图4 2000—2020年湖北省农、林、牧、渔业遭受雷灾数(a)和人员伤亡(b)的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the numbers (a) and casualties (b) of lightning disasters suffered by agriculture, forestry, animal husbandry and fishery sector in Hubei from 2000 to 2020

表3 生命、经济损失指数各因子的最大和最小值

Table 3 Maximum and minimum values of each factor of life and economic loss index

	年均雷灾数/ (次/km ² /a)	年均人员伤亡/ (人/km ² /a)	年均直接经济损失/ (万元/km ² /a)
最大值	0.0186	0.0038	0.034
最小值	0.0003	0	0

至较高经济损失指数主要出现在鄂东中北部, 以及鄂西北和江汉平原局地。各区县生命损失指数与同期的年平均人口密度相关系数、经济损失指数与年均均GDP相关系数分别为0.786、0.598, 均通过了0.001的显著性水平检验, 表明人口密集地区或GDP产值高的区域更应注意防范雷电灾害对生命以及财产安全造成的重大危害。

5 结论与讨论

1) 2000—2020年湖北省发生雷灾1420起, 共造成440人伤亡和7842万元以上的经济损失。能确定等

级的雷灾以一般和较大等级为主; 重大、较大、一般等级雷灾均呈先上升后降低的特征。鄂东地区是雷灾的高发区, 为雷电灾害的重点防范区; 江汉平原常发生较大及以上等级的雷灾; 鄂西地区以一般雷灾为主。

2) 农、林、牧、渔业受雷灾影响最大, 遭受雷灾最多, 人员伤亡和设备损坏最严重, 但近年来呈下降趋势。制造业遭受的经济损失最大, 尤其是鄂东北地区; 电力、热力、燃气、水生产和供应业遭受的间接经济损失最大; 信息传输、软件和信息技术服务业平均每起雷灾造成的设备损坏最多。

3) 湖北省生命损失指数整体呈东高西低的分布特征, 高至较高等级生命损失指数主要位于鄂东中西部地区, 以及鄂西北和江汉平原东北部局地。高至较高的经济损失指数主要出现在鄂东中北部, 以及鄂西北和江汉平原局地。

根据湖北省的雷电灾损特征, 应采取相应的措施

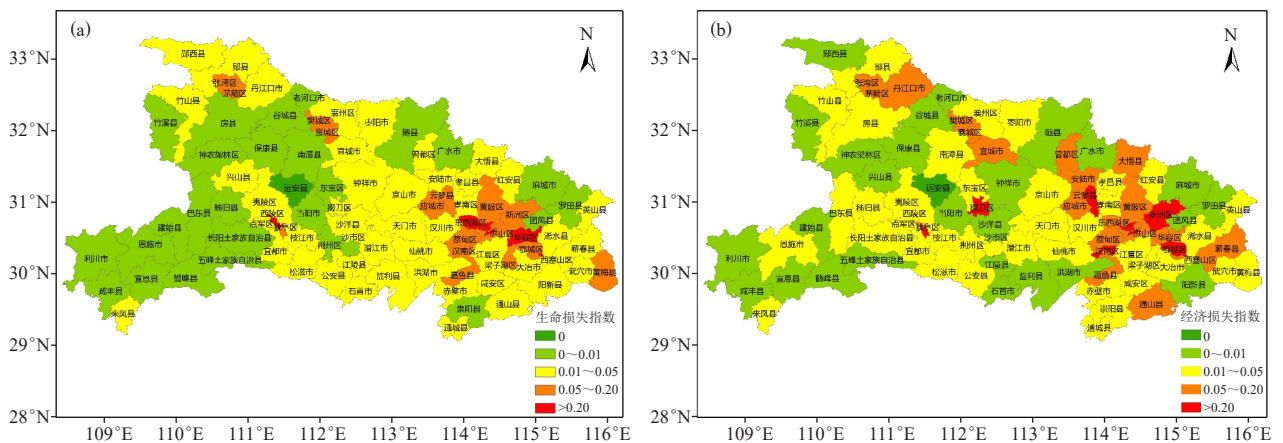


图5 2000—2020年湖北省雷灾生命损失指数(a)和经济损失指数(b)空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of life loss index (a) and economic loss index (b) of lightning disasters in Hubei from 2000 to 2020

来提升防雷减灾能力。首先,在气象台站基础设施建设、区域开发等重大规划中应考虑雷电灾害的影响。针对精密仪器设备的选址,应重点关注信息系统的雷电防护,雷灾多发区域可提升防护等级;针对人口密集或GDP高的区域,应优先配置完善的防雷系统,可布设雷电监测设备开展定点预警。其次,建议各行业采取完善的雷电防护措施。农、林、牧、渔业应以保障人身安全为主,多关注雷电预警信息,在雷电来临时避免户外作业;信息传输、软件和信息技术服务业应重点关注设备的防护。建议各行业安装符合规范要求的防雷装置,建立雷电预警信息接收和响应机制,并将雷电灾害科普知识纳入各行业安全教育内容,提升公众防雷避险能力。

参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [2] López R E, Holle R L. Changes in the number of lightning deaths in the United States during the Twentieth Century[J]. Journal of Climate, 1998, 11(8): 2070-2077.
- [3] Coates L, Blong R, Siciliano F. Lightning fatalities in Australia, 1824-1991[J]. Natural Hazards, 1993, 8(3): 217-233.
- [4] Singh O, Singh J. Lightning fatalities over India: 1979-2011[J]. Meteorological Applications, 2015, 22(4): 770-778.
- [5] Hoque M A A, Billah M, Pradhan B. Spatio-temporal and demographic distribution of lightning related casualties in northeastern part of Bangladesh[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: 101197.
- [6] 马明, 吕伟涛, 张义军, 等. 1997-2006年我国雷电灾情特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 393-400.
- [7] 保尔汗江·买买提. 2000-2009年新疆雷电灾情分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 301-305.
- [8] 周方媛, 肖稳安. 安徽省近10年的雷电灾害分布特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1908-1911.
- [9] 刘晓东, 李松如, 冯旭宇, 等. 内蒙古雷灾特征及灾情的灰色关联评估[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 251-255.
- [10] 黄小彦, 王学良, 李慧. 2000-2006年湖北省雷电灾害时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 73-77.
- [11] 金晨路, 肖稳安, 王学良. 湖北省雷电灾害易损性分析与区划[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(3): 272-276.
- [12] 朱传林, 王学良, 贺姍, 等. 基于层次模型及权重分析的湖北省雷电灾害易损度区划[J]. 中国农学通报, 2015, 31(8): 206-211.
- [13] Holle R L, López R E, Navarro B C. Deaths, injuries, and damages from lightning in the United States in the 1890s in comparison with the 1990s[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2005, 44(10): 1563-1573.
- [14] Elsom D M. Deaths and injuries caused by lightning in the United Kingdom: analyses of two databases[J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1-4): 325-334.
- [15] 田德宝, 冯瑜骅, 张雪慧, 等. 2012-2017年全国雷电灾害事故统计分析[J]. 科技通报, 2020, 36(5): 42-47.
- [16] 吴孟恒, 田艳婷, 崔海华, 等. 2003-2008年河北省雷电灾害特征统计分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 21-25.
- [17] 彭相瑜, 陈笑娟, 陈小雷, 等. 河北省雷电灾害事件特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 100-104.
- [18] 夏雷, 金勇根, 段和平, 等. 江西省雷灾灾情和闪电活动时空分布特征及灾情等级划分研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 252-260.
- [19] 顾媛, 徐震宇, 崔雪东. 1998-2020年浙江省雷电灾害特征分析[J]. 科技通报, 2021, 37(7): 38-43.
- [20] Tanaka M. Lightning hazards in Japan[J]. Electrical Engineering, 1951, 70(12): 1065-1067.
- [21] Montanya J, Fabró F, van der Velde O, et al. Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(6): 1465-1472.
- [22] Plumer J A, Robb J D. The direct effects of lightning on aircraft[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, EMC-24(2): 158-172.
- [23] Matos W L N, Leal A F R, Ferreira E R, et al. Lightning fatalities in the livestock industry in the Brazilian amazon region (2012-2019) [C]//Proceedings of 2019 International Symposium on Lightning Protection. Sao Paulo: IEEE, 2019: 1-6.
- [24] 刘兆旭, 刘晶, 范子昂. 2005-2020年新疆雷电灾害特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1402-1414.
- [25] 蔡永祥, 罗少辉, 唐文婷, 等. 1995-2020年青海省雷电灾害时空分布及其灾害特征分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 92-95, 119.
- [26] 余田野, 王学良, 袁海锋, 等. 基于投影寻踪方法的湖北省雷电灾害风险区划[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 291-296.
- [27] 中国气象局. 雷电灾情统计规范(QX/T 191-2013)[S]. 2013.
- [28] 中国气象局. 雷电灾害调查技术规范(QX/T 103-2017)[S]. 2017.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)[S]. 2017.
- [30] 贺姍, 肖稳安, 王学良, 等. 雷电强度客观分级方法探讨[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1291-1296.
- [31] 张旋. 湖北省产业结构分析与优化研究[J]. 科技和产业, 2017, 17(8): 26-30, 63.

(编辑: 郑秋红)

(上接20页)

- [36] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [37] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [38] Bechtold P, Semane N, Lopez P, et al. Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(2): 734-753.
- [39] Zhang C X, Wang Y Q. Projected future changes of tropical cyclone activity over the western north and south Pacific in a 20-km-mesh regional climate model[J]. Journal of Climate, 2017, 30(15): 5923-5941.
- [40] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [41] Wang L, Zhang Y, Li J, et al. Understanding the performance of an unstructured-mesh global shallow water model on kinetic energy spectra and nonlinear vorticity dynamics[J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(6): 1075-1097.
- [42] Zhang Y, Li X H, Liu Z, et al. Resolution sensitivity of the GRIST nonhydrostatic model from 120 to 5 km (3.75 km) during the DYAMOND winter[J]. Earth and Space Science, 2022, 9(9): e2022EA002401.
- [43] Zhang Y, Yu R C, Li J, et al. AMIP simulations of a global model for unified weather-climate forecast: understanding precipitation characteristics and sensitivity over east Asia[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2021, 13(11): e2021MS002592.
- [44] 陈苏阳, 张祎, 周逸辉, 等. GRIST模式夏季气候回报试验中东亚降水季节内特征的评估[J]. 气象学报, 2023, 81(2): 269-285.

(编辑: 卢冰)