陈广昌，崔逊，田心如. 江苏省雷电灾害危险性定量化评估及区划［J］. 灾害学，2017，32(1)：32 - 35.［CHEN Guangchang，CUI Xun and TIAN Xinru. Quantitative assessment and zoning of lightning hazard in Jiangsu Province［J］. Journal of Catastrophology，2017，32(1)：32 - 35. doi：10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2017. 01. 007.］

江苏省雷电灾害危险性定量化评估及区划*

陈广昌[1]，崔 逊[1]，田心如[2]

（1. 江苏省防雷中心，江苏 南京 210009；2. 江苏省气象台，江苏 南京 210008）

摘 要：为探讨雷电灾害定量化风险评估方法，从而为防灾减灾提供更加科学的决策依据，利用 2013 - 2014 年的无锡市三维闪电定位系统资料和详细的雷电灾情资料，经归一化处理后，采用相关法，选取了相关显著的闪电次数、总闪电强度和最大闪电强度作为雷电灾害的致灾因子。然后采用灰色关联分析法，定量化得到三个致灾因子权重，构建雷电灾害危险度指数模型。以雷电灾害危险度定量表征危险性。近似认为全省雷电灾害防御水平相当，把此模型应用于江苏全省，借助于 GIS 分析工具，进行了 1 km × 1 km 分辨率的江苏省雷电灾害危险度区划。区划结果表明：雷电灾害危险度的空间分布特征与闪电密度分布特征相似，并且危险度高值区和闪电密度高值区的分布也较为一致，不同的是，危险度高值区较闪电密度高值区的范围有所扩大，危险度评估结果与实际贴合，又更加细化，依此方法及长年代雷电及灾情资料做出的雷电灾害风险评估，可更加科学、客观地指导雷电防灾减灾工作。

关键词：雷电灾害；危险性；灰色关联度；定量；区划；江苏

中图分类号：P463.3；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000 - 811X(2017)01 - 0032 - 04

doi：10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2017. 01. 007

江苏省属于雷电活动较频繁的省份，随着社会经济、信息技术特别是计算机网络技术的迅速发展，雷电危害造成的损失也越来越大，雷电防护也成为一项越来越重要的工作。雷击风险分析是合理规划科学防雷的基础，也是重大建设项目防雷设计之前最重要的环节。

目前较新的灾害风险评估方法，多选取致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力等四个因子作为指标，其中致灾因子危险性被作为最重要的因子[1-5]。在雷电特征分析或风险评估中，通常把雷暴日数、闪电频数、闪电强度等要素作为致灾因子进行讨论[4,6-7]。

在闪电定位系统监测资料未系统使用前，对雷电特征及风险的研究，仍限于对人工观测的雷暴日资料进行分析，如刘梅[8-9]、朱飙[10]、冯民学等[11]用江苏省多年雷暴资料，统计分析了江苏省雷暴日数的时、空分布特征及变化趋势。冯民学等[12]通过与江苏省电力部门闪电定位资料的对比，发现省气象局闪电定位系统的探测效率为 91%，是合理的；王学良等[13]利用雷电定位系统资料，采用二元法计算的 2007 - 2012 年湖北省 25 个测站平均年雷暴日数与人工观测相等，平均差异为 7.4%，说明雷电定位系统资料是可靠的。此后，多人陆续使用闪电定位资料进行了闪电分布特征分析、风险区划及雷暴预警的研究[3,14-16]。与雷暴日数相比，闪电次数能代表一个区域内雷暴活动的频繁程度，而闪电强度也是导致受灾严重与否的一个关键因子。冯民学等[3]用历年人工岛内发生地闪次数作为气象指标，对洋口港区人工岛进行雷击风险计算和雷击风险区等级划分，但未能考虑闪电强度，分析不够全面；刘垚等[4]虽然从地闪密度和地闪强度两个方面分析雷电致灾因子的风险，但是两因子权重的赋值较为主观。本文以详实的雷电灾情资料为基础，利用相关方法选出致灾因子。采用灰色关联度方法，定量化得出雷电致灾因子权重，从而得出危险度指数模型。用危险度定量化表征危险性，依此做出的雷电灾害风险评估，可更加科学、客观地指导雷电防灾减灾工作。

* 收稿日期：2016 - 05 - 20　　修回日期：2016 - 08 - 03

基金项目：江苏省科技厅项目(BE2013728)

第一作者简介：陈广昌(1971 -)，男，江苏东海人，工程师，主要从事雷电科学与防护技术研究与应用. E-mail：cgctafl@163.com

通讯作者：田心如(1970 -)，女，江苏沛县人，高级工程师，主要从事气象灾害和应用气象服务研究. E-mail：tianxr4858@sina.com

1　资料和方法

1.1　资料

2013 年前，江苏气象部门闪电定位系统使用的是 ADTD 闪电探测仪，采用定向时差联合法对地闪进行定位。2012 年底布设了三维闪电定位系统，采用 IMPACT(磁定向－时差法)方法实现对闪电进行实时观测，该系统共由 16 个三维闪电定位仪和一个处理中心组成，三维闪电定位仪分别设在徐州、沛县、邳州、赣榆、滨海、宿迁、淮安、盱眙、建湖、大丰、扬州、浦口、高淳、江阴、启东、东山，闪电监测网单站的探测范围约为 600 km，有效覆盖全省。经中国气象局气象探测中心评估，江苏三维闪电定位系统定位误差较小，闪电数据大幅增加，精度极大提高，与国家雷电监测网具有良好的数据一致性，并且通过与雷达图、卫星云图的叠加分析，进一步证明数据是可信的。为保证资料连续性，本文采用 2013－2014 年三维闪电定位系统资料进行研究。使用 1 km × 1 km 的正方形网格提取全省闪电，用每个正方形的地闪次数及强度进行雷电灾害危险度区划。无锡市地闪次数为其所辖行政区域内各网格地闪次数之和。

分析江苏省防雷中心 2013－2014 年的雷电灾情监测报告，发现全省 13 个地级市中，无锡市灾情上报数据最为详细、样本数最多，因而选取该市进行雷电致灾因子权重分析，全省其它地区取相同权重系数。

1.2　数据处理及分析方法

1.2.1　归一化

为使数据无量纲，从而消除自变量的单位对因变量的影响，采用最大最小值法进行数据归一化：

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}。\tag{1}$$

1.2.2　相关分析

在雷电灾情数据中，因为经济损失值和受损物体的价值有关，随机性较大，与之相比，办公电子电器设备受损件数和家用电子电器设备受损件数更能反映雷电的自然影响程度，取二者之和作为因变量。自变量则选取闪电发生当日的闪电次数、闪电总强度、平均闪电强度、日最大闪电强度等因子。把雷电灾情资料和归一化后的闪电资料作相关分析，从而选出雷灾致灾因子。

1.2.3　灰色关联度分析

关联度是事物之间、因素之间关联性的量度。灰色关联度方法具有计算量小、不要求样本数量和服从一定分布规律的特点，是一种使用简便、可行性强的定量风险评估方法。

灰色关联度分析的步骤[17－18]如下：

(1)把归一化后的雷灾受损序列作为原始数据列，为

$$X_0 = \{X_0(1),\ X_0(2),\ \cdots,\ X_0(n)\}。\tag{2}$$

三个因子序列作为比较数据列，为

$$X_i = \{X_i(1),\ X_i(2),\ \cdots,\ X_i(n)\},\ i = 1,\ 2,\ \cdots,\ m。\tag{3}$$

(2)分别计算三个比较数列与原始数列的差值数列。

$$\Delta_i(k) = |\ X_0(k) - X_i(k)\ |,\ k = 1,\ 2,\ \cdots,\ n。\tag{4}$$

取两极最大差与最小差。

$$\Delta(\max) = \max_i \max_k \Delta_i(k);\tag{5}$$

$$\Delta(\min) = \min_i \min_k \Delta_i(k)。\tag{6}$$

(3)取分辨系数 $\rho = 0.5$，计算各比较数据与原始数据的关联系数 $\xi_i(k)$。

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_i(k) + \rho\Delta(\max)},$$

$$k = 1,\ 2,\ \cdots,\ n;\quad i = 1,\ 2,\ \cdots,\ m。\tag{7}$$

(4)计算关联度 γ_i。取 $\xi_i(k)$ 的算术平均值。

(5)根据关联度 γ_i，可计算出第 i 个影响因子的权重，即每个区划指标的权重 R_i。

$$R_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^{m}\gamma_i},\ i = 1,\ 2,\ \cdots,\ m。\tag{8}$$

1.2.4　雷电灾害危险性评估模型

雷电灾害危险性评价指数的数学模型为：

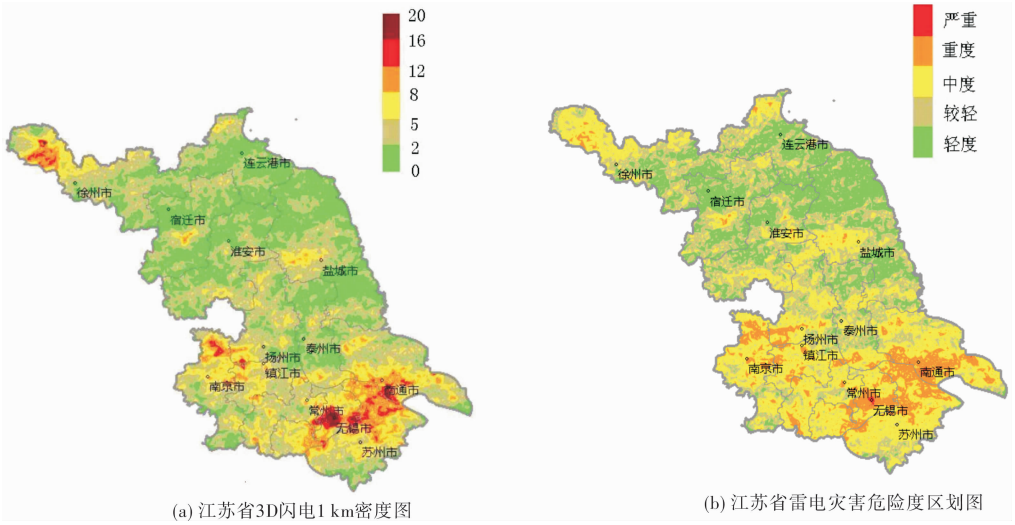
$$W = \sum_{i=1}^{m} R(i)X(i)。\tag{9}$$

式中：W 为危险度指数，m 为评估指标总数，$R(i)$ 为各评估因子的权重值，$X(i)$ 为因子的归一化指数值。同时依据一定的评判标准，可将雷电灾害的危险性程度依指数大小划分等级。

2　结果与分析

2.1　雷电灾害危险度相关气象因子

2013－2014 年，闪电定位仪观测到无锡市共出现 31 个有闪电定位及灾情记录的雷暴日。通过雷电灾情资料和归一化后的日闪电次数、闪电总强度、平均闪电强度、日最大闪电强度作相关分析，发现日闪电次数、闪电总强度以及日最大闪电强度与设备受损件数呈显著的正相关，相关系数分别为 0.6912、0.6570、0.3063，分别通过了 $\alpha = 0.001$、$\alpha = 0.001$、$\alpha = 0.10$ 的显著性检验。平均闪电强度相关不显著。



(a) 江苏省3D闪电1 km密度图　　(b) 江苏省雷电灾害危险度区划图

图 1　江苏省 2013 – 2014 年平均闪电密度分布(*a*)及雷电灾害危险度区划(*b*)

2.2　灰色关联度法求取各致灾因子权重

计算闪电发生日闪电次数、闪电总强度以及最大闪电强度与设备受损件数的关联度 γ_i，结果见表 1。从表 1 可以看出，闪电次数和闪电总强度和雷灾损失的关联度相同，且大于最大闪电强度。根据公式 8，求取以上三个致灾因子的权重系数 R_i，结果见表 2。

表 1　雷灾损失与气象致灾因子的关联度

闪电次数	闪电总强度	最大闪电强度
0. 856	0. 859	0. 572

表 2　各气象致灾因子的权重系数

闪电次数	闪电总强度	最大闪电强度
0. 375	0. 375	0. 250

2.3　江苏省雷电灾害危险性区划及模型检验

2006 年以前，江苏经济发展以苏南地区为主，2006 年中共江苏省第十一次代表大会明确提出了区域经济共同发展的要求，苏北地区正式进入了“飞地”经济时代，全省经济发展踏上了新台阶，可以近似认为，目前全省对雷灾的防御水平相当，因而可以将无锡市雷电灾害危险度评估模型(公式(9))应用于全省。采用表 2 中各因子的权重系数计算全省 1 km × 1 km 每个格点危险度指数 W，指数计算结果分成 5 个等级(表 3)，利用 GIS 对危险度指数做空间分析，得出江苏省雷电灾害危险度区划图。

表 3　雷电灾害危险度等级划分标准

名称	等级	风险指数值
严重	5	>0. 60
重度	4	0. 60 ~ 0. 49
中度	3	0. 48 ~ 0. 33
较轻	2	0. 32 ~ 0. 17
轻度	1	≤0. 16

图 1a 为江苏省 2013 – 2014 年平均地闪密度分布图。从图 1a 中可以看出，全省闪电密度分布不均，沿江苏南明显多于江淮之间和淮北地区，沿江苏南大部及淮北北部的部分地区闪电密度在 5 次/(km^2 · 年)以上。高值区主要在南京市北部、扬州市西南部、镇江市西南部、南通市西南部、泰州市南部、常州市西南和东部、无锡市中部、苏州市北部及徐州市西北部等的部分地区，闪电密度在 8 次/(km^2 · 年)以上，最高可达到 20 次/(km^2 · 年)。这些地区或湖泊河流众多，水气资源充沛，或多低山丘陵，地形条件使得不稳定的天气系统容易发生，雷电发生频次高。另外，连云港市北部、宿迁市南部、淮安市南部、盐城市西北部的局部地区闪电密度在 5 次/(km^2 · 年)以上，最高可达到 12 次/(km^2 · 年)。

雷电灾害危险度(图 1b)的空间分布特征与闪电密度分布特征相似，即沿江苏南地区重于江淮之间及淮北地区，并且危险度高值区和闪电密度高值区的分布也较为一致，从而检验了评估模型的合理性。不同的是，危险度高值区较闪电密度高值区的范围有所扩大。沿江苏南地区、江淮之间南部和中西部及淮北北部部分地区的危险度较高，在中度以上，重度地区集中在南京市中北部、扬州市西南部、镇江市西部、常州西南部和东部、无锡市中部、苏州市北部及南通市西南部部分地区，无锡市局部达到严重程度，这可能是这两年无锡雷电灾情较重的直接原因。

3　结论与讨论

(1)本文以雷电灾情资料为基础，采用相关法，选取致灾因子，然后采用灰色关联分析法，定量化得到三个致灾因子权重，构建雷电灾害危

险度指数模型，依此进行危险度等级划分，研究思路清晰，技术方法可行，避免了人为的主观任意性，解决了当前灾害风险评估过程中权重的分配多依靠专家打分的弊端。

(2)在致灾因子选取上，除闪电密度外，还增加了闪电总强度和最大闪电强度，较以往研究更加全面。

(3)借助 GIS 技术绘制 1km × 1km 分辨率雷电灾害危险度区划图，结果表明，雷电灾害危险度的空间分布特征与闪电密度分布特征相似，并且危险度高值区和闪电密度高值区的分布也较为一致，不同的是，危险度高值区较闪电密度高值区的范围有所扩大，进一步说明危险度评估结果与实际贴合，又更加细化。

(4)本文探讨了一种可行的雷电灾害危险性定量评估方法，随着雷电 3D 资料及雷电灾情资料的延长，运用长年代资料及本文方法做出的区划结果会更加客观，依此做出的雷电灾害风险评估，可更加科学地指导雷电防灾减灾工作。

参考文献：

[1] 邹晨曦，王晓云，王颖，等. 雾灾风险评估与区划方法[J]. 中国科技信息，2011(6)：34－37.

[2] 田心如，陈广昌，武艳，等. 江苏霾灾害风险与地区差异研究[J]. 长江流域资源与环境，2014，23(12)：1767－1774.

[3] 冯民学，焦雪，钟颖颖，等. 江苏洋口港区雷电特性及风险区划[J]. 气象科学，2012，32(1)：86－93.

[4] 刘垚，包云轩，缪启龙，等. 杭州市市雷电灾害风险区划及分析[J]. 西北师范大学学报，2014，50(3)：99－105.

[5] 宋晨阳，王锋，张韧，等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学，2016，31(4)：201－206.

[6] 李家启，申双和，夏佰成，等. 重庆地区 1999－2008 年雷电参数变化特征[J]. 长江流域资源与 环境，2012，21(2)：242－250.

[7] 李霞，魏建苏，朱贵刚，等. 苏州地区雷电分布规律及对农村安全的影响[J]. 长江流域资源与环境，2009，18(9)：876－880.

[8] 刘梅，魏建苏，俞剑蔚，等. 近 57 年江苏省雷暴日时、空分布气候特征[J]. 气象科学，2009，29(6)：827－832.

[9] 刘梅，魏建苏，俞剑蔚，等. 近 57 年江苏省雷暴变化趋势特征分析[J]. 热带气象学报，2010，26(2)：227－234.

[10] 朱飙，王振会，李春华，等. 江苏雷暴时空变化的气候特征分析[J]. 气象科学，2009，29(6)：849－852.

[11] 冯民学，焦雪，韦海容，等. 江苏省雷电分布特征分析[J]. 气象科学，2009，29(2)：246－251.

[12] 冯民学，韦海容，焦圣明，等. 南京市闪电定位资料的对比分析[J]. 南京气象学院学报，2008，31(2)：151－157.

[13] 王学良，张科杰，张义军，等. 雷电定位系统与人工观测雷暴日数统计比较[J]. 应用气象学报，2014，25(6)：741－750.

[14] 焦雪，冯民学，钟颖颖. 2006－2009 年江苏省地闪特征分析及应用[J]. 气象科学，2011，31(2)：205－210.

[15] 郦嘉诚，钟颖颖，冯民学. 江苏省区域闪电分布特征[J]. 大气科学学报，2012，35(3)：380－384.

[16] 周俊驰，王振会，冯民学，等. 南京周边地区雷暴过境时电场特征及其在预警中的应用[J]. 高原气象，2013，32(5)：1470－1477.

[17] 陈亚宁，杨思全. 自然灾害的灰色关联灾情评估模型及应用研究[J]. 地理科学进展，1999，18(2)：159－162.

[18] 张姝丽，丁德平，付治龙，等. 灰色关联度在北京地区雾灾评估中的应用[J]. 灾害学，2008，23(3)：54－56，61.

Quantitative Assessment and Zoning of Lightning Hazard in Jiangsu Province

CHEN Guangchang[1], CUI Xun[1] and TIAN Xinru[2]

(1. *Jiangsu Lightning Protection Center*, *Nanjing* 210009, *China*;
2. *Jiangsu Meteorological Observatory*, *Nanjing* 210008, *China*)

Abstract: In order to explore the quantitative risk assessment methods of lightning disaster, so then to provide more scientific decision-making basis for disaster prevention and mitigation, normalizing the Three-Dimensional lightning location system data and detailed lightning disaster data of Wuxi from 2013 to 2014, using the correlation method to choose three relevant significant indexes such as the number of lightning, the intensity of total lightning and the maximum intensity of lightning. By adopting the grey relational analysis, the weights of three disaster-causing factors were calculated quantitatively, and the lightning disaster risk index model was constructed. The lightning hazard was described quantitatively by endangers degree. Approximatively think that the prevention level of lightning disaster in Jiangsu province was nearly same, this model was applied in Jiangsu region, and the Jiangsu province was divided into many grids of 1km × 1km resolution with the help of GIS analysis tool. Different grid colors represent different endangers degrees of lightning disaster. The zonation results showed that the spatial distribution characteristics of lightning endangers degree were similar with the lightning density, and the high degree area was also more consistent with the high value area of lightning density, the difference was that the high endangers degree area range was greater than the high value area of lightning density, the evaluation results were more detailed and consistent with the fact, the assessment of lightning disaster risk using these methods and long-years lightning and disaster information can be more scientific and objective for lightning disaster prevention and mitigation.

Key words: lightning disaster; hazard; grey relational analysis; quantitation; zonation; Jiangsu