

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.02.024

基于 GIS 的区域雷电灾害风险管理方法研究^①

杨天琦¹, 林彬彬², 韩照全¹, 徐彬彬¹

1. 南京市气象局 南京市气象服务中心, 南京 210009; 2. 福建省防雷中心, 福州 350000

摘要: 从空间角度出发, 首次考虑雷电流强度在区域雷电风险中的重要影响, 运用层次分析法对江苏省区域雷电灾害风险进行分析。研究表明, 与建筑结构相关的建筑质量、雷击大地密度以及雷电流幅值对雷电风险具有较大的影响; 结合闪电定位资料, 基于 GIS 平台构建了简单易行的区域雷电风险评估模型, 实现了对现有雷电灾害风险进行动态分析评价, 有效地提高了雷电资料的利用效能。结果表明, 江苏省南京市为雷电灾害高风险区, 各地级市区域的雷电风险较高, 其他地区风险较低, 与《全国雷电灾害汇编》中 2007—2012 年统计的雷电灾害事故结果大致相符。该方法能较好地表现区域雷电风险空间分布规律, 实现了更快捷、合理地评价区域雷电灾害风险, 对区域雷电灾害风险管理提供了一定的科学依据。

关键词: 雷电灾害, 区域评估, 易损性, 建筑质量

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)02-0155-07

随着社会经济的不断发展, 雷电灾害对人类社会的影响日益严重。雷电灾害发生过程十分复杂, 且时常伴随人为因素、自然环境等多种因素的共同作用, 呈现出一定的区域分布特征。为提高雷电灾害的预测能力, 将灾害防御工作提高到风险管理的层面上来, 当前普遍采用风险区划分析^[1]的方法实现对雷电灾害风险的科学管理。

雷电灾害风险不仅受到致灾因子种类和致灾环境的影响, 承灾体的脆弱性也会对其产生较大影响。对某个特定区域而言, 致灾因子及致灾环境在一段时期内相对稳定, 而易损度作为表征承灾体遭受雷灾损失程度的指标, 与承灾体自身的抗风险能力密切相关^[2], 在很大程度上受到人类社会多方面的影响。许多学者从易损度出发, 对区域灾害风险进行了分析评价。Blalki^[3]从致灾因素、孕灾环境和承灾体的角度出发, 分析了资源开发与自然灾害的关系, 指出承灾体脆弱性与致灾因子的综合作用是导致灾害的主要原因; Cutter^[4]结合美国社会经济与人口资料, 构建了评价社会易损性的指标体系; Thleler^[5]在 GIS 的基础上, 对美国东部沿海地区脆弱性进行定量评价。黄崇福^[6]根据模糊信息优化处理技术提出了自然灾害风险评价的模型体系; 曾金全^[7]以区县行政区域为评估单元, 采用聚类分析方法对区域内总易损度值进行评价。但雷电灾害发生过程十分复杂, 会受到地形、经济等多种因素的影响, 使得雷电灾害风险的分布并不是严格按照行政区域划分。

雷电灾害的主要破坏形式是造成人身伤亡、物理损坏和电子电气设备失效。目前雷电灾害风险模型^[8-10]在易损性分析过程中大多仅考虑雷暴日、雷电密度、闪电频数等对雷电风险的影响, 却忽视了雷电流的破坏效应以及承灾体本身的敏感程度。由于雷电流的热效应与机械效应, 高幅值雷电流在作用的短暂时间内造成的损失也会更为严重, 因此在考虑雷电灾害风险时雷电流的因素不可忽视。而雷暴日、雷电密度、闪电频数 3 个因子并不独立, 相关性很强, 都用来作为雷电灾害风险评价因子显然是不合适的。同时, 由于建造年代、构造方式、施工质量等差异, 建筑物对雷电的承受能力也不尽相同, 也会对区域易损度有

① 收稿日期: 2014-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175003); 南京市气象科研开发项目(NJ201408)。

作者简介: 杨天琦(1987-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事大气电学、雷电灾害方面的研究。

较大影响。

为解决以上问题,本文拟结合区域自然环境和社会经济背景,运用层次分析法对雷灾影响因子进行筛选,并计算各风险因子权重,重点考虑雷电流强度、建筑质量等因子的贡献,对区域雷电灾害风险进行评价。在 GIS 平台和雷电资料的基础上,以江苏省为例,从空间角度对区域雷电灾害风险分布进行探讨和动态分析,以期提高现有区域雷灾风险评估的效率,为防雷减灾工作提供技术支持。

1 雷灾风险模型概述

雷电灾害的作用过程是通过多个方面来影响人类生活的,本研究从致灾因素、孕灾环境和承灾体 3 个方面构建风险评价模型。

1.1 致灾危险性因素

灾害的形成是致灾因子在承灾体所处环境范围内作用到承灾体上的综合结果,与灾害类型、频度、强度等密不可分,因此在考虑雷电灾害危险性时主要考虑的是雷击大地密度和雷电流强度这二个相互独立的因素。

1) 雷击大地密度(N_g)

指的是一年内单位区域内发生雷击的次数,表征的是单位面积内遭受雷电击中的频繁程度。本文选用江苏省 2006—2012 年雷电数据。

2) 雷电流强度(I)

雷电流幅值概率密度分布表征不同强度的雷电活动频度,是计算雷击闪络率的必要参数。由于雷电流幅值高,作用时间短,在通过承灾体时释放瞬时能量可能导致局部高温,甚至引起周围火灾,因此雷灾损失与雷电流强度密不可分,本研究采用的是区域平均雷电流强度。

1.2 孕灾环境的复杂性

雷电灾害属于突发性自然灾害,其产生原因相当复杂,具有很强的不确定性,且其破坏过程通常是不可逆的,是区域气候、地表覆盖以及区域物质与文化环境等多种因素综合作用的产物。

1) 地表覆盖类型

大量的雷击事故历史资料与实验研究表明,雷击具有选择性,表现为雷电容易击中地面突出物体、高耸建筑物以及富含金属矿床等地方,不同地形、地貌、地质等条件对区域雷暴的产生具有很重要的影响,因此下垫面是触发闪电是否发生的重要影响因子。

江苏地处江淮下游,地形主要以平原为主,且其中河湖密布,水资源十分丰富,因而江苏的地形主要分为植被,水体,城区等几类。此处选用的是江苏地表覆盖类型图。

2) 人口因素指数

发生雷电灾害时,某区域遭受雷灾损失量与该地区的人口密度关系很密切,本研究采用的第六次人口普查的人口数据。

3) 受教育与管理水平

风险态度很大部分决定了风险是否被觉察,当地的防雷政策法规是否健全,在一定的执法力度、防雷科普与法制宣传下,受教育程度高低对雷电风险防范的意识具有较大影响。本文拟采用省市县城镇化水平进行分级的方法对受教育与管理水平进行评价。

1.3 承灾体的脆弱性

承灾体即雷电灾害作用的对象,通常采用易损度作为表征承灾体遭受损失时的脆弱程度,与承灾体自身的抗风险能力密切相关,很大程度上受到人类社会多方面的影响。

1) 建筑物质量

建筑质量包含了建筑和内部各种电气电子系统的结构、材料以及施工质量等,不同地域尤其是城市与农村的建筑形式、系统配置方式以及施工质量有较大差异,建筑物质量优劣直接关系到雷电灾害损失量大小。

本文根据标准 IEC62305-2 对雷电致物体的物理损坏的定义进行建筑质量评价。钢筋混凝土结构中主要承重结构如墙、柱、梁等用钢筋混凝土制成,整体性好,耐火性以及抗腐蚀性强,具有较好的电气连通

性,形成较为完整的雷电防护系统,抗雷电的能力较强,参照标准缩减因子取 0.01. 混合结构建筑以砖或砖块砌筑垂直承重结构,梁、楼板、屋面板等水平承重体采用钢筋混凝土结构,形成初始的雷电防护系统,具有一定的雷电防御能力,参照标准缩减因子取 0.1. 砖木结构则主要承重构件采用的是砖块、木结构,对雷电的抵御性差,参照标准缩减因子取 1. 本文所用资料是江苏省 2010 年人口普查得到的不同结构建筑物房屋面积数据,并与建筑物结构缩减因子相乘得到区域建筑质量参数.

2) GDP 经济指数

GDP 可以近似代表区域现代化程度,由于雷电引起的瞬态过电压可以使电子以及电气系统失效,发生雷电灾害时,高 GDP 地区具有较多的电子设备,对雷电所带来的电磁效应敏感,因此遭受雷灾损失也会随之提高. 本文所用 GDP 资料取自江苏省统计局官方网站的“统计信息公开”栏目.

2 研究方法

2.1 雷电灾害风险递阶层次分析模型

雷电灾害风险(R)受多方面影响,难以完全定量分析,为了合理地评价雷电灾害风险,需要对其进行层次化的分析. 本文采用的是层次分析法对雷灾风险进行分析,主要考虑的因素为 3 种,分别标记为:① 致灾因素危险性 B_1 ; ② 孕灾环境复杂性 B_2 ; ③ 承灾体脆弱性 B_3 .

2.2 数据权重的判定

为了便于数学处理,将各因素对雷电灾害风险影响的重要程度(ω)进行两两比较,以其标度值大小来表征两者的相对重要程度. 其中 a_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的相对重要性,根据 Saaty^[11] 提出的引用数字 1~9 及其倒数作为标度.

表 1 判断矩阵标度含义

标度 a_{ij}	含 义	标度 a_{ij}	含 义
1	因素 i, j 重要性一致;	9	因素 i 与因素 j 相比极端重要;
3	因素 i 与因素 j 相比重要性略强;	2, 4, 6, 8	表达的是上述两种标度判断的中间过渡状态;
5	因素 i 与因素 j 相比重要性较强;	倒数	因素 j 与因素 i 相比重要性为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$.
7	因素 i 与因素 j 相比强烈重要;		

1) 由于雷灾的致灾因子主要是由雷电引起的,而雷电灾害风险又与承灾体的雷电承受能力息息相关,因此 B_1 和 B_3 重要性相当;雷击具有选择性,即承灾体遭雷击产生灾害是一种概率事件,因此 B_2 重要性较次之.

具体两两判断矩阵为

$$\begin{matrix} & B_1 & B_2 & B_3 \\ B_1 & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \end{pmatrix} \\ B_2 & \begin{pmatrix} 1/3 & 1 & 1/3 \end{pmatrix} \\ B_3 & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

求解特征向量

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.428 \\ 0.144 \\ 0.428 \end{pmatrix}$$

检验一致性指标 $CR = \frac{CI}{RI} = 0 < 0.10$, 判断矩阵的一致性可以接受.

2) 不同因素对致灾因素危险性 B_1 影响的成对矩阵为

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 \\ C_1 & \begin{pmatrix} 1 & 3 \end{pmatrix} \\ C_2 & \begin{pmatrix} 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

C_1, C_2 分别表示的是雷击大地密度和雷电流强度,雷击大地密度直观表示为承灾体周围雷电活动情况;现

有的雷电流数据是由闪电监测系统, 依据 M. A. Uman 所提出的地闪回击场模型通过遥测法统计^[12]所得到的, 是雷电流概率分布的近似表达. 国家标准^[13]中及相关研究^[14]指出, 在风险计算公式“ $R = NPL$ ”中, N 直接与雷击大地密度相关且有定量计算; 而雷电流强度仅与公式中的 P 和 L 间接相关, 主要是损害概率与建筑物的防雷能力有关, 而建筑物的防雷能力又与雷电流强度相对应, 从而共同决定了损害概率以及可能的损失, 但目前没有定量的关系. 故在目前的风险评估体系尤其是风险区划中很少考虑雷电流强度的因素, 因此雷击大地密度重要性稍大于雷电流强度.

其权重向量为 $(0.75, 0.25)^T$, $CI=0$, $CR=0$.

3) 不同因素对孕灾环境复杂性 B_2 影响的成对矩阵为

$$\begin{array}{c} C_3 \quad C_4 \quad C_5 \\ C_3 \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 5 \\ 5 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \\ C_4 \\ C_5 \end{array} \quad (2)$$

C_3, C_4, C_5 分别表示的是地表覆盖类型、人口因素及受教育与管理水平. 雷电灾害带来的损害类型主要有人员伤亡、公众服务、文化遗产以及经济损失. 近几年来, 雷灾事故频发, 由于雷击所造成的人口伤亡事件也在不断增多, 因此, 人口密度与雷电灾害风险密切相关. 雷击具有选择性, 不同地形、地貌、地质等条件对雷暴的产生具有很重要的影响, 作为当今防雷管理及雷电监测预警是目前雷电防御的重要手段, 因此受教育与管理水平能够在一定程度反映当地对雷电的觉察程度. 在对灾害的风险评估中, 根据判断矩阵标度的定义, 直接相关的因子的重要性大于间接因子的重要性^[15-17], 而对于雷灾风险 P , 地表覆盖类型是直接因子, 受教育与管理水平是间接因子, 故地表覆盖类型比受教育与管理水平重要.

其权重向量为 $(0.28, 0.60, 0.12)^T$, $CI=0.054$, $CR=0.054 < 0.10$, 判断矩阵一致性能接受.

4) 不同因素对承灾体的脆弱性 B_3 影响的成对矩阵为

$$\begin{array}{c} C_6 \quad C_7 \\ C_6 \begin{pmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{pmatrix} \\ C_7 \end{array} \quad (3)$$

C_6, C_7 分别代表建筑质量与 GDP 水平. 由于雷电流的热效应与机械效应, 建筑承受雷电的能力对区域承灾体的易损度有较大的影响, 城市、经济发达地区受到雷击的财产损失较多, 同样根据以上直接相关的因子的重要性大于间接因子的重要性的原理, 得到建筑质量的重要性大于 GDP 带来的影响.

其权重向量为 $(0.83, 0.17)^T$, $CI=0$, $CR=0$, 判断矩阵一致性能接受.

5) B 层随机一致性检验

在层次分析法的原始定义^[18]中, 一致性比例 CR 定义为一致性指标 CI 与平均随机一致性指标 RI 的比值. 根据层次分析法的应用相关研究^[19-20], 当此值小于 0.1 时, 判断矩阵一致性能接受.

将以上数据带入此公式中, 得到

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m CI(j) a_j}{\sum_{j=1}^m RI(j) a_j} = 0.03 < 0.10$$

判断矩阵一致性能接受.

综上所述, 权重由如图 1 所示, 具体每个因子的权重值为该因子所在层次与上一层的权重之积.

通过图 1 可以发现, 承灾体建筑质量占总雷电灾害风险的 0.355 (0.428×0.83), 雷电流的强度 (0.107) 也对总风险具有一定的影响. 但过去在考虑雷电易损性的过程中大多只考虑到雷暴日、雷电密度、闪电频数等对雷电风险的影响, 而忽视了承灾体的建筑质量以及雷电流强度等因素对雷电风险影响是明显欠妥的, 因此在考虑雷电灾害风险的情况下雷电流与建筑物质量的作用不可忽视.

3 区域雷电灾害风险计算

3.1 指标无量纲化处理

根据图 1 各指标来评价区域雷电灾害风险. 为了减少数据的不一致性对最后结果的影响, 需将不同指

标的量纲统一, 即各部分的数据进行无量纲化处理, 使其范围在[0, 1]内.

$$X_i = \frac{X_i}{X_{\max}} \quad (4)$$

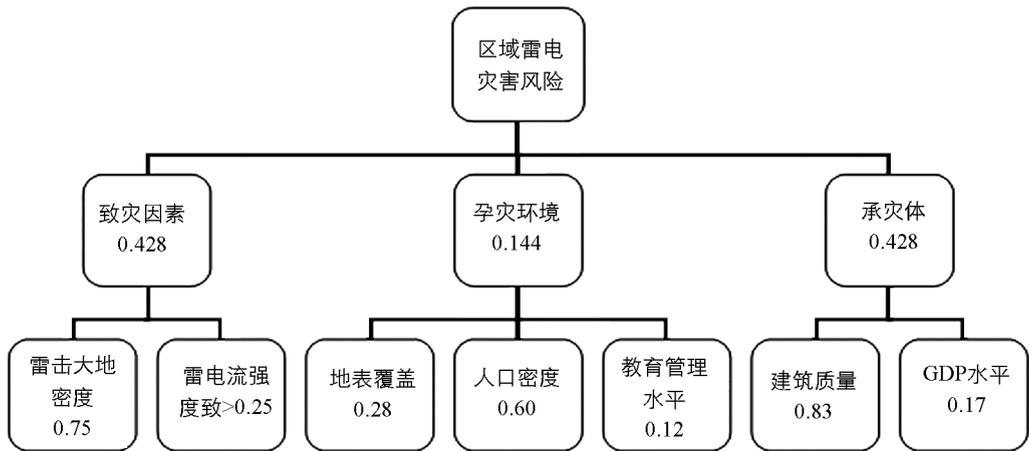


图 1 雷电灾害风险各指标权重值

3.2 雷电灾害风险模型的实现

雷电灾害风险模型分为 3 个子模块进行, 即致灾因子危险性评价模块、孕灾环境脆弱性评价模块及承灾体易损性评价模块, 如图 2, 运用 GIS 的 Model builder 将模型加以实现.

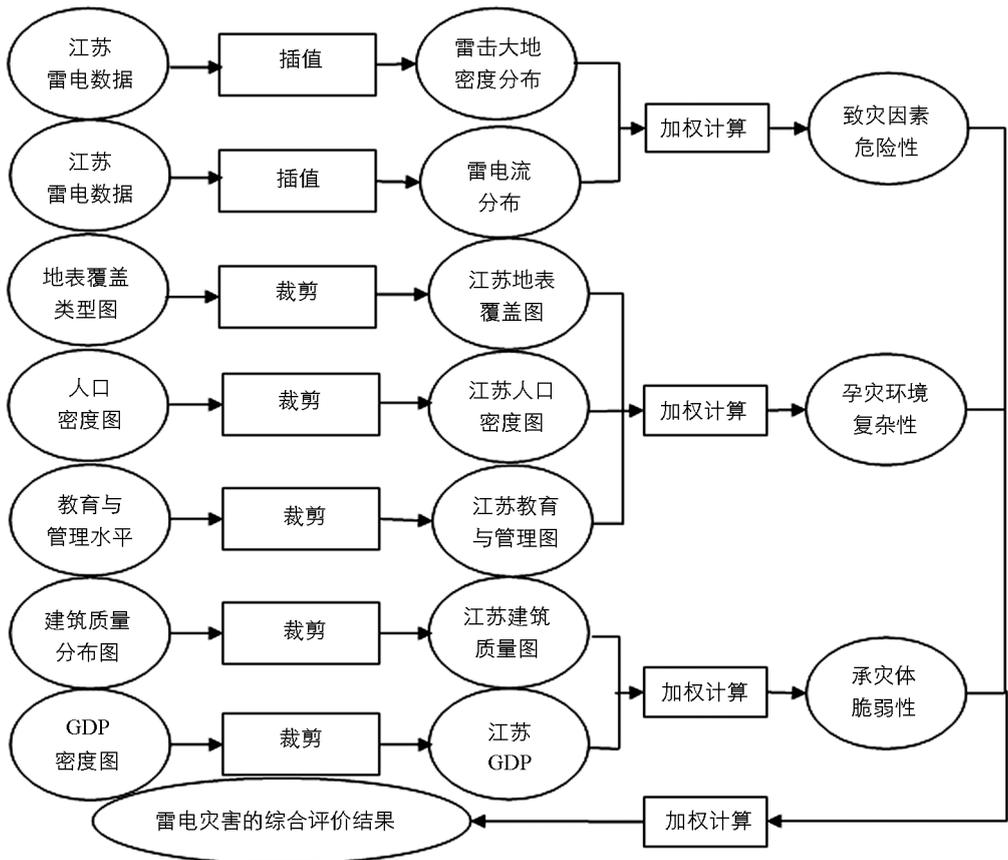


图 2 基于 model builder 的模型框架图

其中, 为计算研究区域的雷电活动及雷电可能造成的影响, 因此致灾因子的危险性评价模块中, 采用的是雷击大地密度和雷电流两个参量. 运用 GIS 插值法、栅格计算器等功能, 按照层次分析法得到的权重将雷击密度、雷电流进行加权计算.

同理,将孕灾环境脆弱性评价模型、承灾体易损性评价模型中的地表覆盖类型、人口密度、教育与管理水平、GDP、建筑质量进行计算。

3.3 计算结果

根据上文所得到的权重值,对区域雷电灾害风险进行计算,具体如式(5)所示

$$R = \sum_{i=1}^7 X_{Ci} \omega_{Ci} \quad (5)$$

式中,雷击大地密度的权重为 ω_{C1} ,由于雷电流的热效应、机械效应而产生损失权重为 ω_{C2} ;地表引起的雷电击中分散性权重为 ω_{C3} ,人口密度权重为 ω_{C4} ,教育与管理水平权重为 ω_{C5} ;由于建筑质量引起的承灾体雷电敏感度的权重 ω_{C6} ,GDP 引起的经济损失权重为 ω_{C7} ,得到的结果如图 3 所示。

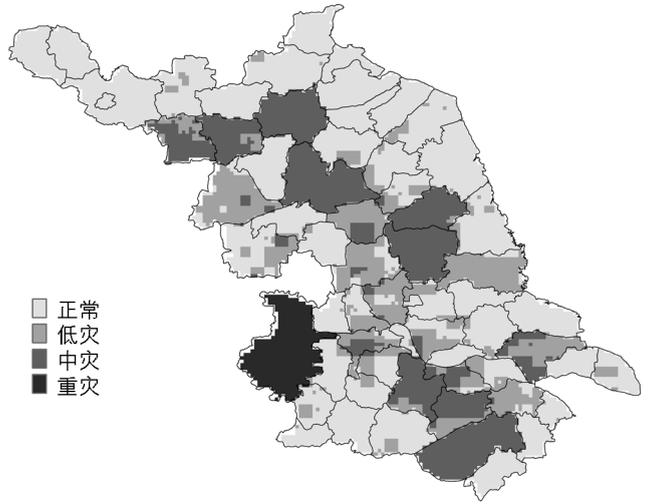


图 3 雷电灾害风险分布图

4 结果与讨论

1) 通过层次分析法对影响区域雷灾风险因素进行分析,结果表明,与建筑结构相关的建筑质量、雷击大地密度以及雷电流幅值对雷灾风险具有较大影响.在此基础上构建了对雷电灾害风险快速评价的模型,并运用 GIS 模型构造器功能,实现了对雷电资料快速处理和利用。

2) 总体上,苏南的雷灾风险比苏北严重,南京市以及各地级市区域的雷电灾害较为严重.这可能由于南京地区地势起伏程度较大,河网密集,下垫面的情况较为复杂,导致遭受雷击的可能性加大.淮安、宿迁区域的雷电灾害风险较为严重,说明欠发达及落后地区是雷电灾害防御的薄弱区,对雷灾风险没有得到足够的重视,急需开展多渠道、多样化的防雷科普宣传和与法制教育,提高人们的防雷减灾意识.苏南地区雷灾风险也较大,可能是由于经济较为发达,人口集中,每次雷电灾害波及范围较广,引起的人员伤亡及电子电气设备失效所引起的财产损失较大.结果表明,与中国气象局雷电防护管理办公室编制的《全国雷电灾害汇编》中 2007—2012 年统计的雷电灾害事故结果大致相符,具有一定的参考价值,为区域雷电灾害的评价提供了合理有力的科学依据。

参考文献:

- [1] 黄崇福,张俊香,陈志芬,等.自然灾害风险区划图的一个潜在发展方向[J].自然灾害学报,2004,13(2):9-14.
- [2] 高 斌,张义军,张文娟,等.我国雷击致人员伤亡特征及易损度评估区划[J].应用气象学报,2012,23(3):294-303.
- [3] PIERS B, TERRY C, IAN D, et al. Risk: Natural Hazard, People's Vulnerability, and Disasters [M]. London: Routledge, 1994: 147-167.
- [4] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social Vulnerability to Environmental Hazards [J]. Social Science Quarterly, 2003, 84(2): 242-61.
- [5] THIELER E R, HAMMAR-KLOSE E S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U. S. [R]. Atlantic Coast: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2001: 99-93.
- [6] 黄崇福,王家鼎.模糊信息优化处理技术及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995,145-159.
- [7] 曾金全,张焯方,王颖波.基于综合评价算法的雷电灾害易损度区划模型研究[J].气象,2011,37(12):1595-1600.
- [8] 杨仲江,唐晓峰.逐步消空法在上海雷电潜势预报中的应用[J].气象科学,2009(6),810-814.
- [9] 王 惠,邓 勇,尹丽云,等.云南省雷电灾害易损性分析及区划[J].气象,2007,33(12):83-87.
- [10] 杨仲江,江 珂,曹洪亮,等.基于 inpolygon 的区域外闪电剔除方法研究[J].灾害学,2014,29(3):72-76.

- [11] 张继权, 李 宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 73—78.
- [12] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征 [J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893—1895.
- [13] 全国雷电防护标准化技术委员会. 雷电防护第 2 部分: 风险管理 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 杨仲江. 雷电灾害风险评估与管理基础 [M]. 北京: 气象出版社, 2009: 303—306.
- [15] 张丽文. 基于 GIS 和遥感的东北地区水稻冷害风险区划与监测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [16] 陈远川. 山区沿河公路水毁评估与减灾方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [17] 李 鑫. 城市隧道施工环境风险评估研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [18] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. Mc. Graw: Hill International Book Company, 1980.
- [19] 兰继斌, 徐 扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2006(9): 107—112.
- [20] SAATY T L, OZDEMIR M. Negative Priorities in the Analytic Hierarchy Process [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2003, 37(9): 1063—1075.

A GIS-Based Research of Regional Risk Management of Lightning Disasters

YANG Tian-qi¹, LIN Bin-bin², HAN Zhao-quan¹, XU Bin-bin¹

1. Nanjing Service Center of Meteorology, Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210009, China;

2. Fujian Lightning Protection Center, Fuzhou 350000, China

Abstract: From the respective of the spatial distribution of lightning, the authors of this paper consider, for the first time, the importance of lightning current amplitude to lightning disaster risk, using the analytic hierarchy process to analyze regional lightning disaster risk in Jiangsu province. They come to the conclusion that construction quality, lightning strike density and lightning current amplitude have great influence on lightning disaster risk. Combining lightning location data and based on GIS, they develop a simple regional lightning risk assessment model, which has realized the dynamic analysis of the existing lightning disaster risk and effectively improved the efficiency of lightning data application. Based on the assessment model, Nanjing is an area with high lightning risk, the prefecture-level cities are apt to considerably high lightning risk, and the other areas of Jiangsu province have low lightning risk, which is quite consistent with the lightning disaster statistics mentioned in the National Lightning Disaster Assembly from 2007 to 2009. In conclusion, this method can well show the spatial distribution of regional lightning risk and give a more efficient and reasonable evaluation, thus providing a certain guide in regional lightning disaster risk management.

Key words: lightning disaster; regional assessment; vulnerability; quality of construction

责任编辑 汤振金

