

余蜀豫, 任艳, 覃彬全. 基于模糊数学的重庆地区雷电灾害风险评估方法研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 75-78, 84.
[Yu Shuyu, Ren Yan, Qin Binquan. Research on the lightning risk assessment method for Chongqing based on fuzzy mathematics [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 75-78, 84.]

基于模糊数学的重庆地区雷电灾害风险评估方法研究*

余蜀豫^{1,2,3}, 任艳^{1,2}, 覃彬全^{1,2}

(1. 重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心, 重庆 400000;

2. 重庆市防雷中心, 重庆 400000; 3. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 科学合理的雷电灾害风险评估能有效指导防雷减灾工作, 不过目前雷电风险评估体系尚不完善, 在某些时候不能真实地评价项目的雷电灾害风险, 比如在评估大型住宅小区、大面积的厂房等时, 现有的评估结果不能准确地反映客观风险。在深入研究雷电成灾机制和重庆雷电活动规律的基础上, 利用模糊数学理论, 通过致灾因子、暴露性和承灾体易损性三个方面进行分析, 提出重庆地区的雷电风险评估方法。通过具体的评估验证, 该方法有较好的适用性, 能更好地为防雷减灾服务, 也能完善现有的雷电灾害风险评估体系。

关键词: 雷电灾害; 风险评估; 模糊数学理论; 防雷减灾; 重庆地区

中图分类号: X43; P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)02-0075-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.014

雷电灾害是联合国“国际减灾十年”公布的最严重的10种自然灾害之一, 被中国电工委员会称为“电子时代一大公害”。重庆位于青藏高原和长江中下游平原之间过渡地带的四川盆地的西南部, 特殊的地理位置使重庆的气候具有纬向和经向过渡性的特点, 成为雷电天气相对活跃区和高发区^[1]。重庆每年因雷击造成的经济损失达数亿元, 人员伤亡达数十人, 加强防雷减灾工作刻不容缓。

对于防雷减灾而言, 应首先开展雷电灾害评估, 加强雷电灾害风险评估研究对雷电防护工作具有指导意义。不过, 目前雷电灾害风险评估的研究还处于起步阶段, 评估方法还不完善, 可操作性差, 参数取值大多以经验为主, 导致评估结果准确性不高^[2]。

雷电灾害风险是不精确、不明确的, 我们对雷电灾害的成因认识不完全, 评估的信息也不完备, 解决这一问题的途径是用适当的方式体现出评估结果的不精确性, 模糊综合评估法能较好地解决这个问题。不少文章^[3-5]使用模糊评判法对雷电灾害风险进行了研究, 但在评估体系、评估指标以及隶属度的选取和计算尚不够完善, 不能很好表现雷电灾害的风险。雷电灾害风险是一类模糊事件, 在重庆地区, 可以划分为低风险、中风险、高风险和非常高风险四个等级。本文从雷电灾害成灾机制入手, 结合重庆地区的环境特征和雷电活动规律, 选取恰当的评估因子, 通过隶属度函数计算得到最终的雷电风险等级。

1 重庆地区雷电灾害风险评估体系

关于自然灾害形成机制, 国内外主要存在以

下几种理论: 致灾因子论、孕灾环境论、承灾体及区域灾害系统论^[6]。自然灾害形成就是承灾体不能适应或者调整环境变化的结果。雷电灾害风险同其他自然灾害风险相同, 也是多种因素相互作用的产物, 它受到一个区域自然系统、社会系统及其组合关系的影响。在对重庆地区雷电灾害进行深入研究得出结论: 一定区域雷电灾害风险是由雷电灾害危险性(H)、暴露(E)、承灾体的易损性(V)、防灾减灾能力(C)4个风险因素相互交链形成, 用公式表达: $R = H \cdot E \cdot V \cdot C$ 。由于4个风险因素为比较笼统的抽象概念, 选择影响雷电灾害风险的具体参数, 针对重庆地区的雷电风险评估结构如图1所示。

1.1 雷电灾害危险性

雷电灾害危险性是指造成雷电灾害的自然变异程度, 主要是由灾变活动规模和活动频次决定的。一般灾变强度越大, 频率越高, 灾害所造成的破坏损失也越严重, 灾害风险也越大^[7]。

对于雷电灾害来说, 其危险性表现在闪电的发生次数、闪电的幅值大小以及闪电发生的极性、陡度。雷电的频数和强度是雷电活动危险性最直观的表现, 对于中小尺度的雷暴天气系统而言, 以雷暴日为主的气候气象资料在反映雷电活动分布特征的代表性值得讨论。闪电定位仪的资料具有更好的代表性, 这里利用闪电定位仪资料表现闪电发生的频次。雷电产生的电磁脉冲对现代微

* 收稿日期: 2014-10-20

修回日期: 2014-11-27

基金项目: 重庆市科技平台与基地建设(cstc2013pt-gc00001)

作者简介: 余蜀豫(1987-), 男, 重庆开县人, 硕士, 研究方向为雷电物理及雷电灾害风险评估. E-mail: meysy@163.com

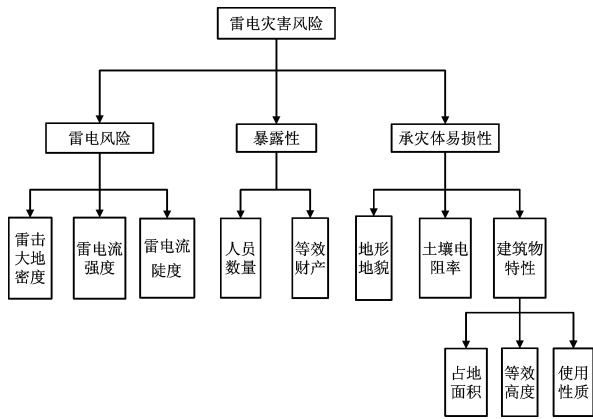


图1 重庆地区雷电灾害风险评估框架图

电子设备有着重要影响，从而导致内部系统失效，雷电流的强度和陡度与这种影响有着明显的正相关^[8]。因此挑选年雷击大地密度，闪电电流平均幅值和雷电流陡度三个因子表现雷电灾害的自然危险性。

1.2 雷电灾害暴露性

暴露性是指可能受到危险因素威胁的所有人和财产。一个地区暴露于各种危险因素的人和财产越多，或者受灾财产值密度越高，可能遭受潜在损失越大，灾害风险也就越大。

评估对象的特征性质能在一定程度上描述暴露性，人员数量更是直接反映雷电灾害中暴露性的因子。另外，在表现经济损失时，可以使用等效财产这个因子。等效财产主要是指评估对象的经济价值总和以及文化价值，一般折算成货币表达式。

1.3 承灾体易损性

也称为脆弱性，是指雷电灾害发生时所造成的伤害或损失程度，承灾体的易损性大小，与其物质成分、结构有关。一般承灾体的易损性越低，灾害损失越小^[9]。

易损性是个广泛的概念，总的来说，是指评估对象的自身结构属性对雷电灾害的防御能力。通过对大量建构筑物进行实地考察和分析，易损性主要表现在评估对象的土壤情况、建筑周边环境以及建筑物的特性三个方面。土壤情况是防雷接地散流的性质的主要表现，可以通过土壤电阻率直接描述；建筑周边环境主要是指在雷电环境下，有没有导致雷击概率变化的特殊因素；建筑物特性就是在雷电天气时，其物理上的抗雷击能力，主要包括其使用性质、高度、结构等。

2 重庆地区雷电灾害风险评估方法的参数设计

许多标准和规范中都运用雷暴日来反映雷电活动的强度，不过雷暴日在一定程度上不能真实地展现雷电活动，有条件的地区应该配合雷电探测仪的观测数据综合分析雷电活动情况。重庆地区从2007年开始架设ADTD闪电定位系统，通过多年观测，重庆地区的平均雷击大地密度为4.9次/(a·km²)。通过统计后，将雷击大地密度分成四个等级，如表1所示。

表1 雷击大地密度等级划分

等级	雷击大地密度/(次/(a·km ²))
非常高	≥6
高	(4, 6)
中等	[2, 4]
低	<2

通过对重庆地区闪电定位仪闪电数据进行统计分析，可以看出大部分闪电的强度(含正闪和负闪)在15~40 kA，根据电气-几何模型公式可以计算出，第一、第二、第三类防雷建筑物及露天堆场对应得到保护的最小雷电流幅值分别是5.4 kA、10.1 kA、15.8 kA和34.5 kA，也就是说当雷电流幅值小于上述幅值时，在接闪器保护范围内被保护物体，有可能遭受直击雷的危害。再结合重庆地区雷电强度分布，可以将雷电流强度的危险分成四个等级，如表2所示。

表2 雷电流强度等级划分

等级	雷电流强度/kA
非常高	≥40
高	(20, 40)
中等	[10, 20]
低	<10

闪电产生的电磁效应通常会影响到附近的弱电设备正常工作，某些时候可能造成设备故障甚至损坏，雷电流陡度正好能直观地反映电磁效应的大小。最新研究结果表明^[10]，输电线路的雷击事故除了与雷电流幅值有关，还与雷电流的最大陡度密不可分。在现代防雷保护与雷电特性基础研究中，雷电流的陡度具有重要的意义。统计重庆地区闪电定位仪数据，可以将雷电流陡度的分成四个等级，如表3所示。

表3 雷电流陡度等级划分

等级	雷电流陡度/(kA/μs)
非常高	≥30
高	(20, 30)
中等	[10, 20]
低	<10

一般情况下，雷电的危害主要表现为对人员生命的威胁和财产损失，IEC62305在此基础上继续细分出文化损失和公共服务中断损失，但由于实际操作中文化和公共服务难以量化取值，采取经验值又不具有客观性，可以将文化价值等值于财产，视为广义的财产。这里，评估的重点还是人员生命和财产，因此用常年活动的人员数量和评估对象的经济文化的等效货币价值来表征承灾体的暴露性，通过对重庆地区近5年来新建项目进行大量调研，可以将人员数量和等效财产分成四个等级，如表4、表5所示。

表4 人员数量等级划分

等级	人员数量/人
非常高	≥2 000
高	(1 000, 2 000)
中等	[200, 1 000]
低	<200

表5 等效财产等级划分

等级	等效财产/万元
非常高	≥5 000
高	(1 000, 5 000)
中等	[200, 1 000]
低	<200

承灾体的易损性是雷电灾害风险评估里面最复杂也是最重要的一方面,雷电通过电阻、电感等耦合机制影响评估对象^[11],造成人员伤亡、物理损坏、内部系统失效,由于不同的环境、不同属性的评估对象,雷电成灾机制也不相同,具体环境下量化分析也很难进行。我们选取雷电灾害风险评估中建筑物最重要的几个属性参数进行量化分析,地形地貌、土壤电阻率和建筑物的特性是承灾体易损性的重要表现,在大多数雷电成灾机理分析中能较好反映对雷电灾害的抵御能力。

大量雷击统计资料和实验研究证明,雷击点和雷击部位是有一定规律的^[12]。地形地貌正是反映环境中导致雷击概率变化的因子,结合相关国家标准,将地形地貌分成四个等级,如表6所示。

表6 周边环境等级划分

等级	地形地貌环境
非常高	孤立旷野的建筑物
高	金属屋面的砖木机构建筑物
中等	水边、山顶、风口处的建筑物
低	其他建筑物

土壤电阻率是决定接地体电阻的重要因素,良好的接地能及时有效地将强大的雷电流泄放流入大地,减少雷电造成的危害。同时,较低的土壤电阻率能快速有效地释放击中周围其他位置的雷电流,在区域内土壤电阻率没有明显水平分层的情况下,土壤电阻率是反映泄放雷电流能力的重要因子,结合重庆地区土壤情况,将土壤电阻率分成四个等级,如表7所示。

表7 土壤电阻率等级划分

等级	土壤电阻率/($\Omega \cdot m$)
非常高	≥ 1000
高	(500, 1 000)
中等	[100, 500]
低	< 100

3 基于模糊数学的雷电灾害风险评估方法

利用模糊集表述方法推断出来的风险结论,称为模糊风险。建立模糊评判模型主要涉及以下三个要素^[13]。

建筑物的属性是承灾体易损性重要表现,建筑物的高度、占地面积和结构属性是反映承灾体在雷电环境下易损性的直观因子,当然建筑物的内部设施设备情况、布线结构、地面类型等也都是反映易损性的重要因子,但这些因子很难在实际操作中取值,在定义这些因子的等级大小时也缺乏相应的理论支撑。建筑物的高度和占地面积决定了在相同雷电环境下,雷电直接击中或者影响的概率大小,结构属性是直接反映建筑物抵御雷电影响的因子,但是结构属性是个广泛的概念,涉及很多方面,在现场勘查和数据量化时都有不小困难,这里使用建筑物的使用性质作为结构属性的代表,通过对重庆地区近5年来新建项目进行大量调研,结合相关国家法规,可以将建筑物高

度、占地面积和使用性质分成四个等级,如表8、表9、表10所示:

- (1)因素集 U ;
- (2)决断集 V ;
- (3)单因素判断关系。

重庆地区雷电灾害风险评估指标教多且复杂,因此使用三级模糊综合评判模型。大致步骤如下:

- (1)构建评估体系的因素集 U

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}。 \quad (1)$$

- (2)确定指标的决断集 V

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}。 \quad (2)$$

决断集即为评估指标的等级,它们是确定指标隶属度的参考标准,一般为分界值。

表8 占地面积等级划分

等级	占地面积/ m^2
非常高	$\geq 50\ 000$
高	(10 000, 50 000)
中等	[5 000, 10 000]
低	< 5 000

表9 建筑物高度等级划分

等级	建筑物高度/ m
非常高	≥ 150
高	(100, 150)
中等	[50, 100]
低	< 50

表10 使用性质等级划分

等级	建筑物使用性质
非常高	易燃易爆场所
高	工业建筑
中等	弱电机房
低	其他建筑

- (3)建立 m 个评价因素的权重分配向量 A

评价因素集中的每个因素在“评价目标”中有不同的地位,即各评价因素在综合评价中占有不同的比重,称为权重值,确定权重值的方法有很多,比如专家咨询法,层次分析法等。目前大多数的权重值法都属于主观判断,雷电的具体成灾机理目前还不能很好地解释^[14],对于重庆地区雷电灾害风险评估中各层的评价因素权重值采取均分的方式,这样可以避免不成熟的人为观念导致某一个评价因素过多地影响最后的评估结果。

- (4)建立综合评价矩阵 R

对评估参数的最底层指标建立一个从 U 到 V 的模糊映射,第 i 个指标的评判隶属度向量为 $R = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}]$,则具有 m 个评估指标的隶属度矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

- (5)选择合成算法,进行综合评价

模糊综合评判结果是决断集 V 上的一个模糊

子集,应用模糊变换的合成运算公式为:

$$B = W \cdot R = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = [b_1, b_2, \dots, b_n]。 \quad (4)$$

隶属函数是模糊集合的支柱,模糊集合完全由隶属函数所刻画,根据重庆地区的实际情况,对于雷电灾害评估所选的参量,经过相应统计后可以看出,大部分隶属函数可采用 K 次抛物线型分布处理,偏小型、偏大型和中间型的 K 次抛物线型分布分别对应重庆地区雷电风险的四个级别:

$$\text{偏小型: } A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1; \\ (\frac{a_2 - x}{a_2 - a_1})^k, & a_1 < x \leq a_2; \\ 0, & x > a_2。 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{偏大型: } A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_3; \\ (\frac{x - a_3}{a_4 - a_3})^k, & a_3 < x \leq a_4; \\ 1, & x > a_4。 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{中间型: } A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1; \\ (\frac{x - a_1}{a_2 - a_1})^k, & a_1 < x \leq a_2; \\ 1, & x = a_2; \\ (\frac{a_3 - x}{a_3 - a_2})^k, & a_2 < x \leq a_3; \\ 0, & x > a_3。 \end{cases} \quad (7)$$

得到综合评价结果,使用常见的最大隶属度原则会损失较多有用信息,这里采用适当的加权平均处理^[15],最后得到下面的公式:

$$F = 1 \times b_1 + 3 \times b_2 + 5 \times b_3 + 7 \times b_4。 \quad (8)$$

4 重庆地区雷电灾害风险评估方法的应用

评估项目为某生物化工有限公司 8 000 t/a 对苯二酚(一期 2 000 t/a)及 30 万 t/a 硫磺制酸(一期 10 万 t/a)生产建设项目。分析项目所在地雷电环境、地形地貌特征、地质结构、受体易损性等,对土壤进行采样,提取相关参数,计算隶属度,最后得到:

表 11 该项目雷电风险隶属度

风险等级	低	中	高	非常高
雷电风险	0.229 1	0.185 1	0.273 4	0.264 5

最后经过加权平均处理,可以看出本评估项目雷电灾害风险处于高风险级别。然后深入分析该项目不同因子对雷电灾害风险的影响程度,可以辨识雷电灾害风险的主要来源,如图 2 所示。

可以直观地看出对于该评估项目,暴露在雷电环境中的财产和人员数量是雷电灾害风险主要影响因子,次要影响因子为该雷电流强度、雷击

大地密度等。

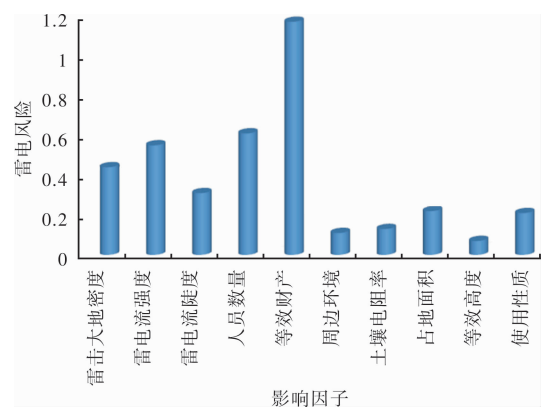


图 2 各因子对雷电灾害风险的影响

5 结论

(1) 针对该项目同时使用 IEC62305-2 和专家调查打分法进行雷电灾害风险评估,结果同上述评估结果基本相同。另外,通过对不同类型的建筑物(群)进行多种雷电灾害风险评估,对比其结果,可以看出基于模糊数学的重庆地区雷电灾害风险评估方法在评价重庆地区雷电风险时具有很好的客观性和实用性,可以作为 IEC62305-2 评估标准以外的补充方法,在分析雷电各风险来源时有着较好的指导意义。

(2) 利用模糊数学的雷电风险评估更加具有针对性,分析条理性也更加合理,可以适应于更广泛的场合。目前的不足是在层与层间的关系计算还是运用经验计算公式,参数的选取尚没有统一标准,需要更加深入地研究雷电灾害的形成规律,完善相关参数的选择,使评估结果更加科学合理。

参考文献:

- [1] 李家启,覃彬全,陈宏,等. 开县“5·23”重大雷电灾害事故分析[J]. 气象科技, 2007, 35(Supp. 1): 48-51.
- [2] 余蜀豫. 雷电风险评估方法和参数研究及实践[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [3] 程向阳,谢五三,王凯,等. 雷电灾害风险区划方法研究及其在安徽省的应用[J]. 气象科学, 2012, 32(1): 80-85.
- [4] 袁湘玲,王振会,肖稳安,等. 雷电灾害潜在与现实易损性分析及区划研究——以黑龙江省为例[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 20-25.
- [5] 刘平英,杨荣建,李兆华,等. 喀斯特地貌景区雷击风险分析——以云南石林为例[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 156-160.
- [6] 黄崇福. 自然灾害风险评价理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 2-45.
- [7] 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.
- [8] 杨仲江,余蜀豫,程斌. 暂态电流和电位抬升对雷电风险参数 P_c 的影响[J]. 科技导报, 2011, 29(26): 57-60.

(下转第 84 页)

Evolution Characteristics of Fog and Haze Disaster Weather in Hengshui City of Hebei Province

Yu Wenjin¹, Wen Yaping¹, Yu Buyun¹, Wu Yan^{1, 2}, Huang Yilu¹ and Qiu Xinfu¹

(1. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*;

2. *Hengshui Meteorological Bureau, Hengshui 053000, China*)

Abstract: According to ground station data in Hengshui city from 1960 to 2013, evolution characteristics and cycle of fog or haze days in Hengshui city are analyzed by linear trend estimate, Morlet wavelet analysis, Mann-Kendall mutation testing methods, etc. Results show that: fog days in Hengshui city from 1960 to 2013 is increasing, while the haze days (1971–2013) are decreasing. Fog days are as winter > autumn > spring > summer, and haze days are as winter > autumn > spring > summer. Fog, haze days are the most in December, followed in January. From 1971 to 2013 in Hengshui there were 766 fog days, most of which were of dense fog, and strong dense fog ones were the least; there were 491 haze days, most of which were of light haze, and moderate ones were the least; Continuous heavy fog weather of 3d and above were 110 times, the average annual continuous heavy fog occurred most in 1990s and least in 1960s, continuous fog appeared most in winter; haze days of continuous 3d and above were 24 times, most in 1980s, and most of the continuous haze appeared in November to next February. The periodic characteristics of the annual fog days and the number of months of fog days in Hengshui City are significant, mostly in the fog day partial multi period. The number of yearly fog days and the days of 6 among 12 months mutated.

Key words: haze; evolution characteristics of disaster weather; controlling factor; Hengshui city in Hebei

(上接第 78 页)

- [9] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理—全面整合模式与中国战略选择[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(10): 29–37.
- [10] 王巨丰, 齐冲, 车治颖, 等. 雷电流最大陡度及幅值的频率分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 106–109.
- [11] 许颖, 刘继, 马宏达, 等. 建(构)筑物雷电保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2010.
- [12] 戈尔德. 雷电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1983.
- [13] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] Luis E Gallego, Oscar Duarte. Lightning risk assessment using fuzzy logic [J]. Journal of Electrostatics, 2004(60): 233–239.
- [15] 江高. 模糊层次综合评价法及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.

Research on the Lightning Risk Assessment Method for Chongqing Based on Fuzzy Mathematics

Yu Shuyu^{1, 2, 3}, Ren Yan^{1, 2} and Qin Binqun^{1, 2}

(1. *Chongqing Engineering Research Center of Lightning Disasters Identification and Prevention, Chongqing 400000, China*; 2. *Chongqing Lightning Protection Center, Chongqing 400000, China*; 3. *Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

Abstract: Reasonable and scientific lightning disaster risk assessment can effectively reduce losses caused by lightning, but at present the lightning risk assessment system is not perfect, sometimes it cannot well evaluate actual lightning disaster risks. For some certain occasions, IEC62305-2 standard dose not well reflect the true lightning risk, such as large-scale residential district, a large area factory, etc. In these cases, on the basis of in-depth study on the mechanism of lightning disaster, the lightning risk can be analyzed by three aspects of hazard, exposure and vulnerability of hazard bearing body. By AHP and fuzzy mathematics theory, the lightning risk assessment formula for Chongqing region is obtained. Through the lightning risk assessment method specific assessment verification shows that this method has better applicability and can better serve lightning protection and disaster reduction in Chongqing region, and it can be a good supplement for IEC62305-2 lightning risk assessment.

Key words: lightning disaster; risk assessment; fuzzy mathematic theory; lightning protection; Chongqing area