殷娴，胡颖，周清倩，等. 云南省地震高发区雷灾风险分析与区划研究[J]. 灾害学，2017，32(4)：67 - 72. [YIN Xian，HU Yin，ZHOU Qingqian，et al. The thunder disaster risk analysis and zoning of earthquake high incidence area in Yunnan province [J]. Journal of Catastrophology，2017，32(4)：67 - 72. doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2017.04.011.]

云南省地震高发区雷灾风险分析与区划研究*

殷 娴[1]，胡 颖[1]，周清倩[1]，李 忠[1]，杨宗凯[1]，吴永斌[2]

（1. 云南省气象灾害防御技术中心，云南 昆明 650034；2. 云南省气象局办公室，云南 昆明 650034）

摘 要：根据自然灾害风险分析理论，运用云南省历年地震数据、地闪数据、雷灾数据以及社会经济数据，从地震高发区判别、致灾因子、受灾敏感度、承灾体 4 个方面提取 8 个地震高发区雷灾风险指标，采用主成份分析和聚类分析方法，以全省 124 个县市为对象区域构建雷灾风险区划模型，并对区划结果进行验证，具有良好推广运用价值。分析结果表明：全省地震高发区雷灾风险等级可分为 7 级，极高易损区为腾冲、华坪、昆明。云南中部昆明、玉溪、楚雄一带，南部版纳、普洱一带，西部保山一带，北部丽江一带属于地震活动高发区，同时也是雷电灾害高风险区。

关键词：地震高发区；雷电活动；雷灾风险；主成份分析；风险区划

中图分类号：X43；P315；P429　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000 - 811X(2017)04 - 0067 - 06

doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2017.04.011

地震灾害和雷电灾害都是突发性的自然灾害，长期威胁着公众的财产安全和人身安全。地震发生时，地质环境表现得比较活跃，受其所释放的能量及磁场影响，容易导致当地的局部天气环境发生变化，往往伴随着雷雨天气的出现，引发雷电灾害等次生灾害[1]。随着现代科学技术的发展及电子电器设备的广泛使用，雷电灾害造成的经济损失及社会影响越来越大，近年来，国内外许多专家和学者致力于雷电灾害的研究。史培军等在综合国内外相关研究成果的基础上，提出区域灾害系统论的理论观点，认为灾情(灾害损失)是由孕灾环境、致灾因子、承灾体之间相互作用形成的[2-4]；尹娜等对广东、江西、陕西、江苏、浙江、厦门的雷电灾害风险进行了研究[5-9]；彭启洋等对 2014 年昭通鲁甸地震灾区雷击风险进行了分析[10]。目前，国内还未有学者对地震活动高发区域的雷电灾害风险及特征进行系统性分析研究。

雷电灾害是云南最常见的强对流天气灾害，2006 - 2015 年间全省发生雷灾事故 1 100 多起，因雷灾造成 317 人死亡，367 人受伤，造成的经济损失达 5 000 多万元。同时，云南也是我国地震最多的省份之一。云南省土地面积仅占我国国土的 4%，但承受全国破坏性地震平均量的 20%，可能发生破坏性地震的地区约占全省面积的 84%。地震发生时，重灾区大多集中在偏远山区，这些区域也是雷电灾害的多发区。根据地震高发区雷电活动的时空分布特征及雷灾特征，提取相关指标进行风险分析与区划研究，可提高地震高发区雷电灾害的防御能力，为地震灾区过渡安置房的规划和建设提供科学合理的意见，对灾区应急救援工作的顺利开展具有重要意义。

1 资料说明与研究方法

1.1 资料来源

本文根据自然灾害风险分析理论，首先对地震高发区进行判别，然后从致灾因子、灾害敏感度、承载体三方面对雷电灾害风险进行分析研究。主要用到地震数据、地闪资料、GIS 数据、社会经济数据及雷灾数据。地震资料为云南省地震局 1900 - 2013 年 4 级以上地震活动统计数据；地闪资料为云南省 22 个闪电定位仪 2011 - 2015 年所记录的地闪活动情况；GIS 数据为云南省数字地图；社会经济数据为云南省 2015 年统计年鉴中各市县

* 收稿日期：2017 - 03 - 20　　修回日期：2017 - 05 - 04

基金项目：云南省气象局“云南省地震救援应急气象监测预警能力提升项目”(ZZZC1512 - JF03969)

第一作者简介：殷娴(1984 -)，女，云南楚雄人，硕士研究生，工程师，主要从事雷灾风险预警区划研究.

E-mail：707239728@qq.com

的面积、人口、GDP 等数据；雷灾数据为 2006 – 2015 年云南省雷灾数据库统计数据。

1.2 研究方法

地震高发区雷灾风险区划首先考虑对象区域的地震危险性，其次考虑区域的雷电灾害易损性。雷灾易损性是指雷电灾害风险及其处理灾害事件的社会和经济能力的综合量度，它包括自然易损性、经济易损性和社会易损性等方面的内容[11-13]。根据全省地震活动性、雷电时空分布、雷电灾害损失、区域经济及人口等因素确定了 8 个易损性评价指标，对全省 124 个市县进行雷灾风险分析。

如图 1 所示，指标体系中前二个指标作为地震高发区的判别；第三、第四指标反映了区域受灾的可能性；第五、第六指标反映了区域历年受损程度；最后两个指标反映了区域受灾隐患以及抵御灾害的能力。

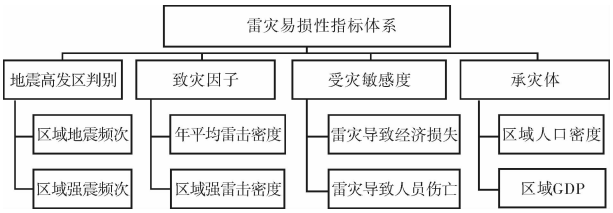


图 1 地震高发区雷灾易损性指标体系

应用 SAS 多元统计分析中主成份分析法来对各区域的易损性指标进行综合评估。其基本原理是通过多元统计分析方法测算出各个指标样本之间的相对差距，用协方差的结构来对原始变量数据矩阵进行降维处理。即在一定的约束条件下，对原始变量作了一次特殊的正交变换。而得到一组具有某种良好的方差性质的新变量，这组新变量彼此互不相关且在各自的特征方向上有最大方差。从中选取前几个变量来代替原变量，计算出这几个主分量的权重，然后进行综合评价结果的加权合成，并根据综合评价值的大小进行排序[14-15]。

因为原始指标数据的量纲不同，为了避免量纲不同对主成份的影响，首先要将指标数据标准化，使第 i 个变量的均值为 0，方差为 1。即设：

$$\overline{X_{\cdot i}} = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^{n} x_{ji} \; ; \tag{1}$$

$$\widetilde{X_{Ji}} = \frac{x_{ji} - \overline{x_{\cdot i}}}{\sqrt{S_{ii}}}, \; (i = 1, \; 2\ldots, \; p; \; j = 1, \; 2\ldots, \; n)。 \tag{2}$$

式中：$\widetilde{x_{Ji}}$为标准化后的数据，S_{ii}为第 i 列数据的方差。

云南省有 124 个对象区域，每个区域对应 8 个评价指标，则原始数据矩阵为 $N = (n_{ji})_{124 \times 8}$，$j$ 等于 1，2……124，i 等于 1，2……8。用 SAS 可求出第 j 个区域的前 m 个主成份 Z_{jk}。

$$Z_{jk} = \sum_{i=1}^{8} n_{ji} \times e_k, (k = 1, 2\cdots\cdots m(m \leqslant 8))。 \tag{3}$$

式中：e_k 是原始数据矩阵对应其相关阵的特征向量。主成份彼此不相关，而且分别以方差贡献率 α_k 为权重解释了各区域的 8 个指标。

$$\alpha_k = \lambda_k \Big/ \sum_{i=1}^{8} \gamma_i 。 \tag{4}$$

式中：λ_k 为第 k 个主成份的方差贡献（特征值），它反映了第 k 个主成份提供信息的大小。当累计贡献率 C 达到 75% ~85% 时，这 m 个主成份就能综合反映所有指标。

$$C = \sum_{k=1}^{m} \alpha_k 。 \tag{5}$$

综合指标 F_j 是以前 m 个主成份的方差贡献率为权重构建的，即第 j 个区域的综合指标为：

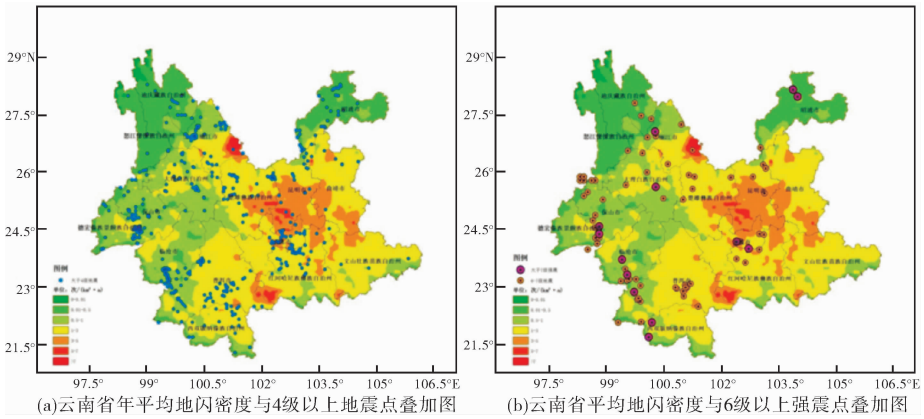
$$F_j = \sum_{k=1}^{m} \alpha_k \times Z_{jk} 。 \tag{6}$$

主成份与变量值是呈正相关的，即主成份得分值越大，所表征的易损性也越大，即雷灾风险也越大。

2 地震高发区雷灾风险分析与区划

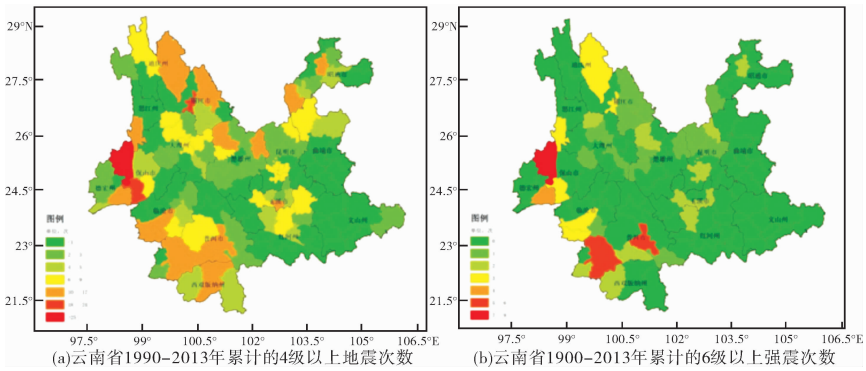
2.1 地震高发区雷电活动分布特征

将地闪次数用 GIS 系统中 Kriging 法插值成栅格数据生成云南年平均地闪密度与 4 级以上地震点（图 2a）、6 级以上强震点的叠加图（图 2b）。从图 2 可看出，昆明南部、玉溪大部、楚雄南部、丽江东部以及版纳与普洱交界处既是地震高发区域，也是雷电活动密集区域。地震灾害发生时，这些区域出现雷雨天气的几率较大，可能引发雷电灾害的风险也较大。全省 6 级以上强震分布相对集中，主要在保山与德宏交界，临沧与普洱交界、普洱中部、玉溪与红河交界等区域。其中玉溪与红河接壤一带地闪密度也较高，局部区域可达 5 ~ 7 次/（km^2 · 年），该区域属于强震高发区，同时也是雷电活动高发区，更应加强防雷应急物资储备。



(a)云南省年平均地闪密度与4级以上地震点叠加图　　(b)云南省平均地闪密度与6级以上强震点叠加图

图 2　云南省地震与年平均地闪密度分布



(a)云南省1990–2013年累计的4级以上地震次数　　(b)云南省1900–2013年累计的6级以上强震次数

图 3　云南省地震次数分布

2.2　地震活动易发性分析

地震活动易发性主要考虑全省 1900 – 2013 年累计的 4 级以上地震次数(图 3a)与 6 级以上强震次数(图 3b)。因灾害是突发性小概率事件，发生区域呈点状分布，具有偶然性、随机性和边界性，本文在分析灾害风险时主要以全省 124 个县市为对象区域进行分析，而未采用栅格插值法。从图 3 可看出，地震发生次数最多为腾冲、龙陵、丽江古城区一带，累计达 18 次以上。其次为普洱、版纳、临沧交界一带，以及香格里拉、宁蒗、大姚、巧家、大关一带，累计达 10 次以上。6 级以上强震区域主要是腾冲、澜沧、宁洱等区域。

2.3　雷电灾害致灾因子分析

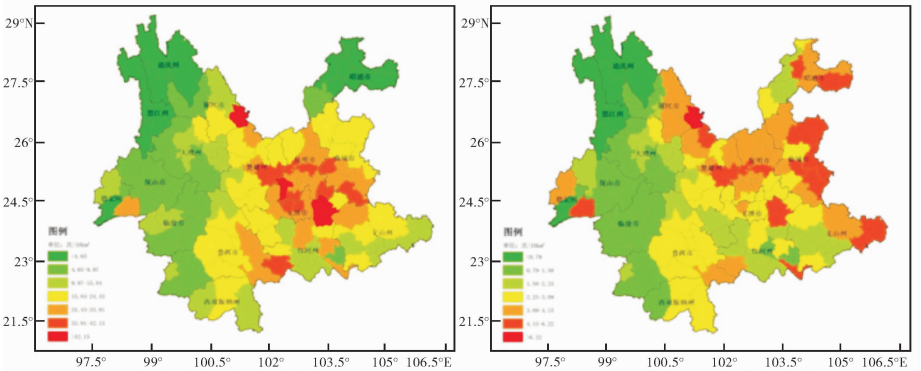
雷电灾害致灾因子主要考虑 124 个县市的年平均地闪密度和强地闪密度。年平均地闪密度通过计算区域单位面积上年平均地闪次数得出(图 4a)，强地闪密度通过计算区域单位面积上强度超过 50 kA 的年平均地闪次数得出(图 4b)。从图 4 可看出，雷电活动密集区域主要集中在昆明、楚雄、曲靖、玉溪、普洱一带，局部区域平均每年可达 40 次/10km^2。强地闪频繁发生区域主要分布在昭通、文山、丽江、楚雄、昆明、曲靖一带，这些区域年平均强地闪次数都在 3 ~ 6 次/10km^2。区域强地闪密度越大，一旦出现雷雨天气都有可能伴随强雷暴的发生，造成雷电灾害的可能性也越大。

2.4　雷电灾害敏感度分析

雷电灾害敏感度主要考虑 124 个县市 2011 – 2015 年间雷灾造成的经济损失和人员伤亡损失情况。经济损失指标是指区域单位面积上的雷灾经济损失数额，人员伤亡损失指标是指区域雷电灾害导致人员伤亡的累计人数。从图 5 可看出，雷灾造成经济损失较为严重的区域主要包括昆明主城区、盐津、宣威、景洪等区域。雷灾造成人员伤亡人数较多的区域包括昭通市区、安宁、腾冲、弥勒、景洪等区域，累计伤亡人数达 20 人以上。雷灾造成经济及人员伤亡损失越严重，表征区域对雷灾的敏感度越强。

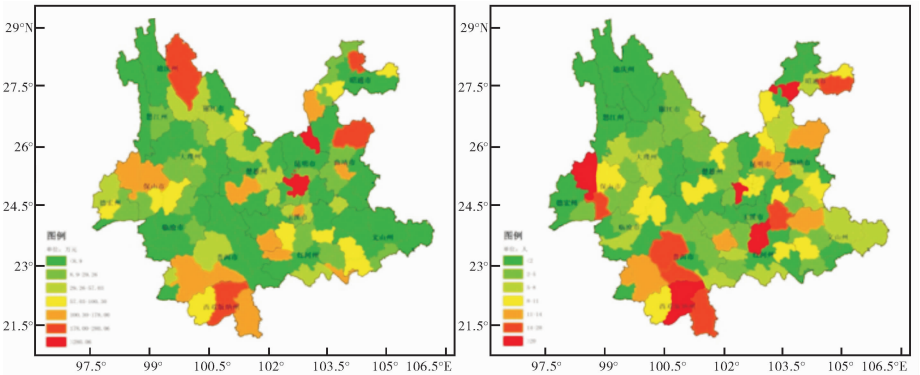
2.5　雷电灾害承灾体分析

雷电灾害承灾体情况主要考虑 124 个县市的人口密度(图 6a)及人均 GDP 水平(图 6b)。如图 6 所示，昆明市区、玉溪市区、大理市区、昭通市区、芒市等区域人口密度较大，达到 318 人/km^2 以上。昆明市区、曲靖市区、玉溪市区等区域人均 GDP 水平较高，达到 5. 17 万元以上。人口密度反映了雷灾发生时的人员伤亡隐患，人均 GDP 反映了区域经济发展水平的差异。人口密度越大，GDP 越高，表征社会结构越复杂，雷灾发生时可能造成的损失也越大。



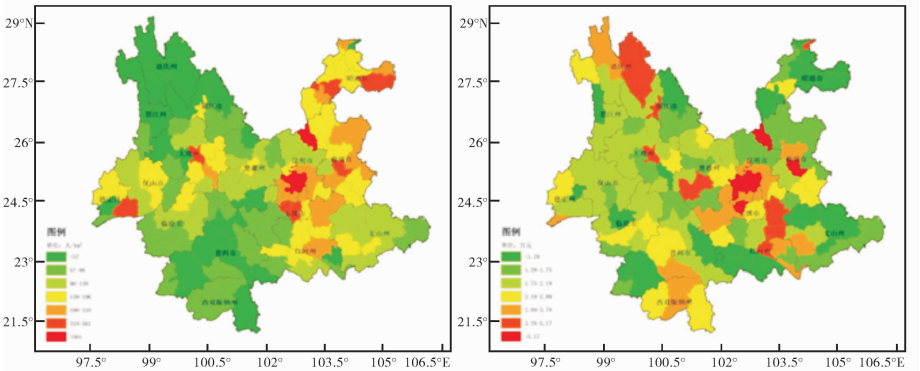
(a)云南省平均地闪密度分布图 (b)云南省强地闪密度分布图

图 4 云南省区域年平均地闪密度



(a)云南省雷灾造成经济损失分布图 (b)云南省雷灾造成人员伤亡损失分布图

图 5 云南省雷灾造成经济损失和人员伤亡损失



(a)云南省人口密度分布图 (b)云南省人均GDP水平分布图

图 6 云南省人口密度和人均 GDP 水平

2.6 地震高发区综合雷灾风险区划

调用 SAS – PRINCOMP 过程对 8 个损性指标做主成份分析，可得出第 j 个区域的第 k 个主成份，同时可得出指标矩阵的指标特征值和方差贡献率。从表 1 可看出，前 5 个主成份的累计贡献率 C = 28.35% +26.25% +15.23% +11.34% +7.72% = 88.89%，大于 85%，即前 5 个主成份就可以充分体现所有指标的信息。

用前 5 个主成份的方差贡献率为权重构建综合指标，即第 j 个区域的综合指标 F_j 为：

$$F_j = \sum_{k=1}^{5} \alpha_k \times Z_{jk} 。 \quad (7)$$

表 1 指标特征值和方差贡献率

主成份序号	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.2682	0.2835	0.2835
2	2.1002	0.2625	0.5461
3	1.2185	0.1523	0.6984
4	0.9070	0.1134	0.8118
5	0.6173	0.0772	0.8889
6	0.5288	0.0661	0.955
7	0.2160	0.027	0.982
8	0.1436	0.018	1

综合指标值大小可表征易损度的大小。调用

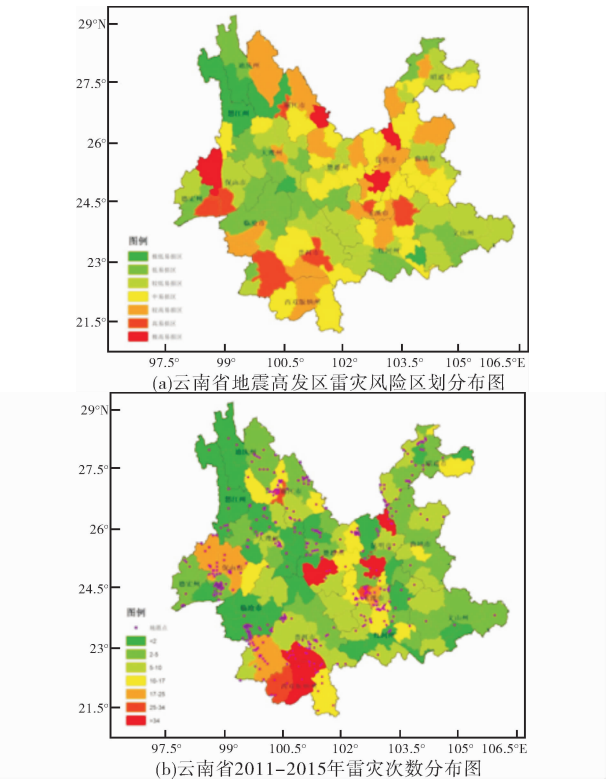
SAS－FASTCLUS 过程在综合指标值中选取 7 个初始凝聚点进行分类。分类结果如表 2 所示，将 124 个县市划分为 7 类，其中，7 个县市属于极低易损区；25 个县市属于较低易损区；33 个县市属于低易损区；29 个县市属于中易损区；20 个县市属于高易损区；7 个县市属于较高易损区；3 个县市属于极高易损区。

表 2　云南省地震高发区雷灾风险区划

极低易损区	低易损区	较低易损区	中易损区	较高易损区	高易损区	极高易损区
南涧县	双柏县	易门县	禄丰县	普洱市	芒市县	腾冲县
玉龙县	西盟县	洱源县	江城县	安宁县	宁洱县	华坪县
屏边县	祥云县	盈江县	楚雄市	通海县	弥勒县	昆明市
兰坪县	漾濞县	绿春县	江川县	曲靖市	丽江市	
贡山县	金平县	泸西县	景谷县	里拉县	澜沧县	
维西县	砚山县	牟定县	泸水县	武定县	玉溪市	
福贡县	临沧市	丘北县	罗平县	大姚县	龙陵县	
	水富县	富源县	富民县	景洪市		
	西畴县	富宁县	蒙自县	耿马县		
	云县县	孟连县	晋宁县	峨山县		
	巍山县	彝良县	石屏县	宣威市		
	麻栗县	盐津县	姚安县	建水县		
	昌宁县	南华县	澄江县	华宁县		
	凤庆县	文山市	河口县	沧源县		
	绥江县	个旧市	会泽县	大关县		
	永善县	元谋县	昭通市	巧家县		
	元阳县	元江县	永胜县	寻甸县		
	景东县	墨江县	勐海县	大理市		
	瑞丽市	沾益县	马龙县	宁蒗县		
	云龙县	保山市	永仁县	嵩明县		
	镇康县	弥渡县	师宗县			
	梁河县	威信县	陆良县			
	德钦县	鹤庆县	剑川县			
	永德县	宾川县	石林县			
	陇川县	施甸县	禄劝县			
		鲁甸县	开远市			
		双江县	镇雄县			
		永平县	宜良县			
		红河县	勐腊县			
		广南县				
		马关县				
		新平县				
		镇沅县				

3　风险区划结果验证

为检验地震高发区风险区划的优劣，将区划结果(图 7a)与全省 2011－2015 年雷灾次数分布(图 7b)进行对比验证。从图 7 可看出，风险区划结果与雷电灾害频次分布对应良好，且与地震活动分布也对应良好，基本能反应全省地震高发区的雷电灾害情况。如图 8 所示，把各市县的雷电灾害次数与雷电综合区划风险值作散点相关分析，相关系数为 0.44，通过0.01 的显著性检验，即雷灾风险区划结果与历史雷灾次数通过了极显著相关性检验。



(a)云南省地震高发区雷灾风险区划分布图

(b)云南省2011-2015年雷灾次数分布图

图 7　云南省地震高发区雷灾风险区划与雷灾次数分布对比

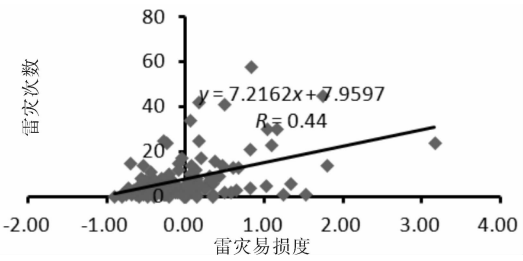


图 8　区划综合指标值与雷灾次数散点相关图

4　结论与讨论

本文根据自然灾害系统理论，以云南省地震活动分布为背景场，从雷电灾害致灾因子、受灾敏感度、承灾体三方面选取 8 个指标，采用多元统计中主成份分析法构建了云南省地震高发区域雷电灾害风险区划模型，并对区划结果进行了验证，得出以下结论：

(1)地震发生密集区与雷电活动高发区重合的主要区域是昆明南部、玉溪大部、楚雄南部、丽江东部以及版纳与普洱交界处。6 级以上强震高发区中，玉溪与红河接壤一带属于强震高发区，同

时也是雷电活动高发区。

(2)云南中部昆明、玉溪、楚雄一带，南部版纳、普洱一带，西部保山一带，北部丽江一带属于地震活动高发区，同时也是雷电灾害高风险区。全省 124 个县市中，腾冲、华坪、昆明既是地震高发区，又是雷电灾害极高易损区。

(3)运用云南省各县市雷电灾害次数对风险区划结果进行验证，雷灾区划风险综合指标值与雷电灾害次数相关性通过极显著性检验，表明本文构建的地震高发区雷电灾害风险评价指标体系及评估方法是可靠且有效的。

本文首次以地震高发区的雷灾风险作为研究对象，在结合两种自然灾害的分布特征进行分析方面做了初步探索。地震高发区的判别主要依据历史地震次数，今后可以考虑运用地震断裂带分布作为判别因子可能更为科学。此外，在雷灾风险区划模型的构建上，今后将考虑在孕灾环境方面加入土壤电导率因子、地形因子等指标，进一步优化区划模型，使区划结果更具合理性和全面性。同时，在现有的研究成果基础上，将逐步开展雷电灾害风险区划与实时雷电监测预警相结合的研究。

参考文献：

[1] 皇甫岗．云南地震活动性研究[D]．合肥：中国科学技术大学，2009.

[2] 史培军．再论灾害研究的理论与实践[J]．自然灾害学报，1996，5(4)：6－17.

[3] 史培军．三论灾害研究的理论与实践[J]．自然灾害学报，2002，11 (3)：1－9.

[4] 王静爱，史培军，王瑛，等．中国城市自然灾害区划编制[J]．自然灾害学报，2005，14(6)：42－46

[5] 尹娜，肖稳安．区域雷灾易损性分析、评估及易损度区划[J]．热带气象学报，2005，21(4)：441－449.

[6] 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，2014，30(5)：996－1000.

[7] 赵伟，杨续超，张斌．浙江省雷电灾害风险分析及区划[J]．热带气象学报，2012，32(1)：80－85.

[8] 高燚，张义军，张义娟，等．我国雷击致人伤亡特征及易损度评估区划[J]．应用气象学报，2012，23(3)：294－303.

[9] 扈海波，王迎春，熊亚军．基于层次分析模型的北京雷电灾害风险评估[J]．自然灾害学报，2010，19(1)：104－109.

[10] 彭启洋，刘平英，张腾飞．2014 年云南昭通鲁甸 6.5 级地震灾区雷击风险分析及防御措施研究[J]．灾害学，2015，30(2)：120－123.

[11] 樊运晓，罗云，陈庆寿．区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J]．灾害学，2001，16(1)：85－87.

[12] 樊运晓，罗云，陈庆寿．承灾体脆弱性评价指标中的量化方法探讨[J]．灾害学，2000，15(2)：52－59.

[13] 国家可科委全国重大自然灾害综合研究组．中国重大自然灾害及减灾对策(总论)[M]．北京：科学出版社，1994：66－92.

[14] 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.

[15] 朱道元，吴诚鸥，秦伟良．多元统计分析与软件 SAS[M]．南京：东南大学出版社，2003：386－389.

The Thunder Disaster Risk Analysis and Zoning of Earthquake High Incidence Area in Yunnan Province

YIN Xian, HU Yin, ZHOU Qingqian

(*Yunnan Meteorological Disaster Prevention Technology Center*, *Yunnan* 650034, *China*)

Abstract: Based on the theory of natural disaster risk analysis, this article used the historical seismic data, lightning data, thunder disaster data and the social economic data, extracted the eight parts of the thunder disaster risk index from the discrimination of earthquake high incidence area , disaster-inducing factors, formative factors and the affected parts of sensitivity , adopted the method of principal component analysis and cluster analysis, taken 124 counties of the province as the area to build the thunder disaster risk zoning model for the object, and validated the result of the division. The result had good popularization using value. The analysis results show that the thunder disaster risk level of earthquake high incidence area can be divided into 7, Kuming, Tenchong, Huaping region are extremely vulnerable area. Kunming, Yuxi, Chuxiong, Banna, Puer, Baoshan and Lijiang region are both the seismic activity, and the high risk during lightning disasters.

Key words: earthquake high incidence area; lightning activity; thunder disaster risk; principal component analysis; risk zoning