

文章编号:1004-4574(2013)01-0175-08

基于聚类分析的海南岛雷电灾害易损度风险区划

高 焱, 蒙小亮, 劳小青

(海南省防雷中心, 海南 海口 570203)

摘要:利用1998-2009年全国雷电灾害汇编资料、海南岛18个气象台站雷暴资料、海南闪电定位网观测资料和海南省统计年鉴的区域经济、人口数据,选取了表征海南岛雷电灾害致灾因子、孕灾环境和承灾体特征的指标变量。采用R型聚类分析方法对影响易损度的指标进行了筛选和检验。以雷暴日数、50 kA以上平均地闪密度、雷灾频数、人员伤亡频数和区域经济易损模数等5个指标为依据变量,用欧氏距离(Euclidean distance)计算了各样本的相似性测度,应用Q型聚类中的Ward's法(离差平方和法)进行了层次聚类分析,并用Q型迭代聚类分析法进行了聚类解验证,开展了海南岛雷电灾害风险区划。结果表明:海口属于易损度高风险的第1类地区,该类地区雷电灾害综合易损值高达3.89;文昌、澄迈、临高、定安、屯昌和琼海为易损度次高风险的第2类地区;儋州、琼中、白沙、通什和保亭为中等风险的第3类地区;昌江、东方、乐东、万宁、陵水和三亚为较弱风险的第四类地区。

关键词:聚类分析;雷电灾害;易损度;区划

中图分类号:P446

文献标志码:A

Cluster analysis-based vulnerability risk zoning of lightning disaster in Hainan Island

GAO Yi, MENG Xiaoliang, LAO Xiaoqing

(Hainan Provincial Lightning Protection Center, Haikou 570203, China)

Abstract: From the national collected data of lightning disasters from 1998 to 2009, the observational thunderstorm data of 18 meteorological stations, and lightning locating networks data and economy and population data in statistical yearbook of Hainan Province, the indices representing hazard-formative factor, hazard pregnant environment and hazard-affected body of lightning was selected. Through R-Cluster analysis, the indices influencing vulnerability were screened and checked. Based on 5 indices, i. e., thunderstorm days, lightning density above 50 kA, thunderstorm frequency, casualty frequency and regional vulnerability economic modulus as basic variables, similarity measures of samples were calculated. With Ward's method in Q-Cluster, the hierarchy cluster analysis was carried out and Q-iterative cluster was adopted to explain and testify the result of the cluster. Finally the zoning of lightning risk in Hainan Island was constructed. Results show that Haikou City is within the first category zone, whose vulnerability is extremely high, with comprehensive vulnerability as high as 3.89; Wencang, Chenmai, Linggao, Dingan, Tuncang and Qionghai are in the second category zone, whose vulnerability is just next to the extremely high zones; Danzhou, Qiongzong, Baisha, Tongshi, Baoting are in the third category zone with moderate risks; Changjiang, Dongfang, Ledong, Wannin, Lingshui and Sanya are in the fourth category

收稿日期:2012-04-17; 修回日期:2012-06-15

基金项目:海南省重点科技计划项目(ZDXM20120057);海南省自然科学基金项目(40882);海南省气象局科技创新项目(HN2012TDA16)

作者简介:高焱(1966-),男,高级工程师,主要从事雷电监测和雷灾评估研究. E-mail: qjgaoyi@qq.com

zone with weak risks.

Key words: cluster analysis; lightning disaster; vulnerability; zone

灾害的发生是由致灾因子的种类、致灾环境的危险性和承灾体的脆弱性所决定,在热带地区,雷灾最直接的致灾因子是雷电,自然形成的致灾环境通常由所在区域的地形、气候、植被、人口、经济等综合因素组成,而承灾体遭受损失或伤害的程度即易损度与其自身的抗风险能力有很大关系,其中,人为因素作用极其重要,它决定了承灾体在受到雷电袭击时的脆弱性。通过人类的管理和规划进行改善,影响和评价承灾体的易损性是防灾减灾的一种重要手段。国内外近几年的发展表明,在科学研究基础上进行风险区划,将自然灾害管理提高到风险管理水平,是所有可能避免和减轻自然灾害的措施中最简便有效的方法之一^[1]。

雷电是大气中伴有闪电和雷鸣的一种放电现象,OTD(光学瞬态探测器)和 LIS(闪电成像仪)探测到的全球闪电频次平均为 (46 ± 5) 次/s,一年里从最少的 35 次/s(出现在北半球冬季)到最多 55 次/s(出现在北半球夏季)^[2],这些闪电的发生正是雷电孕灾环境的直接反映。吴孟恒等^[3-6]分别对河北、山西、广西和黑龙江的雷电灾害特征、成因、分布和活动的的气候规律进行了分析探讨,雷灾造成的人员伤亡和经济损失不可小视,另据美国 30 a(1964 - 1994 年)的不完全统计^[7],雷击平均每年致死 87 人,死亡人数仅次于因山洪、洪水引发的死亡人数,雷电灾害已经对人身安全构成巨大威胁,成为需重点防御的灾害之一。

近年来,对雷灾易损度的研究^[8-11],主要是从灾害密度频数、易损模数作为评价指标的角度,采用五级分割法划分易损等级,并对各等级赋予定值,利用区域综合易损度的方法对区域灾害进行了分析评估和区划。扈海波等^[12]还基于层次分析模型对北京雷电灾害风险评估进行了研究。以上工作为雷电灾害的区域性评估区划提供了有益的帮助,然而这种方法存在以下局限性:(1)以预先假设的变量作为评价指标,不能改变;(2)易损度区划的分类数无法改变,即五级分割法;(3)各指标变量等级采用主观赋予阈值,指标变量累加后的综合指标采用组间最大值与最小值求平均作为等级划分的标准值进行分类;(4)分类区划的结果没有进行检验。事实上,选择不同的指标变量、增加或是减少指标变量数目都会产生完全不同的分级区划的结果,分类数的多少也应该根据不同的分类区划样本来确定,5 级分类对不同的样本并不一定是最好的选择,特别是各个等级之间的界限采用主观赋予阈值的办法,对于千差万别的样本来说,很难较为真实反映易损度的实际情况。为了克服以上不足,本文采用 R 型聚类分析的方法筛选影响易损度的关键指标,采用 Q 型层次聚类分析的方法计算关键指标的分类情况,用聚合系数的陡度来确定分类数,最后采用 Q 型迭代聚类分析法进行验证后,得到海南岛雷电灾害易损度风险区划结果。

1 资料和方法

1.1 资料来源

《全国雷电灾害汇编》是本文雷电灾害数据的主要来源,汇编包括了海南岛 18 个市县 1998 年至 2009 年间 12 a 发生雷灾起数以及造成人员伤亡的情况,以及上报的雷电灾害数据和事例。鉴于资料收集存在不全面或不完整的情况,甚至有些年份雷灾记录有缺失或记载不规范的情况,因此此类数据只是雷灾特征的不完全统计。

人工观测的雷暴资料也是分析区域雷暴特征的重要参考。海南本岛建有气象台站 18 个,各站的资料年限长度不一。如海口站,早在 1951 年就开始进行雷暴的人工观测并进行记录;而定安、昌江、东方和保亭站的人工观测雷暴资料始于 1963 年。为保持样本的一致性,本文数据采用全岛 18 个站 45 a(1963 - 2007 年)的观测统计资料。

地闪强度是雷电灾害中一个重要的致灾环境因素,分析闪电定位网中不同雷电流下的地闪密度可以较为准确的反映孕灾环境的实际情况,海南的 6 个闪电定位监测站,分别位于海口、三亚、东方、琼海、琼中和西沙,本文选取了 2007 年和 2008 年两年完整不间断的资料进行统计,采用不同的网格大小,分析一定区域范围的地闪密度空间分布和雷电流强度特征。

各市县的人口数、GDP 经济数据和区域面积来源于海南省 2008 年和 2009 年统计年鉴。

虽然以上几个方面的资料时长不一致,但是对任意一个影响易损度的指标变量,在不同区域的资料时长是一定的,所以资料时长对雷灾易损度区划的影响较小。

1.2 分析计算方法

本文采用多元统计学中的聚类分析(cluster analysis)进行雷电灾害风险区划研究,其中,以 R 型聚类对变量进行分类筛选,以 Q 型聚类对样本进行分类。为计算相似性测度,采用欧氏距离(Euclidean distance)和 Pearson 相关系数进行计算,方法如下:^[13]

欧氏距离:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}; \quad (1)$$

Pearson 相关系数:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^m (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}}. \quad (2)$$

在进行 R 型聚类时, m 为样本数, x_i 和 x_j 分别代表任意两个变量;在进行 Q 型聚类时, m 为变量数, x_i 和 x_j 分别代表任意两个样本。欧氏距离表征了多维空间中的点距,距离越近表示两者关系越紧密,归为同一类的可能性越大;相反,距离越远的点则可能归属于不同类。

应用(1)式计算得到两个距离矩阵后,可以采用分层的办法进行聚类,其原理是,先将 n 个观测样本各自看成一类,选择距离最近的两类样本合并成一个新类后,剩下 $n-1$ 个类,再计算这 $n-1$ 个类两两之间的距离,将距离最近的两类合并,剩下 $n-2$ 个类……每次合并减少一类,直至所有样本都归成一类为止。聚类过程的每一步情况是由聚类进度表和二叉树聚类图来描述的,每一步计算对应一个聚合系数,可作为确定分类数的重要依据。本文采用 SPSS 软件^[14]中的离差平方和法(Ward's method,简称:Ward's 法)进行 Q 型层次聚类分析,并用 Q 型迭代聚类分析进行验证。Ward's 法是计算出并类后的离差平方和增量,如果并类后的离差平方和增量最小,就可并为一类,否则重新计算直到并类完成。迭代聚类分析是给定初始聚类中心进行迭代,两次迭代之间的最小类中心的变化距离小于初始类中心距离的 1% 时迭代停止,迭代达到收敛的目的,得到分类结果。

2 雷灾风险区划

2.1 评估指标

评估指标应反映致灾因子、孕灾环境和承灾体的特征,可以根据灾后损失评估体系采用反推法确定,也可基于社会易损性的理解、由灾害案例采用信息量法确定^[8]。根据这个原则,初步选出与雷电灾害易损性相关的 6 个影响因子,定义如下:

- (1) 年平均雷暴日数 T_d , 单位: $d \cdot a^{-1}$, 每年平均发生雷暴多少天;
- (2) 50 kA 以上平均地闪密度 N_g , 单位: $次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, 每 km^2 每年发生的强地闪次数;
- (3) 雷灾频数 N , 单位: $次 \cdot a^{-1}$, 发生雷电灾害的年平均次数;
- (4) 人员伤亡频数 P , 单位: $人 \cdot a^{-1}$, 雷击造成人员伤亡的年平均人数;
- (5) 区域生命易损模数 C , 单位: $万人 \cdot km^{-2}$, 一个区域单位面积上的潜在受灾人数;
- (6) 区域经济易损模数 E , 单位: $亿元 \cdot km^{-2}$; 一个区域单位面积上的潜在受灾经济量。

由于各变量的量纲不一致,对以上 6 个变量的 18 个样本数据进行标准化处理,对变量进行标准化变换(表 1)。

以上变量依据反推法和信息量法选出,可以认为是影响雷灾易损度的主要因子,但是并不是每个因子都会在聚类分析中起同等的作用。在模糊聚类分析中,理论上可以选择无限多变量来进行分析,然而实践表明聚类分析的真实解并不与变量数目的多少成正比,如果选择不合适的变量或是相关性较高的变量,变量越多反而会出现多重共线性现象,一些变量无法发挥作用而增加了分析和解决问题的障碍,使聚类解不可信。因此,必须对这些变量进行因子筛选,R 型聚类分析法即是对变量筛选的重要方法,具体过程如下:

(1) 对 6 个变量进行 R 型模糊聚类。图 1 是 Ward's 法二叉树变量聚类图,可见变量 C 和 E 可归为一类,根据类间欧氏距离映射值 10 来分析,变量分成 5 类较为合理,也即 $T_d, N_g, N, P, (E, C)$, 每类挑选一个变

量取 5 个变量为: T_d, N_g, N, P, E 。

表 1 评估变量标准化变换值

Table 1 Standardized transformation values of evaluation variables

		年平均雷暴日数/ ($d \cdot a^{-1}$)	50KA 以上地闪密度/ (次 $\cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	雷灾频数/ (次 $\cdot a^{-1}$)	人员伤亡频数/ (人 $\cdot a^{-1}$)	区域生命易损模数/ (万人 $\cdot km^{-2}$)	区域经济易损模数/ (亿元 $\cdot km^{-2}$)
1	海口	0.238	0.252	2.319	1.223	3.526	3.649
2	文昌	-0.287	0.505	0.010	1.840	-0.133	-0.064
3	澄迈	1.596	1.020	-0.199	2.008	-0.122	-0.064
4	临高	0.096	0.243	-0.507	-0.004	0.424	0.077
5	定安	0.799	1.283	-0.451	0.499	-0.050	-0.331
6	屯昌	0.893	2.368	-0.402	-0.903	-0.216	-0.418
7	儋州	1.029	0.062	-0.144	-0.508	0.209	-0.162
8	琼海	-0.582	0.912	0.626	0.103	0.209	0.186
9	琼中	0.439	0.559	2.522	-1.178	-1.015	-0.729
10	白沙	1.065	-0.327	-0.710	-0.903	-0.932	-0.681
11	通什	0.935	-1.132	-1.123	-1.178	-0.860	-0.675
12	昌江	-0.594	-1.023	-0.556	-0.286	-0.579	-0.265
13	东方	-1.072	-1.051	-0.402	-0.004	-0.370	-0.232
14	乐东	-0.311	-1.331	-0.710	1.223	-0.447	-0.523
15	保亭	0.285	-0.942	-0.556	-0.843	-0.673	-0.598
16	万宁	-1.545	-0.119	0.878	-0.233	0.231	-0.033
17	陵水	-0.878	-0.363	0.010	-0.903	0.198	-0.180
18	三亚	-2.105	-0.915	-0.605	0.049	0.600	1.043

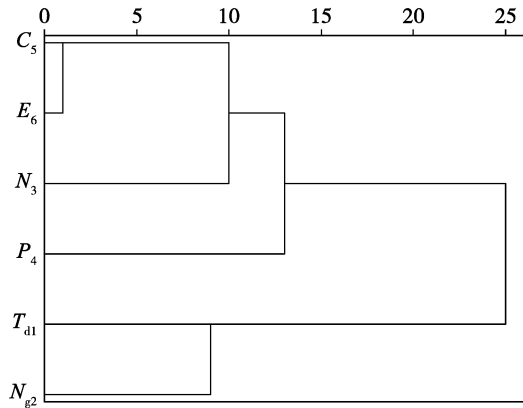


图 1 二叉树变量聚类图(Ward's 法)

Fig.1 Dendrogram of Ward's method cluster

(The X axis is mapping value of cluster distance with SPSS numeration)

表 2 变量之间的相关系数检验表

Table 2 Check up list of correlation coefficients between variables

	T_d	N_g	N	P	C	E
T_d	1					
N_g	0.434	1				
N	-0.060	0.301	1			
P	0.000	0.153	0.073	1		
C	-0.163	0.159	0.486	0.408	1	
E	-0.199	0.062	0.505	0.409	0.967	1

(2)应用相关系数检验。表 2 是 6 个变量的皮尔逊相关系数计算结果,可以看出变量 E 和变量 C 的相

关系数是 0.967,两变量高度相关,去掉变量 C ,而 T_d, N_g, N, P, E 这 5 个变量的相关系数均小于 0.6,因此最后选取 T_d, N_g, N, P, E 这 5 个变量对样本进行 Q 型模糊聚类。

2.2 风险区划与评估

2.2.1 风险区划

取年平均雷暴日数 T_d ,50 kA 以上平均地闪密度 N_g ,雷灾频数 N ,人员伤亡频数 P ,和区域经济易损模数 E 这 5 个指标变量的样本标准化值,采用 Ward's 法对 18 个样本进行 Q 型层次聚类分析,图 2 是聚类进程的二叉树聚类图,图顶部 X 轴(0-25)是聚类过程中各类间的距离测度映射值,从图中看出,聚类过程进行了 17 步,每一步都对应一个距离测度映射值和一个聚合系数,映射值越大说明聚类过程越可信,这个二叉树图非常清楚的体现了样本从分成 18 类开始,逐次合并最后合并成 1 类的全部过程。

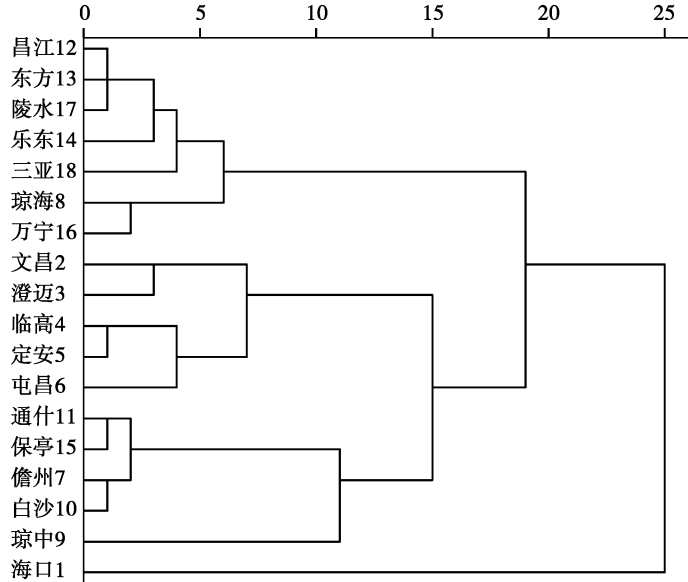


图 2 二叉树样本聚类图(Ward's 法)

Fig. 2 Dendrogram of Ward's method cluster

(The X axis is mapping value of cluster distance with SPSS numeration)

图 3 是由 Ward's 法计算得到的聚合系数,方点代表每一步的聚合系数值,分析计算每两个点的斜率,斜率大说明各类的距离测度远,取一定范围内集中出现斜率较大值的点作为理想分类数,从图中可以看出分类数在 4 类时各类之间的斜率较大,应该是理想分类数,所以采用 4 级分类,取前面分类计算的 4 类值得到下列结果: {海口}、{琼中,白沙,儋州,保亭,通什}、{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌}、{琼海,昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}。

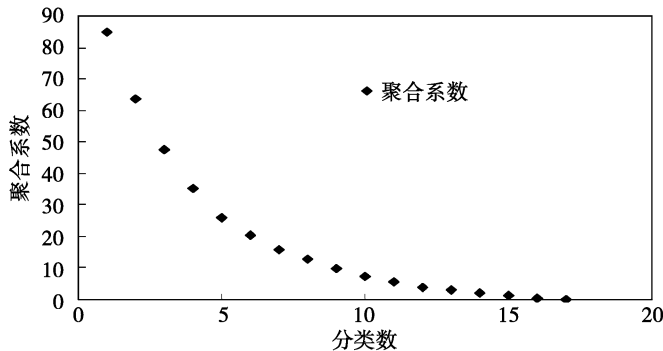


图 3 各类的聚合系数变化

Fig. 3 Coefficients variation under number of cluster

为了验证以上聚类解的稳定性,选取以上分类结果为迭代聚类分析法的初始聚类中心,分别计算 5 个变量的均值如下(表 3):

表 3 迭代聚类的初始聚类中心
Table 3 Initialization center of K - Means cluster

4 类组合	T_d	N_g	N	P	E
{海口}	0.238	0.252	2.319	1.223	3.649
{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌}	0.619	1.084	-0.310	0.688	-0.160
{琼中,白沙,儋州,保亭,通什}	0.750	-0.356	-0.002	-0.922	-0.569
{琼海,昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}	-1.013	-0.556	-0.108	-0.007	-0.001

以这个初始聚类中心,选取 0.01 的收敛准则进行迭代,两次迭代之间的最小类中心的变化距离小于初始类中心距离的 1% 时迭代停止,迭代达到收敛的目的,完成分类结果如下:

表 4 迭代聚类的聚类结果
Table 4 Result of K - Means cluster

样本号	样本	聚类	距离
1	海口	1	0.000
2	文昌	2	1.546
3	澄迈	2	1.844
4	临高	2	1.129
5	定安	2	0.587
6	屯昌	2	2.083
7	儋州	3	0.781
8	琼海	2	1.397
9	琼中	3	2.720
10	白沙	3	0.783
11	通什	3	1.403
12	昌江	4	0.720
13	东方	4	0.365
14	乐东	4	1.706
15	保亭	3	0.935
16	万宁	4	1.396
17	陵水	4	1.041
18	三亚	4	1.535

从分类结果{海口}、{琼中,白沙,儋州,保亭,通什}、{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌,琼海}、{昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}可以看出与用 ward 法完成的分类结果几乎一样,唯一的变化是将琼海分到了{文昌...}那一类,可以认为聚类解非常稳定,分类得到验证,取{海口}、{琼中,白沙,儋州,保亭,通什}、{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌,琼海}、{昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}为最终分类结果。

2.2.2 风险区划等级

要准确的描述聚类结果,给每一类合适的易损度进行排序,可以通过计算各类的特征量来进行,根据前面的指标筛选,可以选取雷暴日数和每 a 每万 km^2 雷灾发生率为致灾因子危险性的特征量,经济易损模数为承灾体易损性的特征量,每 a 每万 km^2 伤亡人数为孕灾环境承灾体暴露性的特征量,计算各类的特征值(表 5)。

可以看出各类别平均雷暴日数在 $77.8 \sim 108.9(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$ 之间,雷暴日数最高的区域,经济易损模数反而是最低,人员伤亡率和雷灾发生率也不高,然而雷暴日数仅有 100.2 d 的海口地区,经济易损模数和人员伤亡率都较高,可见经济和人口对雷灾易损度的影响是至关重要的,为了准确比较和描述各类易损度,先将这 4 个特征值进行标准化处理,累加 4 个无量纲变量值即是各类的综合易损值,根据综合易损值来进行比较,综合易损值越大的易损度越高,雷灾发生导致的风险越大(表 6)。

表 5 各类别的特征值
Table 5 Eigenvalues of cluster

样本集	雷暴日数/ ($d \cdot a^{-1}$)	经济易损模数/ (亿元 $\cdot km^{-2}$)	人员伤亡率/ ($10^{-4} 人 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	雷灾发生率/ ($10^{-4} 次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
{海口}	100.2	0.207	16.269	26.753
{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌,琼海}	103.3	0.035	17.002	13.046
{儋州,琼中,白沙,通什,保亭}	108.9	0.014	2.650	11.563
{昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}	77.8	0.039	9.853	10.577

表 6 标准化下各类别的综合易损值
Table 6 Standardized comprehensive vulnerability evaluation of cluster

类别	样本集	标准化处理				综合易损值
		雷暴日数	经济易损模数	人员伤亡率	雷灾发生率	
第 1 类	{海口}	0.194 1	1.488 7	0.721 92	1.486 5	3.891 27
第 2 类	{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌,琼海}	0.421 2	-0.432 92	0.831 58	-0.321 72	0.498 2
第 3 类	{儋州,琼中,白沙,通什,保亭}	0.831 5	-0.667 54	-1.315 6	-0.517 35	-1.668 9
第 4 类	{昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}	-1.447	-0.388 24	-0.238	-0.647 43	-2.720 6

{海口}的综合易损值高达 3.891 27 为第 1 类地区,该区域雷电灾害的易损度最高,属雷灾高风险区,第 2 类地区{文昌,澄迈,临高,定安,屯昌,琼海}属次高风险区,第 3 类地区为{儋州,琼中,白沙,通什,保亭}属中等风险区,第 4 类地区{昌江,东方,乐东,万宁,陵水,三亚}为弱风险区。根据这个结果就可绘制海南岛雷电灾害风险区划图。

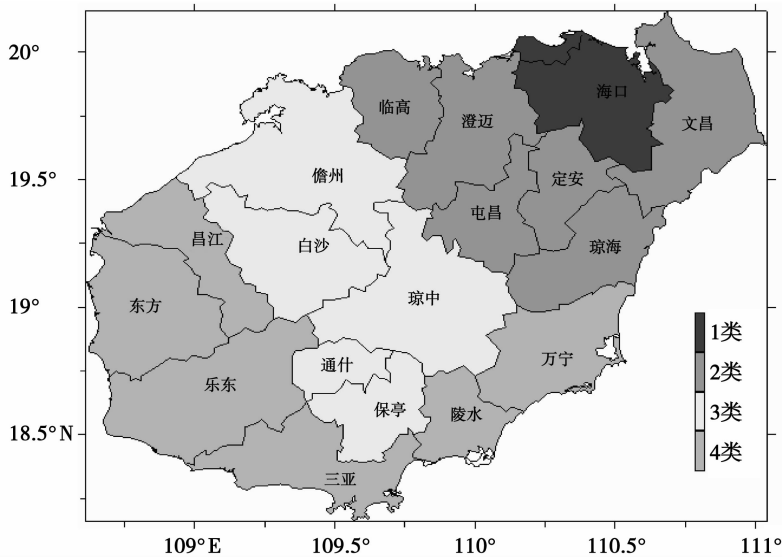


图 4 海南岛雷电灾害易损度区划图

Fig. 4 Vulnerability zoning map of lightning disaster in Hainan Island

3 讨论

雷电灾害资料的收集和上报是雷电灾害风险易损度评估和区划的重要基础,美国在这方面起步很早,早在 1900 年美国就有 10 个州收集发布雷灾报告,到 1935 年 50 个州都收集发布雷灾报告^[14],资料长达百年,完全可以采用同一种方法不同资料时段的计算结果来验证雷电灾害风险区划的结果,然而我省的情况却不同,从 1998 才开始组织上报雷电灾害资料,迄今资料仅有 14 a,如果还用这种方法验证聚类解是不可取的,所以只有采用同一资料应用不同的方法对结果进行验证,当然本文用两种方法得出的结果基本一致,可以认

为风险区划的结果基本可信,该区划结果可以作为防灾减灾决策的重要参考。

另一方面,评估因子的选择对区划的结果也会产生影响,本文基于反推法和信息量法仅选择了 6 个变量因子,经 R 型聚类分析,最后选择了 5 个变量,最初的变量选择带有一定的人为因素,随着雷电灾害风险评估与区划研究的不断深入,将会发现更多影响因子和变量,在这些变量基础上再进行聚类分析,可能得出来的结果会更接近事实,也会更合理。

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.
HUANG Chongfu,ZHANG Junxiang,CHEN Zhifen,et al. Toward a new kind of natural disaster risk zoning map [J]. Journal of Natural Disasters, 2004,13(2):9-14. (in Chinese)
- [2] ZHANG Yijun,MA Ming,LU Weitao,et al. Review on climate characteristics of lightning activity[J]. Acta Meteorologica Sinica,2010,24(2):137-138.
- [3] 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.
WU Mengheng,TIAN Yanting,CUI Haihua,et al. Statistical analysis of characteristics of lightning disaster in Hebei 2003 to 2008 [J]. Journal of Natural Disasters,2010,19(1):21-25. (in Chinese)
- [4] 杨世刚,郝孝智,任晓霞,等. 山西省 2006 年雷电灾害成因分析及应对措施[J]. 自然灾害学报,2008,17(2):117-120.
YANG Shigang,HAO Xiaozhi,REN Xiaoxia,et al. Cause analysis and counter measures against lightning disaster in Shanxi province in 2006 [J]. Journal of Natural Disasters,2008,17(2):117-120. (in Chinese)
- [5] 覃卫坚,寿绍文,王咏青,等. 广西雷暴分布特征及灾害成因分析[J]. 自然灾害学报,2009,18(2):131-138.
QIN Weijian,SHOU Shaowen,WANG Yongqing,et al. Analysis of distribution characteristics and damage causes of thunderstorm in Guangxi [J]. Journal of Natural Disasters,2009,18(2):131-138. (in Chinese)
- [6] 钟幼军,曹铁英,宫延平,等. 黑龙江雷电活动气候特征分析[J]. 自然灾害学报,2007,16(5):79-83.
ZHONG Youjun,CAO Tieying,GONG Yanping,et al. Analysis of climatic character of lightning activity in Heilongjiang province [J]. Journal of Natural Disasters,2007,16(5):79-83. (in Chinese)
- [7] Curran E B,Holle R L,López R E. Lightning Casualties and Damages in the United States from 1959 to 1994 [J]. Journal of Climate,2000,13:3448-3463.
- [8] 蒋勇军,况明生,匡鸿海,等. 区域易损性分析、评估及易损度区划[J]. 灾害学,2001,16(3):59-64.
JIANG Yongjun,KUANG Mingsheng,KUANG Honghai,et al. Regional vulnerability analysis,evaluation and vulnerability zoning [J]. Journal of Catastrophology,2001,16(3):59-64. (in Chinese)
- [9] 严春银,吴高学,朱建章. 区域雷灾易损性及其区划的实证分析[J]. 气象与环境学报,2007,23(1):17-21.
YAN Chunyin,WU Gaoxue,ZHU Jianzhang. A case study on the vulnerability of regional lightning disaster and its division [J]. Journal of Meteorology and Environment,2007,23(1):17-21. (in Chinese)
- [10] 郭虎,熊亚军. 北京市雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 应用气象学报,2008,19(1):35-39.
GUO Hu,XIONG Yajun. Vulnerability analysis,evaluation and vulnerability zoning of lightning disaster in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2008,19(1):35-39. (in Chinese)
- [11] 李彩莲,赵西社,赵东,等. 陕西省雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 灾害学,2008,23(4):49-52.
LI Cailian,ZHAO Xishe,ZHAO Dong,et al. Vulnerability analysis assessment and zoning of thunderstorm disastes in Shanxi Province [J]. Journal of Catastrophology,2008,23(4):49-52. (in Chinese)
- [12] 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.
HU Haibo,WANG Yingchun,XIONG Yajun. AHP model-based risk assessment of lightning in Beijing [J]. Journal of Natural Disasters,2010,19(1):104-109. (in Chinese)
- [13] 郭志刚. 社会统计分析方法[M]. 北京:中国人民大学出版社,2005:118-140.
GUO Zhigang. Analysis Method of Society Statistics [M]. Beijing:China Renmin University Press,2005:118-140. (in Chinese)
- [14] 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,1998,11:2070-2076.