

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.02.016

四川泸州长江河谷地带雷电危险性评价

徐金霞^{1,2}, 郭海燕^{1,2}, 代涛³, 徐沅鑫¹,
卿清涛¹, 邓国卫¹, 钟燕川¹

1. 四川省气候中心, 成都 610072;

2. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

3. 泸州市气象局, 四川 泸州 646000

摘要: 以四川省泸州市 2006—2020 年闪电定位资料以及气象观测站年雷暴日数作为基础数据, 采用数理统计方法以及 ArcGIS 空间分析技术对泸州地区长江河谷地带雷电活动规律及其危险性进行了分析评价。结果显示, 泸州地区近年来雷电活动呈逐渐减少的变化趋势, 2000 年以前处于正距平占优势的多雷暴阶段, 2000 年以后则是负距平占优势的少雷暴阶段。季节、月分布特征均呈明显的“单峰”特性, 其中夏季雷电发生次数最多, 春秋季次之, 冬季基本无雷暴发生; 日内雷电主要发生在午后 15 时至次日 02 时, 峰值出现在深夜 23 时。危险评价结果表明, 泸州地区雷电高危险区主要集中在叙永南部、古蔺北部以及合江西部地区, 低危险区域位于北部泸县、龙马潭等区域, 南部地区危险性明显高于北部地区。

关键词: 闪电定位; 危险性; 地闪密度; 雷电灾害

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)02-0160-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation of Lightning Hazard in the Yangtze River Valley of Luzhou, Sichuan

XU Jinxia^{1,2}, GUO Haiyan^{1,2}, DAI Tao³,
XU Yuanxin¹, QING Qingtao¹, DENG Guowei¹, ZHONG Yanchuan¹

1. Climate Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

3. Luzhou Municipal Meteorological Service, Luzhou Sichuan 646000, China

Abstract: Based on the data of 2006 to 2020 daily thunderstorm and the lightning location in Luzhou City, Sichuan Province, the temporal and spatial distribution of lightning activity and lightning hazard in Luzhou

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42205195); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J058); 中国气象局西南区域气象中心川藏铁路气象服务技术创新团队项目(XNQCXTD202201); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金青年专项(SCQXKJQN2020054)。

作者简介: 徐金霞, 高级工程师, 主要从事气象灾害风险与气候可行性论证研究。

通信作者: 郭海燕, 正研级高级工程师。

was analyzed using ArcGIS. The results show that the lightning activity in Luzhou City has been gradually decreasing in recent years. Before 2000, it was in the phase of more thunderstorms where positive anomalies were dominant. After 2000, it was the phase of less thunderstorms where negative anomalies were dominant. The seasonal and monthly distribution show the obvious “single peak” characteristics. The thunderstorm occurred more frequently in summer, less in spring and autumn, and there was basically no thunderstorm in winter. The intraday thunderstorm mainly occurred in the afternoon of 5 : 00 to evening of 02 : 00, and the peak appeared at 23 : 00. The assessment results show that the high risk areas were mainly located in southern Xuyong, northern Gulin and western Hejiang. The low risk areas were located in northern Luxian, Longmatan and Jiangyang. And the risk in southern areas of those regions was significantly higher than that in the northern region.

Key words: lightning location; hazard; lightning density; lightning disaster

雷电灾害作为自然界中影响人类活动最重要的气象灾害之一,已经被联合国列为“最严重的十种自然灾害之一”,每年因雷击造成的人员伤亡、财产损失不计其数,因其导致的火灾、爆炸、信息系统瘫痪等事故频繁发生,严重危害人民生命财产安全,并造成重大的经济损失和不良社会影响^[1-6].许多专家学者对雷电灾害开展了深入研究,陈广昌等^[7]选取显著相关的闪电次数、总闪电强度和最大闪电强度作为雷电灾害的危险性致灾因子,构建雷电灾害危险度指数模型.郭青等^[8]基于年平均雷暴日数和地闪密度资料进行了梅州市雷电危险性区划.大多数学者对雷电灾害危险性的研究均基于自然灾害风险理论,用地闪强度与地闪密度两个要素来表征雷电灾害的危险程度^[9-16].近几年,随着闪电定位监测网的建立与完善,闪电密度精细化程度得到很大提高,基于闪电定位资料开展雷电灾害的评估与区划已经得到广泛应用^[17-19].

泸州大部分地区属于中亚热带湿润季风气候,气候温和,四季分明,长江河谷一带的低平地区则具有南亚热带气候属性.地势南高北低、中部低凹,水系发达,湿度大,在当地热力条件配合下,受太平洋副热带高压影响,极易冷暖气团交汇形成强烈的对流天气,因本地水汽充沛,局部小的热力或动力扰动同样会产生雷暴天气,且当地森林资源丰富,因雷电灾害导致的森林火灾备受关注.本研究基于近 15 a(2006—2020 年)四川省闪电定位资料以及 34 a(1980—2013 年)的年雷暴日数资料,详细分析了泸州地区雷电活动的时空分布特征,再结合地闪密度、地闪强度、地形起伏度、海拔和土壤电导率等 5 个要素,利用层次分析法开展了泸州地区雷电灾害危险性评价,直观显示了泸州地区雷电灾害危险性分布情况,为当地雷电灾害防御提供参考依据.

1 资料及方法

1.1 资料来源

研究数据主要包括气象数据和基础地理信息数据.四川省闪电定位资料(2006—2020 年)以及年雷暴日数(1980—2013 年)来源于四川省气象局探测数据中心.土壤电导率数据来源于南京土壤所根据第二次全国土地调查结果制作发行的中国 1 : 100 万土壤栅格数据;泸州市地形高程数据和市县行政区划边界资料来源于国家气候中心.

1.2 方法介绍

基于灾害风险区划理论的雷电灾害致灾因子包括气象致灾因子和孕灾环境因子两个部分^[13],其中气象致灾因子包括地闪密度和地闪强度,孕灾环境因子包括地形起伏、海拔和土壤电导率,基于 ArcGIS 空间分析技术,以 3 km×3 km 分辨率栅格为基本评价单元,运用百分位法、归一化法以及层次分析法等^[14-16]综合分析泸州地区雷电灾害的危险性等级,剔除雷电流幅值为 0~2 kA 和>200 kA 的闪电定位资料,雷电流幅值<2 kA 的准确度较低,>200 kA 雷电流幅值可能超出系统探测范围,出错率较高.

1.2.1 气象致灾因子

地闪密度是单位面积单位时间的平均地闪次数,是雷电灾害致灾危险性区划的主要因子,也是雷电分布特征的一个重要参数,这一指标能够较好地反映研究区域遭受雷击的概率问题,地闪密度越大的区域,

遭受雷电灾害的概率也越高。

地闪强度是按百分位数法将地闪放电的雷电流幅值分级后加权平均得到的强度(表 1),将区域划分为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 的网格,统计各网格内不同雷电流幅值等级的地闪频次,并进行归一化处理。具体公式如下:

$$L_n=\sum_{i=1}^5\left(\frac{i}{15}\times F_i\right)$$

(1)

式中: L_n 为地闪强度; i 为雷电流幅值等级; F_i 为雷电流幅值为 i 等级的地闪频次的归一化值。

表 1 雷电流幅值等级

等级	百分位(P)值区间	电流强度阈值(a)/kA
1 级	$P\leqslant 60\%$	$a\leqslant 32.5$
2 级	$60\%<P\leqslant 80\%$	$32.5<a\leqslant 47.9$
3 级	$80\%<P\leqslant 90\%$	$47.9<a\leqslant 67.6$
4 级	$90\%<P\leqslant 95\%$	$67.6<a\leqslant 95.3$
5 级	$P>95\%$	$95.3<a\leqslant 200$

1.2.2 致灾危险性

雷电致灾危险性指数 RH 按照公式 2 进行计算。

$$RH=(L_d\times w_d+L_n\times w_n)\times(S_c\times w_s+E_h\times w_e+T_r\times w_t)$$

(2)

式中: RH 为致灾危险性指数; L_d,L_n 分别为地闪密度和地闪强度; w_d,w_n 为其对应权重; S_c,E_h,T_r 分别为土壤电导率、海拔以及地形起伏度; w_s,w_e,w_t 为其对应的权重因子。

2 雷电活动特征

本研究依据 2006—2020 年四川省雷电监测资料以及 1980—2013 年泸州地区雷暴日数资料统计分析泸州长江河谷地带雷电强度的年、月、日活动的变化规律特征。

2.1 雷暴年变化规律

由泸州地区年雷暴日数年际变化曲线(图 1)可以看出,泸州地区年平均雷暴日数为 32 d(30 a 平均),呈逐渐减少的变化趋势,平均每 10 a 减少 4 d 左右。最高年份(1994 年)为 48.8 d,最少年份(2009 年)为 15.4 d,极值差异达 3.17 倍,年际间雷暴日数相差很大。由年雷暴日距平曲线可以看出,年平均雷暴日数在 20 世纪末发生了明显变化,2000 年以前处于年雷暴日数正距平占优势的多雷暴日阶段,2000 年以后则是负距平占优势的少雷暴日阶段。

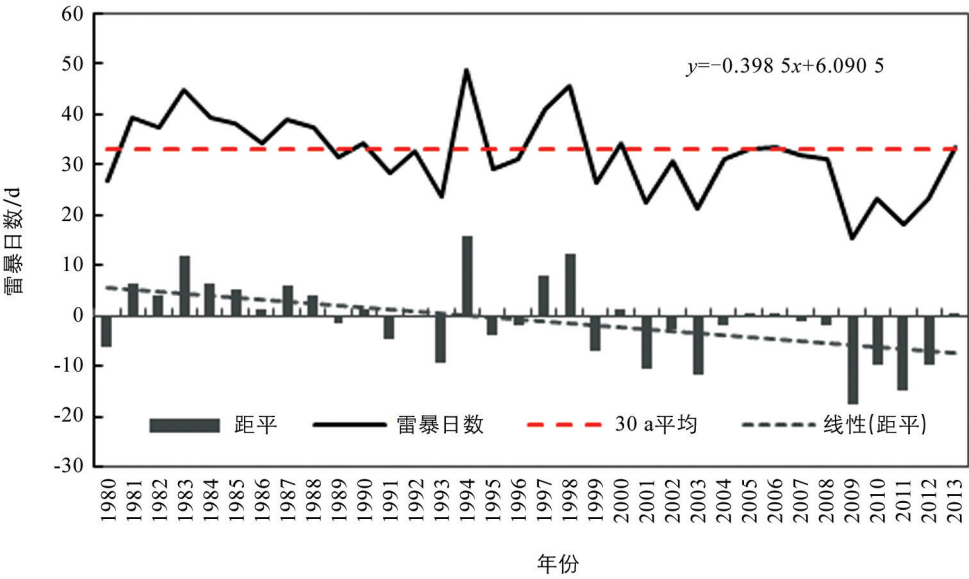


图 1 泸州地区年雷暴日数年际变化曲线

2.2 雷暴月变化特征

由图 2 可知, 泸州地区雷电活动月平均曲线呈单峰型分布, 夏季最多, 冬季最少. 夏季 6—8 月为雷电活动高频月份, 其中 7 月最强, 冬季几乎无雷暴发生. 造成此种月分布规律的主要原因是: 泸州地区为云贵高原到盆地的过渡地带, 夏季高温日数多, 热力不稳定条件加强, 近地面层对流活动加剧, 易于雷暴发生; 冬季随着气温下降, 大气层趋于稳定, 强对流天气难以形成, 因此雷暴发生次数少.

2.3 雷电日分布规律

由图 3 可知, 泸州地区闪电活动主要时段为午后 15 时至次日 2 时, 其中晚间 21 时至次日 0 时闪电活动最为强烈, 次峰值区则在 16—18 时, 4—13 时闪电频次相对较低. 闪电的日变化规律同样与大气的热力对流活动相吻合. 一般而言, 随着气温不断升高, 热力不稳定造成的对流活动不断加强, 气温在 15—16 时达到一天的峰值, 随后开始下降. 泸州地区闪电日变化总体滞后于一天气温变化 5~6 h.

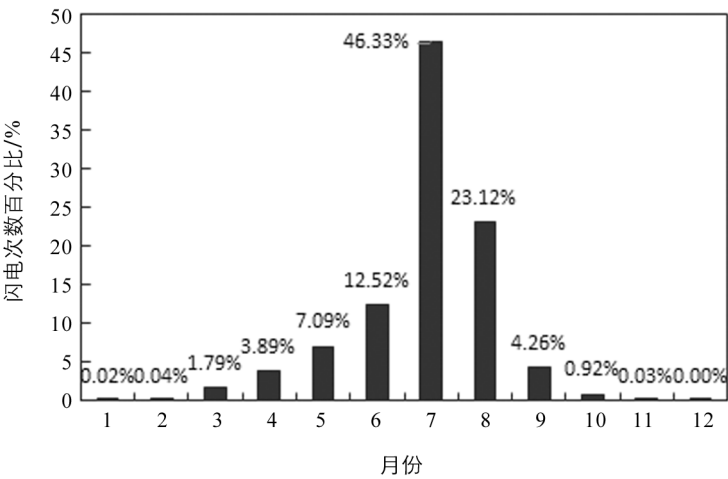


图 2 泸州地区闪电次数月平均分布

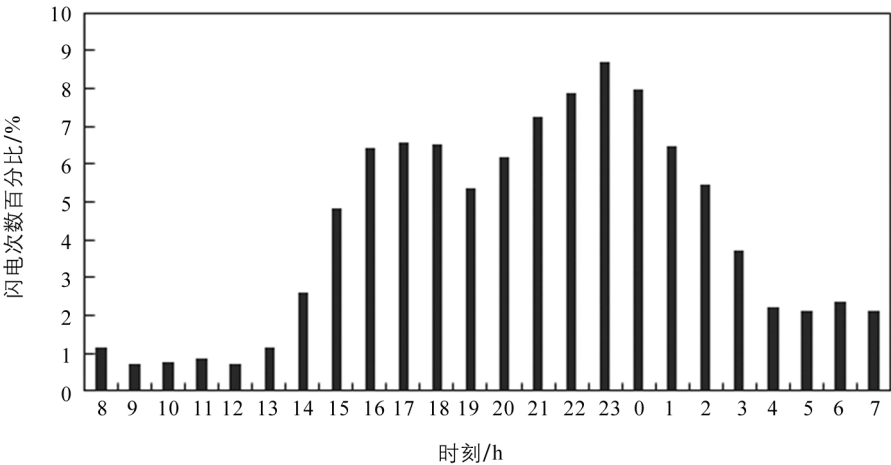


图 3 泸州地区闪电日变化分布图

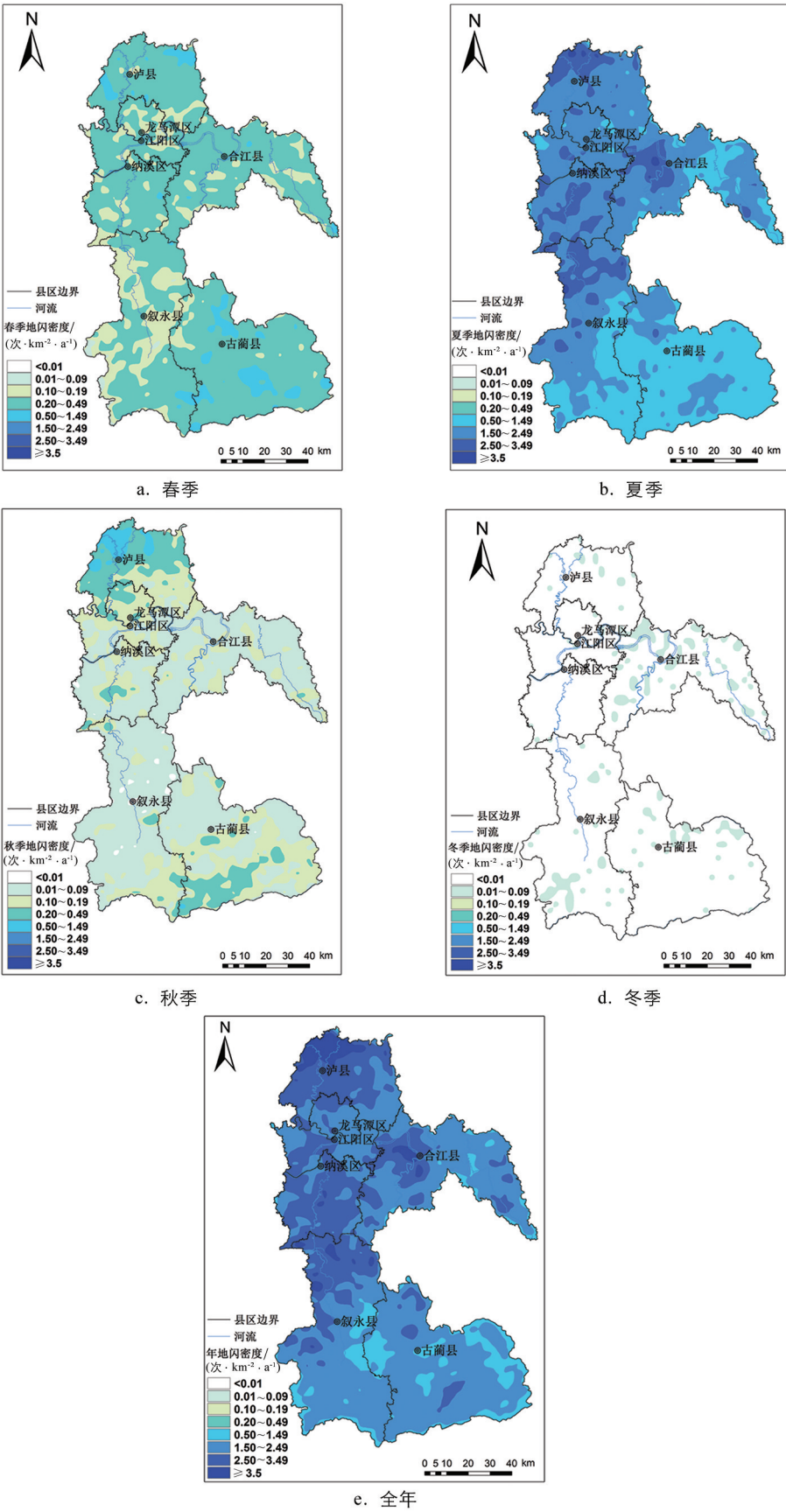
3 泸州雷电灾害致灾危险性评价结果

3.1 气象因子危险性评价结果

3.1.1 地闪密度

地闪密度计算的是单位面积内雷击发生的年平均次数, 区域内地闪密度越高, 说明雷电活动越频繁. 本研究依据 2006—2020 年四川省闪电定位系统监测数据, 统计泸州地区每 km^2 区域内的年落雷次数, 对地闪密度按季节进行了划分, 得到了泸州地区地闪密度分布图(图 4).

泸州绝大多数地区春季单位面积年均地闪频次小于 0.1 次, 中部部分地区年均频次为 0.1~0.2 次, 高频次地闪密度出现在古蔺中南部, 该区域以耕地和草地为主, 局部林地, 海拔大部在 1 000~1 400 m 之间, 最大值为 0.75 次; 夏季泸州地闪频次快速增加, 大多区域单位面积年均频次在 0.5 次以上, 除古蔺大部分地区以及叙永东部外, 其他区县年均地闪频次大多超过 1.5 次; 高值区分布在叙永西北部、合江西部以及泸县北部边缘零散区域, 地闪频次超过 3.5 次, 上述区域水系相对发达, 海拔基本在 650 m 以下, 以耕地为主, 包括部分的浅丘低山区. 进入秋季地闪频次骤减, 绝大数区域年均频次在 0.1 次以下, 高值区位于南北两端, 频次为 0.2~0.5 次. 泸州地区地闪冬季发生频次最低, 单位面积年均频次均小于 0.1 次, 大多数地方未出现闪电.



审图号: GS(2020)4630 号.

图 4 泸州地区地闪密度分布图

年地闪密度分布与夏季分布基本一致, 总体特征表现为高海拔区域频次低, 低海拔区域频次高. 具体如下: 南部与云贵高原接壤的古蔺大部、叙永南部以及合江东部海拔超过 1 000 m 的区域为地闪频次低值区, 多在 1.5~2.5 次之间, 部分区域在 2.5~3.5 次之间; 泸州以北大部分区域地闪频次在 2.5 次以上, 叙永北部的永宁河谷、纳溪区的中部河谷区、合江的长江与大漕河邻近的河谷地区以及泸县北部边缘地区, 年均频次超过 3.5 次. 上述地闪频发区海拔虽然相对较低, 但地形起伏较大, 水系发达, 更易发生雷暴.

3.1.2 地闪强度

地闪强度反映的是雷电的电流强度, 是雷电灾害危险性区划中的重要因子. 雷电灾害造成的损失大小在很大程度上取决于雷电的强度和频次. 雷电流越大, 造成的危害范围越大, 涉及面越广. 本研究中地闪强度是按百分位数法将地闪放电的雷电流幅值分级后加权平均得到的强度值, 对其进行归一化处理后, 最终得到泸州地区地闪强度季节分布情况, 其分布特征与泸州地闪密度相似(图略).

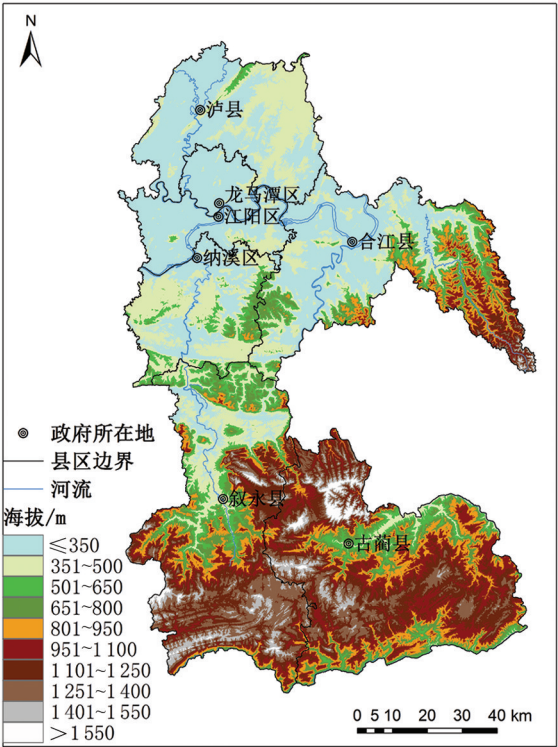
泸州地区夏季地闪强度最大, 多数在 0.53 以上, 中部和长江流域多在 0.55 以上, 部分地区大于 0.6, 地闪强度高值区位于泸县中北部局地、合江东南部、古蔺西北部零星区域及中部大部分地区. 春季地闪强度大部分区域在 0.51 以下; 泸州北部区域泸县、龙马潭和江阳 3 县区的西北部, 纳溪部分地区以及古蔺县南部地闪强度为 0.51~0.53, 古蔺县中南部零星地区地闪强度超过 0.53. 泸州秋季地闪强度主要集中在泸州地区南北两端, 其余绝大多数区域地闪强度在 0.51 以下. 冬季地闪强度值最低, 均在 0.51 以下. 泸州市年地闪强度值绝大部分在 0.6 以上, 高值区集中在中部绝大部分区域、北部边缘地区以及南部局地, 均大于 0.68. 地闪强度大小与地形有一定关系, 地形起伏相对较大的地区地闪强度较高, 水系发达地区也是高地闪强度区域.

3.2 环境因子危险性评价结果

海拔反映一个地区的地形状况, 通过近几年对海拔和雷电活动情况的研究, 发现同一海拔的正极性雷电流幅值及陡度高于负极性. 且随着海拔的上升, 差值越来越大; 正极性雷电流幅值、陡度随海拔上升而增大; 负极性雷电流幅值、陡度随海拔上升而减小; 在一定范围内, 海拔对单位面积内的闪电频次数起主导作用, 因此海拔是雷电灾害风险区划中的一般因子, 对于雷电灾害危险性评估有着一般影响.

泸州地区海拔为 203~1 897 m, 地势由南向北逐步降低, 北部区域位于盆地过渡地带, 海拔在 500 m 以下; 中部长江河谷地带多在 800 m 以下, 长江以南泸州南部边缘, 主要包括叙永南部、古蔺北部、合江东南一带, 紧邻云贵高原, 海拔多在 1 250 m 以上, 以中、低山为主(图 5).

地形起伏度反映的是所选地区与周边环境之间的陡峭程度, 陡峭程度往往影响雷击中的位置, 这也是影响雷击发生的一个重要因素. 利用 ArcGIS 计算高程标准差, 得到泸州地区地形起伏度如

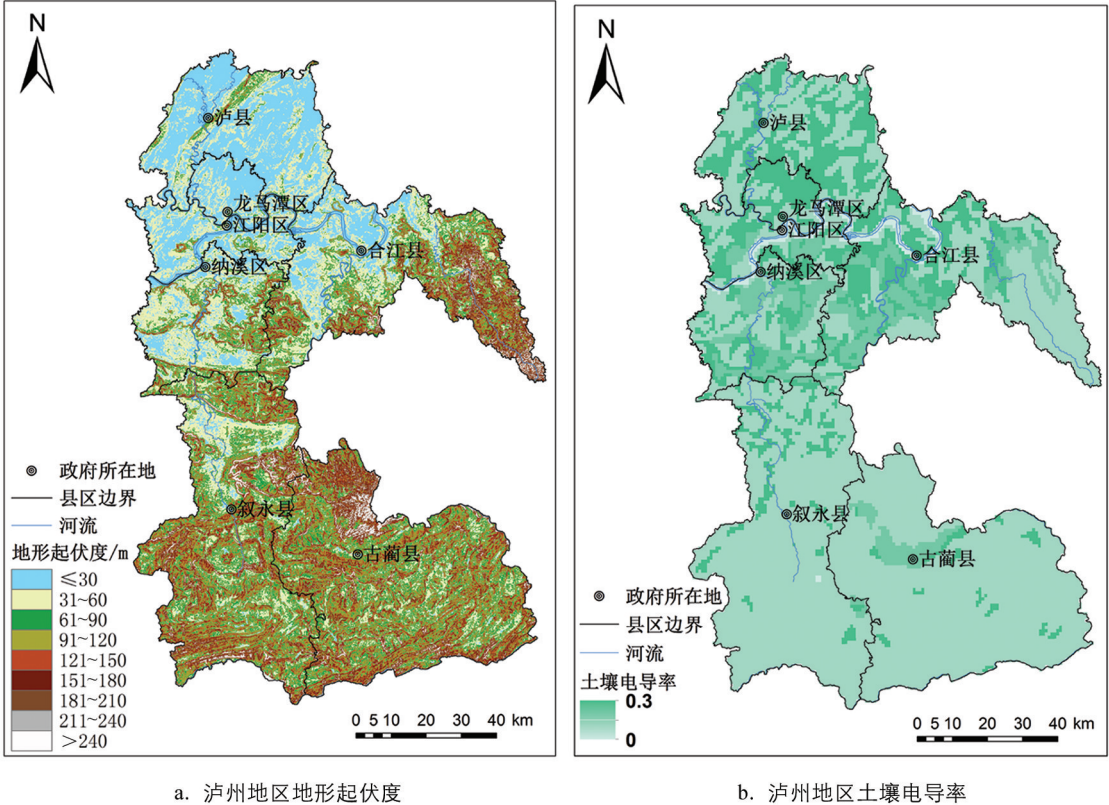


审图号: GS(2020)4630 号.

图 5 泸州地区海拔

图 6a 所示,地形起伏较大的区域基本分布在高海拔地区,长江以南的叙永、古蔺、合江等地高程标准差在 90~210 m 之间,长江以北的地区地势平坦,高差大多在 30 m 以下,泸县中部薄刀岭的岭谷区地形起伏相对较大,高差为 60~90 m。

土壤电导率是表征土壤导电能力强弱的指标,主要表现在对雷电流泄流的影响,土壤电导率越高的地方,越容易孕育雷电灾害。由图 6b 可知,泸州市土壤电导率在 0~0.3 之间,南部山区主要包括古蔺、叙永的南部以及合江东南等高海拔区域,土壤电导率较低,在 0~0.1 之间;泸州北部地区如龙马潭区、江阳区等地土壤电导率则多在 0.2~0.3 之间。对比图 6a 可知,其分布与海拔值呈反向关系,海拔越低,土壤电导率越高。



审图号: GS(2020)4630 号。

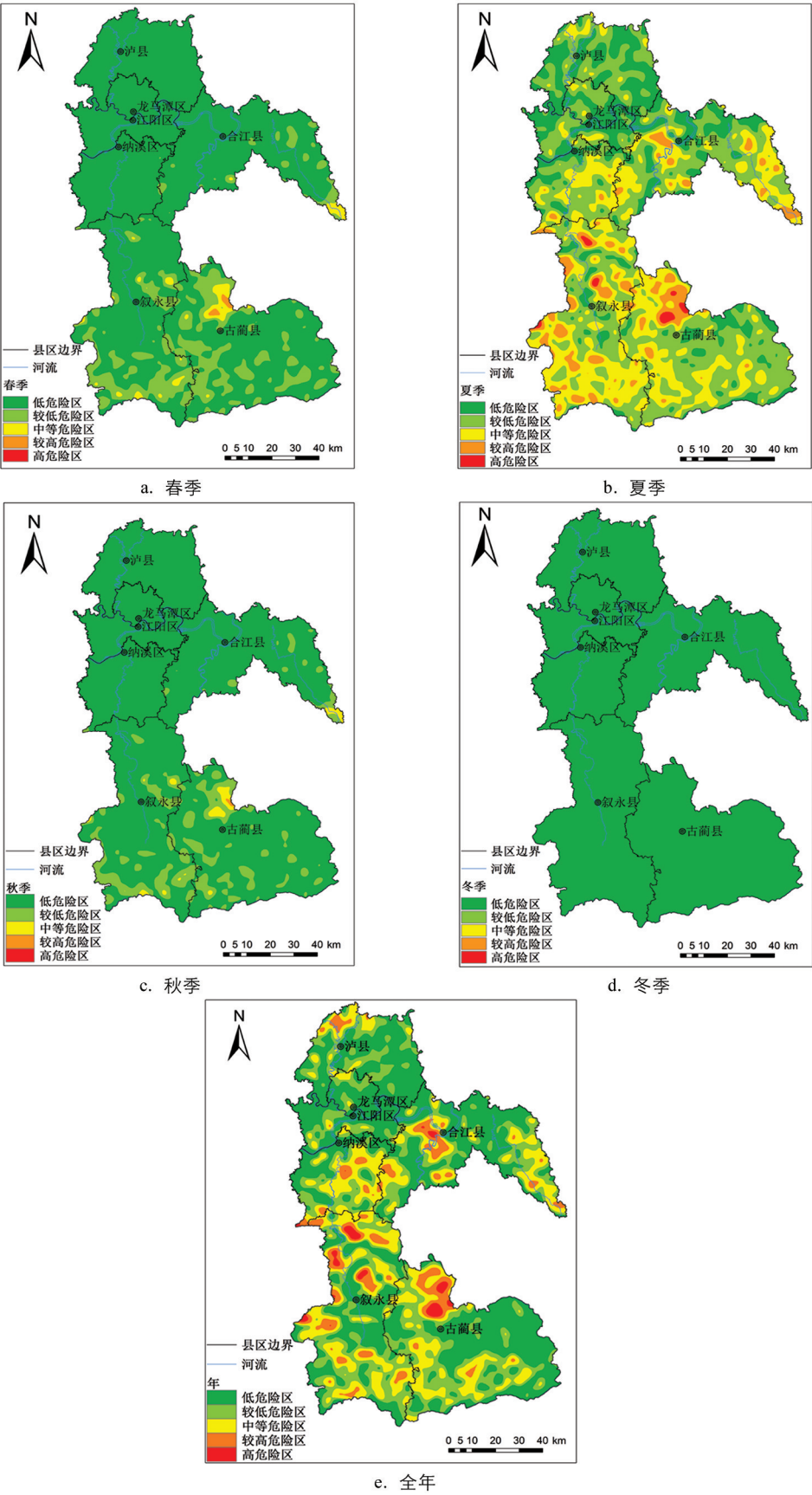
图 6 泸州地区的地形起伏度和土壤电导率

3.3 雷电灾害危险性评估结果

雷电致灾危险性综合考虑各网格的地闪密度、地闪强度、地形起伏度、海拔和土壤电导率等 5 个要素,利用层次分析法判断矩阵(表 2)确定各因子权重,综合得到雷电致灾因子危险指数。根据致灾因子危险性 RH 计算结果,按照自然断点法将危险性划分为 5 级,最终得到泸州地区致灾因子危险性分布图(图 7)。

表 2 致灾因子判断矩阵

致灾危险性	地闪密度	地闪强度	地形起伏	海拔	土壤电导率
地闪密度	1	1	2	3	4
地闪强度	1	1	3	4	5
地形起伏	1/3	1/2	1	2	3
海拔	1/4	1/3	1/2	1	2
土壤电导率	1/5	1/4	1/3	1/2	1
权重值	0.31	0.37	0.16	0.10	0.06



审图号: GS(2020)4630 号.

图 7 泸州地区雷电致灾危险性分布图

由图 7 可知,泸州雷电危险性夏季最高,春秋次之。夏季是泸州地区雷电危险等级最高的季节,除泸州北部外,其余大部分地区危险等级在中等以上;泸县大部、古蔺东部、合江中北部等以低、较低危险等级为主。泸州中部以较高危险等级为主,部分地区为高危险等级,包括纳溪大部、叙永北部、古蔺西北、合江西部的长江流域和东部的低山丘陵区;泸县北部边缘地区有局部的较高危险区。春秋两季泸州危险性等级分布基本一致,表现为绝大部分区域为低危险等级,古蔺北部高海拔林区为中等以上危险区,虽面积较小,但位于古蔺国有林场区域,雷击火风险较高。冬季因基本无雷暴发生,整个区域均属于低危险区。

泸州地区年雷电危险性分布特征总体与夏季基本一致,低和较低危险等级区域较大,综合占 55.3%,主要分布在古蔺东部、合江北部以及泸县和龙马潭大部分地区;较高以及高等级危险区主要分布在叙永、古蔺以及合江地区,占比为 20.6%,其中 3 县高危险等级综合占比为 91.5%,最高为叙永 45.8%,古蔺次之,为 33.3%;较高等级危险区 3 县综合占比为 79.0%,叙永最高,为 34.4%。江阳与龙马潭未出现高危险等级。较高等级以上危险区虽面积较小,但其所覆盖区域包含古蔺、叙永、合江以及纳溪国有林场所所在区域,而泸州火灾高发期 4—5 月和 7—8 月又处于雷电灾害高发季节,极易造成森林火灾事故的发生,需十分警惕。

4 结论

本研究通过 ArcGIS 技术结合数理统计方法系统分析了泸州地区雷电活动的时空分布特征,构建了基于地闪密度、地闪强度、地形起伏度、海拔和土壤电导率等 5 个要素的雷电灾害危险性指标体系,对泸州雷电灾害进行了危险性评价,得到以下结论:

泸州地区年平均雷暴日数呈逐渐减少的变化趋势,平均每 10 a 减少 4 d 左右。年雷暴日数在 20 世纪末发生了明显变化,2000 年以前处于正距平占优势的多雷暴日阶段,2000 年以后则是负距平占优势的少雷暴日阶段。

泸州地区雷电主要发生在 4—9 月。雷电活动的月 and 时分布曲线均呈明显的“单峰”特性,每年雷电活动最强月为 7 月;日地闪主要活动时段为午后 15 时至次日 2 时,其中深夜 23 时雷电活动最为强烈,4—13 时频次较低。

泸州地区夏季雷电发生频次明显高于其他季节,春秋两季次之,冬季基本无雷暴发生。区域内低和较低危险性等级占比为 55.3%,主要分布在古蔺东部、合江北部以及泸县和龙马潭大部分地区;较高以及高等级危险区主要分布在叙永、古蔺以及合江地区,虽面积较小,但其覆盖区域古蔺、叙永、合江以及纳溪国有林场所所在区域,易造成森林火灾。

参考文献:

- [1] 邢贞相,刘昊奇,刘明阳,等. 基于多变量 GAMLSS 模型的洪水理论分布研究 [J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(4): 59-69.
- [2] 杨世刚,赵桂香,潘森,等. 我国雷电灾害时空分布特征及预警 [J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 153-159.
- [3] 马明,吕伟涛,张义军,等. 我国雷电灾害及相关因素分析 [J]. 地球科学进展, 2008(8): 856-865.
- [4] ZHAO P, XIAO H, LIU J, et al. Precipitation Efficiency of Cloud and Its Influencing Factors Over the Tibetan Plateau

[J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(1), 416-434.

[5] ZHAO P G, XIAO H, LIU C, et al. Evaluating a Simple Proxy for Climatic Cloud-to-Ground Lightning in Sichuan Province with Complex Terrain, Southwest China [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(7): 3909-3927.

[6] ZHAO P G, XIAO H, LIU C, et al. Dependence of Warm Season Cloud-to-Ground Lightning Polarity on Environmental Conditions over Sichuan, Southwest China [J]. Advances in Meteorology, 2021(7): 1-12.

[7] 陈广昌,崔逊,田心如. 江苏省雷电灾害危险性量化评估及区划 [J]. 灾害学, 2017, 32(1): 32-35.

[8] 郭青,曾东好,高国靖,等. 梅州雷电危险性分布特征分析 [J]. 气象科技进展, 2019, 9(1): 46-49.

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

[10] 陈施吉,李家启,王远谋,等. 长江重庆航道大雾灾害风险评估与区划研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(89): 165-172.

[11] 黄涛,丁明涛,蒋林宏,等. 基于地理探测器的岷江上游泥石流影响因子相对重要性分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(9): 45-51.

[12] 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.

[13] 朱涯,鲁韦坤,余凌翔,等. 玉溪市雷电灾害风险区划研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(11): 159-164.

[14] 侯奇奇,景华,高宇俊,等. 基于概率统计的河北省暴雨致灾风险评估 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 178-184.

[15] 刘三梅,吕海勇,陈绍东,等. 广东省雷电风险区划研究 [J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2337-2344.

[16] 扈海波,李京校,潘进军. 北京地区雷电灾害风险评估方法与应用 [J]. 气象, 2012, 38(8): 1004-1011.

[17] 卜俊伟. 基于闪电定位资料的四川省雷电风险区划分析 [J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 86-90.

[18] 陈春梅,陈绍炳,唐嘉佩,等. 四川宜宾泸州长江河谷地带雷电监测数据特征分析 [J]. 农业与技术, 2016, 36(20): 227-228.

[19] 朱浩,王凯,程向阳,等. 安徽省雷电灾害特征分析及区域灾情评估 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 162-168.

责任编辑 包颖