

刘凤姣, 薛明, 薛德锋, 等. 基于闪电数据的雷电风险优化研究模型与应用[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 48–53, 84;
[LIU Fengjiao, XUE Ming, XUE Defeng, et al. Research and Application Model of Disaster Risk Optimization Based on Lightning
Data[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 48–53, 84. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.04.011]

基于闪电数据的雷电风险优化研究模型与应用^{*}

刘凤姣¹, 薛明², 薛德锋³, 肖昀³, 贺秋艳¹

(1. 湖南省气象灾害防御技术中心 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410007;
2. 靖州县气象局, 湖南 靖州 418400; 3. 怀化市气象局, 湖南 怀化 418000)

摘 要: 通过选择地闪日数、密度、强度和陡度作为雷电风险的基础因子, 采用天气学与数理统计原理, 给出了雷电数据因子的选择思路、因子优化、变量组合及风险等级划分方法, 开展雷电数据因子和相关标准的应用等对比分析。研究表明: 经数据处理和优化的雷电因子, 对雷电风险具有明显指示意义, 得出雷电因子的组合因子优于单因子, 四个因子的组合是最优最稳定。对依据《GB50057 建筑物防雷设计规范》规范给出的 25 kA 雷电流参数选取的强雷电因子对雷电高风险等级的指示作用进行验证, 绘制了怀化雷电变量风险等级分布和雷灾叠加图, 得出雷灾起数集中区域多为雷电变量风险等级较高区域, 为雷电风险评估、预警、区划因子的选择提供了更多参考思路。

关键词: 闪电数据; 变量组合; 因子优化; 雷电灾害; 风险等级; 等级划分

中图分类号: X43; TU984; X915.5; P446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2020)04–0048–07
doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.04.011

在雷电灾害风险评估与区划中, 地闪密度、强度、陡度等基础变量和组合变量常被用作气象因子参与其中。要建立雷电灾害风险评估和区划模型, 首先是选择与雷电灾害相关程度较高的因子, 并给出这些因子的等级划分方法, 用以对照雷电灾害的风险程度。2017年前, 我国没有雷电灾害风险区划技术的行业标准或国家标准。许多科研工作者以《自然灾害风险评估与区划原理和方法》^[1]《气象灾害风险评估与区划原理和方法》^[2](下称参考书)作参考, 对雷电灾害风险区划方法进行了讨论和研究。陈广昌、李衣长、曾金全等^[3–10]对雷电强度预报、雷电灾害易损度、预报模型等方面进行了研究, 着重研究了雷电因子风险、地域风险、承灾体风险等; 中国气象局于2017年底, 发布了《雷电灾害风险区划技术》^[11](下称“指南”)。因雷电、雷灾的分散性和不连续性, 一些现有的统计方法和模型并不适用于雷电数据与雷灾的相关性研究。为提高雷电变量对雷电灾害风险的指示意义, 本文结合天气学原理, 参照国外对闪电定位系统数据的研究^[12–13], 依据参考书与指南, 修改了雷电数据因子的选择与处理方法, 给出了雷电数据变量的选择方法、优化方法、组合方法、等级划分与风险划分方法, 利用怀化、长沙雷电数据作了与指南的对比分析和应用研究, 得出了一些可供参考但有待更加深入

探讨的应用结论。

1 因子、资料与处理方法

1.1 雷电数据因子

雷电风险与气象因子密切相关。气象因子中包含由人工观测的雷日及由闪电定位仪观测到的雷电数据因子。为便于讨论和区别, 文中所称“雷日”指由人工观测到的“雷暴日数”; 所称“闪日”“次数”“强度(kA)”“陡度(kA/μs)”指由闪电定位仪监测到或通过监测数据计算出的“地闪日数”“地闪次数”“地闪强度”“地闪陡度”。雷日、闪日、次数称频次类因子; 强度、陡度称强度类因子。据多地不完全统计, 同类因子之间多呈正相关, 但又不完全对应。异类因子间是否存在相关性, 有待进一步研究。

1.2 资料取值约定

(1) 数据年限。通常认为, 样本资料时间越长, 特征越稳定。然而, 雷电特性与下垫面性质密切相关。按我国目前基建速度, 多地城区面积约10年就增加一倍, 原有的绿地变成了水泥柏油路面或高楼, 城市热岛效应显现, 雷电特征随之发生变化。以怀化为例, 2009年前, 怀化城区及周边雷电分布较为均匀, 但2010年后, 怀化城区

^{*} 收稿日期: 2020–03–03 修回日期: 2020–06–04

基金项目: 湖南省气象局科研课题(XQKJ18B030, XQKJ19A002); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2006CB200303)

第一作者简介: 刘凤姣(1964–), 女, 湖南益阳人, 正高级工程师, 主要从事雷电灾害防御技术研究。E-mail: 870476555@qq.com

及周边雷电分布呈现出均匀状态,在城区 20 ~ 25 km 处有雷圈形成,城区中心位置雷电密度相对降低,而平均强度相对加强。根据这一事实和马尔科夫随机理论,宜取 5 ~ 6 年雷电数据及雷灾资料进行统计分析。对下垫面变化较小,或没有热岛效应形成的区域,可取 10 年以上数据。

(2)空间分辨率。空间分辨率的取值与预测技术和研究需求有关。在分析雷电特征时,可取 3 km × 3 km 网格,以便较为准确的找到多雷区、少雷区、强雷区和弱雷区。但在雷电灾害风险的相关研究中,因雷电风险与雷电落点的距离密切相关,应考虑雷电落点距离和现有预测技术。雷电落点距离越近,雷电风险越大。据怀化的不完全统计,灾中 1 h, 43% 的雷灾在 1 km 内有地闪出现, 75% 的雷灾在 2 km 内有地闪出现,所有雷灾在 5 km 范围内有地闪出现^[14]。为尽可能含盖最大风险范围,雷电预警空间分辨率不宜高于 10 km × 10 km,雷电风险区划空间分辨率不宜高于 6 km × 6 km。

(3)数据处理。闪电定位仪给出的雷电数据中,因仪器原因或雷电特强,会有强度或陡度超过平均值几倍或数十倍的高值数据出现,也有强度或陡度值同时为零或其中之一为零的现象出现。这些数据所占比例不高,多在 1% 以下,但显然存在不合理性,且可能影响时空图形的美观度。因此,指南规定剔除雷电流幅值 0 ~ 2 kA 和 200 kA 以上的闪电定位资料。为对强雷电进行分析,文中约定:对强度和陡度实行“删 0 降高”处理。“删 0”是将强度或陡度值为零的雷电数据予以剔除,“降高”是将强度值大于某一点数据的数据降低。降高公式为:

$$X' = (X - a) / 100 + a. \quad (1)$$

式中: a 为基点数据,可根据需求而定(为对应指南, a 可取值 180 kA), X 为原始数据, X' 为新数据。

(4)陡度实化。根据定义,强度是一次地闪过程的雷电流;陡度是雷电流随时间上升的变化率,对过电压有直接影响。过电压是导致弱电设备受损的重要因素。计算陡度时,如一次地闪过程的放电时间不足 1 μs,则仍按 1 μs 时间计算雷电流陡度。此时,会出现陡度值大于强度值的现象。怀化最大陡度为 -2 214.9 kA/μs,对应的强度为 -173.0 kA。以降水为例说明:强度类似过程性降水,陡度类似小时降水,在一次降水量为 20 mm,降水时间为 20 min 的降水过程中,按陡度的计算方法,1 h 的降水是 60 mm,而不是 20 mm,其中 40 mm 是一种计算虚数。在雷电数据中,陡度值大于强度值的现象是可见的,比例各地不同,怀化市 2009 - 2018 年为 0.15%。比例虽小,但大于 250 kA/μs 的陡度数据基本属此情况,故对陡度予以实化。参考陡度计算原理,约定:当陡度值大于强度值的 80% 时,取强度值的 80% 为陡度值,否则陡度值不变,实化后的陡度值称实陡度。

数据处理和陡度实化对强度、陡度的平均略有影响。测试长沙市 2011 - 2015 年共 188 902 条雷电

数据,降高 381 条、删零 8 509 条、陡度实化 960 条。处理前、后,平均强度由 35.4 kA 降为 35.3 kA,平均陡度由 10.3 kA/μs 升为 10.5 kA/μs。

(5)雷灾次数。雷灾次数是雷电风险和雷电天气过程的直接反映,雷灾起数则是雷灾范围或受灾程度的反映,一次雷灾天气过程可以有多起雷灾事故。在建立数据模型时,为尽可能减少雷灾起数的偶然性,提高计算模型的稳定性,以网格为单元,统计同日同网格发生雷电灾害的起数。约定:1 ~ 10 起雷灾,雷灾次数计为 1 次;11 ~ 20 起雷灾,雷灾次数计为 2 次;20 起以上雷灾,雷灾次数计为 3 次。

1.3 数据的网格化处理

在对雷电数据(包含雷电灾害)进行处理时,对地球半径不作平均处理,且考虑海拔高度对地表距离的影响,采用基于 VB 的闪电数据处理模型与方法^[15]对雷电数据建立网格化和计算模型。

2 变量组合与优化模型

2.1 百分位排名

将一组数据从小到大排序,已知各数据的排列顺序,计算该数相应的累计百分位,则累计百分位就称为该数的百分位排名 p 。可表示为:一组 n 个观测值按数值大小排列,则第 i 个排序数据的百分数排名为:

$$p_i = (i - 1) / (n - 1) \times 100. \quad (2)$$

根据公式,如果观测值中某个数据重复出现多次,则有多个百分位并列出现。为解决并列百分位的不便比较问题,文中采用自然排位对并列排位进行加权。具体步骤是:第一步,在多个变量数据表中,先逐一将各变量实行升序排列;第二步,按第一步顺序对第一个变量重新实行升序排列,并以该变量的自然排位为观测值,计算百分位排名;重复第二步,计算所有变量的百分位排名。

并列排位加权不能在单变量中实行。对雷电变量而言,平均强度、陡度在分析区域网格中出现重复数据的可能性较小,可直接使用百分位排名;闪日、次数出现重复数据的可能性较大,可在平均强度、陡度等不易出现重复数据的变量先行排序的基础上使用并列排位加权。当变量的观测值不重复时,百分位和并列排位加权百分位是同一组数据。

2.2 拟合数计算

雷电灾害的出现虽然具有随机性,与环境因子等触发机制有关,更与雷电密度、强度等因子存在较大程度的相关性。分析怀化资料发现:发生雷灾的 3 h 内(统计雷灾发生时刻前后各 1.5 h)的雷电密度为 0.65 次/km² · h,远高于历年平均密度 1.36 次/km² · a;雷电强度为 48.9 kA,比历年平均强度 42 kA 高 16.4%,且离雷灾点 15 km 范围内均有 300 kA 以上的强雷电出现^[14]。因此,对雷电数据因子与雷灾进行拟合度计算,用以测试各地雷电数据因子对雷电灾害风险的指示性。

设百分位节点为 K , 各网格定性预报指数为 R , 如果各变量的百分位排名 P 大于 K , 则在有雷电的网格 R 取雷电次数, 无雷电的网格 R 取 1; 如果 P 小于 K , 则 R 取 0。

雷电次数拟合数为:

$$w_{ik} = \sum_{i,j,k=1}^{n,s,t} R_{ijk} \circ \quad (3)$$

雷电次数空报数为:

$$y_{ik} = \sum_{i,j,k=1}^{n,s,t} R_{ijk} \circ \quad (4)$$

式中: $i=1, \dots, n$ 为雷电因子个数; $j=1, \dots, m$ (或 s), m 为有雷电灾害的网格数, S 为无雷电灾害的网格计次数; $k=k_1, k_2, \dots, k_l, t$ 为节点取值个数。

2.3 变量组合

将 2 个或以上单变量以任一组合方式, 求取组合变量的权重百分比排名:

$$c_{ijk} = \sum_{i,j,k=1}^{n,s,t} p_{ijk} w_{ik} / \sum_{i,j,k=1}^{n,s,t} w_{ik} \circ \quad (5)$$

2.4 优化模型

拟合数只是反映雷电灾害与变量间的一个基础性指标, 两组资料的相关是否具有可靠性、一致性和稳定性, 根据天气预报评定方法, 采用表 1 中关系符号, 对雷电因子进行优度计算。

表 1 预报与实况关系符号

关系符号	预报有	预报无	合计
实况有	W	$q-w$	q
实况无	y	$s-y$	s

优质因子应该是拟合率、准确率相对较高、 k 值较大, 空报率、漏报率相对较低的因子。据表 1, q 为网格有雷电所计次数, 也即雷电总次数; s 为网格无雷电所计次数, 也即无雷电网格数, 则: 拟合率 = w/q , 准确率 = $(w+s-y)/(s+q)$, 空报率 = $y/(w+y)$, 漏报率 = $(q-w)/q$, 计算各变量在某一百分位节点时的优度为:

$$G_{ik} = w_{ik} \times (w_{ik} + s - y_{ik}) \times (w_{ik} + y_{ik}) \times k(s+q)/y_{ik}/(q-w_{ik})/(100-k) \circ \quad (6)$$

当 $k=50$ 时, G_{ik} 越接近 1, 因子对雷电风险的指示作用越差; $G_{ik} > 1$, 因子与雷电灾害风险呈正相关, 值越大, 正相关程度越好; $G_{ik} < 1$, 因子与雷电灾害风险呈负相关, 值越小, 负相关程度越好。在一组正相关因子中, G_{ik} 为最大数时, 对应的变量 i 为最佳变量, k 为该变量的最佳节点。

3 节点分级

3.1 节点确定

雷电灾害与雷电变量之间存在一定的相关性。理论上, 风险变量可以划分为多级, 划分方法也有多种。如: 划分为二级时, 可选用自然断点分级。但划分为二级时, 其中一级风险较小, 另一级风险较大, 风险较大区域只有一个等级, 重点不够明确, 难以满足雷电防御需求。为指出雷电灾害防御的重点区域及其危险程度, 据现有防御需求与能力, 将雷电风险等级划分为三级或四级

较为适宜。以三级为例, 依据下列方法确定等级与等级间的划分节点。

(1) 帕累托及金字塔法则。帕累托法则也叫巴莱特定律, 是 19 世纪末 20 世纪初意大利经济学家帕累托发现的。他认为, 在任何一组事件中, 最重要的只占其中一小部分, 约 20%, 其余 80% 尽管是多数, 却是次要的, 因此又称二八定律。习惯上, 二八定律讨论的是顶端的 20%, 而非底部的 80%。金字塔法则是一项层次性、结构化的设计技术, 顶层是各层次的核心, 从底层到顶层, 层次价值逐层递增, 所占数量逐层递减。金字塔原则几乎在每个行业都有应用, 降水等级划分符合这一原理, 雷电风险等级划分也应遵循这一原则。据怀化、长沙有雷电网格数比值数 11.8%、20.8%, 确定高风险等级(3 级)所占网格参考比例为 20%, 对应使用 k 值为 77~83(高节点区, 也称 H 区)中的某个最佳节点为 3 级与 2 级区域之间的分界值划分等级。

(2) 据帕累托法则, 低风险区域应占多数; 又据优度判断条件, k 值低于(含)50 时, 在正相关因子中, 计算优度没有实际意义。对应使用 k 值为 51~57(低节点区, 也称 L 区)中的某个最佳节点为 2 级与 1 级区域之间的分界值划分等级。

据此, 将风险等级划分为三级(表 2)。根据表 2 划分区间, 计算 H 、 L 区不同 k 值各因子的优度, 选取每个因子在 H 、 L 区的最大优度, 并计算在各因子中的排名。最大优度值对应的因子及 k 值, 就是该节点区间的最优因子和最佳节点。

表 2 雷电风险等级参数

雷电风险等级参数	3 级 (高风险)	2 级 (中风险)	1 级 (低风险)
等级划分 节点区间(k 值)	77~83 (H 区)	51~57 (L 区)	
所用网格数 参考比例/%	20	30	>50
风险等级划 定等值线	3.9、3.4	2.9、2.4	1.9、1.4

3.2 分级等值线的确定

在最佳变量的各等级网格区间内, 对百分位排名实现归一化处理:

$$e = (z - \min z) / (\max z - \min z) \circ \quad (7)$$

式中: z 为转换前变量的百分位排名, e 为转换后的归一化计算值, $\max z$ 、 $\min z$ 分别为区段中的最大值和最小值。

为了使计算出的 e 值与变量的风险等级对应, 同时使绘制的空间分布图形具有层次感(每个等级区间可有 2 条等值线), 需对 e 值进行订正。订正方法: 在每个等级区间, 如网格值 $e \geq 0.5$, 则该网格 e 值记为 0.9, 否则记为 0.4; 之后对雷电风险 3、2、1 等级区段的 e 值分别加上数值 3、2、1, 使计算出的最终 e 值保证为等值线划定数据(表 2)。

如每一风险等级不需绘制二条等值线, 则选择 3.9、2.9、1.9 三等值线代表三个等级绘制风险等级分布图, 这样划定等值线, 能使风险等级空间分布图形达到较为满意的程度。

4 应用研究

4.1 因子选择

据前所述, 雷电风险与雷日、闪日、次数、强度、陡度有关。在《GB50057 建筑物防雷设计规范》(下称规范)中, 雷日被作为唯一因子用来计算建筑物所处地区雷击大地密度 N_g [16] 并表示风险程度; 在指南中, 将雷电密度和强度的平均组合作为气象因子, 加入模型, 参与雷电风险区划等级划分。然而, 雷日数据存在人为因素大、观测站点少、无法实现网格化等多种不足, 故不参与文中因子优化。

为尽可能找到稳定度较高的因子, 以 50 km^2 为网格大小, 取 2011—2015 年长沙 ($28.2458^\circ \sim 29.0404^\circ \text{N}$, $112.5825^\circ \sim 113.2838^\circ \text{E}$, 计 $7\,200 \text{ km}^2$ 面积, 43 次雷电灾害) 和怀化 ($27.2232^\circ \sim 27.9386^\circ \text{N}$, $109.65^\circ \sim 110.2238^\circ \text{E}$, 计 $5\,500 \text{ km}^2$ 面积, 23 次雷电灾害) 地闪、雷灾资料, 按正相关方式选取有关因子。雷电风险因子的选择有多种思路, 文中采用下列步骤和方法选择并优化因子:

(1) 以闪日、次数、强度、实陡度 (分别用 a 、 b 、 c 、 d 作为代号) 共 4 个单变量为基础因子, 计算因子百分位排名及在 H 、 L 区的最大优度, 比较各因子在 H 、 L 区的最大优度的平均优度值, 作为评判因子优劣的依据并参加因子优劣排名。

(2) 对 a 、 b 、 c 、 d 四个基础因子实行 2、3、4 个变量的组合 (共 11 个组合因子), 用 (5) 式计算组合因子各变量的权重, 按 (1) 同样方法计算组合因子在 H 、 L 区的最大优度的平均值及相关参数参与因子优度排名。

(3) 取 a 、 b 分别与 c 、 d 的组合 (计 4 个组合变量, 并用 $!$ 表示), 每组选择其中的大值进行百分位排名; 取 a 与 b , c 与 d (计 2 个组合变量, 并用 $/$ 表示) 的均值进行百分位排名; 同时计算雷电通量, 其值为 b 与 c 的积, 用 $bc*$ 表示。

(4) 为验证指南因子 (用 “ $bc+$ ” 表示) 对雷电灾害的指示作用, 选取密度与强度同等权重组合计算百分位排名和 $k=50$ 时的优度, 不参与其它 k 值的优度计算。

以上共 23 个因子, 包含全部雷电数据, 下称雷电因子。

(5) 根据 GB50057 规范附录 F 提供的首次负极性以后雷击的雷电流参量 [16], 在雷电数据处理基础上, 再滤去地闪强度小于 25 kA 的雷电数据, 以 (1)~(4) 同样方式和步骤, 计算同样 23 个因子的相关数据。该类因子不含 25 kA 以下雷电数据, 下称强雷因子, 并用符号 \uparrow 表示。

(6) 比较雷电因子、强雷因子在 H (高) 区和 L (低) 区优度。如 H 、 L 区优度的最大值为同一因子, 则该因子为雷电风险等级划分的最优因子; 如为二个不同因子, 则以二因子组合划分雷电风险等级, 即先以 L 区最优因子和对应的节点将雷电风险等级划分为 1、2 二级, 再以 H 区最优因子和对应的节点将 2 级区域划分为 2、3 二个风险等级。

4.2 优度计算

按前述方法和表 2, 对照气象部门收集到的雷

电灾害, 分别计算怀化、长沙两地 H 、 L 区雷电因子和强雷因子的优度, 选取每个因子在 H 、 L 区的最大值, 形成表 3。分析表 3 得出:

(1) 整体来看: L 区, 怀化、长沙雷电因子与强雷因子优度变化不大, 怀化前者高于后者 9.6% , 长沙前者低于后者 2% ; H 区, 二地强雷因子均高于雷电因子优度。特别是怀化 H 区, 雷电因子优度为 3.94 , 强雷因子优度提升到 8.22 , 提升 108.6% 。这说明: 依据规范给出的 25 kA 雷电流参数选取的强雷因子对雷电高风险等级有更好的指示作用, 而强度低于 25 kA 的较弱雷电, 造成的雷电风险相对较小, 甚至可以不加考虑, 证明了本文的优选方法是合理的。这一结论为今后雷电风险评估、预警、区划因子的选择提供了更多参考思路。

(2) 在 a 、 b 、 c 、 d 四个雷电单因子中, 怀化优度最高的为实陡度 d 。最佳组合平均优度 (H 、 L 区最大值的平均) 达 10.47 , 为单因子平均值 5.11 的 2 倍。长沙优度最高的为平均强度 c , 优度 3.15 , 为单因子平均值 2.22 的 1.4 倍。优度最低的, 怀化、长沙均显示为次数 b 。特别是怀化, 各节点区优度值均小于 1, 平均值 0.4 , 为各因子中最低值, 根据判断条件, b 与雷电灾害呈明显负相关。长沙区域, 因子 b 显示为弱负相关, 参考价值较低。这表明: 闪电密度不是造成雷电灾害的关键因素。

(3) 在组合因子中, 怀化、长沙最佳组合优度同时排名前三的是因子 $abcd$, 这表明: 雷电灾害的形成与闪日、密度、强度、陡度四个因子都有一定的关系, 但每个因子具有不同的权重, 这更符合雷电灾害形成的原理和常识。

(4) $bc+$ 优度, 怀化、长沙分别为 0.79 、 1.56 , 怀化仅高于因子 b , 长沙仅高于因子 b 、 $bc*$, 在 23 个因子中分别排名第 22、21 位, 属偏差因子之一。这也说明: $bc+$ 仅考虑密度与强度的平均, 且不进行节点优选存在缺陷和不足。

从以上分析综合得出: 怀化雷电组合因子排名前 4 的为 acd 、 $abcd$ 、 d 、 cd , 都与陡度和强度有关; 长沙雷电组合优度因子排名前 4 的为 bcd , c , $abcd$, ad , 也是与陡度和强度有关, acd 与 bcd 意义差不多, 因此确定权重组合因子 $abcd$ 为最具稳定性和可靠性, 比指南确定的 $bc+$ 因子更具指示性。

4.3 分级节点选择

据表 3 优度计算结论, 以怀化为例, 在 L 区, 优度最大值为 14.18 , 对应因子为 acd , k 值为 55 ; 在 H 区, 优度最大值为 16.12 , 对应因子为 d , k 值为 80 。因此, 选择因子 acd , 以 k 值 55 为节点, 先将雷电风险划分为 1 级和 2 级二个级别; 再选因子 d , 以 k 值 80 为节点, 再将 2 级区域划分为 2 级和 3 级。按表 2 确定风险等级划定等值线。

4.4 空间风险分布

据分级因子与节点选择, 绘制雷电变量风险等级分布图; 为验证雷电风险等级分布图对雷电风险的指示作用, 统计样本资料同期同范围出现的网格雷电灾害, 合并制成图 1。

表 3 雷电风险因子优度对比表

雷电风险因子	a	b	c	d	bc*	abc	abd	ac	bc	ad	bd	ab	cd	acd	bcd	abcd	ac!	ad!	bc!	bd!	ab/	cd/	平均	bc +
怀化 L 区 G 值	0.92	0.29	2.12	2.94	0.29	2.65	2.82	4.01	2.54	5.13	5.13	0.92	6.70	14.18	2.76	11.79	1.48	2.39	0.49	0.76	1.09	6.70	3.55	0.79
怀化 L 区 k 值	57	57	52	57	53	52	57	54	55	53	53	57	51	55	56	52	57	54	57	57	56	51	54.68	50
怀化 H 区 G 值	1.87	0.13	2.53	3.50	1.36	10.74	7.10	10.74	2.53	7.10	3.50	1.87	2.53	6.12	2.53	6.12	4.71	5.44	1.70	1.93	0.12	2.53	3.94	
怀化 H 区 k 值	83	80	83	81	83	81	77	81	83	77	81	83	83	82	83	82	82	83	82	83	79	83	81.59	
怀化 L 区 ↑G	0.92	0.37	4.82	4.82	0.87	3.00	2.16	3.68	3.27	4.17	3.69	0.89	3.60	4.53	4.82	3.69	4.92	6.70	2.82	3.60	0.29	3.60	3.24	
怀化 L 区 k 值 ↑	57	57	52	57	56	54	53	57	51	55	53	53	57	56	57	53	57	57	57	57	57	57	55.45	
怀化 H 区 ↑G 值	2.29	0.80	10.74	16.12	1.36	10.23	8.27	8.27	13.39	8.27	13.39	1.36	13.39	13.39	14.10	13.39	4.26	4.01	5.00	4.71	0.62	13.39	8.22	
怀化 H 区 k 值 ↑	82	77	81	80	83	83	81	81	83	81	83	83	83	83	81	83	81	83	80	82	78	83	81.59	
怀化最佳组合平均	1.61	0.59	7.78	10.47	1.11	6.87	5.54	7.38	8.33	6.70	9.26	1.40	10.05	13.79	9.46	12.59	4.82	6.07	3.91	4.16	0.86	10.05	6.49	0.79
怀化最佳组合排名	18	23	9	3	20	11	14	10	8	12	7	19	4	1	6	2	15	13	17	16	21	4	22	
长沙 L 区 G 值	1.07	0.98	2.93	0.53	0.96	1.24	1.42	1.42	1.75	1.81	1.11	1.70	1.81	1.63	1.45	1.89	2.82	1.87	0.95	0.67	1.80	1.70	1.52	1.56
长沙 L 区 k 值	53	57	51	51	55	57	57	55	52	55	51	56	52	57	57	53	51	57	56	53	57	53	54.36	50
长沙 H 区 G	2.89	1.17	1.88	1.75	1.17	3.71	1.90	4.27	2.00	2.89	0.87	1.94	1.32	2.19	1.63	4.00	2.44	3.09	1.20	1.45	1.25	1.17	2.10	
长沙 H 区 k 值	79	79	80	83	79	81	77	82	81	79	80	81	82	79	82	79	83	82	83	83	80	79	80.59	
长沙 L 区 ↑G 值	1.08	1.24	1.90	1.24	1.32	1.53	1.43	1.43	1.35	1.09	1.87	1.42	1.46	2.02	1.66	1.25	2.12	2.72	1.63	1.36	1.42	1.45	1.55	
长沙 L 区 k 值 ↑	55	57	51	53	52	56	53	51	52	51	51	57	51	52	57	51	55	53	57	56	57	53	53.68	
长沙 H 区 ↑G 值	1.65	1.82	3.37	3.23	1.17	2.01	2.13	2.07	2.20	2.01	1.89	1.69	3.31	3.31	4.78	2.44	1.64	2.14	2.28	3.07	1.69	3.31	2.42	
长沙 H 区 k 值 ↑	78	80	80	81	81	83	80	80	82	83	79	83	83	83	83	83	77	83	82	83	83	83	81.50	
长沙最佳组合平均	1.98	1.53	3.15	2.24	1.25	2.62	1.78	2.85	1.98	2.35	1.88	1.82	2.56	2.66	3.22	2.94	2.63	2.90	1.95	2.22	1.75	2.51	2.31	1.56
长沙最佳组合排名	14	22	2	12	23	8	19	5	15	11	17	18	9	6	1	3	7	4	16	13	20	10	21	

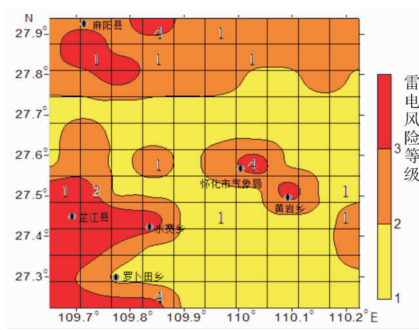


图1 雷电变量风险等级及雷灾起数分布图

注: 图中颜色区域为雷电变量等级, 图中数字为所在 50 km² 网格出现的雷灾起数

(1) 雷电风险等级分布。图中雷电风险较高的 3 级区域有三个较为集中的区域: 一是位于图中西北方向的麻阳县城及东南侧; 二是位于图中西南方向的芷江南侧、水宽乡西侧与罗卜田乡西、南侧组成的地域; 三是图中心偏东南方向的怀化市市区气象局与黄岩乡附近区域。雷电风险较低的 1 级区域是离怀化城区 10~20 km 的周边郊区地带。

(2) 验证雷灾起数集中区域多为雷电变量风险等级较高区域, 而雷电变量风险等级较低区域所包含的雷电灾害多为分散性雷电灾害, 仅 2 次雷电灾害发生在雷电风险 1 级区域。

统计图 1 中各风险等级数据得表 4, 从表 4 可以看出: 在风险等级较高的 3 级区域, 16.4% 的面积包含了 69.6% 的雷电灾害, 雷灾占比是分析区域平均值的 4.2 倍; 而风险等级较低的 1 级风险区域, 54.5% 的面积只包含了 8.7% 的雷电灾害, 雷灾占比是分析区域平均值的 0.2 倍。这说明: 图 1 给出的雷电风险等级具有明显的指示意义; 并表明, 文中处理方法、筛选模型在雷电风险区划等实际工作中具有一定的参考价值。

表 4 雷电风险等级与雷电灾害的关系

风险等级	网格数	网格比/%	雷灾次数	雷灾占比/%	距平比/%
3 级	18	16.4	16	69.6	4.2
2 级	32	29.1	5	21.7	0.7
1 级	60	54.5	2	8.7	0.2

5 结论

本文针对闪电数据的应用, 进行了多方位的研究, 为今后雷电风险评估、预警、区划因子的选择提供了更多参考思路。结论如下:

(1) 根据大气科学及数理统计原理, 结合百分位法, 建立了基于闪电数据的雷电风险优化模型, 给出了雷电灾害风等级划分方法。依据《GB50057 建筑物防雷设计规范》给出的 25 kA 雷电流参数选取的强雷因子对雷电高风险等级有更好的指示作用。

(2) 文中空间分辨率、数据处理、陡度实化等资料取值约定, 给出了具体参数或方法。以闪日、

次数、强度、实陡度(分别用 a、b、c、d 作为代号)共 4 个单变量为基础因子, 计算因子百分位排名及在 H、L 区的最大优越度, 得出闪电密度不是造成雷电灾害的关键因素。权重组合因子 abcd 为最具稳定性和可靠性, 比“指南”确定的 bc + 因子更具指示性。

(3) 优越度计算模型的建立, 弥补了雷电、雷灾等不连续、不呈正态分布数据缺少相关性计算模型的不足。

(4) 据分级因子与节点选择, 绘制怀化雷电变量风险等级分布和雷灾叠加图, 对比得出雷灾起数集中区域多为雷电变量风险等级较高区域, 进一步应用证明本文方法的正确性。

参考文献:

- [1] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [2] 章国材. 气象灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [3] HU H, WANG J, PAN J. The characteristics of lightning risk and zoning in Beijing simulated by a risk assessment model[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(8): 65 - 72.
- [4] HU Z X, ZHAO W G, ZHU H P. A source location algorithm of lightning detection networks in China[J]. Annals of Geophysics, 2010, 28(10): A0111.
- [5] 陈广昌, 崔逊, 田心如. 江苏省雷电灾害危险性定量评估及区划[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 32 - 35.
- [6] D K Katsanos, K Lagouvardos, V Kotroni. Relationship between lightning and model simulated microphysical parameters over the central and eastern Mediterranean[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9(5): 148 - 153.
- [7] C J Rodger, J B Brundell, R L Dowden, et al. Location accuracy of long distance VLF lightning location network[J]. Annals of Geophysics, 2004, 22(3): A0316.
- [8] 李衣长, 沈永生, 陈阿仲, 等. 基于 GIS 图层叠置法的精细化雷电灾害易损度区划模型[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 182 - 188.
- [9] WAYAN Suparta, JA'AFAR Adnan, MOHD Alauddin Mohd, et al. Now casting the lightning activity in Peninsular Malaysia using the GPS PWV during the 2009 inter - monsoons[J]. Annals of Geophysics, 2014, 57(2): A0217.
- [10] 曾金全, 冯真祯, 张烨方, 等. 区域雷电灾害风险评估模型与应用[J]. 气象科技, 2017(1): 178 - 182.
- [11] 程向阳, 陶寅, 邹建军, 等. 雷电灾害风险区划技术指南[S]. 北京: 气象出版社, 2017.
- [12] G Anderson, D Klugmann. A European lightning density analysis using 5 years of ATD net data[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(4): 95 - 99.
- [13] B Kucińska, G B Raga, O Rodríguez. Cloud-to-ground lightning over Mexico and adjacent oceanic regions: a preliminary climatology using the WWLLN data set[J]. Annals Geophysics, 2010, 28(11): 112 - 117.
- [14] 薛德锋, 肖坤葵, 陈巍, 等. 怀化市雷灾特征及成因[J]. 南方农业, 2016, 10(9): 226 - 227.
- [15] 薛德锋, 薛明. 基于 VB 的闪电数据处理模型与方法[C]//长江流域气象中心大气探测、通信与信息技术交流会. 武汉: 湖北省气象学会, 2017.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50057 建筑物防雷设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

(下转第 84 页)