

吴量,向清才,陆庆. 广西高速公路沿线雷电灾害风险分析[J]. 陕西气象,2024(5):71-76.

文章编号:1006-4354(2024)05-0071-06

# 广西高速公路沿线雷电灾害风险分析

吴量<sup>1</sup>,向清才<sup>2</sup>,陆庆<sup>1</sup>

(1. 河池市气象局,广西河池 547000;2. 都安县气象局,广西都安 530700)

**摘要:**为了解广西高速公路沿线的雷电灾害风险情况,制定有效的防雷减灾措施,利用广西高速公路路网数据、2016—2022年广西地闪数据和2019年广西社会经济数据进行统计分析。结果显示,广西高速公路沿线的雷击风险度中弱雷电占比0.77%,中等雷电占比16.36%,强雷电占比45.19%,特强雷电占比36.79%。其中,崇左市、北海市和防城港市的特强雷电路段占比超过60%,其他地区的强雷电路段比重均超过40%,北海市、防城港市和钦州市为无弱雷电路段区域。闪电强度分布中,二级闪电强度占比最大,达到46.28%。三级闪电强度以上的路段主要分布在北海市、防城港市、钦州市西南部、南宁市西南部以及崇左市除北部以外的其他地区。广西高速公路沿线中89.92%的路段处于雷电灾害风险一级的区域,其中北海市、南宁市、玉林市、柳州市和桂林市的部分路段处在高风险区域。

**关键词:**高速公路;雷击风险度;闪电强度;雷电灾害风险;广西

**中图分类号:**X928

**文献标识码:**A

雷电是发生在云地间或云层之间的剧烈放电现象,产生的巨大电流和电磁场可能会对人类生命及财产安全构成威胁<sup>[1]</sup>。近年来,随着高速公路路网的不断扩大及公路信息化、电子化的不断提升,雷电灾害在高速公路建设和运营中日益凸显出其危害性。因此,有较多学者对高速公路机电系统的防雷措施开展了研究<sup>[2-4]</sup>,而高速公路沿线雷电灾害的风险分析,对于高速公路的安全管理起到至关重要的作用。目前国内对于高速公路沿线雷电活动的相关研究不多,李林等<sup>[5]</sup>通过对江苏高速公路沿线的闪电时空分布特征研究,为当地高速公路防雷减灾服务提供科学依据;郑君亮等<sup>[6]</sup>开展福建省高速公路沿线地闪活动特征分析,为当地高速公路机电设施的防雷工作提供了参考。上述研究主要基于闪电数据的分析,对人口、经济等共同影响研究较少。广西地处云贵高原东南边缘,受复杂地形和东亚季风的影响属于雷电高发区<sup>[7]</sup>。为了解广西高速公路沿线的雷电

灾害风险,利用2016—2022年广西地闪监测数据,分析广西高速公路沿线雷击风险度和闪电强度的分布特征,结合2019年社会经济数据,采用信息熵法分析雷电灾害风险,旨在为加强和改善广西高速公路沿线的雷电防灾减灾工作提供参考。

## 1 数据来源和处理

本研究将2016—2022年广西VLF/LF全闪电(包括云闪、地闪)定位系统的地闪数据中陡度出现0值的数据以及雷电流幅值0~2 kA和200 kA以上的数据剔除,共监测到3 601 678个地闪数据。2019年广西人口密度和单位面积地区生产总值(GDP)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。广西高速公路路网资料从OpenStreetMap(OSM)获得(<http://download.geofabrik.de/asia.html>)。

为了综合考虑广西高速公路沿线的雷电流幅值和陡度的影响,引入闪电强度 $P$ ( $P$ 为无量纲)的概念<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2023-07-06

作者简介:吴量(1983—),女,仫佬族,广西宜州人,硕士,高级工程师,主要从事雷电防护技术服务研究。

$$P = A_1 I_0 + A_2 D_0, \quad (1)$$

式中,  $A_1 = A_2 = 0.5$ ,  $I_0$  为雷电流幅值标准值(kA),  $D_0$  为雷电流陡度标准值(kA/ $\mu$ s)。

根据离差标准法对雷电流幅值、陡度进行标准化处理,其中采用 99%、1%分位点的数值分别代替数据最大值和最小值,  $I_{1\%} = 4.0415$  kA,  $I_{99\%} = 125.716$  kA,  $D_{1\%} = 0.9$  kA/ $\mu$ s,  $D_{99\%} = 40.1$  kA/ $\mu$ s,得到标准化公式为

$$I_0 = (I - I_{1\%}) / (I_{99\%} - I_{1\%}) = (I - 4.0415) / 121.6745, \quad (2)$$

$$D_0 = (D - D_{1\%}) / (D_{99\%} - D_{1\%}) = (D - 0.9) / 39.2. \quad (3)$$

(2)、(3)公式中,  $I$  为雷电流幅值(kA),  $D$  为雷电流陡度(kA/ $\mu$ s)。将公式(2)和(3)代入(1),可得广西高速公路沿线闪电强度的计算公式为

$$P = I / 243.349 + D / 78.4 - 0.028. \quad (4)$$

## 2 雷击风险度

将广西高速公路沿线按 3 km 为间距, 2 km 为半径划分网格,把网格与地闪数据进行叠加分析,统计网格内的地闪次数和地闪电流强度,地闪密度可由地闪次数除以网格面积得到。

由于地闪密度和地闪电流强度分布并不完全一致,遭遇雷击频次较多的区域其电流强度并不是最大的,因此根据模糊矩阵法<sup>[9]</sup>,以每个网格为单元综合考虑地闪密度、地闪电流两个因子,构造适用于广西高速公路沿线的雷击风险度计算模型,并绘制风险度分布图。

### 2.1 雷电等级划分及阈值计算

构造雷击风险度函数的步骤如下。(1)统计各网格平均面积内每小时的地闪频次( $F$ , 次/( $h \cdot km^2$ ))和最大雷电流( $Q$ , kA),得到累计频次分布情况(图 1)。(2)因子分级上下限值的确定。将  $F$  和  $Q$  的累计频次达到 98% 时的数值,作为因子分级的上限值。将  $F$  的下限值设为 0,  $Q$  的下限值设为 2 kA,  $F$  的上限值设为 5.25 次/( $h \cdot km^2$ ),  $Q$  的上限值设为 199.44 kA。(3)划分风险程度。将  $F$  和  $Q$  的取值范围 4 等分,  $0 < F \leq 1.31$  (次/( $h \cdot km^2$ )) 和  $2 < Q \leq 51.36$  (kA),  $1.31 < F \leq 2.62$  (次/( $h \cdot km^2$ )) 和  $51.36 < Q \leq 100.72$  (kA),  $2.62 < F \leq 3.93$  (次/( $h \cdot km^2$ )) 和  $100.72$

$< Q \leq 150.08$  (kA),  $3.93 < F \leq 5.25$  (次/( $h \cdot km^2$ )) 和  $150.08 < Q \leq 199.44$  (kA),分别对应于弱雷电、中等雷电、强雷电和特强雷电 4 个雷击风险度级别。

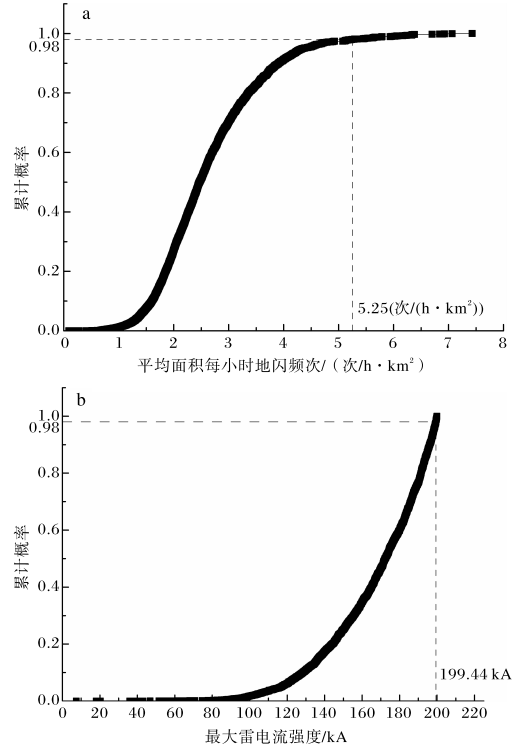


图 1 广西高速公路沿线 1  $km^2$  每小时地闪频次(a)、最大雷电流强度(b)累计概率分布(图中虚线表示累积频次达 98% 时的数值)

### 2.2 建立因子隶属度函数

根据模糊综合算法建立雷击风险度的隶属度函数,函数由多个线性函数

$$y = mx + b \quad (5)$$

构成,  $y$  为隶属度,  $x$  为因子预报值,  $m$ 、 $b$  为常数。

#### 1) 广西高速公路沿线 $F$ 隶属度函数

用函数特征点值(0,0)、(1.31,1)、(2.62,0), (1.31,0)、(2.62,1)、(3.93,0), (2.62,0)、(3.93,1)、(5.25,0), (3.93,0)、(5.25,1),使用一次线性函数的求解方法,分别求出各级别线性函数的  $m$  和  $b$  值,将其代入(5)式,可得出各级别的隶属度函数。

$$\text{一级 } y_1 = \begin{cases} 1, & x = 1.31; \\ \frac{1}{1.31}x, & 0 < x < 1.31; \\ -\frac{1}{1.31}(x - 2.62), & 1.31 < x \leq 2.62 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \text{二级 } y_2 &= \begin{cases} 1, x=2.62; \\ \frac{1}{1.31}(x-1.31), 1.31 < x < 2.62; \\ -\frac{1}{1.31}(x-3.93), 2.62 < x \leq 3.93 \end{cases} \\
 \text{三级 } y_3 &= \begin{cases} 1, x=3.93; \\ \frac{1}{1.31}(x-2.62), 2.62 < x < 3.93; \\ -\frac{1}{1.31}(x-5.25), 3.93 < x \leq 5.25 \end{cases} \\
 \text{四级 } y_4 &= \begin{cases} 1, x \geq 5.25; \\ \frac{1}{1.31}(x-3.93), 3.93 < x < 5.25; \\ 0, x=3.93 \end{cases}
 \end{aligned}$$

2) 广西高速公路沿线 Q 隶属度函数

用函数特征点值(0,0)、(51.36,1)、(100.72,0)、(51.36,0)、(100.72,1)、(150.08,0)、(100.72,0)、(150.08,1)、(199.44,0)、(150.08,0)、(199.44,1)使用一次线性函数的求解方法,分别求出各级别线性函数的 m 和 b 值,将其代入(5)式,可得出各级别的隶属度函数。

$$\begin{aligned}
 \text{一级 } y_1 &= \begin{cases} 1, x=51.36; \\ \frac{1}{51.36}x, 2 < x < 51.36; \\ -\frac{1}{51.36}(x-100.72), 51.36 < x \leq 100.72 \end{cases} \\
 \text{二级 } y_2 &= \begin{cases} 1, x=100.72; \\ \frac{1}{51.36}(x-51.36), 51.36 < x < 100.72; \\ -\frac{1}{51.36}(x-150.08), 100.72 < x \leq 150.08 \end{cases} \\
 \text{三级 } y_3 &= \begin{cases} 1, x=150.08; \\ \frac{1}{51.36}(x-100.72), 100.72 < x < 150.08; \\ -\frac{1}{51.36}(x-199.44), 150.08 < x \leq 199.44 \end{cases} \\
 \text{四级 } y_4 &= \begin{cases} 1, x \geq 199.44; \\ \frac{1}{51.36}(x-150.08), 150.08 < x < 199.44; \\ 0, x=150.08 \end{cases}
 \end{aligned}$$

2.3 广西高速公路沿线雷击风险度划分

根据隶属度函数公式,得到广西高速公路沿线雷击风险度分布(图 2,文中地图基于广西标准地

图服务平台网站审图号为桂 S(2020)51 号的标准地图制作,底图无修改)。图中大部分路段的雷击风险度属于强雷电,占 45.19%;其次是特强雷电风险度,占 36.79%;而弱雷电风险度最少,仅占 0.77%。表明广西高速公路沿线的雷电活动频繁,需要重视高速公路机电设施的雷电防护工作。

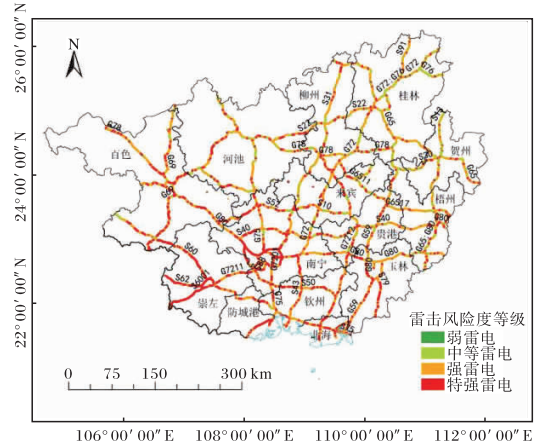


图 2 2016—2022 年广西高速公路沿线雷击风险度分布

表 1 为广西各地市高速公路沿线雷击风险度占总路段的分布情况。其中,崇左市、北海市和防城港市的特强雷电路段占比超过 60%,表明该区

表 1 2016—2022 年广西各地市高速公路沿线雷击风险度分布 %

| 地市   | 弱雷电  | 中等雷电  | 强雷电   | 特强雷电  |
|------|------|-------|-------|-------|
| 北海市  | 0.00 | 4.19  | 33.53 | 61.68 |
| 百色市  | 0.26 | 14.40 | 43.06 | 41.49 |
| 崇左市  | 0.25 | 1.26  | 24.18 | 73.30 |
| 防城港市 | 0.00 | 3.48  | 35.65 | 60.87 |
| 贵港市  | 0.43 | 17.17 | 53.00 | 29.18 |
| 桂林市  | 2.12 | 29.20 | 51.55 | 15.82 |
| 河池市  | 1.44 | 24.55 | 46.39 | 27.08 |
| 贺州市  | 1.61 | 31.51 | 45.02 | 20.90 |
| 来宾市  | 1.07 | 21.45 | 46.65 | 30.56 |
| 柳州市  | 1.08 | 24.91 | 50.72 | 22.56 |
| 南宁市  | 0.77 | 7.52  | 40.79 | 49.86 |
| 钦州市  | 0.00 | 4.47  | 48.64 | 46.40 |
| 梧州市  | 0.43 | 21.41 | 50.96 | 26.77 |
| 玉林市  | 0.25 | 7.00  | 51.25 | 41.00 |

域的高速公路沿线存在极高的雷击风险性。除以上三个地区,其他地区的强雷电路段比重均超过40%。大部分地区的弱雷电路段占比都较低,其中北海市、防城港市和钦州市无此类风险级别路段,虽然桂林市的比例最大,但也仅占当地高速公路总数的2.12%。强雷电以上风险级别路段主要分布在广西西南地区,考虑是由于广西地势西北高东南低,高地势区域更容易触发雷暴的发生,而广西南部靠海区域由于受大地辐射升温情况不同,容易形成比较强的局部对流环境,因此更容易产生雷暴强对流天气。

表2 2016—2022年广西高速公路沿线闪电强度(P)分级标准

| 闪电强度 | 一级                 | 二级                     | 三级                     | 四级                     |
|------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $P$  | $0 < P \leq 0.132$ | $0.132 < P \leq 0.182$ | $0.182 < P \leq 0.242$ | $0.242 < P \leq 0.425$ |

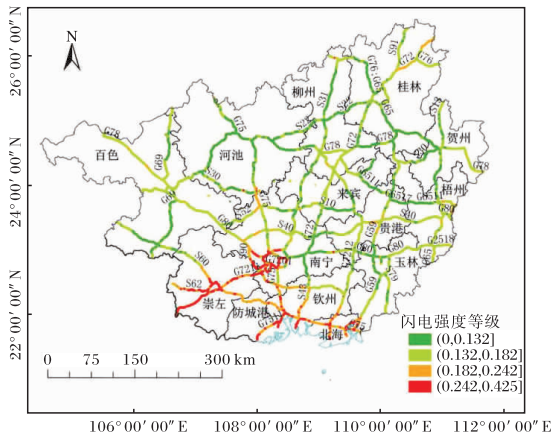


图3 2016—2022年广西高速公路沿线闪电强度分布

闪电强度等级,制定相应的防雷措施,保障城市交通安全。

## 4 雷电灾害风险分析

### 4.1 信息熵法

信息熵法是通过度量系统中信息的无序度来评估指标重要性的指标权重计算方法<sup>[10]</sup>。计算步骤如下:(1)对原始数据矩阵 $(x_{ij})_{m \times n}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; m$ 为样本数, $n$ 为指标个数, $x_{ij}$ 为第 $i$ 个样本的第 $j$ 个指标值)进行标准化处理得到 $(p_{ij})_{m \times n}$ 。(2)第 $j$ 个指标的熵( $E_j$ )、差异系数( $V_j$ )计算, $E_j = -K \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$  ( $K = (\ln m)^{-1}$ ),

## 3 闪电强度

利用 ArcGIS 自然断点法,将广西高速公路沿线的闪电强度( $P$ )划分为四个等级(表2),并绘制广西高速公路沿线闪电强度分布图(图3)。由图可知,广西高速公路沿线大部分路段(占比为46.28%)的闪电强度等级为二级,有30.63%的路段处于闪电强度等级为四级的区域。北海市、防城港市、钦州市西南部、南宁市西南部以及崇左市除北部以外的其他地区路段的雷电强度主要为三级以上。广西高速公路沿线大部分路段的雷电强度都较高,雷击危害较大。因此可针对不同的

$V_j = 1 - E_j$ 。(3)第 $j$ 个指标的归一化权重  $W_j =$

$$V_j / \sum_{j=1}^n V_j。$$

### 4.2 权重计算

参考相关文献可知<sup>[11-12]</sup>,人口和经济参数是进行雷电灾害风险分析的可靠指标因子,由于雷电灾害与闪电活动密切相关,因此有必要将人口,经济参数与闪电密度、强度进行一元线性回归相关分析(表3)。由表3可知:人口密度与闪电密度的线性拟合斜率 $>0$ ,与闪电强度的线性拟合斜率 $>0$ ,且相关系数均 $>0$ ,因此人口密度为闪电活动的正向指标;GDP密度与闪电密度的线性拟合斜率 $<0$ ,与闪电强度的线性拟合斜率 $>0$ ,且相关系数均 $>0$ ,因此GDP密度为闪电密度的负向指标,为闪电强度的正向指标。

根据信息熵法的计算步骤,将闪电密度和强度作为表征雷灾发生的正向指标,并结合人口密度和GDP密度指标来计算权重,结果见表4中第2、3列数据。单独计算闪电密度、强度的信息熵权重为0.5484和0.4516,将闪电密度权重与对应列(第2列)、闪电强度权重与对应列(第3列)的雷灾指标权重相乘后求和得到4项指标的雷电灾害风险权重(第4列)。

表 3 人口密度、GDP 密度与闪电活动关系

| 指标     | 闪电密度  |        | 闪电强度  |        |
|--------|-------|--------|-------|--------|
|        | 相关系数  | 线性拟合斜率 | 相关系数  | 线性拟合斜率 |
| 人口密度   | 0.572 | 0.787  | 0.596 | 0.801  |
| GDP 密度 | 0.084 | -0.420 | 0.661 | 0.834  |

表 4 信息熵法计算雷灾相关指标权重

| 指标     | 闪电密度指标权重 | 闪电强度指标权重 | 雷电灾害风险指标权重 |
|--------|----------|----------|------------|
| 人口密度   | 0.716 0  | 0.273 3  | 0.516 1    |
| GDP 密度 | 0.009 5  | 0.621 9  | 0.286 1    |
| 闪电密度   | 0.150 5  | 0.057 5  | 0.108 5    |
| 闪电强度   | 0.124 0  | 0.047 3  | 0.089 3    |

将各网格的 4 项指标值进行权重相乘后求和得到雷电灾害风险值( $T$ ),利用 ArcGIS 自然断点法,将广西高速公路沿线的雷电灾害风险值( $T$ )划分为 4 个等级(表 5),并绘制广西高速公路沿线雷电灾害风险分布图(图 4)。由该图可知,广

西高速公路沿线大部分路段(约 89.92%)处于雷电灾害风险等级一级的区域。北海市、南宁市、玉林市、柳州市和桂林市的部分路段是高风险区域。建议加强高风险区域的防雷设施建设,减少雷电灾害对交通安全带来的影响。

表 5 广西高速公路沿线雷电灾害风险( $T$ )等级

| 雷电灾害风险 | 一级                   | 二级                            | 三级                               | 四级                               |
|--------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $T$    | $0 < T \leq 750.914$ | $750.914 < T \leq 2\ 161.429$ | $2\ 161.429 < T \leq 4\ 510.428$ | $4\ 510.428 < T \leq 8\ 809.240$ |

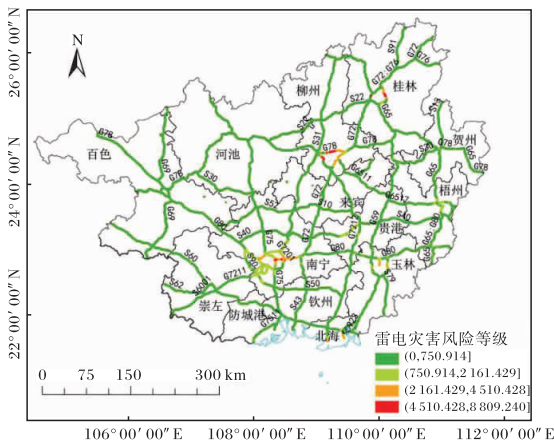


图 4 2016—2022 年广西高速公路沿线雷电灾害风险分布

5 结论

基于广西地闪数据和人口密度、GDP 密度数据,开展广西高速公路沿线雷击风险度、闪电强度

分布和雷电灾害风险分析,得到以下结论。

(1)综合考虑地闪频次和最大雷电流强度,广西高速公路沿线的雷击风险度以强雷电路段为最多,其次是特强雷电路段,而弱雷电路段最少。其中,崇左市、北海市和防城港市的特强雷电路段占比超过 60%,其他地区的强雷电路段比重均超过 40%,北海市、防城港市和钦州市为无弱雷电路段区域。

(2)综合考虑地闪电流和陡度参数,广西高速公路沿线大部分路段的闪电强度等级为二级,其次为四级,闪电强度三级以上的路段主要分布在北海市、防城港市、钦州市西南部、南宁市西南部以及崇左市除北部以外的其他地区。对于闪电强度大值区域,除了考虑雷击风险度以外,还可针对不同的闪电强度等级,制定相应的防雷措施。

(3)综合考虑地闪密度、强度和社会经济数据,广西高速公路沿线路段大部分处于雷电灾害风险等级为一级的区域。对于处于高风险路段的北海市、南宁市、玉林市、柳州市和桂林市的部分区域,除了加强防雷设施的完善以外,还需加强雷电预警设施的建设,提高交通管理部门的应急响应能力,减少雷电灾害对交通运输的影响。

#### 参考文献:

- [1] 包佳渺,李鹏飞,王晓萍,等. 镇江地区闪电时空特征及相关性分析[J]. 陕西气象,2015(6):22-25.
- [2] 丁立言. 高速公路机电系统防雷的重要性与防护技术[J]. 交通世界,2021(33):141-142.
- [3] 钟雨珊,陈景荣. 高速公路机电系统防雷设计[J]. 气象研究与应用,2022,43(4):139-142.
- [4] 江居炜. 山区高速公路 ETC 门架设备智能防雷监测技术的应用[J]. 福建交通科技,2021(8):97-101.
- [5] 李林,包云轩,袁成松,等. 江苏苏南地区高速公路闪电时空分布特征研究[J]. 大气科学学报,2020,43(4):735-744.
- [6] 郑君亮,刘隽,应达. 福建省高速公路沿线雷电活动特征分析[J]. 气象科技,2021,49(2):278-283.
- [7] 孙崇智,李有华,王振国. 广西气象灾害预警信号时空分布特征[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):87-92.
- [8] 曾金全,杨超,王颖波,等. 基于统计分布特征的闪电强度等级划分[J]. 暴雨灾害,2016,35(6):585-589.
- [9] 雷电危险度等级(征求意见稿)[S]. 北京:中国气象局,2008.
- [10] 杨宗佶,乔建平. 基于信息熵的典型滑坡危险度评价研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(4):47-52.
- [11] 吴量,向清才,陆庆. 基于综合评价法的河池市雷电灾害风险区划[J]. 陕西气象,2019(6):24-29.
- [12] 王治邦,蔡永祥,罗少辉,等. 青海省雷电灾害风险区划[J]. 陕西气象,2021(3):61-66.