暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估

李亚飞 祝传栋 刘邕 王丹云 李华凝 崔丹阳

Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway

LI Yafei，ZHU Chuandong，LIU Yong，WANG Danyun，LI Huaning，CUI Danyang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-016

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

广西前汛期和后汛期地闪特征差异及影响因子分析

Comparative analysis of the cloud to ground lightning activity during pre and post flood season in Guangxi

暴雨灾害. 2022, 41(2): 224-231 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.013

斜拉索桥梁雷电暂态分布特性研究

Research on lightning transient distribution characteristics of cable-stayed bridges

暴雨灾害. 2023, 42(6): 731-738 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-148

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS

暴雨灾害. 2024, 43(6): 733-740 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186

阿克苏地区一次强对流天气过程的地闪活动特征分析

Activity characteristics of the cloud-to-ground lightning in a severe convective weather event in Arksu of Xinjiang

暴雨灾害. 2022, 41(6): 640-650 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-013

湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析

Comparative analysis of cloud-ground flash data of two lightning location networks in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 646-654 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.009

2024年2月我国两次雨雪冰冻过程中闪电活动特征对比分析

Comparative analysis of lightning activity characteristics during two rainfall/snowfall and freezing events in China in February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 479-489 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-082

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李亚飞,祝传栋,刘邕,等.2025.京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估[J].暴雨灾害,44(3):332−339. LI Yafei, ZHU Chuandong, LIU Yong, et al. 2025. Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):332−339 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−016

京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估

李亚飞[1], 祝传栋[2], 刘邕[1], 王丹云[1], 李华凝[1], 崔丹阳[1]

(1. 天津市气象灾害防御技术中心, 天津 300074; 2. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

摘　要: 基于 2008—2018 年京津冀地区雷电定位系统 (Advanced Direction and Time of arrival Detecting system, ADTD) 闪电定位数据, 采用线路走廊网格法研究京津城际铁路沿线地闪频次、密度、雷电流幅值、陡度的时空变化特征, 并利用熵权综合评价方法建立雷电危险性模型, 揭示铁路沿线的雷电危险性等级。结果表明: (1) 京津城际铁路沿线负 (正) 地闪在 8 月 (6 月) 发生频次最高, 且频次的日变化呈双峰 (单峰) 结构; (2) 负地闪雷电流幅值分布集中, 多出现在[10, 30) kA 区间。正地闪雷电流幅值较为分散, 但高强度出现的比例更大。正、负地闪雷电流陡度分布都比较集中, 多出现在 [3, 12) kA·μs^{-1} 区间; (3) 京津城际铁路沿线地闪密度大致呈“增加-减少-增加-减少”的空间分布特征, 其中最易发生雷电的路段出现在京津冀交界; 雷电流幅值空间分布呈“北高南低”型, 其中负 (正) 地闪高值区出现在北京段中北部 (北京段-天津段北部); 负 (正) 地闪雷电流陡度空间分布大致呈“北高南低”(“高-低-高-低”) 型, 其中高值区出现在北京段中北部 (北京段北部和北京段南部-天津段中西部); (4) 京津城际铁路沿线雷电危险性等级表现为从北京段到滨海段逐渐降低, 其中高风险路段主要位于北京段中北部。

关键词: 京津城际铁路; 地闪密度; 雷电流幅值; 雷电流陡度

中图法分类号: P427.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−016

Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway

LI Yafei[1], ZHU Chuandong[2], LIU Yong[1], WANG Danyun[1], LI Huaning[1], CUI Danyang[1]

(1. *Tianjin Meteorological Disaster Defense Technology Centre*, *Tianjin* 300074; 2. *Hubei Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430205)

Abstract: Based on the ADTD (advanced direction and time of arrival detecting system) lightning location data in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2008 to 2018, this study uses the line corridor grid method to study the spatiotemporal variation characteristics of cloud-to-ground lightning frequency, density, lightning current amplitude, and steepness along the Beijing-Tianjin intercity railway. The entropy weight comprehensive evaluation method is used to establish a lightning hazard model to reveal the risk levels of different sections. The results are as follows. (1) Along the Beijing-Tianjin intercity railway, negative (positive) cloud-to-ground lightning occurs most frequently with a bimodal (unimodal) structure in daily variation in August (June). (2) The peak current amplitude distribution of negative cloud-to-ground lightning is concentrated, mostly appearing in the [10, 30) kA range. While that of the positive cloud-to-ground lightning is more dispersed, with a higher proportion at high intensities. Both positive and negative cloud-to-ground lightning current steepness distributions are relatively concentrated, predominantly occurring within the [3, 12) kA·μs^{-1} range. (3) The density of cloud-to-ground lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway generally exhibits a spatial distribution pattern of "increase-decrease-increase-decrease", with the most susceptible sections to cloud-to-ground lightning occurring at the Beijing-Tianjin-Hebei border. The lightning peak current amplitude shows a pattern of "higher in the north and lower in the south", with high-value areas for negative (positive) cloud-to-ground lightning appearing in the north-central parts of the Beijing section (from the Beijing section to the northern part of the Tianjin section). The peak current steepness of negative (positive) cloud-to-ground lightning generally follows a pattern of "higher in the north and lower in the south" ("high-low-high-low"), with high-value areas occurring in the north-central parts of the Beijing section (the northern part of the Beijing section and the southern part of the Beijing section to the central-western parts of the Tianjin section). (4) The lightning risk level along the Beijing-Tianjin intercity railway gradually

收稿日期: 2024−01−16; **定稿日期**: 2024−10−25

资助项目: 天津市气象局科研项目 (202311ybxm06)

第一作者: 李亚飞, 主要从事雷电灾害防御技术研究。E-mail: liyafei@lasg.iap.ac.cn

通信作者: 刘邕, 主要从事雷电灾害风险研究。E-mail: Subutai@yeah.net

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

decreases from the Beijing section to the Binhai section, with high-risk sections mainly located in the north-central parts of the Beijing section.

Key words: Beijing-Tianjin intercity railway; ground lightning density; lightning current amplitude; lightning current steepness

引　言

雷电是发生于大气中的一种瞬态大电流、高电压放电现象, 能够在瞬间产生巨大的破坏作用, 造成巨大经济损失和人员伤亡 (马明等, 2008; 张祎等, 2018; 李霞等, 2021), 因此, 开展雷电危险性评估对防灾减灾具有重要意义。

雷电危险性是雷电风险的重要组成部分, 也是综合评估雷电风险、制定防雷减灾对策的重要指标 (马明等, 2008; 史培军, 2014; 余田野等, 2023)。地闪密度、雷电流幅值、陡度是表示雷电活动强弱和危险性特征的重要参数 (高金阁等, 2019; 余田野等, 2019; 宋喃喃等, 2022; 刘威和欧阳霖, 2023), 其中地闪密度和雷电流幅值主要表征雷电对建筑物等承灾体的直击雷害影响, 危害形式主要表现为电效应破坏、热效应破坏和机械效应破坏, 因此地闪密度和雷电流幅值也常被用来探究雷电危险性特征。程向阳等 (2012) 利用雷电流强度和地闪密度探究了安徽省雷电危险性特征, 余田野等 (2023) 利用雷电流幅值、雷击点密度探究了湖北省雷电危险性特征。雷电流陡度表征雷电对电子、通讯设备等承灾体的感应雷害影响, 感应雷害的特点是电子通讯设备被击穿或烧毁的地点距离雷击的发生地还很远, 近则数百米, 远则数千米或几十千米, 因此雷电流陡度也是防雷工程设计中需要考虑的主要指标 (王学良等, 2010)。余田野等 (2019) 利用雷电流幅值、陡度、地闪密度等参数探究了湖北省高速公路沿线的雷电危险性特征。以上研究涵盖了雷电危险性评估的主要内容。

铁路和公路沿线布设有建筑物、供电、通讯、照明等设备, 这些设备都极易遭到雷电灾害的威胁 (范海江和罗健, 2008; 程宏波等, 2013), 因此雷电也是影响公路、铁路等交通运输的重要气象灾害之一 (张志访等, 2010; 李国梁等, 2013), 学者们对各地区的高速铁路沿线的雷电活动特征做了针对性研究。李国梁等 (2013) 利用湖北省地面雷暴日资料和闪电定位监测资料, 通过分析武汉至广州高铁湖北段沿线雷电时空变化特征, 揭示了铁路沿线雷电防御重点地段; 向念文等 (2015) 利用雷电定位系统的地闪数据, 分析了京沪高铁沿线雷电活动的空间特征, 并根据沿线地闪密度分布, 阐明了京沪高铁沿线易受雷击路段。京津城际铁路由北京南站经天津站至滨海站, 连接北京市与天津市, 是中国《中长期铁路网规划》中环渤海地区城际轨道交通网的重要组成部分, 其中 2023 年每日开行列车超过 120 对, 日运送旅客量超过 7 万人次, 年旅客发送量近 2 000 万人次, 京津城际铁路车次多, 运力大, 易受雷电天气影响, 其中在京津城际铁路开通第一年, 雷电造成接触网跳闸 31 次, 严重影响了京津铁路交通的安全稳定运行 (李汝军, 2011), 但目前关于京津城际铁路沿线雷电活动特征及其危险性还鲜有研究。

本文基于 2008—2018 年京津冀地区雷电定位系统 (Advanced Direction and Time of arrival Detecting system, ADTD) 闪电定位数据, 采用线路走廊网格法研究了京津城际铁路沿线地闪频次和密度的时空演变, 分析了铁路沿线不同路段雷电流幅值、陡度的空间分布、概率密度分布, 并利用熵权综合评价方法建立雷电危险性模型, 揭示京津城际铁路沿线雷电危险性分布特征, 研究成果可为京津城际铁路沿线防雷工程设计、雷电风险评估等提供科学依据, 以期保障京津冀交通枢纽安全稳定正常运行。

1 资料与方法

1.1 研究资料

本文使用京津冀地区 ADTD 闪电定位数据中的地闪数据, 时间段为 2008 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日, 包括闪电发生时间、经纬度、雷电流幅值、陡度等, 其中雷电流陡度是指在单位时间间隔内, 起点与终点雷电流幅值的差值, 物理意义是雷电流幅值在单位时间内变化的大小。ADTD 闪电定位系统采用时差法和定向时差联合法进行定位, 定位误差小于 500 m, 云地闪探测效率大于 90%, 单站探测范围约为 150 km。为保证数据质量, 本文依据 IEEE 工业组文件规定的数据质量控制方法剔除雷电流幅值小于 2 kA 和大于 200 kA 的闪电数据。

1.2 研究方法

本文利用线路走廊网格法将京津城际铁路沿走向划分成不同路段区间, 使得每个路段区间内的雷电参数能更准确地表征铁路沿线的雷电活动特征; 利用熵权综合评价方法确定各因子的权重系数, 建立雷电危险性评估模型。

1.2.1 线路走廊网格法

由于铁路沿线所经地区地理环境、气象条件变化多样, 雷电灾害易损性存在很大差异 (金晨路等, 2011), 采用线路走廊网格分析法使得每个路段区间内的雷电参数能够准确表征铁路沿线的雷电活动,

常常被用来探究高铁沿线雷电活动特征 (陈家宏等, 2006; 向念文等, 2015), 具体步骤如下: 利用 ArcGIS 软件沿京津城际铁路线路走向按5 km 等距离划分, 在城际铁路沿线两边各取 3 km 作为统计区域, 形成约为 6 km×5 km 的网格路段。京津城际铁路全长约 166 km, 因此从北向南可划分为 33 个网格路段, 编号为 P1 至 P33, 其中在起始路段区间, 以北京南站和滨海站为圆心, 各包括一个半圆区域, 如图 1 所示, P1—P10 属于北京段, P11 属于京津冀交界处, P12—P33 属于天津段。本文使用的数据均来自于线路走廊网格法确定的京津城际铁路沿线两边 3 km 范围内的雷电数据。

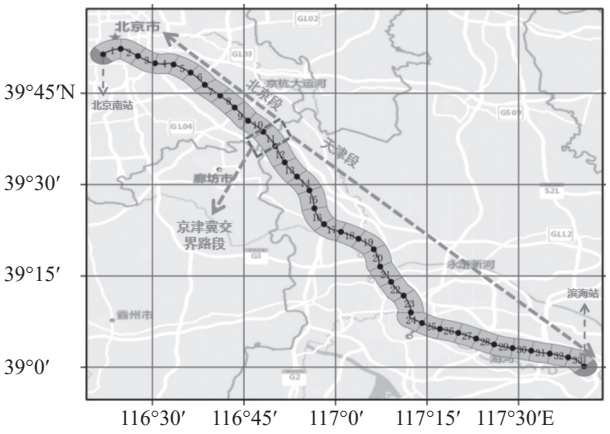


图 1 线路走廊网格法划分京津城际铁路沿线区域分布

Fig. 1 Distribution of 33 sections along the Beijing-Tianjin intercity railway

1.2.2 熵权综合评价方法

通过计算“熵”确定京津城际铁路沿线雷电危险性评估模型中各因子的权重, 当评价对象的某项因子熵值较小 (大), 说明该因子提供的有效信息量较大 (小), 其权重也应较大 (小)。

设共有 m 个评价对象、n 个评价指标的原始数据矩阵为 $A=(a_{ij})_{m\times n}$, 熵权综合评价计算模型为

$$G_i=\sum_{i=1}^{n}w_j\times r_{ij} \tag{1}$$

$$r_{ij}=\frac{a_{ij}-\min\limits_{i}\{a_{ij}\}}{\max\limits_{i}\{a_{ij}\}-\min\limits_{i}\{a_{ij}\}} \tag{2}$$

$$f_{ij}=(1+r_{ij})/\sum_{j=1}^{n}(r_{ij}+1) \tag{3}$$

$$h_j=\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}f_{ij}\ln f_{ij} \tag{4}$$

$$w_j=\frac{1+h_j}{n+\sum\limits_{j=1}^{n}h_j}\left(0\leqslant w_j\leqslant 1,\ \sum_{j=1}^{n}w_j=1\right) \tag{5}$$

式 (1) 中 G_i 是每个对象的雷电危险性评价指数, i=1,2,⋯,m; 式 (2) 为归一化处理, r_{ij} 为归一化后第 j 个评价指标的无量纲化值; 式 (4) 计算熵, h_j 为第 j 个指标的熵; 式 (5) 计算熵的权重, w_j 为第 j 个指标的权重值。

基于京津城际铁路沿线雷电数据, 以京津城际铁路沿线 33 个路段区间作为评价对象, 用雷电危险性评价指数的大小来衡量各对象受雷电影响程度。选取年平均地闪密度、雷电流幅值和陡度作为评价指标, 使用式 (2) 进行归一化处理去掉 3 个评价指标的量纲, 代入式 (4) 分别计算评价指标的熵, 进而代入式 (5) 计算出 3 个评价指标的权重依次为 0.248、0.337 和 0.415。将评价指标及权重系数代入式 (1), 可得到京津城际铁路沿线雷电危险性综合评价指数计算公式为

$$G_j=0.248\times W_{ij}+0.337\times W_{ij}+0.415\times W_{ij} \tag{6}$$

式 (6) 中 G_j 是京津城际铁路沿线第 j 路段的雷电危险性综合评价指数, W_{1j}、W_{2j} 和 W_{3j} 分别第 j 路段的年平均地闪密度、雷电流幅值和陡度, j=1,2,⋯,33。

2 京津城际铁路沿线雷电活动特征

2.1 时间分布特征

京津城际铁路沿线 2008—2018 年总地闪、正地闪、负地闪频次的年际变化和月变化如图 2 所示。从年际尺度来看 (图 2a), 总地闪超过 2 000 次的年份有 3 a, 分别是 2009 年、2013 年和 2014 年, 在 2013 年达到最高值, 超过 3 900 次, 在 2008 年为最低值, 不足 2013 年的四分之一。虽然在年际尺度上, 地闪频次没有明显的变化趋势, 但在 2014 年前, 总地闪频次变率较大, 年际变化显著, 而在 2014 年以后总地闪频次较为稳定, 变率显著减小, 每年约发生 1 100 次; 负地闪占总地闪的 90% 以上, 年际变化与总地闪基本一致; 相比于负地闪, 正地闪出现频率较低, 多数年份在 100 次以下, 年际变化较小, 2011 年以后, 正地闪频次稳定在每年 100 次左右。从月尺度来看 (图 2b), 京津城际铁路沿线闪电一般发生在 4—10 月, 且以 6 月、7 月和 8 月为主, 这三个月出现的闪电占全年闪电的 90% 以上。其中总地闪和负地闪在 8 月发生频次最高, 超过 6 500 次, 6 月和 7 月出现次数相差不大, 均在 4 000 次以上, 而正地闪则在 6 月发生频次最高。进一步将 6—8 月分为上半月

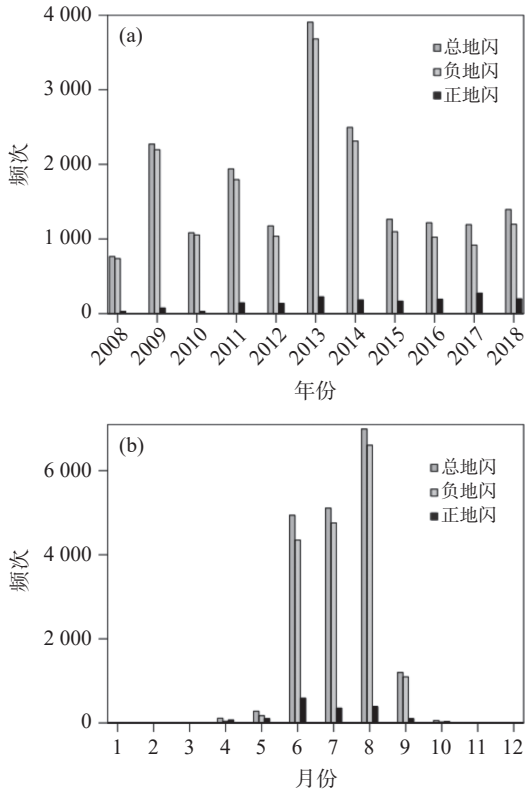


图 2 2008—2018 年京津城际铁路沿线总地闪和正、负地闪频次的年际变化 (a) 和月变化 (b)

Fig. 2 The (a) interannual and (b) monthly variations of total cloud-to-ground lightning, positive cloud-to-ground lightning and negative cloud-to-ground lightning frequency along the Beijing-Tianjin intercity railway during 2008-2018

(1—15 日)、下半月 (15 日以后), 统计不同阶段闪电发生的频次, 可发现闪电多出现在 6 月下半月、7 月下半月和 8 月上半月, 其中八月上半月发生的负地闪 (正地闪) 是下半月发生的负地闪 (正地闪) 的 3 倍 (2 倍) (表 1)。

图 3 给出京津城际铁路沿线多年累积总地闪、正地闪、负地闪频次的日变化。在日尺度上, 总地闪

表 1 京津城际铁路沿线 2008—2018 年 6—8 月上半月、下半月平均地闪次数

Table 1 Average frequency of ground lightning occurred along the Beijing-Tianjin intercity railway in the first and second half of June, July, and August during 2008-2018

月份	半月	总地闪/次	负地闪/次	正地闪/次
6月	上	1 427	1 157	270
	下	3 512	3 192	320
7月	上	2 169	2 002	167
	下	2 940	2 755	185
8月	上	5 202	4 930	272
	下	1 788	1 675	113

呈双峰结构, 易出现在下午、午夜, 不易出现在凌晨至上午, 其中 17 时 (北京时, 下同) 发生频率最高, 其次是 03 时, 频次均超过 1 200 次, 11 时发生频率最低, 不足 300 次。负地闪变化与总地闪变化较为一致。而正地闪易出现在傍晚前后 (16—21 时), 其中 18 时发生频率最高, 超过 160 次, 8 时发生频率最低, 不足 20 次。此外, 一天之中约有六分之五的时间, 正地闪占总地闪的比例不足 12%, 且多出现在凌晨至下午, 傍晚前后正地闪的比例有所增加, 18 时达到最高, 超过 20%。

综上分析表明, 京津城际铁路沿线地闪频次年际变化趋势不明显, 最高 (低) 值出现在 2013 年 (2008 年)。月时间尺度上, 闪电多出现在 6—8 月, 约占全年闪电的 90% 以上, 负 (正) 地闪在 8(6) 月发生频次最高。日时间尺度上, 负地闪呈双峰结构, 易出现在下午、午夜, 17 时发生频率最高, 正地闪呈单峰结构, 易出现傍晚前后, 18 时发生频率最高。

2.2 雷电流幅值和陡度的频率分布特征

图 4 为 2008—2018 年京津城际铁路沿线雷电流幅值和陡度的概率密度分布。对于雷电流幅值

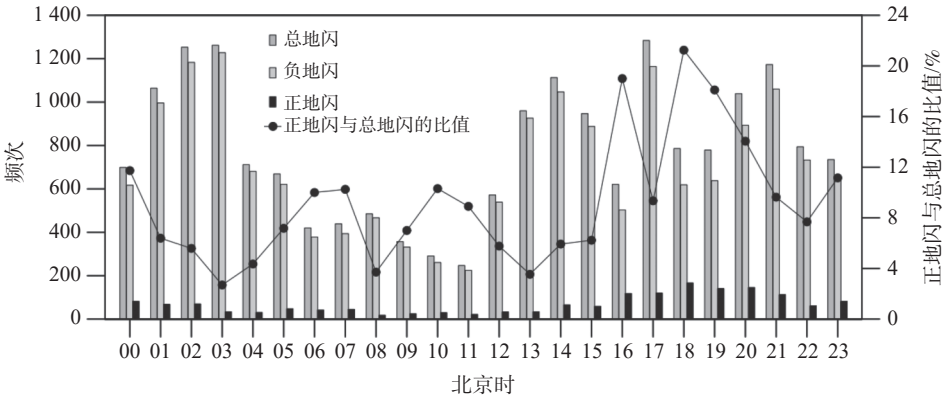


图 3 2008—2018 年 京津城际铁路沿线累积地闪频次及正地闪与总地闪比值的日变化

Fig. 3 Daily variation of cumulative cloud-to-ground lightning frequency and the ratio of positive cloud-to-ground lightning to total cloud-to-ground lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway during 2008-2018

(图 4a), 总地闪和负地闪低强度 (0~60 kA) 出现的概率较大, 约占 95%, 高强度 (60 kA 以上) 出现的概率相对较小, 约占 5%, 概率密度分布比较集中。其中总地闪强度最大频率区间是[20, 30) kA, 超过 30%, 其次是[10, 20) kA, 超过 25%, 两者之和约占 60%; 强度超过 100 kA 的次数却不足 2%。正地闪概率密度分布相对比较分散, 不同强度区间的频率在 4%~18% 之间变化, 最大频率区间是[10, 20) kA, 约为 18%, 其次是[20, 30) kA, 约为 15%。此外相比于负地闪, 正地闪高强度出现的概率显著增加, 超过 100 kA 的次数约占 10%, 这表明地闪在雷电流幅值上有显著的非对称性特征。

对于雷电流陡度 (图 4b), 总地闪、负地闪和正地闪频率分布较为相似, 三者最大频率区间都位于[6, 9) kA·μs^{-1}; 在超过 12 kA·μs^{-1} 以上的区间, 三者出现的频率基本一致; 中低等强度出现的频率较大, 高强度出现的频率相对较小, 出现在[3, 12) kA·μs^{-1} 的地闪次数都超过 60%, 其中总地闪和负地闪次数更是接近 70%。但总地闪、负地闪和正地闪频率分布也存在些差异。主要表现在: 1) 最大频率数值有所不同, 总地闪和负地闪最大频率比正地闪多 5% 左右; 2) 次最大频率区间不同, 其中总地闪和负地闪出现在[9, 12) kA·μs^{-1}, 正地闪出现在[3, 6) kA·μs^{-1}。

综上分析表明, 京津城际铁路沿线负地闪雷电流幅值和陡度频率分布都是低强度出现的频率较大, 高强度出现的频率较小, 频率密度分布比较集中, 其中总地闪强度最大频率区间是[20, 30) kA, 陡度最大频率区间是[6, 9) kA·μs^{-1}, 都超过 30%。

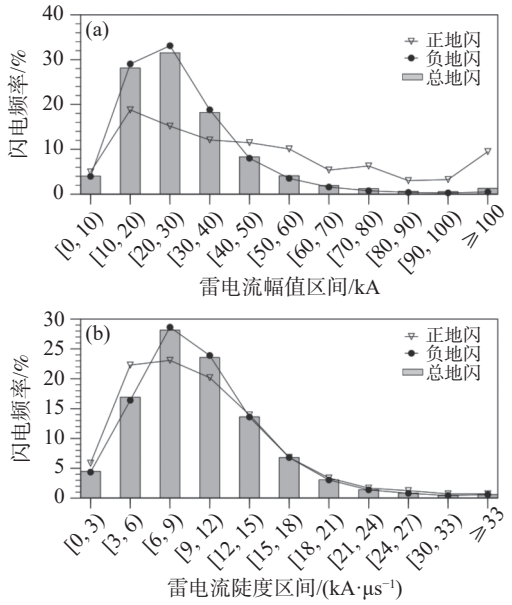


图 4 2008—2018 年京津城际铁路沿线雷电流幅值 (a) 和陡度 (b) 的概率密度分布

Fig. 4 Probability density distribution of (a) amplitude and (b) steepness of lightning peak current along the Beijing-Tianjin intercity railway during 2008-2018

2.3 空间分布特征

京津城际铁路沿线不同路段地闪密度的空间分布如图 5 所示。总地闪主要表现为负地闪的变化特征。除个别路段外 (P20、P28 和 P33), 京津城际铁路沿线地闪密度从北到南大致呈“增加-减少-增加-减少”分布。负地闪易出现在北京段南部-天津段北部 (P9—P16), 最易发生雷电路段出现在京津冀交界处 (P10—P11), 超过 2.4 次·km^{-2}·a^{-1}, 最不易发生雷电路段出现在北京南站附近, 不足 1 次·km^{-2}·a^{-1}。与负地闪密度变化不同的是, 正地闪密度从北到南基本呈“高-低-高-低”型分布, 即高频路段多出现在北京段北部 (P1—P6)、天津段中部 (P20—P27), 低频路段多出现在北京段南部-天津段北部 (P7—P19)、天津段东部 (P30—P33)。位于武清的 P15 路段在正、负地闪中出现频率都较高, 即易发生雷电。对比北京段和天津段可发现, 北京段 (P1—P10) 负地闪密度从北向南逐渐增加, 且地闪密度变化范围较大, 平均值低, 多数路段不易发生雷电; 天津段 (P12—P33) 负地闪密度变率较小, 平均值高, 多数路段易发生雷电, 最易发生雷电路段出现在 P28, 该区域的建筑物和防雷

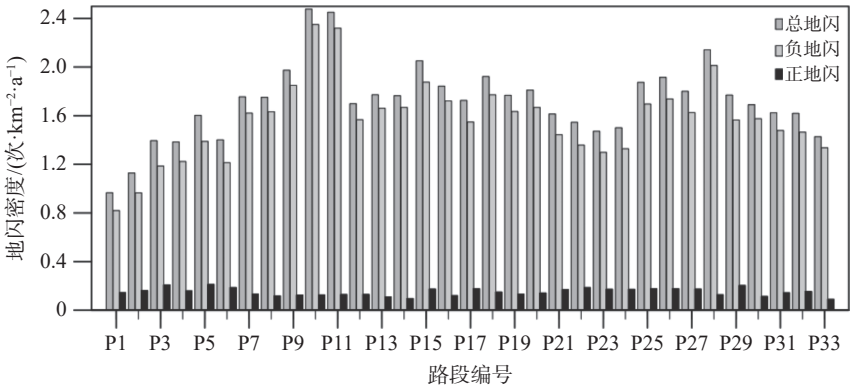


图 5 2008—2018 年京津城际铁路沿线不同路段地闪密度分布

Fig. 5 Distribution of ground cloud-to-lightning density in different sections along the Beijing-Tianjin intercity railway during 2008-2018

工程应增加防雷设施。

京津城际铁路沿线不同路段平均雷电流幅值的空间分布如图 6 所示。总地闪整体呈负地闪的变化特征, 表现为京津城际铁路沿线雷电流幅值大致呈“北高南低”型, 负地闪雷电流幅值高值区出现在北京段中北部 (P1—P7), 最高值出现在北京南站附近 (P1), 约为 34 kA, 低值区出现在北京段南部至天津段 (P8—P33), 最低值出现在 P21 段, 约为 23 kA。正地闪雷电流幅值变化大致也呈“北高南低”型, 但范围有所不同, 变化也更加复杂。高值区多出现在北京段-天津段北部 (P1—P16), 最高值出现在北京段最南部 (P10), 约为 65 kA, 低值区出现在天津段中东部 (P17—P33), 另外在雷电流幅值连续高低值路段也有相反的变化, 如连续低 (高) 值区 P25—P31 (P1—P16) 路段中的 P28 (P5、P6) 路段时雷电流幅值较高 (低)。对于雷电流幅值高值路段内的建筑物和防雷工程, 建议铁路部门一方面增加防雷设施, 另一方面加强巡视巡查及时检修, 避免或减轻雷击损失。

京津城际铁路沿线不同路段平均雷电流陡度的空间分布如图 7 所示。总地闪和负地闪的平均雷电流陡度变化特征较为一致, 大致呈“北高南低”型。以负地闪为例, 雷电流陡度高值区出现在北京段中北部 (P1—P7), 最高值出现在 P3 段, 约为 13 kA·μs^{-1}, 低值区出现在北京段南部 (P9—P11) 和天津段中东部 (P21—P33), 最低值出现在 P29 段, 约为 8 kA·μs^{-1}。正地闪平均雷电流陡度变化大致呈“高-低-高-低”型。其中高值区多出现在北京段北部 (P1—P4) 和北京段南部-天津段中西部 (P8—P25), 最高值出现在 P1 段, 约为 11.4 kA·μs^{-1}, 低值区出现在北京段中部 (P5—P7) 和天津段东部 (P26—P33), 最低值出现在滨海 (P30), 约为 7 kA·μs^{-1}。对于雷电流陡度高值路段, 这些路段内的第一类和第二类防雷建筑物应采用防雷电感应的措施, 如等电位连接、安装电涌保护器等。

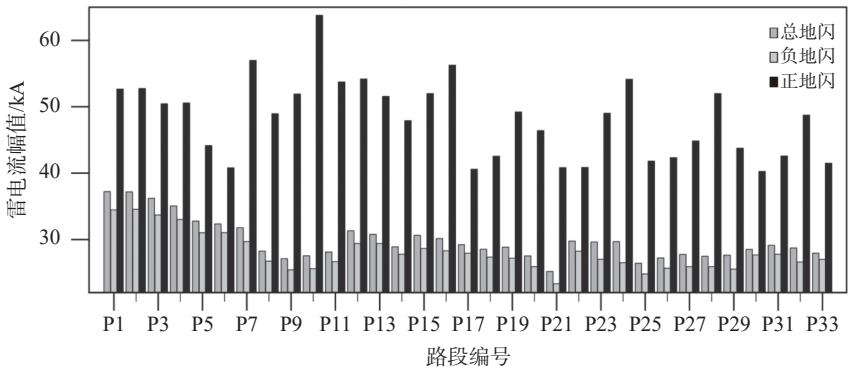


图 6 同图 5, 但为雷电流幅值

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the lightning peak current amplitude

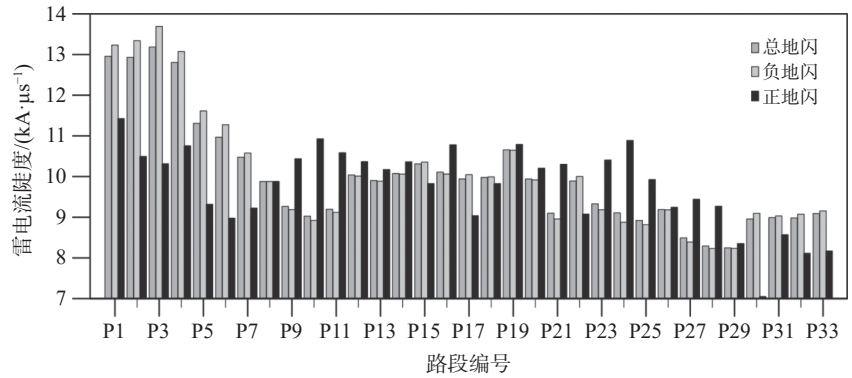


图 7 同图 5, 但为雷电流陡度

Fig. 7 Same as Fig.5, but for the lightning peak current steepness

综上分析表明, 京津城际铁路沿线地闪密度从北到南呈“增加-减少-增加-减少”的变化特征, 易发生雷电路段出现在京津冀交界处, 不易发生雷电路段主要出现在北京南站附近; 雷电流幅值呈“北高南低”型, 其中负地闪高值区出现在北京段中北部, 正地闪高值区多出现在北京段-天津段北部; 负地闪平均雷电流陡度呈“北高南低”型, 高值区出现在北京段中北部, 正地闪平均雷电流陡度变化呈“高-低-高-低”型, 高值区多出现在北京段北部和北京段南部-天津段中西部。

3 京津城际铁路沿线雷电危险性评估

京津城际铁路沿线不同路段雷电危险性评价指数如图 8 所示，可见雷电危险性评价指数大致呈“北高南低”型，即从北京段到滨海段呈降低趋势。将京津城际铁路沿线 33 个路段区间的雷电危险性评价指数按照自然断点法(余田野等, 2019)分为低、中、高 3 个风险等级，低-中、中-高风险分界线分别为 0.312 1 和 0.544 0，其中雷电危险性评价指数小于 0.312 1 的路段为低风险路段，这些区域受雷电影响相对较轻，主要出现在天津段东部 (P24—P33)；雷电危险性评价指数在 0.312 1~0.544 0 之间的路段为中风险路段，这些地区受雷电影响不强也不弱，主要出现在北京段南部至天津段中西部 (P6—P23)；雷电危险性评价指数大于 0.544 0 的路段为高风险路段，这些区域受雷电影响相对较大，主要出现在北京段中北部 (P1—P5)。

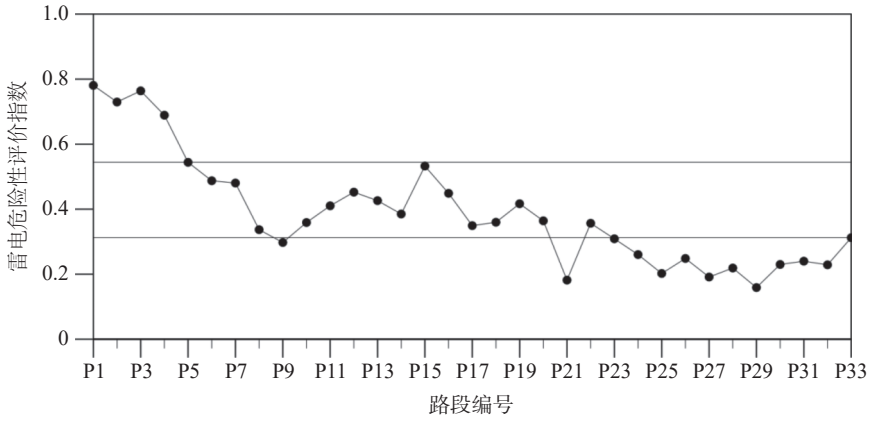


图 8 2008—2018 年京津城际铁路沿线不同路段雷电危险性评价指数分布。横线分别为低-中、中-高风险分界线

Fig. 8 Distribution of lightning risk evaluation index for different sections along the Beijing Tianjin intercity railway during 2008-2018. The horizontal lines are the low-medium and medium-high risk boundary lines, respectively

4 结论与讨论

本文基于京津冀 2008—2018 年 ADTD 闪电定位数据，首先分析了京津城际铁路沿线地闪频次的时间分布及雷电流幅值、陡度的频率分布，然后采用线路走廊网格法将京津城际铁路划分为 33 个路段区间，对比分析了雷电要素的空间特征，最后利用熵权综合评价方法建立适用于京津城际铁路沿线的雷电危险性评估模型，并用自然断点法将 33 个路段区间划分为不同风险等级，主要结论如下：

(1) 年际时间尺度上，京津城际铁路沿线地闪频次最大 (低) 值出现在 2013 年 (2008 年)。月时间尺度上，闪电多出现在 6—8 月，负 (正) 地闪在 8 (6) 月发生频次最高。日时间尺度上，负地闪呈双峰结构，易出现在下午、午夜，正地闪呈单峰结构，易出现在傍晚前后。

(2) 京津城际铁路沿线负地闪雷电流幅值和陡度频率分布都是低强度出现的频率较大，高强度出现的频率较小，频率密度分布比较集中。[10, 30) kA 的雷电流幅值和[3, 12) kA·μs^{-1} 的雷电流陡度频率都超过 60%。

(3) 京津城际铁路沿线地闪密度从北到南呈“增加-减少-增加-减少”变化，最易发生雷电路段出现在京津冀交界处。正、负地闪雷电流幅值都呈“北高南低”型，但范围有所不同。负地闪雷电流陡度呈“北高南低”型，高值区出现在北京段中北部；正地闪雷电流陡度变化呈“高-低-高-低”型，高值区多出现在北京段北部和北京段南部-天津段中西部。

(4) 京津城际铁路沿线雷电危险性等级从北京段到滨海段呈降低趋势。高风险路段主要出现在北京段中北部，中风险路段主要出现在北京段南部至天津段中西部，低风险路段主要出现在天津段东部。

需要指出的是，本文使用的雷电数据主要来源于京津冀二维闪电定位仪探测到的雷电流幅值、陡度等雷电参数，虽然具有一定的代表性，但随着三维闪电定位仪的陆续投入使用，以后会有更多表征雷电活动的参数可供研究，因此在后续的工作中将会尝试考虑其它雷电参数进行综合研究，使分析结果更全面。

参考文献 (References)：

陈家宏,王海涛,冯万兴,等.2006. 1000 kV 线路走廊的雷电参数及易闪线段分析[J].高电压技术,32(12):45−48. Cheng J H, Wang H T, Feng W X, et al. 2006. Analysis of lightning parameters and weak sections for 1000 kV UHV transmission line corridor [J]. High Voltage Engineering,32(12):45−48 (in Chinese). doi:10.3969/iissn.1003−6520.2006.12.010

程宏波,何正友,胡海涛,等.2013.高速铁路牵引供电系统雷电灾害风险评估及预警[J].铁道学报,35(5):21−26. Cheng H B, He Z Y, Hu H T, et al. 2013. Risk assessment and early warning of lightning disaster for traction power supply system of high speed railway [J]. Journal of the China Railway Society,35(5):21−26 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−8360.2013.05.004

程向阳,谢五三,王凯,等.2012.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,32(1):80−85. Cheng X Y, Xie W S, Wang K, et al. 2012. Method research of the risk zoning of thunder and lightning and its application over Anhui Province [J]. Journal of the Meteorological Sciences,32(1):80−85 (in Chinese). doi:10.3969/2012jms.0055

范海江,罗健.2008.铁路客运专线接触网防雷研究[J].铁道工程学报,25(8):80−83. Fan H J, Luo J. 2008. Research on the lightning protection of OCS in passenger dedicated lines [J]. Journal of Railway Engineering Society,25(8):80−83 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−2106.2008.08.019

高金阁,刘燕,朴文.2019.基于 ADTD 资料的北京地区雷电流幅值特征分析[J].暴雨灾害,38(1):92−96. Gao J G, Liu Y, Piao W. 2019. Analysis on the characteristics of lightning current amplitude in Beijing area using ADTD data [J]. Torrential Rain and Disasters,38(1):92−96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.01.012

金晨路,肖稳安,王学良.2011.湖北省雷电灾害易损性分析与区划[J].暴雨灾害,30(3):272−276. Jin C L, Xiao W A, Wang X L. 2011. Vulnerability analysis and regionalization for lightning disaster in Hubei [J]. Torrential Rain and Disasters,30(3):272−276 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2011.03.012

李国梁,朱传林,李俊,等.2013.武汉至广州高速铁路湖北段沿线雷电活动分析[J].暴雨灾害,32(4):374-378. Li G L, Zhu C L, Li J, et al. 2013. Analysis of lightning activity along the Wuhan-Guangzhou high-speed rail line in the section of Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters, 32(4): 374-378 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.04.011

李汝军.2011.客运专线接触网防雷加强措施探讨[J].电气化铁道,22(4):5−7. Li R J. 2011. Discussion on strengthen lightning protection measures for passenger line catenary [J]. Electric Railway,22(4):5−7 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−936X.2011.04.002

李霞,宋喃喃,刘银萍,等.2021.基于信息扩散理论的江苏省雷电灾害风险评估[J].暴雨灾害,40(5):564−568. Li X, Song N N, Liu Y P, et al. 2021. Lightning disaster risk assessment in Jiangsu province based on information diffusion theory [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):564−568 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.014

刘威, 欧阳霖.2023.基于 ArcGIS 的网格化雷电灾害风险评估方法研究与应用[J].沙漠与绿洲气象,17(2):170−175. Liu W, Ou Y L. 2023. Methods and application of grid lightning disaster risk assessment based on ArcGIS [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):170−175 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.022

马明,吕伟涛,张义军,等.2008.我国雷电灾害及相关因素分析[J].地球科学进展,23(8):856−865. Ma M, Lv W T, Zhang Y J, et al. 2008. Analysis of lightning disasters in China and their correlative factors [J]. Advance in Earth Science,23(8):856−865 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1001−8166.2008.08.009

宋喃喃,刘邕,李霞,等.2022.天津地区雷电流幅值及累积概率分布特征[J].气象与环境学报,38(3):137−143. Song N N, Liu Y, Li X, et al. 2022. Distributions of lightning current amplitude and cumulative probability in the Tianjin area [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(3):137−143 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2022.03.016

史培军,孔锋,叶谦,等.2014.灾害风险科学发展与科技减灾[J].地球科学进展,29(11):1205−1211. Shi P J, Kong F, Ye Q, et al. 2014. Disaster risk science development and disaster risk reduction using sience and technology [J]. Advance in Earth Scienee,29(11):1205−1211 (in Chinese). doi:10.11867/i.issn.1001−8166.2014.11.1205.1

王学良,刘学春,史雅静.2010.武汉地区云地闪电特征及防护效率研究[J].气象科技,38(6):805−809. Wang X L, Liu X C, Shi Y J. 2010. Lightning characteristics and protective efficiency in Wuhan area [J]. Meteorological Science and Technology,38(6):805−809 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2010.06.029

向念文,谷山强,陈维江,等.2015.京沪高铁沿线临近区域雷电分布特征[J].高电压技术,41(1):49−55. Xiang N W, Gu S Q, Chen W J, et al. 2015. Lightning distribution characteristics of Beijing-Shanghai high-speed railway corridor [J]. High Voltage Engineering,41(1):49−55 (in Chinese). doi:10.13336/j.1003−6520.hve.2015.01.007

余田野,王学良,袁海锋,等.2019.基于投影寻踪方法的湖北省雷电灾害风险区划[J].暴雨灾害,38(3):291−296. Yu T Y, Wang X L, Yuan H F, et al. 2019. Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on projection pursuit method [J]. Torrential Rain and Disasters,38(3):291−296 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.03.012

余田野,贺姗,张科杰,等.2023.基于改进层次分析法的湖北省雷电灾害风险区划[J].暴雨灾害,42(1):88−96. Yu T Y, He S, Zhang K J, et al. 2023. Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on imprved analytic hierarchy proess [J]. Torential Rain and Disasters,42(1):88−96 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−185

张祎,李浩,边学文.2018. 2007—2013 年浙江省雷电灾害特征统计分析[J].气象与环境科学,41(2):139−143. Zhang Y, Li H, Bian X W. 2018. Analysis of lightning disasters during 2007-2013 in Zhejiang Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences,41(2):139−143 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2018.02.021

张志访,卓建洪,赵紫辉,等.2010.广深铁路沿线雷电活动分析[J].电气化铁道,6:9−12. Zhang Z F, Zhuo J H, Zhao Z H, et al. 2010. Guangzhou-Shenzhen railway lightning activity analysis [J]. Electric Railway,6:9−12 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−936X.2010.06.003

(责任编辑　张 文)