

刘向科,康宁,邱黎,等.泰山景区地闪分布特征及与海拔高度关系研究[J].海洋气象学报,2021,41(4):102-108.
LIU Xiangke, KANG Ning, QIU Can, et al. Study on distribution characteristics of cloud-to-ground lightning and their correlation with altitude in Mount Tai[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(4): 102-108. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.010. (in Chinese)

泰山景区地闪分布特征及与海拔高度关系研究

刘向科^{1,2}, 康宁³, 邱黎⁴, 蒋如斌⁵, 陈乐奇^{1,2}, 邬铭法^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.山东省气象灾害防御技术中心, 山东 济南 250031; 3.国家卫星气象中心, 北京 100081; 4.山东省气候中心, 山东 济南 250031; 5.中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境观测重点实验室, 北京 100029)

摘要:我国因雷击造成的森林火灾和景区人员伤亡时有发生,近年来,泰山景区也多次发生雷击森林火灾和设备损坏等事故。为了有效地避免或降低雷击对泰山景区的危害,利用2007—2018年山东省闪电定位系统监测的地闪资料,对泰山景区闪电活动特征及其与地形、海拔的相关性进行分析,从而为有效地开展防雷减灾服务及为地方政府部门决策提供技术支撑。结果表明:虽然不同年份的落雷次数有所差别,但每年不同海拔高度落雷次数的分布特征比较一致,泰山景区年均地闪密度为 $1.82 \text{次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,地闪密度较高的区域集中在主峰和主峰西北方4~7 km附近山顶区域;地闪活动的季节性分布特征明显,夏季(6—8月)地闪次数约占全年总地闪次数的86.86%,海拔900 m以下落雷次数较多;日落雷次数的高峰时段为14:00—20:00,落区集中在200~800 m之间;正闪强度均值随海拔升高波动较大,负闪强度随海拔的变化较小;地闪密度随海拔升高呈现上升趋势,海拔高度<800 m的区域地闪密度随海拔增加呈缓慢上升的趋势,海拔高度>1 000 m的区域地闪密度随海拔增加呈明显上升的趋势,同时发现随海拔高度的增加地闪密度和陡度呈现增大和增高的趋势,800 m以上尤其明显,可见泰山景区地闪密度与陡度和海拔高度呈现较好的正相关性。

关键词: 闪电特征; 下垫面; 相关性; 地闪; 时间变化; 空间分布; 海拔

中图分类号: P427.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)04-0102-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.010

Study on distribution characteristics of cloud-to-ground lightning and their correlation with altitude in Mount Tai

LIU Xiangke^{1,2}, KANG Ning³, QIU Can⁴, JIANG Rubin⁵, CHEN Leqi^{1,2}, WU Mingfa^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Disaster Prevention Center, Jinan 250031, China; 3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 4. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 5. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The forest fires and casualties caused by lightning strokes occur from time to time in China. In recent years, there have been many accidents such as lightning strokes, forest fires, and equipment damage in Mount Tai. In order to effectively avoid or reduce the harm of lightning strokes to Mount Tai,

收稿日期:2020-07-24; 修订日期:2020-12-09

基金项目:山东省气象局科研项目(2020sdqxz07,2019sdqxm10)

第一作者:刘向科,男,高级工程师,主要从事雷电特征分析和雷电防护相关研究,lxk81216@sina.com。

通信作者:康宁,男,硕士,高级工程师,主要从事气象卫星技术研究,kangn@cma.gov.cn。

this paper analyzes the lightning characteristics of Mount Tai and its correlation with terrain and altitude using cloud-to-ground (CG) lightning data monitored by Shandong Lightning Location System from 2007 to 2018, in order to provide technical support for effective lightning protection, disaster reduction, and decision-making of local government departments. The results are as follows. 1) Although the number of lightning strokes in different years is different, the distribution characteristics of the number of lightning strokes at different altitudes are relatively consistent every year. The annual mean CG lightning density in Mount Tai is $1.82 \text{ times} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and the areas with higher CG lightning density are concentrated in the main peak and the top areas 4–7 km to the northwest of the main peak. 2) The seasonal distribution of CG lightning is obvious. The number of CG lightning in summer (from June to August) accounts for about 86.86% of the total number in the whole year and the number of lightning below 900 m above sea level is more. 3) The peak period of the daily number of lightning is between 14:00 and 20:00 and the falling area is concentrated between 200 m and 800 m. 4) The mean value of positive CG lightning intensity fluctuates greatly with the increase of altitude, while that of the negative CG lightning intensity changes slightly with altitude. 5) The CG lightning density increases with the increase of altitude. The density increases slowly with the increase of altitude below 800 m and increases obviously over 1 000 m. What's more, the density and steepness of CG lightning increase with the increase of altitude, especially over 800 m. It can be seen that the CG lightning density in Mount Tai has a good positive correlation with steepness and altitude.

Key words lightning characteristics; underlying surface; correlation; cloud-to-ground lightning; temporal variation; spatial distribution; altitude

引言

闪电是伴随雷暴天气系统的一种天气现象,研究闪电特征及其时空分布,对了解雷暴发生规律和雷电灾害的防御具有非常重要的意义^[1-2]。闪电活动除与天气系统有关外,还与地形等因素有紧密的关系,存在明显的地域性特征^[3-5],不同地区的闪电活动受当地的气候、地形和环境条件的影响而呈现出较大差别。KILINC and BERINGER^[6]发现澳大利亚南部闪电密度和海拔成正相关,北部这一特征却不明显。BOURSCHEIDT et al.^[7]研究发现巴西南部地区地形坡度对闪电活动的影响大于海拔的影响。ZAJAC and RUTLEDGE^[8]对美国闪电密度与地形进行分析,发现地形与闪电密度和雷暴日之间存在较好的相关性。国内成鹏伟等^[9]研究发现北京市与成都市地闪密度与海拔高度呈明显的负相关。刘海兵等^[10-11]对不同尺度地闪密度与海拔进行分析发现,江西省地闪密度与海拔呈负相关,但江西省的三清山地闪密度在 800 m 以下随海拔的上升而减小,800 m 以上随海拔上升表现出明显的增长趋势,不同地区及不同尺度地闪密度和海拔之间存在不同的相关性^[12]。目前山东地区尤其是泰山景区的地闪分布特征及与下垫面关系研究相对较少。

泰山位于中国东南部的山东省泰安市内,是山东省最高大的山脉,地势较为险峻,有山峰 150 多座。泰山景区地理范围为 $117.0^{\circ} \sim 117.2^{\circ} \text{ E}$, $36.20^{\circ} \sim 36.36^{\circ} \text{ N}$, 约 300 km^2 , 海拔高度在 150 ~ 1 545 m 之间。冯桂力等^[13]、刘向科等^[14]和唐巧玲等^[15]在研究山东地区闪电特征时,均发现泰山景区为山东的闪电高发区。本文利用山东省 2007—2018 年 12 a 的地闪数据与地理高程数据,分析地形、高度对地闪分布特征的影响,在此基础上,分析泰山的地闪密度、雷电流强度空间分布特征,同时对闪电的时空分布与海拔高度的关系进行分析。由此可对制定相应的雷电防御措施,减少雷击灾害造成的人员伤亡、森林火灾和财产损失提供科学指导,并为地方政府部门决策提供技术支撑。

1 资料来源

文中所用闪电资料由山东省雷电监测定位网提供,该系统由 13 个 ADTD 闪电定位仪组成(图 1),可覆盖山东 95% 以上陆地区域,探测效率为 90% 左右,其定位精度为 300 m,地闪雷电波形鉴别率达 95%,测向精度理论随机误差为 0.5° ,时钟同步精度为 $0.1 \mu\text{s}$ 。此系统能够提供闪电事件发生的时间、位置、强度等数据^[16-17],根据相关专家对数据

质量控制的研究成果^[18],剔除强度值小于 10 kA 的正地闪。

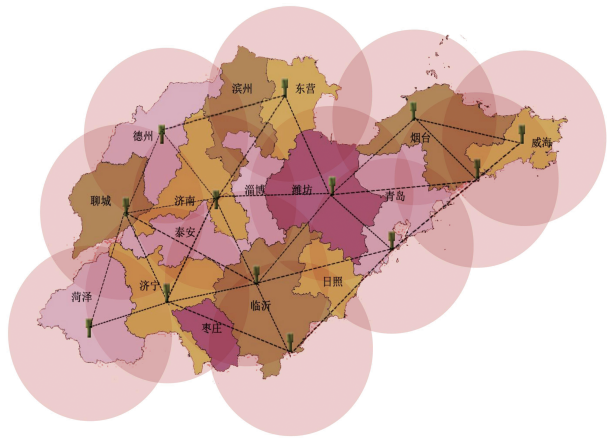


图1 山东省雷电监测定位网

Fig.1 Shandong Lightning Detection and Location Network

文中所使用泰山景区地貌、海拔数据为美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 与日本经济产业省 (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 共同推出的最新地球电子地形数据,分辨率为 30 m,资料获取地址为 <http://bjdl.gscloud.cn/search>。

2 落雷次数与海拔高度相关性分析

2.1 年落雷次数与海拔高度关系变化特征

不同海拔高度所占面积与对应海拔内落雷次数占总闪比例分布趋势基本一致(图 2a),即所占面积越大落雷次数相对较多。整体来看:1 000 m 以下的区域占总面积的 94.96%,对应的落雷次数占总闪的 92.20%;同时发现海拔 600 m 以下区域占总面积的 66.67%,对应的落雷次数占总闪的 55.27%,此区域虽然占总面积较多,但落雷次数占总闪比例不高;而海拔 600 m 以上区域占总面积的

33.33%,对应的落雷次数占总闪的 44.93%,其中海拔 1 300 m 以上区域占总面积的 0.28%,但对应的落雷次数占总闪的 2.29%,这也反映了海拔较高的区域比海拔较低的区域更容易发生雷击。由年际变化趋势(图 2b)可知,2007、2010 和 2012 年 1 000 m 以下落雷次数较多,其中 2010 年落雷次数最多。整体来看,虽然不同年份的闪电数量有所差别,但每年不同海拔高度落雷次数的分布趋势比较一致,即:100~500 m 落雷次数占的比重最大;其次为 500~1 000 m 落雷次数较多;1 000 m 以上落雷次数较少。

2.2 月落雷次数与海拔高度关系变化特征

泰山景区地闪活动的季节性分布特征明显(图 3a),春季(3—5 月)地闪活动逐渐增多,夏季(6—8 月)地闪次数约占全年总地闪次数的 86.86%,秋季(9—11 月)地闪活动迅速减少,冬季仅 2 月出现过少量地闪,11 月、12 月和 1 月没有出现地闪活动。正闪比的季节变化与地闪频数的季节变化基本相反,正闪比最高出现在 4 月。泰山景区平均海拔在 600 m 左右,由图 3b 可以看出落雷区域主要集中在海拔 1 000 m 以下,约占总闪的 90%以上,其中 8 月海拔在 100~500 m 之间时落雷次数相对较多,由于夏季 7、8 月山东地区受西南季风和副热带高压的影响,强对流天气较多,泰山受地形热力和动力特征影响^[19-20],海拔 900 m 以下落雷次数较多。

2.3 日落雷次数与海拔高度关系变化特征

由泰山景区落雷次数日变化(图 4a)可见:总地闪数与负闪数呈多峰震荡分布,在 06 时和 14—20 时出现峰值,其中 19—20 时最高,00—05 时及 08—13 时为低值时段;正闪比在 00—08 时较高。图 4b 为地闪频数随海拔高度每升高 100 m 的日变化分布,可以看出落雷区域主要集中在 900 m 以下;06

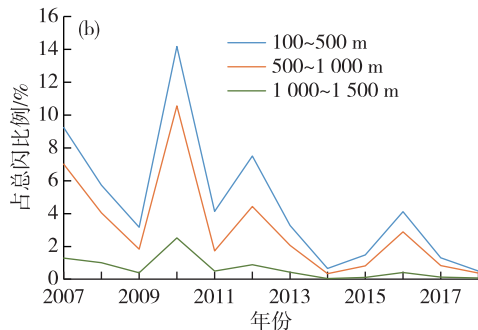
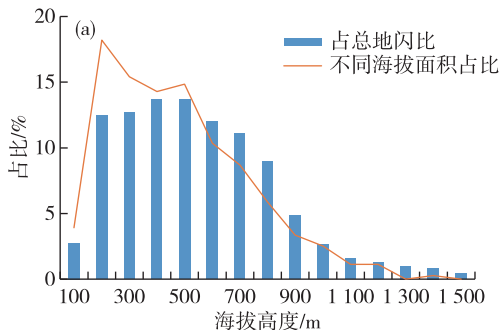


图2 地闪次数与海拔高度关系变化特征(a)和不同海拔高度地闪年变化特征(b)

Fig.2 Variation of cloud-to-ground (CG) lightning frequency and altitude (a) and annual variation of CG lightning at different altitudes (b)

时落雷高度在海拔 400~800 m 明显增加,14—20 时在海拔 200~800 m 落雷次数最多。由于太阳辐射在中午达到最强,大气在午后容易形成不稳定层

结,当受山体抬升作用影响时,比较容易出现强对流天气,所以该时段闪电活动最为活跃^[21-23]。

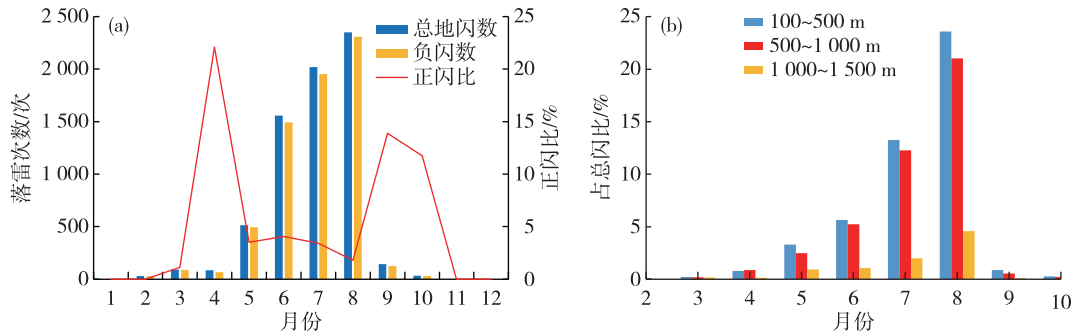


图3 泰山景区闪电月变化特征(a)和不同海拔高度闪电月变化特征(b)

Fig.3 Monthly variation of lightning in Mount Tai (a) and monthly variation of lightning at different altitudes (b)

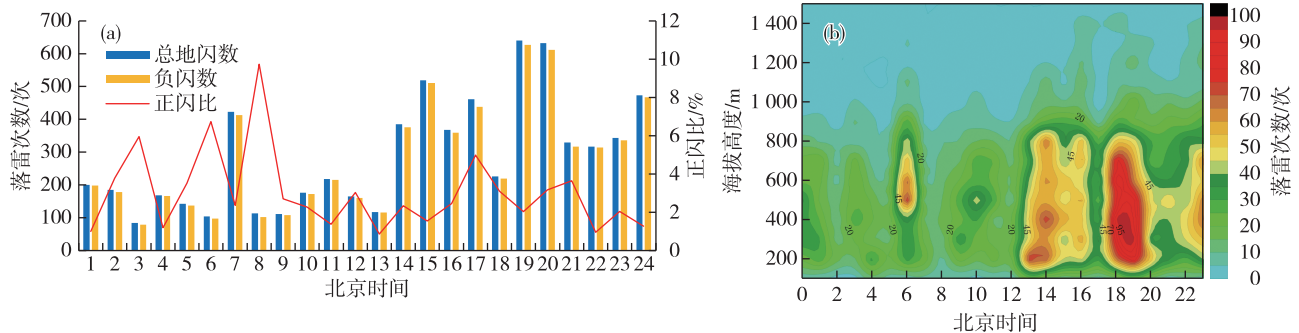


图4 泰山景区地闪次数日变化(a)和日落雷次数与海拔高度关系(b;色阶代表地闪次数)

Fig.4 Diurnal variation of the number of CG lightning (a) and relationship between daily number of lightning and altitude (b; color scale for the number of CG lightning) in Mount Tai

3 地形对地闪空间分布的影响

图 5a 为泰山景区遥感影像与地闪密度叠加图。泰山景区地势呈现北高南低、西高东低的特征,北部为山区,西南部为低山丘陵,东南部为平原。泰山景区年均地闪密度为 $1.82 \text{ 次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,高于周边区域年平均值,景区地闪密度高值区位于泰山主峰(A 峰,1 545 m)峰顶区域,主峰西北方 4 km 附近 C 峰(964 m)峰顶的北侧和主峰西北方 7 km 附近 D 峰(886 m)峰顶区域的地闪密度也相对较高。

通过地闪密度与海拔高度等值线(图 5b)可看出,主峰(A 峰)在海拔 1 200 m 以上区域地闪密度最高,年地闪密度在 $4.90 \text{ 次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。主峰南侧和东侧 3 km 以上区域海拔迅速降低到 500 m 左右,其中主峰南 10 km 附近垂直落差在 1 300 m 以上。随着地形的平缓,地闪密度也随之减少,仅主峰东北侧山脊处地闪密度相对较高。C 峰(964 m)的北侧地闪密度大于 $3.00 \text{ 次} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,D 峰

(886 m)峰顶地闪密度相对较高,泰山景区闪电密度高值区主要位于主峰和主峰西北方山峰的峰顶附近。根据陈善炳^[24]对 1959—1996 年 6—8 月泰山顶逐日雷暴方向统计结论可知,雷暴移动方向基本规律为自西、北半面向东、南半面移动。结合泰山景区地形特点,雷暴自西北方进入泰山景区,受地形抬升作用,首先在 C 峰、D 峰处放电,虽然 B 峰(1 130 m)海拔较高,但相对 C 峰、D 峰来说,高度差异并不明显且距离较近,所以 B 峰闪电密度较低,雷暴继续向东南移动,由于主峰相对陡峭且海拔较高,加剧了对流的发展,因此主峰闪电密度最高。

4 雷电流幅值随海拔高度变化规律

闪电强度是衡量闪电破坏能力的重要因素之一^[25],通过对闪电监测资料统计分析,泰山景区地闪平均电流强度为 11.91 kA,正闪的平均电流强度为 45.42 kA,负闪的平均电流强度为 11.01 kA。

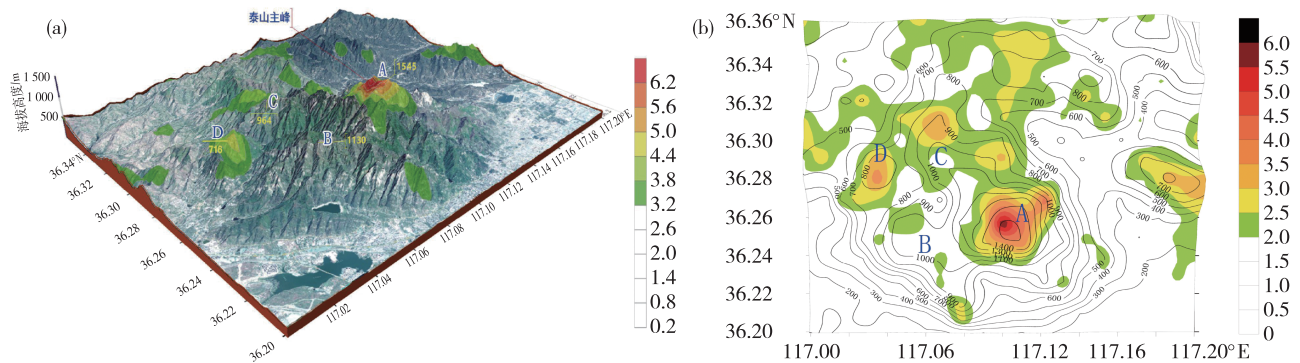


图5 泰山景区遥感影像与地闪密度分布(a;色阶为地闪密度,单位:次·km⁻²·a⁻¹)和海拔高度与地闪密度分布(b;等值线为海拔高度,单位:m;色阶为地闪密度,单位:次·km⁻²·a⁻¹)

Fig.5 Remote sensing image and distribution of CG lightning density (a; color scale for CG lightning density, units: times · km⁻² · a⁻¹) and altitude and distribution of CG lightning density (b; isoline for altitude; color scale for CG lightning density, units: times · km⁻² · a⁻¹) in Mount Tai

为进一步了解地闪的电流强度分布特征,将地闪根据电流强度绝对值以5 kA为间隔分为21个等级,不同等级的地闪百分率变化曲线(图6a)显示,电流强度在5~10 kA的地闪比例最大,约为31.28%,强度主要集中在0~20 kA之间,占总数的92.43%。正闪电流强度在15~20 kA之间的占正地闪总数的比例最大,约为20.83%,正地闪主要集中在15~40 kA之间,占正地闪总数的76.19%。电流强度在5~10 kA之间的负闪占负闪总数的比例最大,约为32.11%,负地闪主要集中在0~20 kA之间,占负闪总数的93.86%。由于正地闪占总闪的比例非常低,负地闪占绝大多数,所以总闪的电流强度分布曲线与负地闪接近。

由图6b可以看出,在同一海拔高度处,正闪强度大于负闪强度,正闪强度均值随海拔高度升高波动较大。900 m以下变化较小,正闪强度均值为40.64 kA;在500 m时有轻微下降,正闪强度均值平

均为25.98 kA;在900~1 100 m之间,随着海拔高度升高闪电强度均值明显上升,海拔高度1 100 m时为最高值89.40 kA;在1 200~1 500 m之间,随着海拔高度升高闪电强度均值波动中下降,海拔高度1 500 m时为最低值15.61 kA。负闪强度随海拔高度的变化不大,比较稳定,负闪强度均值在14.06 kA附近,最大负闪强度均值为20.65 kA,在海拔高度1 400 m处。由于正地闪强度远大于负地闪,正地闪造成的危害相对较高。

5 地闪密度与海拔高度相关性分析

将海拔高度按100 m划分为高度间隔,对泰山地区2007—2018年均地闪密度(0.01°×0.01°网格)进行分析,发现地闪密度随海拔高度上升呈现上升趋势(图7a),海拔高度小于800 m的区域地闪密度随海拔高度增加呈缓慢上升的趋势,平均值在1.80次·km⁻²·a⁻¹左右,海拔高度大于1 000 m的

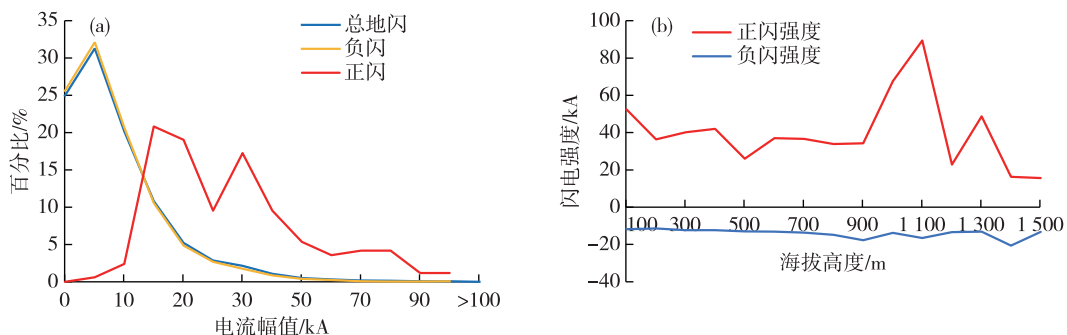


图6 雷电流强度分布(a)和雷电流平均强度随海拔高度变化曲线(b;单位:kA)

Fig.6 Distribution of lightning current intensity (a) and variation curve of average lightning current intensity with altitude (b; units: kA)

区域地闪密度随海拔高度增加呈明显的上升趋势,利用线性回归方法拟合海拔高度(x)与地闪密度(y)的关系,得出 $R^2=0.292\ 4$,地闪密度与海拔高度呈现正相关,即高度越高,闪电密度越高,雷击事故发生的概率也越大。

将海拔高度和地闪密度均按 $0.01^\circ\times 0.01^\circ$ 网格

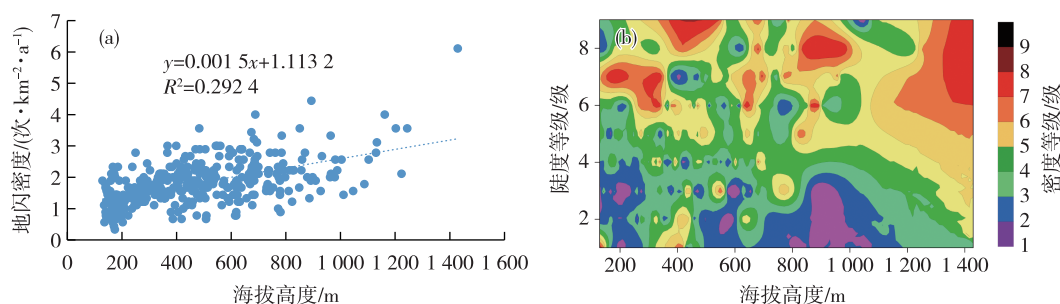


图7 地闪密度与海拔高度关系的变化特征(a)和闪电密度随陡度与海拔的变化曲线(b;色阶代表闪电密度等级)

Fig.7 Variation of CG lightning density with altitude (a) variation curve of lightning density with steepness and altitude (b; color scale for grade of lightning density)

6 讨论与结论

6.1 讨论

虽然泰山景区地闪密度与海拔高度呈现较好的正相关,但紧邻主峰的B峰(1 130 m)海拔相对较高,地闪密度却低于 $2.5 \text{次}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。通过图5b可以看出主峰A峰西北侧地闪密度高值区在C峰的东侧、北侧山坡和西侧D峰(886 m)附近,整体来看主峰A峰西北侧地闪密度高值区位于B、C山峰的西北方。形成这一现象的原因可能是:由于夏季泰山景区雷暴来向以西北方居多^[26],受地形抬升作用,雷暴能量会在B、C山峰的西北方山坡处进行释放,当到达B、C山峰时能量已经释放完成;同时B峰、C峰山顶与主峰A峰距离较近且相对A峰比较平缓;另外可能是泰山主峰地形阻挡了低层的南风暖湿空气,使其沿山区西侧绕流北上到泰山北部,使得主峰西北侧低层大气增暖增湿,增强此处的位势不稳定,从而导致B、C山峰西北侧山坡地闪密度较高。

6.2 结论

1)泰山景区海拔高度在200~500 m之间的年落雷次数呈明显的上升趋势,海拔600 m以上年闪电数量相对较少;泰山景区年均地闪密度为 $1.82 \text{次}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,地闪密度较高的区域集中在主峰和主峰西北方4~7 km附近的山顶区域。虽然不同年份的闪电数量有所差别,但年闪电密度分布趋势比较一致。

进行划分,将中心网格与其周围相邻网格数据按从小到大排序(共 $3\times 3=9$ 个等级),见图7b,该等级可以较好地反映相对陡度与相对地闪密度之间的关系,可以看出随海拔高度的增加地闪密度和陡度均呈现增高的趋势,800 m以上尤其明显,可见泰山景区地闪密度与陡度呈现较好的正相关。

2)地闪活动的季节性分布特征明显。夏季(6—8月)地闪次数约占全年总地闪次数的86.86%,海拔900 m以下落雷次数较多;落雷次数的高峰时段是14—21时,峰值时段闪电主要落区集中在200~800 m之间。

3)正闪强度均值随海拔升高波动较大,900 m以下变化较小,在900~1 100 m之间,随着海拔升高闪电强度均值明显上升,在1 200~1 500 m之间,随着海拔升高闪电强度均值波动中下降;负闪强度随海拔的变化不大。

4)地闪密度随海拔上升呈现上升趋势,海拔高度小于800 m的区域地闪密度随海拔增加呈缓慢上升的趋势,平均值在 $1.8 \text{次}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右,海拔高度大于1 000 m的区域地闪密度随海拔增加呈明显的上升的趋势,地闪密度与海拔高度呈现正相关;同时发现随海拔高度的增加地闪密度和陡度均呈现增高的趋势,800 m以上尤其明显,可见泰山景区地闪密度与陡度呈现较好的正相关。

泰山景区在森林防火、旅游设施建设和游客安全等方面可参考以上结论,有效减少或避免因雷电导致的相关危害。

参考文献:

- [1] 鄧秀书.全球闪电活动与气候变化[J].干旱气象,2003,21(3):69-73.
- [2] 蒋如斌,鄧秀书,王彩霞,等.峰值电流达几千安量级的闪电M分量放电特征及机理探讨[J].物理学报,

- 2011, 60(7):867-874.
- [3] 鄯秀书,周筠珺,袁铁.卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异[J].地球物理学报,2003,46(6):743-750,885.
- [4] BOCCIPPIO D J, GOODMAN S J, HECKMAN S. Regional differences in tropical lightning distributions[J]. J Appl Meteor, 2000, 39(12):2231-2248.
- [5] DISSING D, VERBYLA D L. Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation[J]. Can J Forest Res, 2003, 33(5):770-782.
- [6] KILINC M, BERINGER J. The spatial and temporal distribution of lightning strikes and their relationship with vegetation type, elevation, and fire scars in the Northern Territory[J]. J Climate, 2007, 20(7):1161-1173.
- [7] BOURSCHEIDT V, JUNIOR O P, NACCARATO K P, et al. The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil[J]. Atmos Res, 2009, 91(2/3/4):508-513.
- [8] ZAJAC B A, RUTLEDGE S A. Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999[J]. Mon Wea Rev, 2000, 129(5):999-1019.
- [9] 成鹏伟,周筠珺,赵鹏国,等.北京与成都城市下垫面闪电时空分布特征对比研究[J].成都信息工程大学学报,2018,33(3):326-334.
- [10] 刘海兵,张云峰,李玉塔.江西闪电特征海拔高度影响分析[J].气象科技,2017,45(2):342-348.
- [11] 刘海兵,姚平安,卢秋芳,等.山地环境雷电活动特征分析:以三清山为例[J].高原山地气象研究,2017,37(2):50-57.
- [12] 鄯秀书,TOUMI R.卫星观测到的青藏高原雷电活动特征[J].高原气象,2003,22(3):288-294.
- [13] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等.山东地区闪电的特征分析[J].应用气象学报,2002,13(3):347-355.
- [14] 刘向科,李海雷,胡先锋,等.利用 LIS 分析华东地区及附近海域雷电活动特征[J].气象水文海洋仪器,2017(4):114-120.
- [15] 唐巧玲,孙荆茶,李杰,等.2008 年山东地区闪电活动特征分析[J].山东气象,2009,29(增刊):1-3.
- [16] 高金阁,刘燕,朴文.基于 ADTD 资料的北京地区雷电流幅值特征分析[J].暴雨灾害,2019,38(1):92-96.
- [17] 杨学斌,代玉田,吕伟琦.闪电发生的环境场特征及闪电活动的预报[J].海洋气象学报,2019,39(3):96-102.
- [18] CUMMINS K L, MURPHY M J, BARDO E A, et al. Combined TOA/MDF technology upgrade of U. S. National Lightning Detection Network[J]. J Geophys Res Atmos, 1998, 103(D8):9035-9044.
- [19] 邱黎,王栋成,李娟,等.风廓线雷达垂直速度与地面降雨关系研究:以济南为例[J].海洋气象学报,2017,37(4):91-100.
- [20] 杨晓霞,高留喜,宋佳嘉,等.山东夏季强降水的影响系统和物理量特征[J].海洋气象学报,2018,38(3):57-66.
- [21] 张芹,苏莉莉,张秀珍,等.山东一次暖区暴雨的环境场特征和触发机制[J].干旱气象,2019,37(6):933-943.
- [22] 石湘波,黄旋旋,沈一平,等.不同下垫面雷暴雷达回波特征与地闪的关系[J].气象科技,2015,43(5):880-887.
- [23] 高晓梅,俞小鼎,马守强,等.鲁中地区强对流天气的气候特征及相关环境参数特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):43-54.
- [24] 陈善炳.泰山雷暴气候特征[J].气象,1998,24(3):2.
- [25] QIE X S, JIANG R B, YANG J. Characteristics of current pulses in rocket-triggered lightning[J]. Atmos Res, 2014, 135-136:322-329.
- [26] 侯淑梅,俞小鼎,张少林,等.山东中西部后向发展雷暴初步研究[J].气象学报,2015,73(5):819-836.