

王楠喻,杨成芳,冯桂力,等,2026.渤海海效应降雪地闪活动统计特征[J].气象,52(1):83-93. Wang N Y, Yang C F, Feng G L, et al, 2026. Statistical characteristics of cloud-to-ground lightning activity associated with sea-effect snowfall over the Bohai Sea [J]. Meteor Mon, 52(1):83-93(in Chinese).

## 渤海海效应降雪地闪活动统计特征<sup>\*</sup>

王楠喻<sup>1,2,3</sup> 杨成芳<sup>4</sup> 冯桂力<sup>2,5</sup> 戈 瑶<sup>4</sup> 范子琪<sup>4</sup> 曹 倩<sup>4</sup>

1 山东省烟台市气象局,烟台 264003

2 中国气象局雷电重点开放实验室,北京 100081

3 长岛国家气候观象台,山东长岛 265800

4 山东省气象台,济南 250031

5 山东省气象科学研究所,济南 250031

**提 要:** 利用地面观测、闪电定位、多普勒天气雷达等观测数据和 ERA5 再分析数据,对 2017—2023 年 11 月至次年 2 月山东半岛海效应降雪过程地闪活动特征进行研究。结果表明:在渤海海效应降雪过程中,11 月地闪次数最多,12 月至次年 1 月逐月减少,2 月无地闪出现;地闪日变化呈多峰值结构,峰值主要位于凌晨至上午。将伴有地闪的海效应降雪分为雨夹雪类和纯雪类后发现,雨夹雪类的地闪数量更多、分布范围更广;90% 的纯雪类海效应降雪雷暴日中,地闪频次低于 10 次。海效应降雪地闪在渤海上及陆地上均有出现,陆地上的分布与山脉地形有关;雨夹雪类地闪主要分布在渤海上,而纯雪类地闪主要分布在陆地上,多出现在强降雪区域附近,并且位于强降雪中心的西北方向(即上风向);雨夹雪类地闪发生时的对流发展高度高于纯雪类。地闪出现的时间和位置对强海效应降雪的强降雪时段和落区的短时临近预警有较好的指示意义,海效应降雪地闪发生之后的 0~2 h 降雪强度显著增强,地闪发生地附近的强降雪中心可达暴雪量级。

**关键词:** 地闪,海效应降雪,短时临近预警,暴雪

**中图分类号:** P427, P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.073101

## Statistical Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning Activity Associated with Sea-Effect Snowfall over the Bohai Sea

WANG Nanyu<sup>1,2,3</sup> YANG Chengfang<sup>4</sup> FENG Guili<sup>2,5</sup> GE Yao<sup>4</sup> FAN Ziqi<sup>4</sup> CAO Qian<sup>4</sup>

1 Yantai Meteorological Office of Shandong Province, Yantai 264003

2 CMA Key Laboratory of Lightning, Beijing 100081

3 Changdao National Climatology Observatory, Shandong Changdao 265800

4 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

5 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

**Abstract:** Based on surface observations, lightning location data, Doppler radar data, and ECMWF ERA5 reanalysis data, the characteristics of cloud-to-ground (CG) lightning activity of the sea-effect snowfall with CG lightning in Shandong Peninsula from November to the following February during 2017—2023 are studied. The results are as follows. The CG lightning mainly occurs in the sea-effect snowfall over the Bohai Sea from November to the following January, with the highest frequency in November and gradually

<sup>\*</sup> 烟台市科技创新发展计划(2024YD097)、长岛国家气候观象台开放基金项目(2024cdkfm05)、环渤海区域海洋气象科技协同创新项目(QYXM202411)、山东省自然科学基金项目(ZR2025LQX001、ZR2023MD025)、烟台市气象局面上项目(2026ytqxm07)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B27、2024LASW-B03)和中国气象局雷电重点开放实验室开放课题(2024KELL-B010)共同资助

2024 年 12 月 30 日收稿; 2025 年 7 月 31 日收修定稿

第一作者:王楠喻,主要从事天气预报业务及海气相互作用相关研究. E-mail: wangnanyu@stu.ouc.edu.cn

通讯作者:杨成芳,主要从事天气预报业务及降雪研究. E-mail: cf\_yang70@hotmail.com

decreasing frequency from December to the following January, and there is no CG observed in February. The diurnal variation of CG lightning shows a multi-peak structure, primarily from wee hours to morning. The frequency and distribution range of CG lightning in sea-effect snowfall of sleet type are greater than those of pure snow type. 90% of the thunderstorm days with pure snow type sea-effect snowfall have CG lightning less than 10 times. CG lightning during the two types of sea-effect snowfall is distributed both over the Bohai Sea and on land, and the distribution on land is connected to the terrain. CG lightning of sleet type is mainly distributed over the Bohai Sea, whereas CG lightning of pure snow type is mainly distributed on land, generally near areas of heavy snow, and in the northwest direction of the center of heavy snow (upwind direction). The convective development height of the sleet type CG lightning is higher than that of pure snow type. The occurrence time and location of CG lightning have a certain indicative effect on short-time imminent warning of snowfall period and location of heavy sea-effect snowfall, and the snowfall intensity increases significantly within 0–2 h after the occurrence of CG lightning in sea-effect snowfall. At the heavy snowfall centers near CG lightning locations, snowfall intensity may reach the level of blizzards.

**Key words:** cloud-to-ground (CG) lightning, sea-effect snowfall, short-time imminent warning, blizzard

## 引 言

渤海是中国海效应降雪主要发生区域(杨成芳, 2023), 渤海海效应降雪是一种浅层对流性降雪(李鹏远等, 2009; 郑怡等, 2014; 周淑玲等, 2016; 李刚等, 2020; 杨成芳等, 2024)。当对流较为剧烈时, 海效应降雪可以出现闪电, 甚至伴有明显雷声。伴有闪电的海效应降雪通常是暴雪的预兆, 一般还伴有低温、大风等, 其是山东半岛冬季一种主要的灾害性天气。因此加强对海效应降雪的“雷打雪”研究对降雪预报业务尤其是暴雪预报能力的提升有重要意义。

我国内陆“雷打雪”暴雪过程多为高架雷暴(俞小鼎等, 2016; 2024; 刘洲洋等, 2018; 刘晓岳等, 2020; 万夫敬等, 2024), 渤海海效应“雷打雪”过程与其发生机制不同, 但与美国五大湖地区的湖效应“雷打雪”形成机制相似。暖的湖表面温度强迫大气产生活跃的对流, 可能引发雷电(Steiger et al, 2009)。湖效应“雷打雪”的起电机理主要为非感应起电机理(Steiger et al, 2023), 其对流云层比无闪电降雪更深厚、不稳定性更强, 平均湖面温度比无闪电的湖效应降雪过程高。云内起电主要发生在  $-25 \sim -10^{\circ}\text{C}$ , 其水成物特征(如霰、冰晶、过冷却液态水等)在起电过程中十分重要(Steiger et al, 2009; 2018)。国内目前针对山东半岛海效应“雷打雪”的研究较少, 现有研究大多基于个例分析或对比分析, 探究海效应降雪发生机理或极端性(杨成芳等, 2024; 李建华等, 2024), 但对闪电现象的特征研究仍

较为匮乏。

闪电在夏季强对流天气中有一定的预警指示作用(Williams et al, 1999; 于函等, 2022; Srivastava et al, 2022), 在冬季降雪中的预警指示意义也逐渐引起相关研究者的关注。冯桂力等(2024)发现内陆降雪过程的闪电比较活跃, 闪电空间分布和走向与强降雪落区表现出良好的一致性。尽管海效应“雷打雪”是山东“雷打雪”的主要天气类型(郑丽娜等, 2019), 但是由于出现次数不多, 目前对海效应降雪过程中的闪电特征、闪电在降雪预报中的指示作用等问题的研究仍较少。本文利用地面观测、闪电定位、多普勒天气雷达等观测数据和 ERA5 再分析数据, 对 2017—2023 年渤海海效应降雪地闪活动特征进行统计分析, 并探讨地闪与降水相态、降雪强度及落区等的关系, 旨在加深对海效应降雪闪电的基本发生规律的认识, 为海效应降雪精细化预报提供参考依据。

## 1 资料与方法

本文地面及高空观测资料来自山东省气象数据中心, 包括山东半岛 2017—2023 年 11 月至次年 2 月国家级地面气象观测站(简称国家站)的逐小时降水量、天气现象、探空数据等。地闪数据使用国家雷电探测系统闪电定位数据, 该数据可获得的地闪时间序列较长, 进行闪电时空特征分析多基于此数据(王娟和湛芸, 2015; 何邓新等, 2021; 鞠晓雨等, 2022; 丁艺涵等, 2024)。再分析资料采用欧洲中期

数值预报中心发布的第五代大气再分析资料(ERA5, Hersbach et al, 2020), 地形数据采用美国地球物理中心发布的全球水深地形高程数据集(ETOPO), 本文选取数据集空间分辨率为  $30''$  (NOAA National Centers for Environmental Information, 2022)。全文所用地图基于审图号为 GS (2024)0650 号标准地图制作, 底图无修改。所用时间均为北京时。

海效应降雪雷暴日筛选及闪电定位数据质量控制方法(图 1)为:(1)确定海效应降雪日。根据海效应降雪发生在西北冷平流背景下, 将山东半岛 850 hPa 为西北冷平流时产生的降雪定义为海效应降雪(杨成芳, 2023)。利用 ERA5 再分析资料, 结合逐日降水数据(以 20 时为日界线)筛选出 2017—2023 年 11 月至次年 2 月海效应降雪日。(2)确定海效应降雪雷暴日。在  $36^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$ , 将山东半岛及其北侧的黄海、渤海向西延伸至  $119^{\circ}\text{E}$  作为海效应降雪研究关键区。海效应降雪日在研究关键区出现地闪则为一个海效应降雪雷暴日。(3)质量控制。剔除研究关键区以外及系统性降水的地闪数据, 并利用雷达反射率因子对地闪数据进行质量控制, 若地闪出现位置的 10 km 范围内组合反射率因子  $<10\text{ dBz}$ , 则

剔除该次地闪信息, 从而减少虚假电磁信号或者错误定位信息的影响。闪电在弱降雪过程中发生极少, 为了更好反映闪电与海效应降雪的关系, 剔除 24 h 最大降水量  $<5\text{ mm}$  (中雪以下) 纯雪类海效应雷暴日。(4)雷达参数值确定方法。对筛选出的地闪数据根据其发生位置选择合适雷达站, 按照其发生时间反演其最临近时间的雷达基数据, 再按照其发生位置的经纬度输出其对应位置雷达参数。

## 2 地闪活动与海效应降水相态的关系

按照以上方法, 2017—2023 年共筛选出海效应降雪雷暴日 19 d, 其中有 10 d 降水相态为纯雪, 则为纯雪类海效应降雪雷暴日, 其余 9 d 存在雨雪相态转换, 则为雨夹雪类海效应降雪雷暴日(包括雨转雨夹雪、雨或雨夹雪转雪、雨夹雪和雨雪共存 4 种情况)。

7 年间共发生海效应降雪地闪 185 次, 其中正地闪 110 次, 负地闪 75 次, 正地闪比例为 59.5%。从地面降水相态统计来看, 雨夹雪类地闪共发生 145 次, 纯雪类共发生 40 次。其中雨夹雪类正地闪 83 次, 负地闪 62 次; 纯雪类正地闪 27 次, 负地闪 13 次, 两类正地闪占比皆高于负地闪。

地闪次数最多的两个雷暴日分别是 2023 年 11 月 17 日(84 次, 占总次数的 45.4%) 和 23 日(36 次, 占总次数的 19.5%), 两者都为雨夹雪类海效应降雪雷暴日。纯雪类海效应降雪雷暴日发生时地闪频次较少, 2023 年 1 月 24 日地闪频次最多(11 次), 其余 9 个纯雪类海效应雷暴日的地闪频次在 1~9 次, 纯雪类 90% 的单日地闪频次在 10 次以下。可见, 雨夹雪类海效应降雪过程较纯雪类过程更容易发生地闪。

## 3 地闪活动的时空分布

### 3.1 地闪活动时间分布特征

#### 3.1.1 年、月变化特征

2017—2023 年, 平均每年有 2.7 个海效应降雪雷暴日。2023 年海效应降雪雷暴日数最多, 为 12 d, 2022 年为 4 d, 2019 年为 2 d, 2018 年为 1 d, 其余年份未出现。可见, 各年海效应降雪雷暴日数差异较大。

海效应降雪雷暴日的月变化上, 11 月有海效应

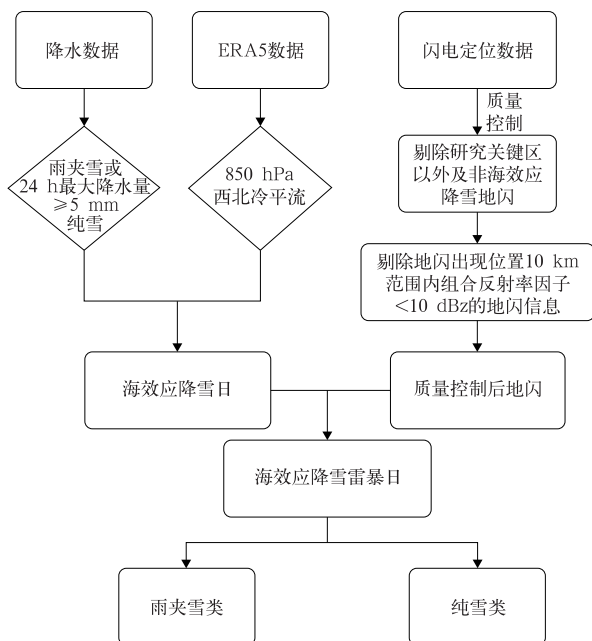


图 1 海效应降雪雷暴日筛选及闪电定位数据质量控制流程图

Fig. 1 Flow chart of data quality control for sea-effect snowfall and thunderstorm day screening and lightning locating

降雪雷暴日 11 d, 占总雷暴日的 57.9%, 12 月有 6 d, 1 月有 2 d, 2 月无。从地闪总频次月变化上看(图 2b), 地闪峰值出现在 11 月, 频次为 151 次, 占总频次的 81.6%; 12 月次之, 频次为 22 次, 1 月频次为 12 次, 分别占总频次的 11.9% 和 6.5%。已有研究指出, 山东半岛 12 月的海效应降雪日数、暴雪日数均多于 11 月, 海效应降水过程的雨雪相态转换主要发生在 11 月(杨成芳, 2023)。可见, 强降雪日数较多并不意味着地闪日数多。此外, 11 月的海效应降雪往往伴随着相态转换, 说明雨夹雪类海效应降雪过程较纯雪类过程更容易发生地闪。

### 3.1.2 日变化特征

海效应降雪地闪总频次的日变化(图 2a)出现多峰值结构。最高峰值集中在 01—05 时, 次峰值出现在 09—10 时, 其余地闪峰值集中在 15—16 时和 19 时。这与单纯统计海效应事件的日变化特征类似(周雪松等, 2019)。从各月地闪总频次的日变化(图 2c)看, 11 月与其日变化接近, 出现多峰值结构, 这主要是因为地闪在 11 月比例高达 81.6%, 对总频次日变化分布特征影响较大。12 月地闪总频次

峰值分别出现在 02 时和 07 时, 1 月峰值在 05 时。可见, 渤海海效应降雪地闪主要出现在凌晨和上午, 这主要与气温的日变化有关, 冬季由于存在较强晴空辐射, 凌晨一般是当日气温最低、海气温差最大的时段, 此时大气层结最不稳定, 有利于对流发生。除此以外, 海气温差还取决于冷空气影响的时间, 在海效应降雪发生时, 冷空气影响渤海和山东半岛的时间有差异, 所以当日温差最低时段也不固定, 造成地闪日变化多峰值现象。

### 3.1.3 地闪与海效应降雪强度的关系

为分析地闪与海效应强降雪时段的关系, 对每个海效应降雪雷暴日选取地闪发生位置附近的一个国家站作为代表站, 分析地闪发生前后 3 h 的逐小时降水量随时间的变化(图 3)。因有 4 个海效应降雪雷暴日日闪发生在 20 时前后, 有 2 个代表站数据横跨两个海效应降雪雷暴日。故 19 个雷暴日中去除 2 个, 选取 17 条记录。图 3 显示, 6 个代表站最大小时降水量与地闪发生时间出现在相同时次, 5 个代表站过去 1 h 最大降水量出现在地闪发生后 1 h, 5 个代表站最大小时降水量出现在地闪发生后

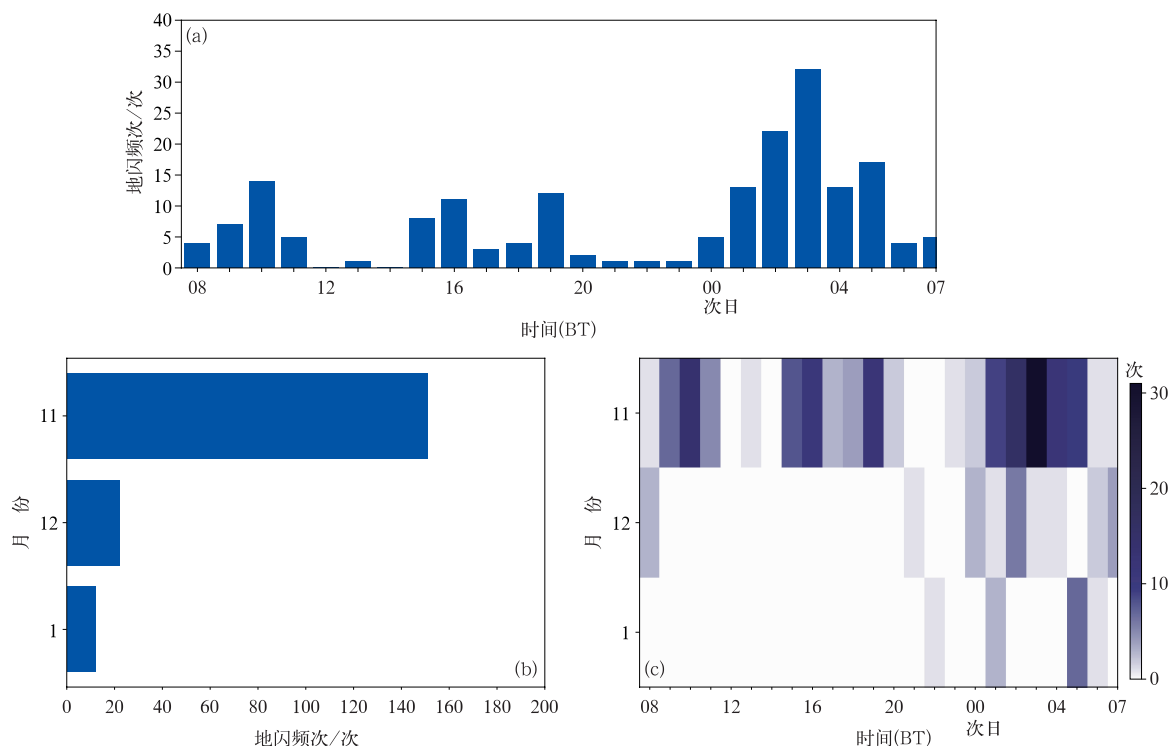


图 2 2017—2023 年山东半岛海效应降雪地闪总频次(a)日变化,(b)月变化,和(c)11 月、12 月、1 月的日变化

Fig. 2 (a) Diurnal and (b) monthly variations of total frequency, and (c) diurnal variation in November, December and January of cloud-to-ground (CG) lightning in sea-effect snowfall in Shandong Peninsula from 2017 to 2023

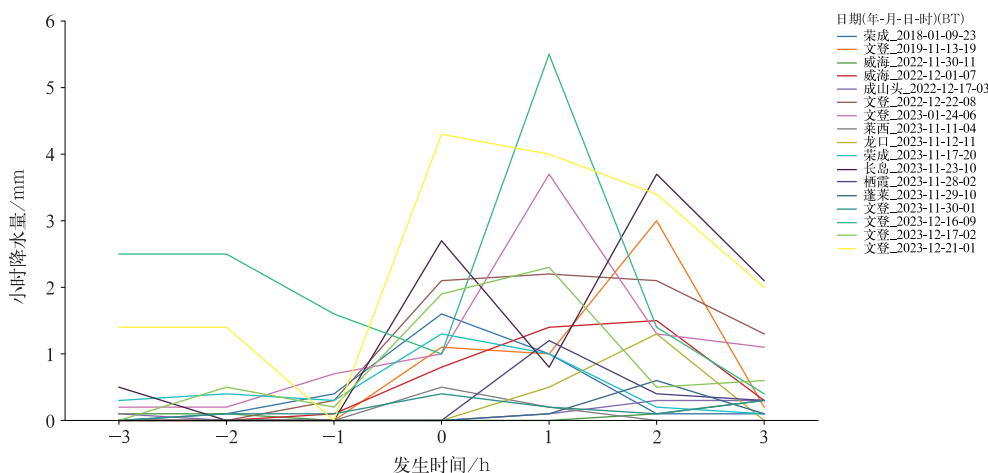


图 3 2017—2023 年山东半岛 17 个代表站相对地闪发生时间前后 3 h 逐小时降水量变化

Fig. 3 Variation in hourly precipitation of 3 h before and after the occurrence time of relative CG lightning at 17 representative stations in Shandong Peninsula from 2017 to 2023

2 h, 1 个代表站最大小时降水量出现在地闪发生后 3 h。94.1% 的代表站降雪强度增强在地闪出现的 0~2 h 内。图 3 中每个代表站的最大小时降水量有 5 个在 0.1~0.9 mm, 6 个在 1.0~1.9 mm, 2 个在 2.0~2.9 mm, 2 个在 3.0~3.9 mm, 1 个在 4.0~4.9 mm; 最大值为 5.5 mm, 出现在 2023 年 12 月 16 日 10 时的文登站。70.5% 的最大小时降水量在 1 mm 以上, 35.2% 的在 2 mm 以上。可见, 闪电发生时间对海效应降雪强度有一定的指示作用, 海效应降雪闪电发生之后的 0~2 h 内降雪强度有明显的增强。

### 3.2 地闪活动空间分布特征

#### 3.2.1 空间分布

按照雨夹雪类(图 4a)和纯雪类(图 4b)对海效应降雪地闪及累计降水量空间分布情况分类分析, 可以看到, 雨夹雪类与纯雪类的地闪分布有明显差异, 雨夹雪类的地闪数量较纯雪类更多、分布范围更广。两类海效应降雪地闪在渤海上和陆地都有分布, 但雨夹雪类地闪分布在渤海上较陆地多, 纯雪类则相反。雨夹雪类地闪在山东半岛陆地上分布主要有两个区域, 一个区域在烟台的龙口—栖霞—蓬莱三地, 并且在海拔较高处分布较为密集; 另一个区域在烟台市区以东至威海的北部沿海地区, 集中出现在高海拔地形以北。纯雪类地闪主要出现在烟台市区以东的北部沿海地区, 大多集中在高海拔地形以北; 在莱州与招远之间有地闪零星分布。由以上可知, 海效应降雪地闪在陆地的分布具有一定的区域性, 与山脉地形有一定的关系, 主要发生在山东半岛

低山丘陵的北侧, 与海效应降雪分布一致。

#### 3.2.2 地闪空间分布与强海效应降雪落区的关系

从图 4 中还可以看到, 雨夹雪类在山东半岛北部沿海的蓬莱(包括长岛)—威海一带降水量较大(图 4a), 纯雪类在山东半岛北部沿海的烟台市区—文登—荣成一带降水量较大(图 4b)。纯雪类的降水量强中心出现在文登, 为 138.1 mm, 纯雪类地闪分布最密集的区域在文登站的西北方向, 即烟台市区—威海—文登围成的三角形区域。可见, 纯雪类地闪分布位置一般在强降雪区域附近, 并且在强降雪中心的西北方向(上风向)。而地闪出现在强中心西北方向与海效应降雪带主要沿着西北风传播有关(杨成芳和王俊, 2009; 周雪松等, 2019; 郑怡等, 2019)。雨夹雪类地闪多集中在渤海上, 由于冬季固态降水观测只布设在国家站, 渤海上只有长岛站, 无法得出雨夹雪类地闪发生位置与渤海上强降雪落区的关系; 从陆地分布来看, 在地闪发生区域, 降水量较大, 以烟台—牟平一带最为显著。

经统计, 80% 的纯雪类海效应降雪雷暴日及 50% 的地面有明显积雪的雨夹雪类海效应降雪雷暴日出现 >10 mm 的强降水区域, 并有地闪发生在强降雪区域附近。这说明有地闪出现的强降雪区域中心降雪量级可达暴雪。

纯雪类海效应降雪雷暴日在 2023 年 12 月 16 日国家站暴雪范围最大, 有 5 个国家站出现暴雪; 2018 年 1 月 10 日出现 3 个暴雪站点。在其余暴雪日, 国家站出现 4 个、2 个、1 个和无暴雪的站点均各有 2 d。雨夹雪类海效应降雪雷暴日有 6 d 发生在 11 月中旬, 3 d 发生在 11 月下旬。其中只有 4 d 有



积雪记录(2023 年 11 月 17 日及 11 月下旬的 3 d), 最大积雪深度都在 4 cm 以下。2023 年 11 月 12 日、17 日、23 日, 各出现 3 个站单日降水量超过 10 mm, 最大单日降水量(23.6 mm)出现在 12 日的牟平站。

选取雨夹雪类(图 5a)和纯雪类(图 5b)海效应降雪暴雪日典型过程分析单日降水量和地闪分布, 2023 年 11 月 17 日(图 5a), 威海—文登—成山头一带为单日降水量 $>10$  mm 的强降雪区域, 强降水中心位于威海站(22.6 mm), 在其附近地闪分布较密集, 17 日 20 时威海站积雪深度 1 cm, 地面最大积雪深度(3 cm)出现在文登站。雨夹雪类地闪在渤海上

和陆地上都有大范围分布, 这与纯雪类(图 5b)有明显不同, 地闪以在渤海上分布为主, 但对威海附近的强降雪也有一定的指示作用。

2023 年 1 月 24 日(图 5b)山东半岛有多个局部强降雪中心, 在文登站降水量最大(16.5 mm), 在烟台市区有降水量为 11.3 mm 的暴雪站点。在莱阳站有降水量为 5.0 mm 的局部强降雪中心。地闪分布呈现东西两部分, 东侧分布在烟台市区—文登一带, 西侧主要位于莱州与招远之间。可见, 暴雪过程中地闪主要出现在强降雪区域附近, 表明地闪的发生位置对强降雪落区有较好指示信号。

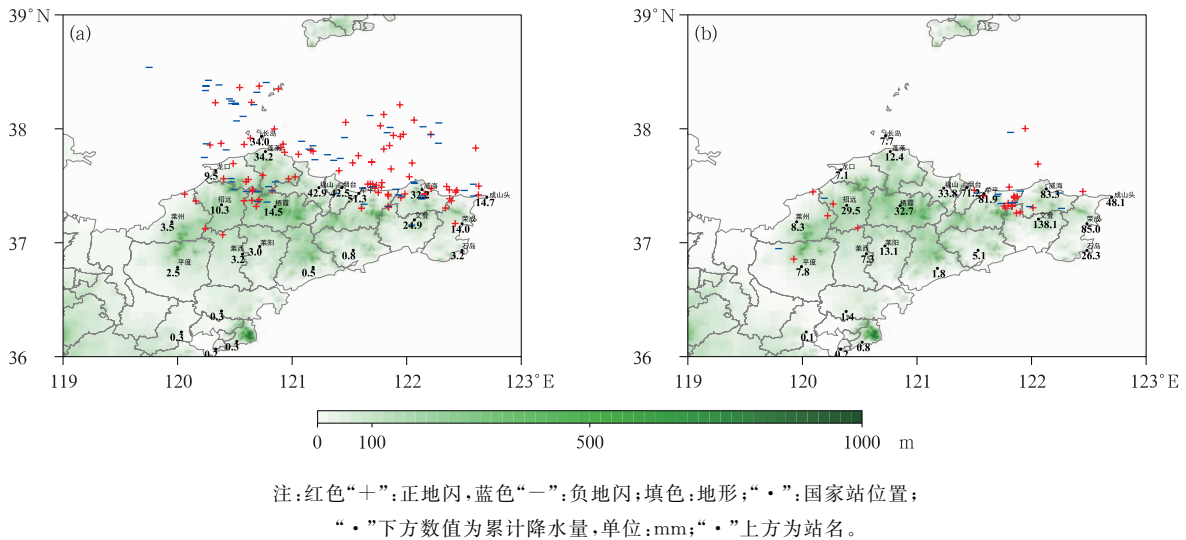


图 4 2017—2023 年山东半岛(a)雨夹雪类和(b)纯雪类海效应降水量和地闪分布  
Fig. 4 Distribution of CG lightning associated with sea-effect snowfall of (a) sleet type and (b) pure snow type in Shandong Peninsula from 2017 to 2023

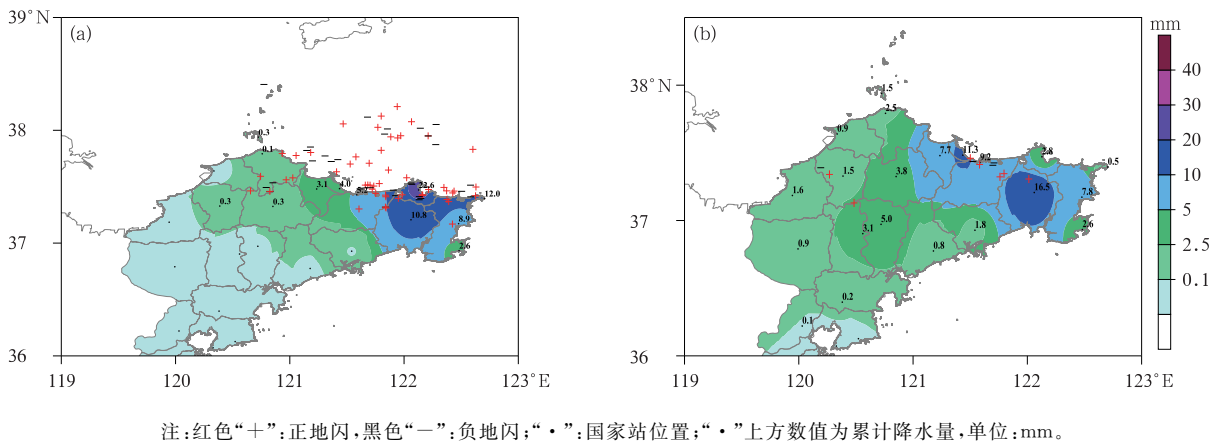


图 5 2023 年(a)11 月 17 日和(b)1 月 24 日山东半岛海效应降雪单日降水量(填色)和地闪分布  
Fig. 5 Distribution of daily accumulated precipitation (colored) of sea-effect snowfall and CG lightning in Shandong Peninsula on (a) 17 November and (b) 24 January 2023

## 4 海效应降雪地闪雷达参数特征

### 4.1 回波顶高

图 6a 给出了 2017—2023 年山东半岛地闪发生位置对应雷达参数组合反射率因子(CR)-回波顶高(ET)散点图。从图中可以看出,雨夹雪类和纯雪类地闪 CR 为 18 dBz 的 ET(图 6a)分别集中在 2.3~4.7 km 和 2.1~2.7 km,这说明雨夹雪类地闪发生时对流发展高度高于纯雪类。对流发展高度与大气不稳定层结有关,杨成芳和曹玥瑶(2022)对典型海效应降水个例的研究也表明,雨夹雪类不稳定层结较纯雪类深厚,雨夹雪类典型个例不稳定层结高度可达 850 hPa,纯雪类主要在 925 hPa 以下(杨成芳等,2024)。海效应降水受渤海暖海面下垫面强迫作用,雨夹雪类天气过程一般发生在 11 月,此时渤海海温较高,在 15~17℃(孙艺迪等,2023),海气温差大产生热通量向大气输送,其对流发展高度高于纯雪类。

### 4.2 回波强度

雨夹雪类地闪发生时 CR 主要集中在 25~45 dBz(图 6a),结合 CR 在不同区间的比例及频次分布(图 6b),雨夹雪类 CR 在 30~35 dBz 的比例和频次最多,且 CR>40 dBz 的情况只出现在雨夹雪类。纯雪类地闪发生时 CR 主要集中在 20~35 dBz

(图 6a)。纯雪类 CR 在 25~30 dBz 的比例和频次最多。对于海效应降雪过程,一般性降雪的 CR 集中在 20 dBz 以下,通常暴雪过程的 CR 均在 25 dBz 以上(杨成芳,2023),这表明当纯雪过程有地闪发生时雷达回波强,有利于产生强降雪,这对于海效应降雪短时临近预警具有指示意义。另外,以上分析也表明,雨夹雪类地闪发生时的 CR 整体大于纯雪类。

CR>45 dBz 主要出现在 2023 年 11 月 17 日,是地闪强度较强的雨夹雪类海效应降雪雷暴日,最大日降水量出现在威海站,达 22.6 mm。纯雪类闪电 CR>33 dBz 主要出现在 2023 年 12 月 21 日(图略),该海效应降雪雷暴日的最大降水量出现在文登站,达到 33.7 mm,具有极端性(杨成芳等,2024)。由图 6a 中也可以看到雨夹雪类有少数地闪对应的 CR<25 dBz,结合闪电数据初步分析出现此现象可能原因:一是出现地闪时降水相态可能已经转为雪,纯雪的 CR 一般低于雨或雨夹雪,所以 CR 数值相对较小;二是可能由于雷达数据时间与地闪出现时间无法完全一致,按照地闪出现位置进行统计可能导致 CR 偏小,并且闪电定位仪探测地闪存在系统定位偏差;三是地闪落在雷达静锥区的附近或者离雷达距离较远的渤海上可能导致 CR 偏小。

为了分析 CR 和闪电分布空间关系,分别选取雨夹雪类(图 7a)和纯雪类(图 7b)闪电较强时刻叠加 CR。由图 7 可以看到,雨夹雪类和纯雪类地闪都分布在强回波区内,但并未在最强回波处。图 7a 回波呈西南—东北向带状,图 7b 回波呈西北—东南

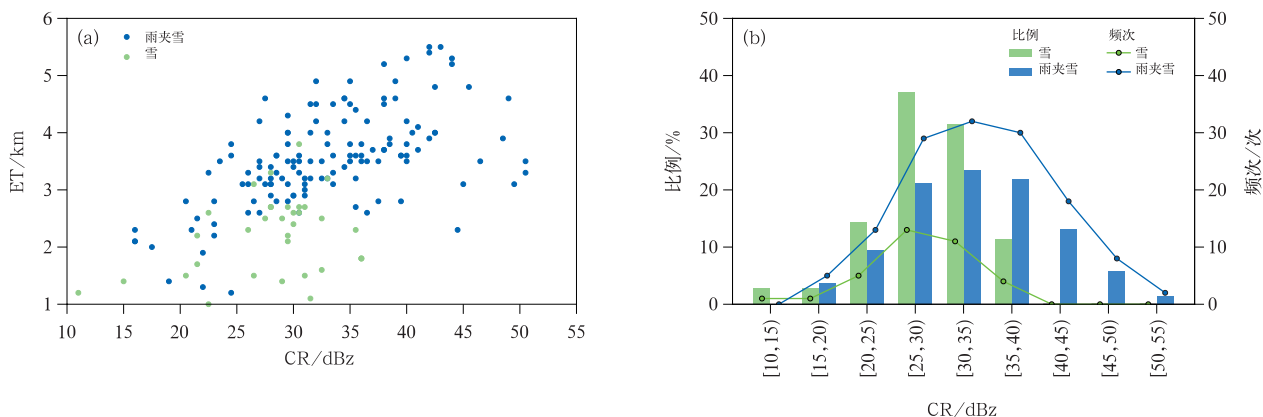


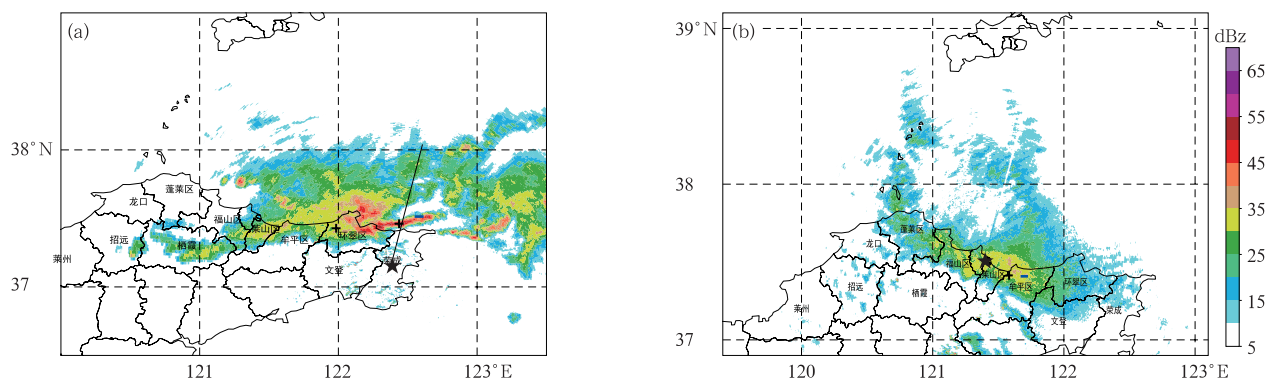
图 6 2017—2023 年山东半岛(a)地闪雷达组合反射率因子-回波顶高散点图和(b)组合反射率因子在不同区间分布频次及占该类总频次比例

Fig. 6 (a) Scatter of CR-ET features associated with CG lightning and (b) distribution and its percentage of CR in different intervals in Shandong Peninsula from 2017 to 2023

向带状,均自西北向东南方向移动,地闪位于回波前部。在地闪位置西北方向  $CR > 30$  dBz 的范围较大,预示未来将有持续的较强降水回波经过地闪发生位置。结合前文的分析可知,地闪出现的时间和

位置对强海效应降雪的强降雪时段和落区的短时临近预警有较好的指示意义。

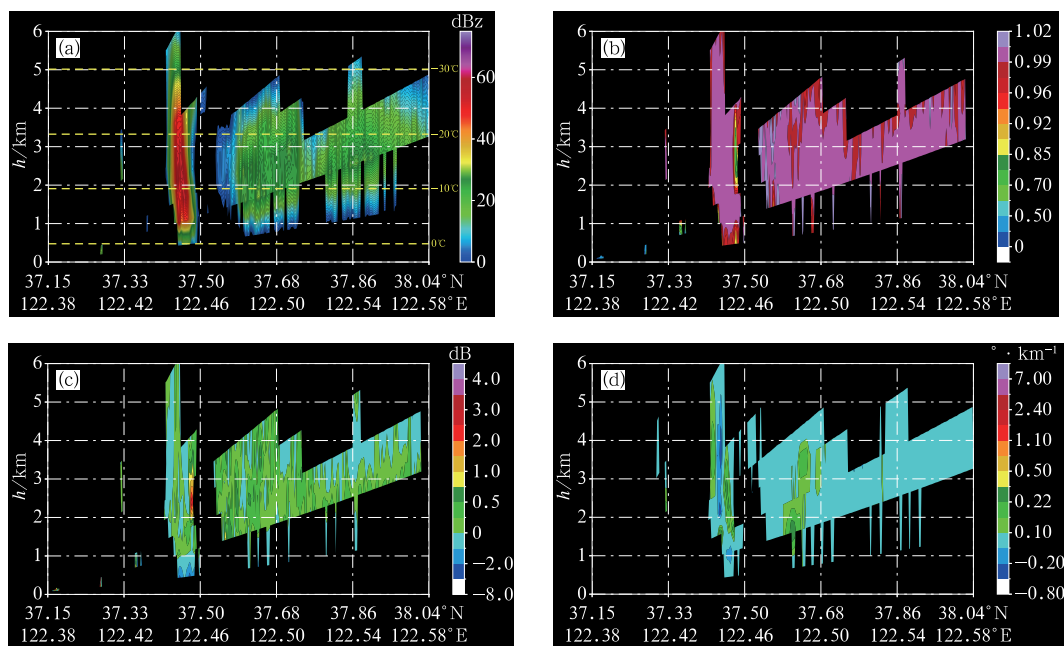
图 8a~8d 分别为沿图 7a 中黑色线段所做  $Z_H$ 、CC、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  剖面。从图 8a 中可以看出,对应地闪



注:黑色“+”:正地闪,蓝色“-”:负地闪;黑色“★”:雷达站位置;图 a 中黑色线段:图 8 剖面位置。

图 7 2023 年(a)11 月 17 日 04:02 荣成和(b)1 月 24 日 05:09 烟台  
雷达组合反射率因子及对应体扫时间地闪分布

Fig. 7 Distribution of the CR from (a) Rongcheng Radar at 04:02 BT 17 November  
and (b) Yantai Radar at 05:09 BT 24 January 2023 and the CG lightning  
at the corresponding volume scan time



注:图 a 黄色虚线:由低到高分别为 0、-10、-20、-30 °C 高度。

图 8 2023 年 11 月 17 日 04:02 沿图 7a 中黑色线段的荣成雷达剖面  
(a)  $Z_H$ , (b) CC, (c)  $Z_{DR}$ , (d)  $K_{DP}$

Fig. 8 Vertical cross-sections of (a)  $Z_H$ , (b) CC, (c)  $Z_{DR}$  and (d)  $K_{DP}$   
from Rongcheng Radar along black line in Fig. 7a at 04:02 BT 17 November 2023



发生的系统前部存在明显的对流,回波顶高接近 6 km, >30 dBz 回波高达 5 km(约-30℃高度),最大回波超过 60 dBz。而其东北方向未发生地闪区域的反射率因子垂直分布特征明显偏弱。在强回波中心的北侧 2~3 km 的高度范围内存在正  $Z_{DR}$  柱(>1.0 dB,图 8c)和正  $K_{DP}$  柱(>0.22 °·km<sup>-1</sup>,图 8d),配合着偏低的 CC 值(0.7~0.8,图 8b),表明该处存在较强的上升气流,并且存在过冷却液态水(冯桂力等,2024)。在  $Z_{DR}$  柱南侧其值接近 0 dB,对应区域的  $Z_H$  大于 40 dBz,说明在该混合相态区域内含有大量霰粒子(Carey and Rutledge,2000)。紧贴  $K_{DP}$  柱南侧有一个明显的负值中心(-0.4 °·km<sup>-1</sup>),表明冰相粒子呈现垂直排列,可以推测云内存在电场(Kumjian and Deierling,2015;Yang et al,2024)。2023 年 11 月 17 日黄渤海海面温度较高(图略),向边界层输送热量和水汽也有利于产生大量霰粒子(Steiger et al,2009)。在混合相态区域垂直对流旺盛,存在大量霰粒子,促进冰相粒子的电荷分离,满足非感应起电机条件(Steiger et al,2009;2023)。

## 5 结 论

本文利用地面观测、闪电定位、多普勒天气雷达等观测数据和 ERA5 再分析数据,对 2017—2023 年渤海海效应降雪地闪活动特征进行研究,发现地闪在海效应降雪短时临近预报中有指示作用。主要结论如下:

(1)渤海海效应降雪地闪主要出现于 11 月至次年 1 月,11 月次数最多,12 月至次年 1 月逐月减少,目前暂未有出现在 2 月的海效应降雪地闪。地闪日变化具有多峰值结构,峰值主要位于凌晨至上午。正地闪比例略高于负地闪。

(2)海效应降雪地闪在渤海上和陆地上都有分布,陆地上的分布与山脉地形有关。将伴有地闪的海效应降雪分为雨夹雪类和纯雪类,雨夹雪类海效应降雪的地闪数量较纯雪类更多、分布范围更广。90%的纯雪类海效应降雪雷暴日单日地闪频次在 10 次以下。雨夹雪类地闪主要分布在渤海上;纯雪类地闪主要分布在陆地上,一般在强降雪区域附近,并且在强降雪中心的西北方向(即上风向)。

(3)雨夹雪类地闪发生时对流发展高度高于纯雪类。雨夹雪类地闪发生时的回波强度和 ET 整体大于纯雪类。雨夹雪类 CR 在 30~35 dBz 地闪最多,纯雪类在 25~30 dBz 最多。雨夹雪类地闪发生时 ET 主要集中在 2.3~4.7 km,纯雪类主要集中在 2.1~2.7 km。通过分析双偏振雷达参量给出的云中水成物特征,表明渤海海效应“雷打雪”云内满足非感应起电机条件。

(4)地闪发生时间和位置对海效应降雪短时临近预报具有指示意义,尤其对海效应降雪强度和落区预报有较好的指示作用。海效应降雪地闪发生之后的 0~2 h 降雪强度明显增强,地闪发生地附近的强降雪中心可达暴雪量级。

## 参考文献

- 丁艺涵,支树林,许东蓓,等,2024. 江西省地闪特征及其与雷达特征量关系研究[J]. 气象,50(5):591-602. Ding Y H, Zhi S L, Xu D B, et al, 2024. Research on the characteristics of cloud-to-ground lightning and its relationship with radar characteristics in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 50(5):591-602(in Chinese).
- 冯桂力,邢如峰,夏凡,等,2024. “12·14 雷打雪”过程的闪电特征及成因[J]. 海洋气象学报,44(2):42-54. Feng G L, Xing R F, Xia F, et al, 2024. Lightning characteristics and causes of “12·14” thundersnow process[J]. J Mar Meteor, 44(2):42-54(in Chinese).
- 何邓新,赖安伟,康兆萍,等,2021. 闪电资料在快速更新同化系统中的应用研究[J]. 气象,47(8):995-1008. He D X, Lai A W, Kang Z P, et al, 2021. Research on the application of lightning data in rapid update assimilation system[J]. Meteor Mon, 47(8):995-1008(in Chinese).
- 鞠晓雨,王凯,朱浩,2022. 2011—2021 年安徽省闪电时空分布特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,16(5):110-117. Ju X Y, Wang K, Zhu H, 2022. Spatial and temporal distribution characteristics of lightning in Anhui during 2011—2021[J]. Desert Oasis Meteor, 16(5):110-117(in Chinese).
- 李刚,刘畅,曹玥瑶,等,2020. 一次 1 月山东半岛东部极端海效应暴雪的发生机制分析[J]. 气象,46(8):1074-1088. Li G, Liu C, Cao Y Y, et al, 2020. Case study on generation mechanism of extreme ocean-effect snowstorm in the east of Shandong Peninsula in January[J]. Meteor Mon, 46(8):1074-1088(in Chinese).
- 李建华,肖明静,孙倩倩,等,2024. 2023 年和 2005 年山东两次极端海效应暴雪的对比[J]. 海洋气象学报,44(2):15-26. Li J H, Xiao M J, Sun Q Q, et al, 2024. Comparative analysis on two extreme sea-effect snowstorms in Shandong in 2023 and 2005[J]. J Mar Meteor, 44(2):15-26(in Chinese).
- 李鹏远,傅刚,郭敬天,等,2009. 2005 年 12 月上旬山东半岛暴雪的

- 观测与数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报, 39(2): 173-180.
- Li P Y, Fu G, Guo J T, et al, 2009. An analysis and numerical modeling of a snowstorm event over Shandong Peninsula in December, 2005[J]. Period Ocean Univ China, 39(2): 173-180 (in Chinese).
- 刘晓岳, 于海鹏, 盛夏, 等, 2020. 半干旱区一次罕见“雷打雪”天气形成机制分析[J]. 气象, 46(12): 1596-1607. Liu X Y, Yu H P, Sheng X, et al, 2020. Mechanism analysis of a rare “thundersnow” process in semi-arid area[J]. Meteor Mon, 46(12): 1596-1607 (in Chinese).
- 刘洲洋, 俞小鼎, 王秀明, 等, 2018. 中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J]. 气象, 44(2): 258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al, 2018. Climatological statistical analysis of elevated convection characteristics in cold season in Pan-North China [J]. Meteor Mon, 44(2): 258-267 (in Chinese).
- 孙艺迪, 王德, 高志强, 等, 2023. 1982—2021 年黄、渤海表层温度变化的线性和非线性特征分析[J]. 海洋科学, 47(5): 41-53. Sun Y D, Wang D, Gao Z Q, et al, 2023. Linear and nonlinear trend analyses of sea surface temperature in the Bohai and Yellow seas of China during 1982—2021[J]. Mari Sci, 47(5): 41-53 (in Chinese).
- 万夫敬, 李博, 罗江珊, 等, 2024. 一次伴随高架雷暴的极端暴雪不稳定机制分析[J]. 气象, 50(9): 1105-1119. Wan F J, Li B, Luo J S, et al, 2024. Analysis of the instability mechanism of an extreme snowstorm accompanied by elevated thunderstorms[J]. Meteor Mon, 50(9): 1105-1119 (in Chinese).
- 王娟, 湛芸, 2015. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析[J]. 气象, 41(2): 160-170. Wang J, Chen Y, 2015. Analysis of the 2009—2012 lightning distribution characteristics in China[J]. Meteor Mon, 41(2): 160-170 (in Chinese).
- 杨成芳, 2023. 山东暴雪[M]. 北京: 气象出版社: 9-123. Yang C F, 2023. Shandong Snowstorm[M]. Beijing: China Meteorological Press: 9-123 (in Chinese).
- 杨成芳, 曹玥瑶, 2022. 秋季渤海海效应降雨的统计特征及形成机理[J]. 海洋气象学报, 42(1): 12-22. Yang C F, Cao Y Y, 2022. Statistical characteristics and formation mechanism of Bohai ocean-effect rain in autumn[J]. J Mar Meteor, 42(1): 12-22 (in Chinese).
- 杨成芳, 戈瑶, 刘畅, 等, 2024. “23·12”山东半岛特大海效应暴雪特征及成因[J]. 海洋气象学报, 44(2): 1-14. Yang C F, Ge Y, Liu C, et al, 2024. Characteristics and causes of “23·12” extremely severe sea-effect snowstorm in Shandong Peninsula[J]. J Mar Meteor, 44(2): 1-14 (in Chinese).
- 杨成芳, 王俊, 2009. 利用单多普勒雷达资料做冷流暴雪的中尺度分析[J]. 高原气象, 28(5): 1034-1043. Yang C F, Wang J, 2009. Analysis on mesoscale character to ocean-effect snowstorm using single-Doppler radar data[J]. Plateau Meteor, 28(5): 1034-1043 (in Chinese).
- 于函, 张鸿波, 刘冬霞, 等, 2022. 飊线系统中的闪电活动与雷达回波特征的相关性研究[J]. 大气科学, 46(4): 835-844. Yu H, Zhang H B, Liu D X, et al, 2022. Relationship between lightning activities and radar echoes of squall line convective systems[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 835-844 (in Chinese).
- 俞小鼎, 费海燕, 王秀明, 2024. 2024 年 2 月 17—23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. 气象, 50(9): 1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. Meteor Mon, 50(9): 1033-1042 (in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2016. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. 气象学报, 74(6): 902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. Acta Meteor Sin, 74(6): 902-918 (in Chinese).
- 郑丽娜, 张子涵, 夏金鼎, 2019. 山东省“雷打雪”事件分型及其成因分析[J]. 气象, 45(8): 1075-1084. Zheng L N, Zhang Z H, Xia J D, 2019. Classification and cause analysis of “thundersnow” events in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 45(8): 1075-1084 (in Chinese).
- 郑怡, 高山红, 吴增茂, 2014. 渤海海效应暴雪云特征的观测分析[J]. 应用气象学报, 25(1): 71-82. Zheng Y, Gao S H, Wu Z M, 2014. Observational analysis of cloud characteristics of the Bohai sea-effect snowstorms[J]. J Appl Meteor Sci, 25(1): 71-82 (in Chinese).
- 郑怡, 杨成芳, 郭俊建, 等, 2019. 一次罕见的山东半岛西部海效应暴雪过程的特征及机理研究[J]. 高原气象, 38(5): 1017-1026. Zheng Y, Yang C F, Guo J J, et al, 2019. Analysis on the characteristics and mechanism of a rare ocean-effect snowstorm in the western Shandong Peninsula[J]. Plateau Meteor, 38(5): 1017-1026 (in Chinese).
- 周淑玲, 王科, 杨成芳, 等, 2016. 一次基于综合探测资料的山东半岛冷流暴雪特征分析[J]. 气象, 42(10): 1213-1222. Zhou S L, Wang K, Yang C F, et al, 2016. Characteristics analysis on a snowstorm in Shandong Peninsula by using multiple observation data[J]. Meteor Mon, 42(10): 1213-1222 (in Chinese).
- 周雪松, 杨成芳, 孙兴池, 2019. 基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析[J]. 海洋气象学报, 39(1): 26-37. Zhou X S, Yang C F, Sun X C, 2019. Analysis of basic characteristics of ocean-effect events in the Bohai Sea based on satellite identification [J]. J Mar Meteor, 39(1): 26-37 (in Chinese).
- Carey L D, Rutledge S A, 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: a C-band polarimetric radar study[J]. Mon Wea Rev, 128(8): 2687-2710.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Kumjian M R, Deierling W, 2015. Analysis of thundersnow storms over northern Colorado[J]. Wea Forecasting, 30(6): 1469-1490.
- NOAA National Centers for Environmental Information, 2022. ETOPO 2022 15 arc-second global relief model [EB/OL].

- NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.
- Srivastava A, Liu D X, Xu C, et al, 2022. Lightning nowcasting with an algorithm of thunderstorm tracking based on lightning location data over the Beijing Area[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(1): 178-188.
- Steiger S M, Bruning E C, Chmielewski V C, et al, 2023. Winter lightning to the lee of lake Ontario; the lake-effect electrification (LEE) field campaign[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 105(11): E2026-E2046.
- Steiger S M, Hamilton R, Keeler J, et al, 2009. Lake-effect thunderstorms in the lower great lakes[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(5): 889-902.
- Steiger S M, Kranz T, Letcher T W, 2018. Thunderstorm characteristics during the Ontario winter lake-effect systems project[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 57(4): 853-874.
- Williams E, Boldi B, Matlin A, et al, 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms[J]. *Atmos Res*, 51(3/4): 245-265.
- Yang J, Zhao K, Song P, et al, 2024. The evolution of microphysical structures and cloud-to-ground lightning in a deep compact thunderstorm over the Nanjing Area[J]. *Adv Atmos Sci*, 41(12): 2367-2380.

(本文责编:王婷波)