

杭州萧山机场雷暴大风的天气——气候学特征研究

史佩剑, 刘伟东, 杨超锋

中国民用航空华东地区空中交通管理局浙江分局, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月28日

摘要

依据2001~2022年杭州萧山机场观测站观测资料和2001~2019杭州站探空资料, 对杭州萧山机场61次雷暴大风进行统计分析, 结果表明: 杭州萧山机场大多数雷暴大风具有下击暴流特征, 而且冰雹的落区附近也是大风的爆发区之一; 雷暴大风日年际分布不均, 有明显的年际变化; 雷暴大风明显有季节性, 主要出现在夏季, 其次为春季, 在春季中期和夏季的前期及中期发生强雷暴大风的概率最大; 雷暴大风具有明显的日变化特征, 夏季主要峰值发生在下午13时到傍晚后20时之间, 春季峰值时间在半夜前后, 即前半夜20时至凌晨02时之间; 86.9%的雷暴大风持续时间在0~30 min之间, 春季和秋季雷暴大风的持续时间皆小于20 min; 73.9%的雷暴大风时雷暴初始的方向位置位于本场西侧(包含偏西、西南和西北方向)和南侧; 雷暴大风最大风速的风向主要集中在两个区域, 72.1%的风向在220°~360°之间, 19.7%的方向在0°~80°之间; 57.4%的雷暴大风最大风速在20~29 m/s之间, 39.2%雷暴大风最大风速在17~19 m/s之间。对抬升指数、K指数和CAPE值做了对比分析, 结果显示这三个参数对萧山机场雷暴大风的潜势预报有较大的局限性, 而对流层中层700~400 hPa之间的干层和对流层中下层(850~500 hPa)温度递减率对本场雷暴大风的潜势预报有较好的指示作用, 其阈值分别为: 700~400 hPa之间平均温度露点差不小于6℃, 或其单层最大温度露点差不小于10℃; 850~500 hPa温差值不小于25℃。

关键词

雷暴大风, 下击暴流, 最大风速, 对流层中层干层, 对流层中下层温度递减率

The Synoptic and Climatic Characteristic Studies of Thunderstorm Gusts at Hangzhou Xiaoshan Airport

Peijian Shi, Weidong Liu, Chaofeng Yang

Zhejiang Sub-Bureau of East China Air Traffic Management Bureau CAAC, Hangzhou Zhejiang

Received: October 23, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 28, 2025

文章引用: 史佩剑, 刘伟东, 杨超锋. 杭州萧山机场雷暴大风的天气——气候学特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1413-1426. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146141

Abstract

Based on observational data from the Hangzhou Xiaoshan International Airport observation station from 2001 to 2022 and sounding data from the Hangzhou station from 2001 to 2019, 61 occurrences of thunderstorm gusts at Hangzhou Xiaoshan International Airport were statistically analyzed. The results indicate the following: Most of the thunderstorm gusts at Hangzhou Xiaoshan International Airport exhibit downburst characteristics, and the vicinity of the hail-fall area is often one of the burst zones for strong winds. The annual distribution of thunderstorm gust days is uneven, showing significant interannual variability. Thunderstorm gusts show clear seasonality, occurring primarily in summer, followed by spring. The highest probability of strong thunderstorm gusts occurs during the middle of spring and the early-to-middle parts of summer. Thunderstorm gusts exhibit distinct diurnal variation characteristics. In summer, the main peak occurs between 13:00 and 20:00 (afternoon to early evening), while the spring peak occurs around midnight, specifically between 20:00 and 02:00 (early night to early morning) Beijing Time. 86.9% of the thunderstorm gusts lasted between 0 and 30 minutes, and the duration of spring and autumn thunderstorm gusts were both less than 20 minutes. For 73.9% of the thunderstorm gusts, the initial direction and location of the thunderstorm was situated to the west side (including west, southwest, and northwest directions) and south side of the airport. The wind directions of the maximum wind speed during thunderstorm gusts are primarily concentrated in two regions: 72.1% of the wind directions are between 220° and 360°, and 19.7% are between 0° and 80°. 57.4% of the maximum wind speeds were between 20 and 29 m/s, while 39.2% were between 17 and 19 m/s. A comparative analysis of the Lifted Index (LI), K Index (KI), and Convective Available Potential Energy (CAPE) was performed, revealing that these three parameters have significant limitations for the potential forecasting of thunderstorm gusts at Xiaoshan Airport. In contrast, the dry layer in the mid-troposphere between 700 and 400 hPa and the temperature lapse rate in the lower-to-mid troposphere (850 to 500 hPa) showed better indicator potential for forecasting thunderstorm gusts at this location. Their respective thresholds are: the average temperature-dewpoint depression between 700 and 400 hPa is not less than 6°C, OR the maximum single-layer temperature-dewpoint depression between 700 and 400 hPa is not less than 10°C; the temperature difference between 850 and 500 hPa is not less than 25°C.

Keywords

Thunderstorm Gust, Downburst, Maximum Wind Speed, Mid-Tropospheric Dry Layer, Temperature Lapse Rate in the Lower to Mid-Troposphere

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷暴大风是杭州地区春季、夏季和秋季都可发生的灾害性天气之一，其短时阵风风力达到或超过 8 级，并往往伴随短时强降水、阵风锋、下击暴流等强对流天气。由于它的发生、发展具有突发性，如果发生机场附近，经常会造成机场跑道两端风向风速的突变，导致低空风切变的发生，使得飞机失去稳定，对飞机起飞和着陆威胁极大。

雷暴大风的发生和当地的气候环境有很大关系，因此有必要对雷暴大风天气和气候学进行研究。秦丽[1]、廖晓农[2]、杨璐[3]等分别对北京地区雷暴大风的气候特征和雷达特征进行了研究，得出了有利于

雷暴大风的探空结构,建立了北京地区雷暴大风临近预报方程,同时总结了雷暴大风的雷达回波特征。许霖樊[4]对湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征进行了研究,得出雷暴大风有短周期和长周期性特点,不同地区的雷暴大风其热力条件存在一定的差异。曹倩[5]对江西雷暴大风的特征进行了分析,得出江西雷暴大风发生前的热力、动力和水汽特征存在显著时空差异,按季节分区域、分时段设定环境参数阈值,对于雷暴大风预报预警的指导意义更大。曹世腾[6]对辽宁省冷涡型雷暴大风时空分布及环境参数特征进行了研究,得出冷涡雷暴大风主要集中在辽宁中部平原,该区域冷涡引起的雷暴大风占有雷暴大风的90%,不同季节雷暴大风发生时的环境条件存在差异,春、秋季雷暴大风对应不同层温差、垂直风切变较强和风暴承载层风速较大等特征;盛夏雷暴大风发生对应水汽条件充沛,近地面蒸发较强、中层干空气侵入和热对流特征明显等。马淑萍[7]、高晓梅[8]、李耀东[9]、方翀[10]对中国各地区雷暴大风的环境参量进行了研究,得出不同地区雷暴大风发生的环境物理量阈值也不同,同时得出极端雷暴大风天气发生在对流层中层相对干的环境下,表现为400~700 hPa极端雷暴大风对应的单层最大温度露点差和平均温度露点差平均值分别为25.7℃和13.6℃,而普通雷暴的相应值分别为16.2℃和6.5℃。李苗[11]等对杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件进行分析,得出3个夏季午后雷暴大风天气概念模型:高空冷平流型强迫、低层暖平流强迫型和准正压型,得到影响杭州地区雷暴大风路径及关键区,并对相关参数进行了分析。

可见不同地区的雷暴大风,其气候特征和发生的大气环境条件也有所不同,为此本文依据2001~2022年杭州萧山机场观测站观测资料和2001~2019杭州站探空资料,对杭州萧山机场雷暴大风(瞬时风速 ≥ 17 m/s)爆发时降水和冰雹的特征、年际变化、季节分布、日变化特征、大风持续时间特征、雷暴大风时雷暴初始的方向位置特征、大风风向分布特征和风速特征进行统计,对抬升指数、K指数和CAPE值做对比分析,对两个大气环境条件:流层中层(700~400 hPa)的干层和对流层中下层(850~500 hPa)的温度直减率进行统计分析,以进一步丰富杭州地区雷暴大风天气和气候统计特征的分析结果,为杭州萧山机场雷暴大风的预报提供参考。

2. 对流风暴的概念模型和雷暴大风产生机制

2.1. 对流风暴的概念模型

雷暴大风与对流云中下沉气流有关。根据对流风暴的概念模型[2](如图1所示),测站的风速首先会因前侧阵风锋(如果有)的过境而增大(图1(a)),而且风向突变。阵风锋过境时一般没有降水。它的后面是前侧下沉气流区——风暴的第一个近地面大风核(图1)。前侧阵风锋与风暴主体的距离在不同的风暴单体间差异较大,有时当阵风锋紧贴风暴主体时,在雷达上很难将其分辨出来。在大雨、冰雹、龙卷等强对流天气之后是后侧下沉气流区,它是存在于近地面层的第二个大风核所在位置。当对流较弱时,常常出现干下击暴流,即不伴有降水或降水量非常小的对流性大风。

2.2. 雷暴大风的产生机制

对流风暴中下沉气流的产生和维持主要决定于:负浮力和降水物的拖曳作用。通常认为,降水物的拖曳作用是云中下沉气流的启动机制,而负浮力则是使其维持甚至加强的重要因素。负浮力的来源主要有:降水物相变(包括雨水滴蒸发和冰雹等融化)使云中空气冷却,对流层中层环境干空气被夹卷到对流云中加大了蒸发效应进而加大了云中空气冷却,在云中气流下沉的路径上环境空气的温度变化率大于云内下沉气流使得下沉气流较环境大气冷,等等。因此,考察对流层中层是否有干空气及对流层中下层的温度递减率是利用环境条件制作雷暴大风潜势预报的基点。

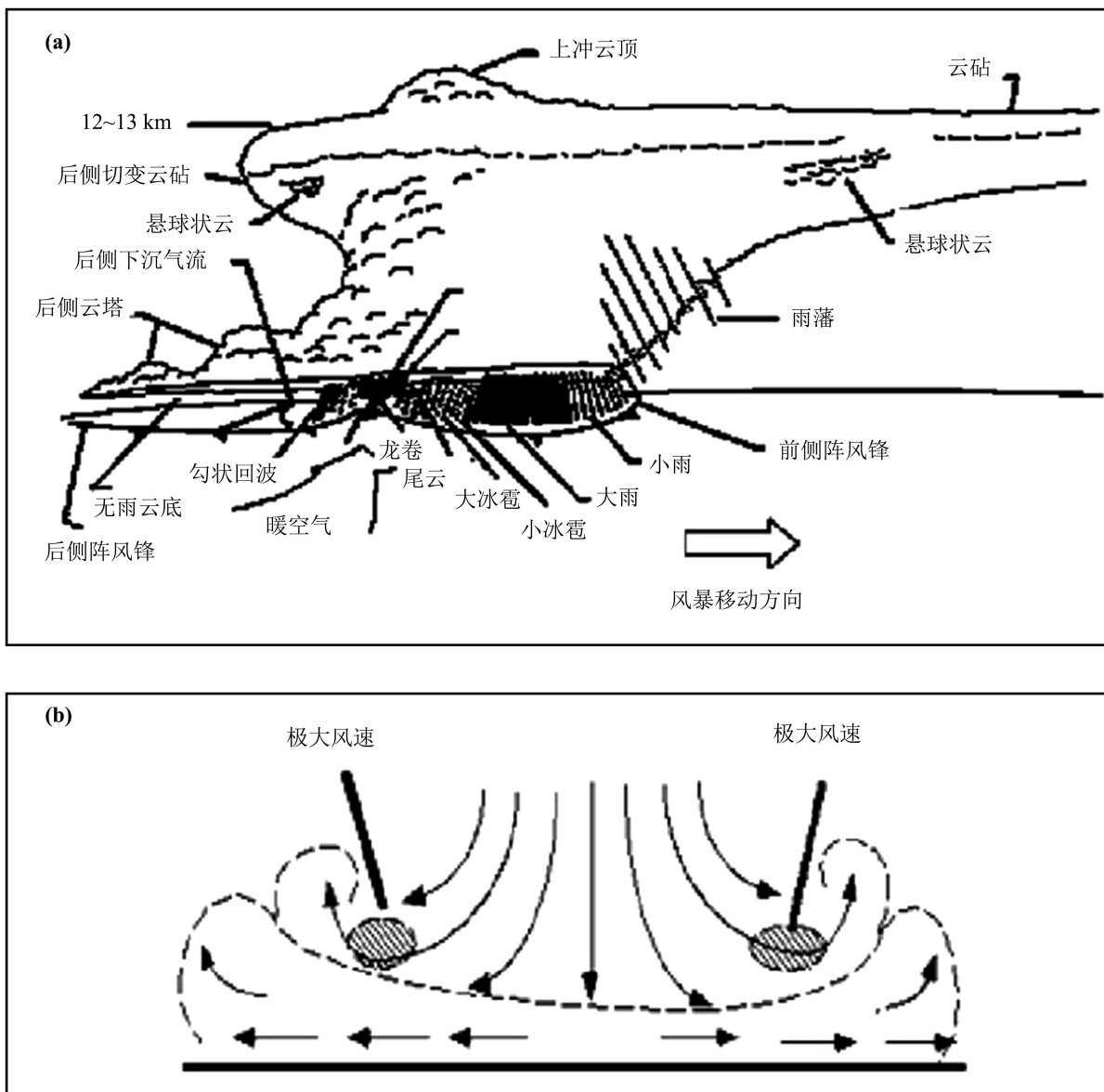


Figure 1. Schematic diagram of classic conceptual models for convective storms [2]. (a) Schematic diagram of a convective storm model; (b) Schematic diagram of a downburst model

图 1. 对流风暴经典概念模型示意图[2]。(a) 对流风暴模型示意图；(b) 下击暴流模型示意图

3. 雷暴大风的气候学特征统计分析

全面掌握一种天气现象的气候特征是制作其预报的基础。雷暴大风、地面降水和冰雹之间有着比较密切的联系，本文通过萧山机场 22 年(2001~2022 年)的地面观测资料和事实，给出雷暴大风爆发过程中有关降水和冰雹的统计结果，并分析了雷暴大风的年际变化、季节分布、日变化特征、大风持续时间特征、雷暴大风时雷暴初始的方向位置特征、大风风向分布特征和风速特征等气候学特征。

3.1. 雷暴大风爆发时地面降水的观测事实

2001~2022 年，萧山机场气象台观测站共观测到 60 次雷暴大风过程(称为雷暴大风日)。其中，有 5 次雷暴大风日在对流活动中地面没有观测到降水，是典型的干型雷暴大风日。而绝大多数雷暴大风日在

大风出现的前后均有降水量大小不一的降水发生。为了考察雷暴大风爆发时地面降水的特征，本文将测站观测到一次雷暴大风记为一个例子，得到了有 61 个个例组成的个例集。

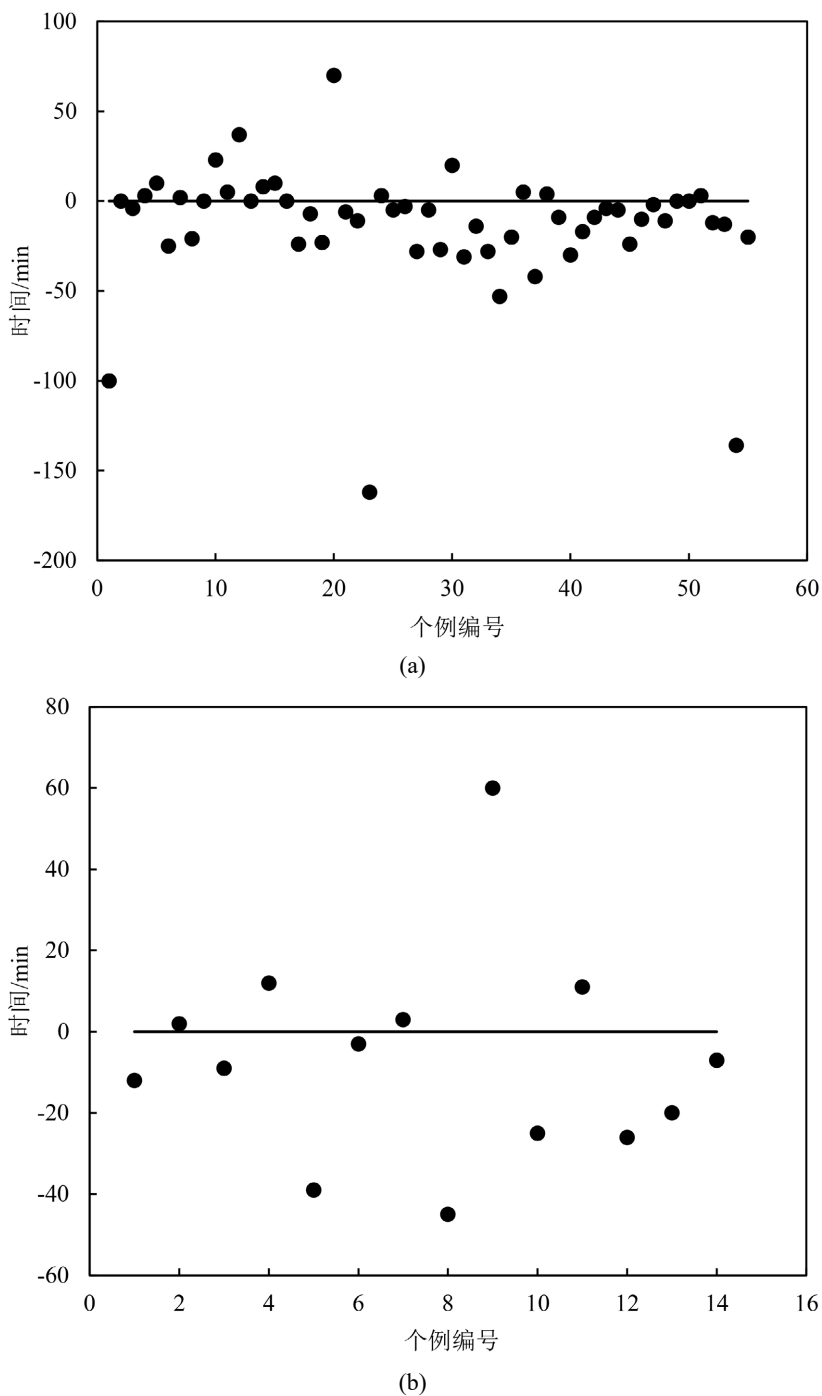


Figure 2. Time difference between thunderstorm weather and surface precipitation. (a) Time difference between the start time of the thunderstorm gust/strong wind and the start time of precipitation; (b) Time difference between the end time of the thunderstorm gust/strong wind and the start time of precipitation

图 2. 雷暴天气与地面降水的时间差。(a) 雷暴大风开始时间与降水开始时间差；(b) 雷暴大风结束时间与降水开始时间差

如图所示,图 2(a)给出了测站风速达到大风标准的初始时间(称为雷暴大风爆发的时间)与降水开始时间的差值。其中,正值表示雷暴大风爆发先于地面降水;负值,反之;0 表示强阵风和降水同时被观测到。统计结果表明,雷暴大风先发于地面降水的个例占 25.45%,雷暴大风爆发于降水之后的个例占 63.63%,大风和降水被同时观测到的个例占 10.91%。因此,萧山机场的雷暴大风多数发生在前侧下沉气流区和后侧下沉气流区中,具有下击暴流的特性。同时,统计了落在正值区的个例雷暴大风结束时间(测站风速减小,达不到大风标准的时间)与降水开始时间的差值(图 2(b))。其中,正值表示在地面降水开始前雷暴大风已经结束;负值,反之;0 表示观测到降水的同时测站风速减小已达不到大风的标准。在 14 个个例中,有 9 个个例雷暴大风的结束时间落后于地面降水的开始时间,最长的落后 45 min。因此,在这些个例中,地面大风出现在阵风锋后面到前侧下沉气流区中。5 个个例在地面降水开始时,大风已经结束。这些个例的地面强阵风由阵风锋过境带来,同时也有可能是在主对流云前发展起来的弱对流云产生的干下击暴流。此外,还统计了与雷暴大风相关联的对流性降水持续时间。其中,7.27%的个例降水持续时间在 30 min 以下,而且降水停止后天空云量减少。因此,这些个例的雷暴大风与移动迅速的飢线等线型回波或孤立的单体有关。上述分析表明,萧山机场的雷暴大风是由下击暴流和阵风锋过境共同作用的结果,风暴的移动速度也是制作雷暴大风临近预报应该考虑的因素之一。

3.2. 雷暴大风爆发时地面降雹概率

在杭州萧山机场,一次对流活动中雷暴大风与冰雹在同一个测站被观测到次数为 3 次,概率为 4.9%。统计了雷暴大风爆发时间与冰雹降落到地面的时间之间的关系(如表 1 所示)。在伴有降雹的 3 个个例中,有 1 个个例大风的持续时间不到 10 min,连续观测到强阵风的最长时间为 40 min,2 个个例大风的持续时间与冰雹的持续时间相差小于 10 min,1 个个例两者相差 29 min。2 个个例冰雹降落到地面的时间及降雹结束时间先于雷暴大风爆发时间及结束时间,1 个例的降雹开始时间及结束时间落后于雷暴大风的爆发时间及结束时间。2 个降雹开始时间及结束时间先于雷暴大风爆发时间及结束时间的个例中,其开始时间差值在 4 min 之内,结束时间差值在 9 min 之内。因此,冰雹的落区附近也是大风的爆发区之一。

Table 1. Statistical table of thunderstorm gust and hail occurrence times from 2001 to 2022 (Times are in Beijing Time, and apply throughout)

表 1. 2001~2022 年雷暴大风和冰雹出现时间的统计表(时间为北京时,下同)

日期	雷暴大风开始时间	雷暴大风结束时间	冰雹开始时间	冰雹结束时间	雷暴大风持续时间(min)	冰雹持续时间(min)
2001.7.12	16:05	16:45	16:01	16:43	40	42
2004.8.4	14:42	15:10	14:40	15:01	28	21
2010.8.26	16:13	16:20	16:15	16:51	7	36

3.3. 年际变化

如图所示,图 3 是 2001~2022 年全年雷暴大风日数的年际分布。从图上可以看出,杭州萧山机场的雷暴大风日年际分布不均,有明显的年际变化:发生雷暴大风最多的年份是 2002 年和 2009 年,有 6 次至多;最少的年份是 2004 年、2005 年和 2007 年,皆为 0 次,两个极值相差 6 次;22 年平均雷暴大风日数为 2.7 次;21 世纪第一个 10 年雷暴大风日数较多,第二个 10 年相对减少,而进入到第三个 10 年中,目前来看雷暴日数相对第二个 10 年有增加趋势。

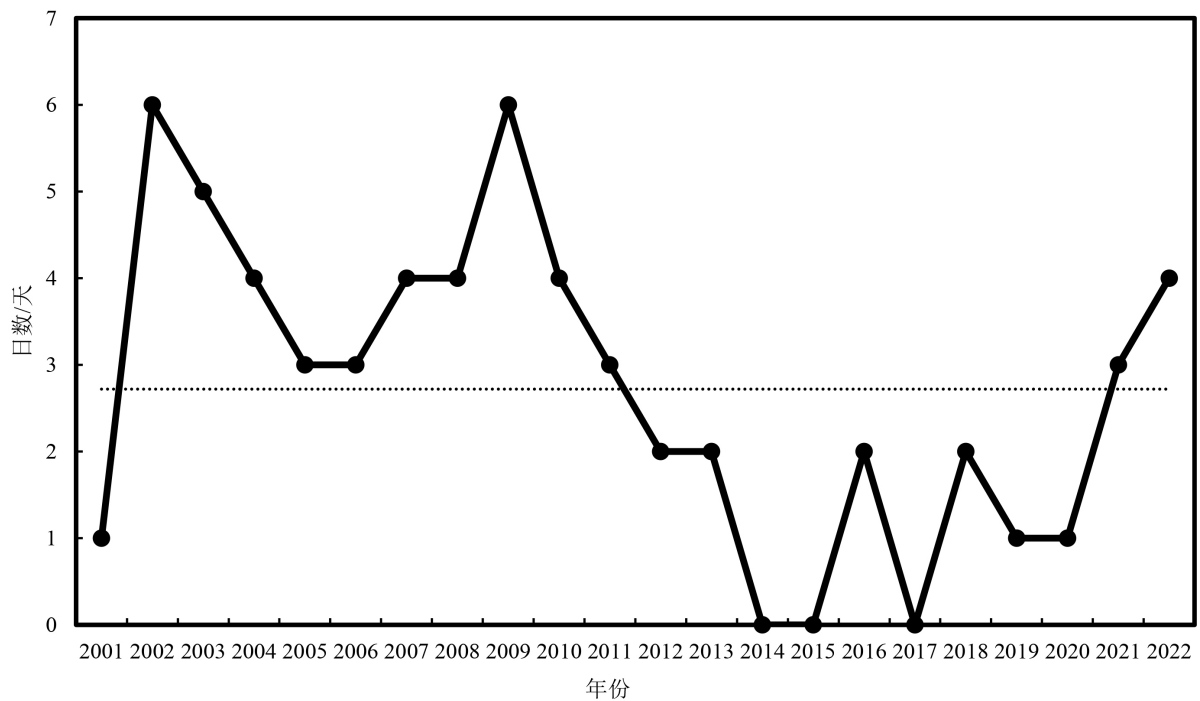


Figure 3. Annual distribution of thunderstorm gust days from 2001 to 2022

图 3. 2001~2022 年雷暴大风日数的年际分布

3.4. 季节分布明显

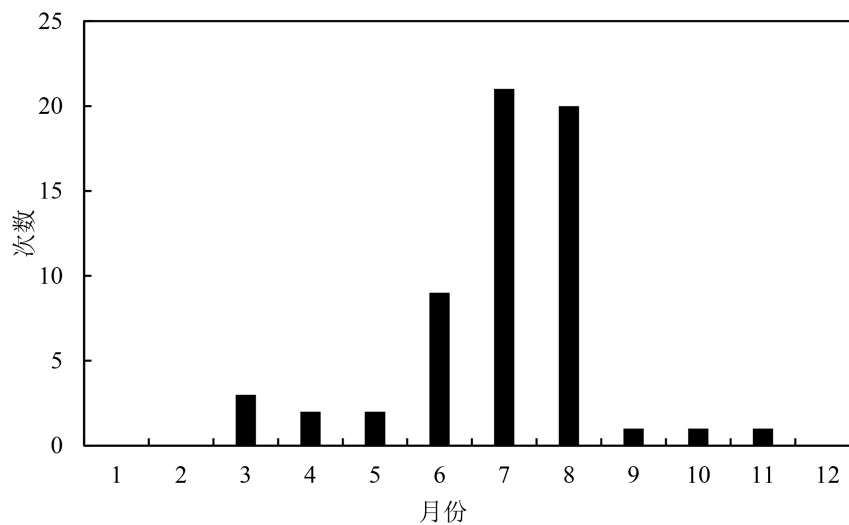


Figure 4. Monthly distribution of thunderstorm gust days from 2001 to 2022

图 4. 2001~2022 年雷暴大风日数的月际分布

如图所示,图 4 是 60 次雷暴大风日数的月际分布,可以看出杭州萧山机场雷暴大风出现在 3~11 月,为春、夏、秋季。夏季(6~8 月)雷暴日数占总数的 83.3%,春季(3~5 月)次之,占总数的 11.7%,秋季最后,占总数的 5%。雷暴大风日数在 6~8 月中,7 月最多,共出现 21 次,占总数的 35%,8 月和 6 月次之,分别为 33.3%和 15%。这说明杭州萧山机场的雷暴大风具有明显的季节性特征,即杭州萧山机场雷暴大风

主要出现在夏季，其次为春季。另外，结合最大阵风风速的月际分布图(图 5)可知，4 月和 9 月的最大阵风风速平均值最高，分别为 26.5 m/s 和 26 m/s，这虽然和样本数比较少有关，但仍可反映出在春季和秋季依然有可能发生比较强的雷暴大风。6 月、7 月和 8 月份的最大阵风风速平均值相对比较低，这和样本数较多有关，但从极大风速值的分布来看，6 月、4 月和 7 月位列前三位，分别为 34 m/s、30 m/s 和 29 m/s。总体来看，杭州萧山机场在春季中期和夏季的前期及中期发生强雷暴大风的概率最大。

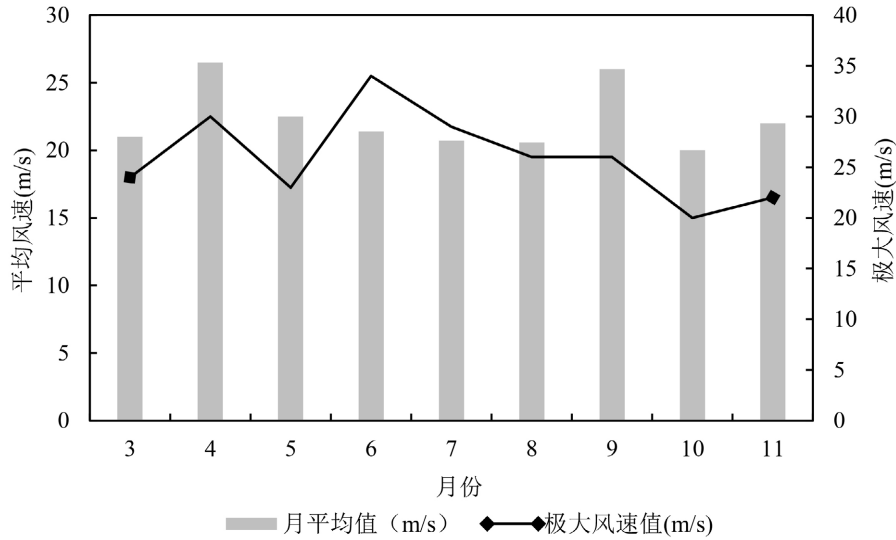


Figure 5. Monthly distribution of the maximum gust wind speed for thunderstorm gust events from 2001 to 2022

图 5. 2001~2022 年雷暴大风最大阵风风速的月际分布

3.5. 单日变化特征明显

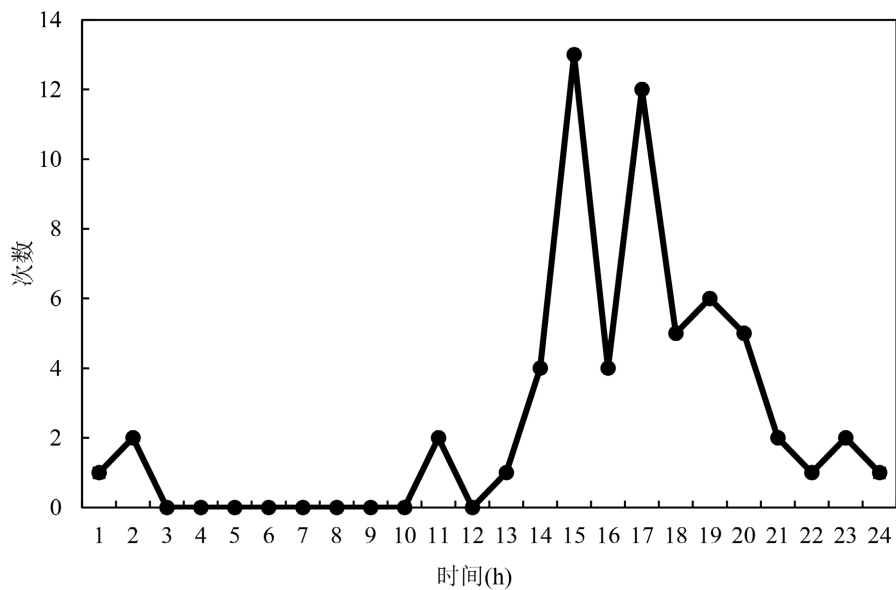


Figure 6. Temporal distribution of thunderstorm gust occurrence from March to November, 2001~2022

图 6. 2001~2022 年 3~11 月雷暴大风出现的时间分布

如图所示, 图 6 是 22 年(2001~2022 年) 3~11 月杭州萧山机场雷暴大风最大阵风风速值的时间分布, 该图是以最大阵风风速出现的时间为尺度, 间隔 1h, 统计各时段出现的雷暴大风次数。可以看出, 雷暴大风主要集中在 13~20 时, 共发生了 49 次, 占个例总数的 80%; 20 时~凌晨 02 时发生了 9 次, 占总数的 14.8%, 10~11 时发生了 2 次, 其余 02~10 时及 11~12 时则无雷暴大风产生。这说明杭州萧山机场雷暴大风具有明显的日变化特征, 即主要峰值发生在下午 13 时到傍晚后 20 时之间, 次峰值时间在半夜前后, 即前半夜 20 时至凌晨 02 时之间。结合雷暴大风的发生日期来看, 下午 13 时到傍晚以后 20 时之间发生的雷暴大风全是在夏秋季, 其中主要发生在夏季, 而半夜前后发生的雷暴大风主要在春季。从最大阵风风速来看, 最大阵风风速大于 25 m/s 的较强雷暴大风的 90% 发生在 13:30~21:30 之间。这是因为午后(13:30 之后)近地面温度将达到最大值, 热力效应造成近地面增温将达到最强, 使得大气层结状态不稳定性增加, 从而有利于雷暴大风的发生并达到较大的强度。

3.6. 雷暴大风持续时间特征

如图所示, 图 7 是 61 次雷暴大风持续时间的分布, 可以看出杭州萧山机场雷暴大风持续时间分布可以分为三个梯队: 第一梯队是 0~15 min, 共有 37 个个例, 占总个例数的 60.7%; 第二梯队是 15~30 min, 共有 16 个个例, 占总个例数的 26.2%; 第三梯队是 30~55 min, 共有 8 个个例, 占总数的 13.1%。这说明萧山机场雷暴大风持续时间随着时间的延长, 发生的次数在减少, 雷暴大风持续时间主要在 0~30 min 之间, 这个比例占 86.9%。春季和秋季雷暴大风的持续时间皆小于 20 min, 夏季雷暴持续时间小于 20 min 的个例占夏季雷暴大风总个例数的 58.8%, 有 41.2% 的夏季雷暴大风持续时间大于 20 min, 有 15.7% 的夏季雷暴大风持续时间大于 30 min, 雷暴大风最长持续时间为 55 min。

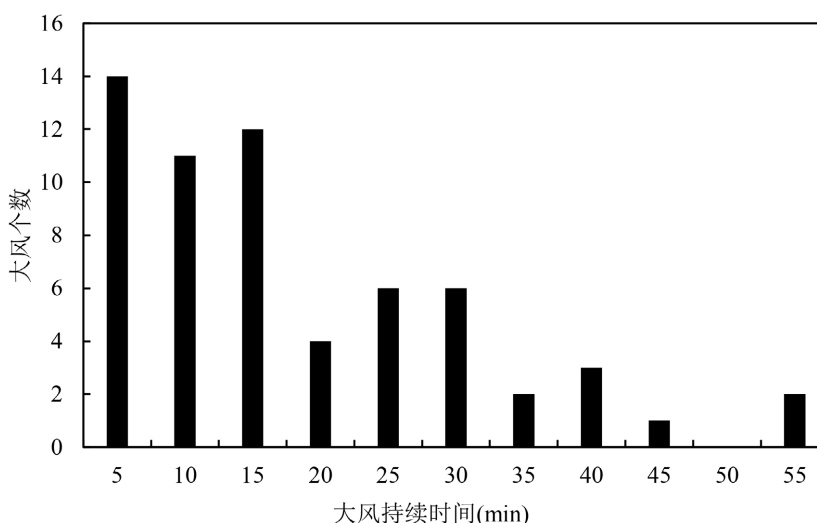


Figure 7. Duration distribution of thunderstorm gust events from 2001 to 2022
图 7. 2001~2022 年雷暴大风持续时间分布

3.7. 雷暴大风时雷暴初始的方向位置特征

如图所示, 图 8 是 2001~2022 年雷暴大风时雷暴初始的方向位置分布, 可以看出 61 次雷暴大风中, 17 次雷暴初始位置位于本场的偏西方向, 占总个例数的 27.9%; 10 次雷暴初始位置位于本场的西南方向, 占总个例数的 16.4%; 雷暴初始位置位于本场的西北方向和偏南方向各有 9 次, 各占总个例数的 14.8%; 最少的是位于本上东北方向和本上上空, 各有 3 次, 各占总个例数的 4.9%。可以看出, 雷暴大风时雷暴

初始的方向位置分布极不均匀, 雷暴大风时雷暴初始的方向位置主要位于本场西侧(包含偏西、西南和西北方向)和南侧, 这两个位置的个例之和占总个例数 73.9%, 位于本场东侧和偏北方向的个例之和占总个例数的 26.1%。

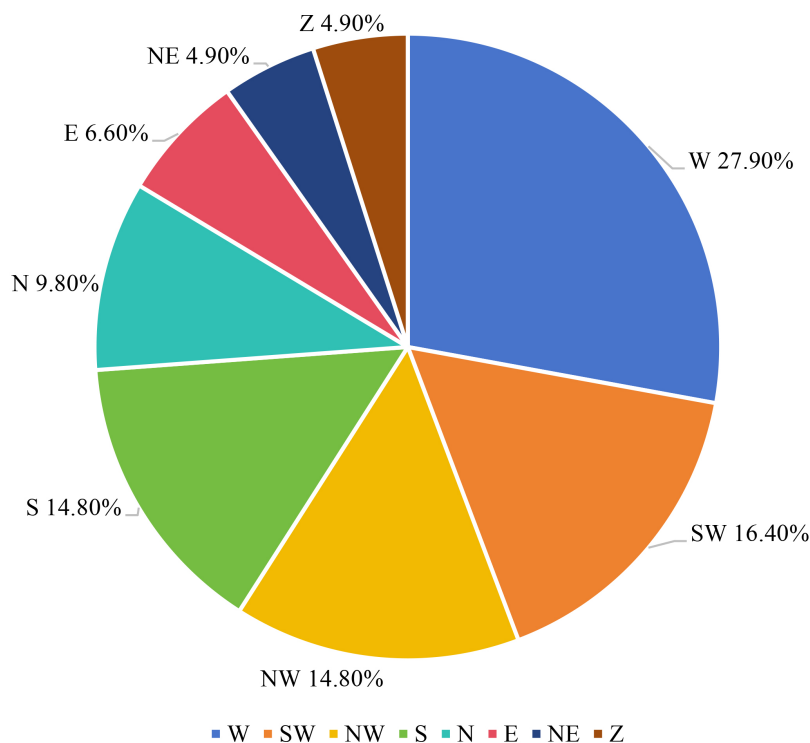


Figure 8. Directional distribution of initial thunderstorm position during thunderstorm gust events, 2001~2022

图 8. 2001~2022 年雷暴大风时雷暴初始的方向位置分布

3.8. 雷暴大风的风向分布特征

如图所示, 图 9 是 2001~2022 年雷暴大风时最大风速的风向分布图, 最大风速的风向散点分布主要集中在两个区域, 一个是 $220^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间, 有 44 个个例, 占总个例数的 72.1%; 一个是 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间, 有 12 个个例, 占总个例数的 19.7%。这和雷暴初始位置及雷暴移动方向有关系, 风向在 $220^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间, 与本场有雷暴大风时的雷暴初始位置多半位于本场的西侧有关, 再加上偏北方向生成的雷暴, 两个方向的雷暴在西风带的影响下往偏东方向移动, 一般雷暴大风的的方向是西北方向、偏西方向和西南偏西方向; 风向在 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间, 一般与台风影响生成的雷暴大风有关, 一般台风从东南方向或者偏东方向往偏北或者西北方向移动, 本场位于台风的北侧容易受其偏东气流的影响。

3.9. 雷暴大风风速特征

在发生的 61 次雷暴大风个例中, 雷暴大风日的最大阵风风速达到了 34 m/s, 平均最大阵风风速为 21.1 m/s。其中, 最大阵风风速达到 30 m/s 及以上的强雷暴大风出现了 2 次, 占个例总数的 3.3%; 而 20~29 m/s 的中级雷暴大风出现的次数最多, 有 35 次, 占个例总数的 57.4%, 超过了半数; 普通雷暴大风(阵风风速为 17~19 m/s)出现 24 次, 占个例总数的 39.2%。上述分析说明杭州萧山机场雷暴大风发生时阵风风速较大、强度较强。

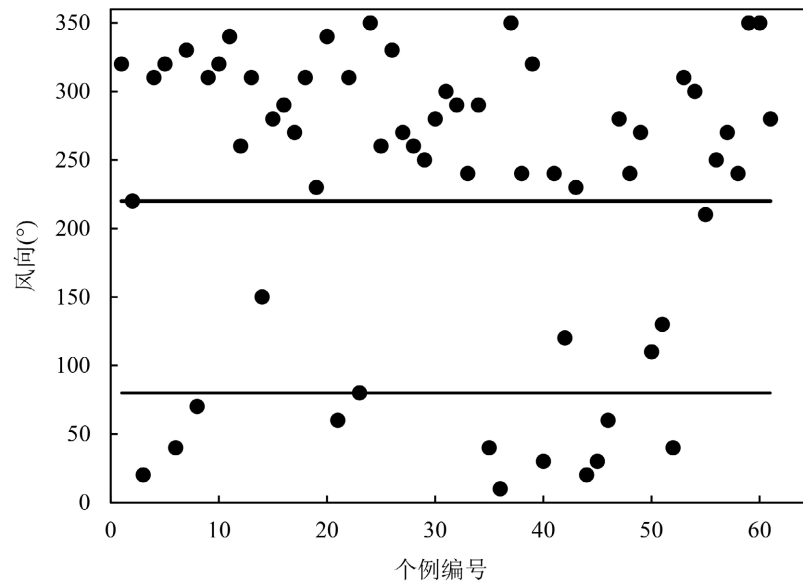


Figure 9. Directional distribution of maximum wind speed during thunderstorm gust events, 2001~2022

图 9. 2001~2022 年雷暴大风时最大风速的风向分布

4. 雷暴大风的天气环境参数分析

雷暴大风是一种典型的强对流天气,除了考虑雷暴(深厚湿对流)生成的三个要素(层结不稳定、水汽、抬升条件)外,还需考虑导致强下沉气流的有利环境条件和表达参数。本文根据 2001~2019 年杭州站的探空资料,采用 08:00 探空数据计算 50 个雷暴大风个例的各个参数,统计结果表明抬升指数、K 指数及 CAPE 值等对春季雷暴大风预报没有指示意义,同时 77.3%的夏季雷暴大风日抬升指数 $< -1.5^{\circ}\text{C}$, 38.6%的夏季雷暴大风日抬升指数 $< -3^{\circ}\text{C}$; 70.5%的夏季雷暴大风日 K 指数 $> 31^{\circ}\text{C}$, 45.5%的夏季雷暴大风日 K 指数 $> 35^{\circ}\text{C}$; 61.4%的夏季雷暴大风日 CAPE 值 $> 500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 38.6%的夏季雷暴大风日 CAPE 值 $> 800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 这个三个参数的数值在区别雷暴和雷暴大风上不明显。原因是上述参数多用于预测上升气流的启动及维持,但是雷暴大风是一种下沉气流,因此这个三个参数在对夏季雷暴大风的预报上有较大的局限性。此外有研究表明大风指数的应用也有局限性,在中层偏干的环境中空报率较高[1],只适用于某些特定的环境,普遍适用性低。俞小鼎等[12]认为,目前获得广泛共识的有利于深厚湿对流内强烈下沉气流产生的有利环境条件有两条:一是对流层中层(700~400 hPa)存在干层;二是对流层中下层(地面~500 hPa)的温度直减率相对较大,这个条件也有利于强上升气流的产生。以下本文主要对这两个环境条件的统计特征进行讨论。

4.1. 对流层中层 700~400 hPa 之间的干层特征

雷暴大风是对流风暴中较强的下沉气流,环境干空气的夹卷对下沉气流的启动是重要的。本文用 700~400 hPa 之间平均温度露点差和其中单层最大温度露点差来研究对流中层干空气的强度,如图 10 所示。50 个雷暴大风个例的对流层中层平均温度露点差的平均值为 10.8°C ,主要为 5.5°C ~ 25°C 之间,最高为 40°C ; 50 个雷暴大风个例的对流层中层单层最大温度露点差的平均值为 17.9°C ,主要为 10°C ~ 29°C 之间,最高为 45°C 。俞小鼎等[12]计算出对流层中层 700~400 hPa 之间明显干层的具体参考阈值,在海拔低于 1000 m 以下的低海拔地区 700~400 hPa 之间平均温度露点差不小于 6°C ,或其单层最大温度露点差不小于 10°C 。本文根据这个参考值来检验本场 50 个雷暴大风个例,得出 700~400 hPa 之间平均温度露点差

不小于 6°C 的个例有 41 个个例，占总数的 82%；700~400 hPa 之间单层最大温度露点差不小于 10°C 有 40 个个例，占总数的 80%，其中这 40 个个例都包含在前面 41 个个例中，本文认为俞小鼎等给出的 700~400 hPa 之间明显干层的参考阈值是适用于杭州萧山机场的。因此，对流层中层 700~400 hPa 之间平均温度露点差不小于 6°C，或其单层最大温度露点差不小于 10°C，对本场雷暴大风的潜势预报有较好的指示作用。

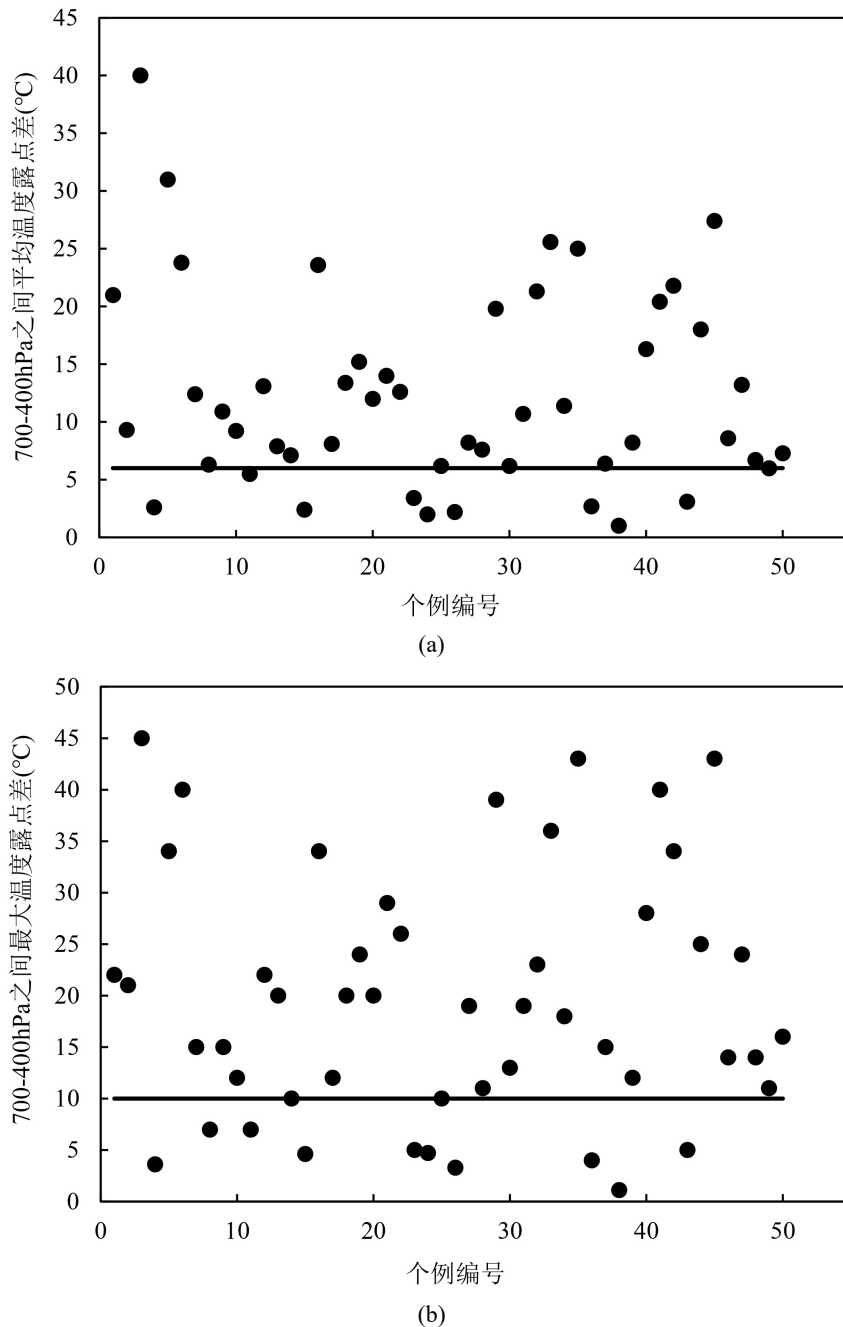


Figure 10. Average temperature-dewpoint depression between 700 and 400 hPa (a) and maximum temperature-dewpoint depression between 700 and 400 hPa (b) for thunderstorm gust events, 2001~2019

图 10. 2001~2019 年雷暴大风 700~400 hPa 之间平均温度露点差(a)和 700~400 hPa 之间最大温度露点差(b)

4.2. 对流层中下层温度递减率特征

对流层中下层(地面~500 hPa)的温度直减率对于较强下沉气流的维持是重要的, 该温度递减率越大, 下沉气流下降过程中(本身会产生增温)环境的增温幅度越大, 有利于下沉气流和环境之间负温差的保持, 有利于下沉气流内已形成的下沉气流强度的维持[3]。一般用 850~500 hPa 温差来代表对流层中下层温度递减率, 如图 11 所示。本场雷暴大风时 850~500 hPa 温差的平均值为 25.5℃, 主要 23.3℃~28.3℃, 最高为 30.5℃。俞小鼎[12]计算出 850~500 hPa 温差的具体参考阈值, 在海拔低于 1000 m 以下的低海拔地区 850~500 hPa 温差不小于 24℃。本文根据这个参考值来检验本场 50 个雷暴大风个例, 得出 850~500 hPa 温差不小于 24℃的个例数为 40 个, 占总个例数的 80%。如果把 850~500 hPa 温差值设为不小于 25℃, 则满足这个条件的本场个例数为 32 个, 占总个例数的 64%。可以看出, 温度直减率阈值设置的越低, 命中数会增多, 但空报率也会增加; 阈值设置越高, 命中数会减少, 但空报率会降低。在实际工作中, 850~500 hPa 温差不小于 24℃这个阈值应用到本场空报率会比较高, 把 850~500 hPa 温差值设为不小于 25℃比较适用于杭州萧山机场, 对本场雷暴大风的潜势预报有较好的指示作用。

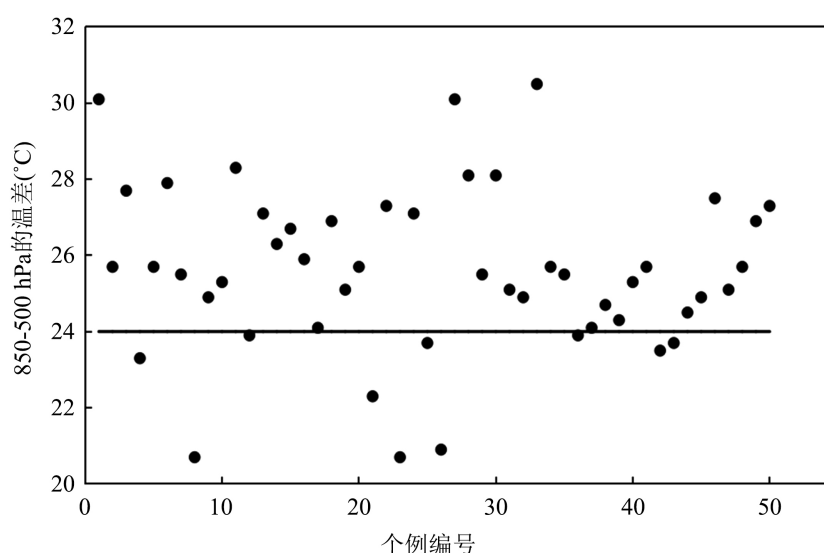


Figure 11. Temperature difference between 850 and 500 hPa during thunderstorm gust events from 2001 to 2019

图 11. 2001~2019 年雷暴大风 850~500hPa 温差

5. 结语

利用 2001~2022 年杭州萧山机场观测站观测资料和 2001~2019 杭州站探空资料, 统计了出现在该期间的 61 次雷暴大风过程地面强阵风爆发时降水和冰雹的气候特征、年际变化、季节分布、日变化特征、大风持续时间特征、雷暴大风时雷暴初始的方向位置特征、大风风向分布特征和风速特征, 对抬升指数、K 指数和 CAPE 值做了对比分析, 对两个大气环境条件: 流层中层(700~400 hPa)的干层和对流层中下层(850~500 hPa)的温度直减率进行了统计分析。通过研究, 得出以下结论。

(1) 在杭州萧山机场, 绝大多数雷暴大风过程有降水发生, 但是降水量大小不一。在所研究的个例中, 77.54%的雷暴大风发生在地面降水区中, 22.46%的个例雷暴大风爆发超前于地面降水。在这些超前的个例中, 有 5 个个例(占总个例数的 8.2%)在雷暴大风爆发和持续期间没有降水; 7.27%的个例降水持续时间在 30 min 以下。萧山机场的雷暴大风是由下击暴流和阵风锋引起的。4.9%的雷暴大风过程中伴有地面降

雹, 降雹区也是雷暴大风发生概率较高区。

(2) 雷暴大风日年际分布不均, 有明显的年际变化。雷暴大风的发生具有明显的季节性特征, 即杭州萧山机场雷暴大风主要出现在夏季, 其次为春季, 在春季中期和夏季的前期及中期发生强雷暴大风的概率最大。雷暴大风具有明显的日变化特征, 夏季主要峰值发生在下午 13 时到傍晚以后 20 时之间, 春季峰值时间在半夜前后, 即前半夜 20 时至凌晨 02 时之间。90% 的最大阵风风速大于 25 m/s 的较强雷暴大风发生在 13:30~21:30 之间。

(3) 86.9% 的雷暴大风持续时间在 0~30 min 之间, 春季和秋季雷暴大风的持续时间皆小于 20 min。夏季雷暴持续时间小于 20 min 的个例占夏季雷暴大风总个例数的 58.8%, 有 41.2% 的夏季雷暴大风持续时间大于 20 min, 有 15.7% 的夏季雷暴大风持续时间大于 30 min。

(4) 雷暴大风时雷暴初始方位分布极不均匀, 73.9% 的雷暴大风时雷暴初始方位位于本场西侧(包含偏西、西南和西北方向)和南侧, 26.1% 的雷暴大风时雷暴初始方位位于本场东侧和偏北方向。

(5) 雷暴大风最大风速的风向主要集中在两个区域, 72.1% 的风向在 220°~360° 之间, 19.7% 的方向在 0°~80° 之间。雷暴大风发生时阵风风速较大、强度较强, 20~29 m/s 的中级雷暴大风出现的次数最多, 占个例总数的 57.4%, 普通雷暴大风(阵风风速为 17~19 m/s)占个例总数的 39.2%。

(6) 抬升指数、K 指数和 CAPE 值对杭州萧山机场雷暴大风的潜势预报有较大的局限性。对流层中层(700~400 hPa)干空气的夹卷对下沉气流的启动很重要, 萧山机场雷暴大风个例的对流层中层平均温度露点差的平均值为 10.8℃, 雷暴大风个例的对流层中层单层最大温度露点差的平均值为 17.9℃。认为当 700~400 hPa 之间平均温度露点差不小于 6℃, 或其单层最大温度露点差不小于 10℃ 时, 对本场雷暴大风的潜势预报有较好的指示作用。

(7) 对流层中下层(地面~500 hPa)的温度直减率对于较强下沉气流的维持是重要的, 萧山机场雷暴大风时 850~500 hPa 温差的平均值为 25.5℃。把 850~500 hPa 温差值设为不小于 25℃, 对本场雷暴大风的潜势预报有较好的指示作用。

因樊李苗等[11]已对杭州夏季午后雷暴大风天气形势作了详尽的分析总结, 故本文未对萧山机场雷暴大风的天气形势作再次分析。同时因雷达资料的匮乏, 本文也未对雷暴大风的对流回波形态进行总结, 需要在以后积累一定数量个例的前提下对回波形态作进一步的研究。

参考文献

- [1] 秦丽, 李耀东, 高守亭. 北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 755-762.
- [2] 廖晓农, 于波, 卢丽华. 北京雷暴大风气候特征及短临预报方法[J]. 气象, 2009, 35(9): 18-28.
- [3] 杨璐, 陈明轩, 孟金平, 等. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 2018, 344(6): 802-813
- [4] 许霖, 姚蓉, 王晓雷, 等. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 993-1000.
- [5] 曹倩, 郭建平, 孙玉萍, 等. 2015-2023 年江西雷暴大风特征分析[J]. 气象, 2024, 50(12): 1495-1508.
- [6] 曹世腾, 杨磊, 陈宇, 等. 2017-2021 年辽宁省冷涡型雷暴大风时空分布及环境参数特征[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(4): 65-73.
- [7] 马淑萍, 王秀明, 俞小鼎. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报, 2019, 30(3): 292-301.
- [8] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.
- [9] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 401-409.
- [10] 方翀, 王西贵, 盛杰, 等. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1-18.
- [11] 樊李苗, 俞小鼎. 杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1621-1632.
- [12] 俞小鼎, 王秀明, 李万丽, 等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 292-348.