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

绍兴南部山地雷暴大风特征与地形作用研究

蔡骐超 张春艳 姚佳骏 石磊 张宇梁

Study on the characteristics and terrain effect of thunderstorm gale in the southern mountainous area of Shaoxing

CAI Qichao，ZHANG Chunyan，YAO Jiajun，SHI Lei，ZHANG Yuliang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-037

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

海南岛雷暴大风天气形势和环境参数特征分析

Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm gales in Hainan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 86-93 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.010

湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征

Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province

暴雨灾害. 2022, 41(1): 66-75 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.008

山东省雷暴大风天气学分型与物理诊断量统计特征

Synoptic classification and statistical characteristics of physical diagnoses for thunderstorm gale in Shandong Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 362-373 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.004

冷涡背景下河北雷暴大风环境条件与对流风暴演变个例分析

Analysis of environmental condition and convective storm evolution of a thunderstorm gale event under cold vortex in Hebei

暴雨灾害. 2020, 39(1): 52-62 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.006

一次深秋高架雷暴天气的对流特征与发展机制分析

Analysis of convective characteristics and development mechanisms of a late-autumn elevated thunderstorm

暴雨灾害. 2025, 44(2): 197-206 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-035

贵州省短时强降水时空分布特征分析

Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Guizhou Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 383-392 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡骐超,张春艳,姚佳骏,等.2026.绍兴南部山地雷暴大风特征与地形作用研究[J].暴雨灾害,45(1):103−110. CAI Qichao, ZHANG Chunyan, YAO Jiajun, et al. 2026. Study on the characteristics and terrain effect of thunderstorm gale in the southern mountainous area of Shaoxing [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):103−110 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−037

绍兴南部山地雷暴大风特征与地形作用研究

蔡骐超[1], 张春艳[2], 姚佳骏[1], 石磊[3], 张宇梁[3]

(1. 浙江省嵊州市气象局, 嵊州 312400; 2. 浙江省绍兴市气象台, 越城 312000;
3. 浙江省嵊州市气象防灾减灾中心, 嵊州 312400)

摘　要: 基于 2017—2021 年绍兴及周边地区 714 个国家、区域气象观测站和雷电观测、ERA5 再分析以及台风路径等资料, 分析了绍兴及周边地区雷暴大风的时空分布特征以及南部山地不同天气型雷暴大风的环流特征, 并利用 ERA5 资料计算的对流参数研究了三次雷暴大风天气过程中山地地形的作用。结果表明: (1) 绍兴及周边地区雷暴大风年平均次数空间分布不均, 两个明显高发区位于南部山地会稽山脉西侧和四明山脉西南侧。(2) 绍兴南部山地雷暴大风主要出现在 3—9 月的下午至前半夜, 日变化峰值较为显著, 后半夜至上午也常发生; 平原地区后半夜至上午很少发生雷暴大风。(3) 绍兴南部山地雷暴大风的天气型有三类: 高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型和准正压型, 其中准正压型最多(66.3%), 此型中副热带高压作用显著。(4) 绍兴南部山地地形对雷暴大风作用分为两类: 一是动力作用, 山地导致迎风坡气流抬升, 加强上升运动; 二是热力作用, 山地的存在使得自由对流高度和下垫面的高度差随海拔高度的增加而减小, 对流更容易产生, 其作用主要发生在午后时段。

关键词: 雷暴大风; 天气分型; 时空分布; 地形作用

中图法分类号: P458.1^{+}23　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−037

Study on the characteristics and terrain effect of thunderstorm gale in the southern mountainous area of Shaoxing

CAI Qichao[1], ZHANG Chunyan[2], YAO Jiajun[1], SHI Lei[3], ZHANG Yuliang[3]

(1. *Shengzhou Meteorological Bureau of Zhejiang Procince*, *Shengzhou* 312400; 2. *Shaoxing Meteorological Station of Zhejiang Province*, *Yuecheng* 312000; 3. *Shengzhou Center for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Zhejiang Procince*, *Shengzhou* 312400)

Abstract: Based on data from 714 national and regional weather observation stations, lightning observations, ERA5 reanalysis, and typhoon tracks from 2017 to 2021, this study analyzed 1) the spatiotemporal distributions of thunderstorm gale in Shaoxing and surrounding areas, 2) circulation characteristics of the different weather types of thunderstorm gale in the southern mountainous regions, and 3) investigated the role of terrain in three thunderstorm gale events using convection parameters by the EAR5 data. The results are as follows. (1) The spatial distribution of the annual average frequency of thunderstorm gale shows two obvious high incidence areas near the southern mountainous terrain in Shaoxing, namely the westside of the Kuaiji Mountains and the southwest side of the Siming Mountains. (2) Thunderstorms gale in the southern mountainous areas of Shaoxing mainly occur from the afternoon to the early half of the night with significant daily peak variation from March to September. It also often appears in morning and the late half of the night, rarely occurs in the plain areas in morning and the late half of the night. (3) There are three typical weather types for thunderstorms gale in the southern mountainous areas of Shaoxing with different forcing: a) cold advection, b) warm advection, and c) quasi-barotropic. Among them, the quasi-barotropic category is the most common (66.3%), in which the subtropical high pressure plays a significant role. (4) There are two formation mechanisms of thunderstorm gale in the southern mountains: First, mountain terrain leads to the airflow uplift and strengthen the upward movement; Second, the existence of mountain reduces the height difference between the free convection height and the underlying surface with increasing altitude, making convection more likely to occur. However, thermal effects mainly occur in the afternoon.

收稿日期: 2023−02−28; **定稿日期**: 2023−07−31

资助项目: 浙江省气象局科技计划项目 (2021YB24); 绍兴市气象局揭榜挂帅项目 (2021GS08); 绍兴市气象局预报员专项(2024YBY09)

第一作者: 蔡骐超, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: cai_qichao@foxmail.com

通信作者: 张春艳, 主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail: yfyzcy@sohu.com

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

Key words: thunderstorm gale; weather typing; spatial-temporal distribution; terrain effect

引　言

雷暴大风是指伴随强雷暴而出现的强烈短时大风，易在短时间内产生 8 级及以上大风，对简易搭建物、户外设施、高空作业等造成严重危害，造成财产损失甚至人身危害。Fujita 和 Byers (1977) 及 Johns 和 Doswell III (1992) 均认为下击暴流是造成雷暴大风的主要原因。由于雷暴大风具有突发性和破坏力强的特点，在日常生活被广泛关注，也是预报业务中监测预警的重要内容。

雷暴大风的产生需要满足一定的中低层水汽条件、大气不稳定条件以及抬升条件 (Doswell III, 1987; 秦丽等, 2006)，这依赖于相应的大尺度环境条件 (孙继松和陶祖钰, 2012; 郑永光等, 2017)。已有研究总结了部分地区发生雷暴大风的典型天气形势 (华雯丽等, 2021; 刘彬等, 2022; 王艳春等, 2023)，周虹等 (2018) 研究了四川南充地区的雷暴大风天气环流，可分为高空冷平流强迫类和斜压锋生类；柯元惠等 (2022) 则将海南地区的雷暴大风天气环流总结为西南热低压型、季风槽型和冷锋型；韦惠红等 (2022) 将湖北雷暴大风天气形势总结为高空冷平流强迫型、斜压锋生型、低层暖平流强迫型和准正压型。樊李苗和俞小鼎 (2020) 研究了杭州夏季雷暴大风的天气分型，总结为高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型和准正压型三类。以上研究表明不同地区产生雷暴大风的天气型特征存在差异，需要针对性进行研究。

此外，雷暴大风这种中小尺度的灾害性天气，具有明显的局地特征，易受局地环境条件影响，而下垫面则是一个重要的影响因素，会导致雷暴大风空间分布不均匀性，这在其他地区的研究中同样有体现。周虹等 (2018) 通过统计分析得出南充雷暴大风日次频数北部山区多于南部丘陵区；王黉等 (2020) 和龙柯吉等 (2024) 研究了川藏地区的雷暴大风，发现高原站的频次大于盆地站。此外，根据下垫面的不同，还可以分为山地或平原的雷暴大风。针对发生在山地的雷暴大风，学者们研究认为，地形对对流影响主要有：动力作用 (孙继松和陶祖钰, 2012; 黄小彦等, 2019) 和热力作用 (孙继松和陶祖钰, 2012) 两种。动力作用方面，钟利华等 (2011) 通过研究广西雷暴大风，认为局地雷暴大风的出现与地形作用有密切关系，地形的狭管效应、地形抬升等作用有利于雷暴大风天气的发生。孙继松和陶祖钰 (2012)、王选嵩等 (2020)、邹灵宇等 (2022) 研究认为山脉会对其周围的气流产生影响，进而在接近山脉附近产生抬升运动，触发对流；或山谷风引起的局地环流也加强了对流的发展。热力作用方面，吕晓娜等 (2020) 研究认为山区和其他地区的对流物理量阈值存在差异，山区出现雷暴大风所需的不稳定能量较小，更易产生雷暴大风天气。以上研究表明地形的动力或热力作用对雷暴大风的分布和发展具有重要作用。

绍兴位于浙江中北部，地势为南高北低，具有群山环绕、盆地内含、平原集中的地貌特点，山地在下垫面的占比较大。春夏季绍兴地区特别是南部山地出现过多次雷暴大风过程，对人民群众的生产生活造成影响，如 2017 年 6 月 30 日、2017 年 8 月 12 日、2021 年 5 月 15 日等出现的雷暴大风天气均对户外设施和农作物造成损失。樊李苗和俞小鼎 (2020) 研究了杭州的雷暴大风，杭州距离绍兴较近，有较好的参考价值，然而杭州为钱塘江入海口，地形多为冲击平原，而绍兴多山地地形，相近地点不同地形产生雷暴大风的天气型是否相同需要研究。此外，上述文献只分析了夏季雷暴大风，春季也是绍兴雷暴大风的多发季节，也需要对雷暴大风开展研究。

本文利用 2017—2021 年绍兴及周边地区 714 个国家、区域气象观测站 (以下分别简称国家站和区域站) 的地面和雷电观测、ERA5 再分析以及台风路径等资料，研究了绍兴及周边地区的雷暴大风分布特征以及南部山地不同天气型雷暴大风的环流特征，并基于 ERA5 再分析资料计算的对流参数分析了山地地形对雷暴大风的影响机制，旨在为该地区雷暴大风的预报预警提供参考。

1　资料、区域与方法介绍

1.1　资料及区域介绍

本文使用的资料包括：(1) 绍兴及周边地区 714 个国家和区域站 (图 1) 逐小时极大风速、气温、2 min 风向风速和闪电定位仪的雷电极性、强度、出现时间、位置等雷电资料，来源于浙江省气象局的自动站资料库，其中极大风速资料用于雷暴大风过程统计及分析时空分布特征，雷电资料用于判断大风过程是否属于雷暴大风，其余资料用于地形作用分析；(2) 欧洲中期天气预报中心大气再分析 ERA5 资料，空间分辨率为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 h，包括不同高度层的位势高度、风、气温、相对湿度等要素，用于天气分型及地形作用分析；(3) 西太平洋和南海生成的台风路径资料，来源于绍兴市气象局台风资料数据库，用于剔除台风环流引起的大风过程。以上资料时间均为 2017—2021 年。

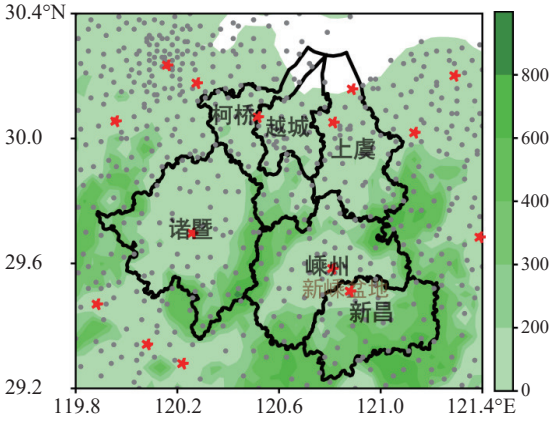


图 1 绍兴及周边国家站 (红色星号) 和区域站 (灰色圆点) 分布及地形高度 (填色, 单位: m)

Fig. 1 Distribution of terrain height (color, unit: m), national stations (red asterisks) and regional station (gray dots) in Shaoxing and surrounding areas

绍兴市下辖柯桥、越城、上虞、诸暨、嵊州、新昌 6 个县区, 南北地形差异较大。其中南部地区 (诸暨、嵊州、新昌 3 个县) 多山地起伏, 山地主要分布在新嵊盆地及周边 (图 1)。研究区域为绍兴及周边地区, 具体指绍兴市及周边县市的部分地区, 范围 119.8°—121.4°E, 29.2°—30.4°N (图 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 雷暴大风过程挑选和归类

由于绍兴及周边地区区域站的数量逐年增加, 在选择分析年份的时候, 如果起始年份太早, 站点分布会过于稀疏, 可能会漏掉雷暴大风天气, 为避免由于站点数量变化引起的统计误差, 综合考虑起始年份的站点数量, 选择 2017—2021 年的国家和区域站资料。首先, 利用绍兴及周边地区共 714 个国家和区域站的逐小时极大风速数据, 挑选出大风天气。由于能够引起大风天气的因素有很多, 如本文研究的雷暴, 也可以是冷空气、台风等, 不同大风天气的影响系统、特征、机制各不相同, 本文仅讨论强对流引起的雷暴大风。因此, 结合国家和区域站小时降水、气温以及雷电、台风等数据, 对用极大风速挑选出来的大风天气进行筛选, 剔除冷空气大风、台风大风以及错误数据。然后, 参考柯元惠等 (2022) 和邹灵宇等 (2022) 的研究方法, 本文雷暴大风过程具体判别方法如下: 单站小时极大风速≥8 级 (17.2 $m \cdot s^{-1}$) 且伴有雷电, 同时剔除受冷空气和台风环流影响的过程和异常数据; 最后, 根据达标站点的时间和空间连续性进行过程归类, 将相近时间、相近地域先后出现的雷暴大风归类为一次雷暴大风天气。共挑选出绍兴及周边地区雷暴大风过程 234 个, 其中绍兴南部地区的雷暴大风过程 89 个, 对其进行统计分析。

1.2.2 雷暴大风天气分型及年平均次数计算

利用 ERA5 再分析资料, 分析 500 hPa、850 hPa 等高度的天气形势, 参考已有天气分型方法(樊李苗和俞小鼎, 2020; 刘彬等, 2022; 柯元惠等, 2022), 按照冷暖平流、干湿区、槽线、切变线等影响系统的位置、强度, 对雷暴大风进行天气分型。同时计算了雷暴大风单站年平均次数和区域年平均次数, 计算方式如下: (1) 雷暴大风单站年平均次数为 2017—2021 年 5 a 内单站小时极大风速≥8 级的年平均出现次数; (2) 雷暴大风区域年平均次数为区域内所有站点单站年平均次数的平均值。

1.2.3 对流参数计算

为定量分析地形高度改变局地的热力场, 通过改变局地站点的高度, 分析其对流条件与地形高度变化是否有关系 (王瑶等, 2024)。具体做法为: 利用区域站气象要素, 分析地面风场的分布特征与地形的关系, 并结合 ERA5 资料计算站点的对流有效位能、对流抑制能量、自由对流高度等对流参数值, 分析绍兴南部山地地形对雷暴大风可能产生的影响机制。由于绍兴南部山区海拔高度基本在 1 500 m 以下 (大致为 850 hPa), ERA5 资料在这个高度下共 7 层, 按照线性插值的方法 (王瑶等, 2024) 加密其中的气象要素值, 计算对流参数值。

2 绍兴及周边地区雷暴大风时空分布特征

2.1 空间分布特征

图 2 给出了 2017—2021 年绍兴及周边地区年平均雷暴大风分布, 可见呈现明显的空间分布不均, 且存在几处高发区。结合地形分布可知, 绍兴南部山地雷暴大风年平均次数高值区和地形有一定关系。主要存在 2 个高发区: 会稽山脉西侧 (区域 1)、四明山脉西南侧 (区域 2)。而区域 3 为新嵊盆地中部地

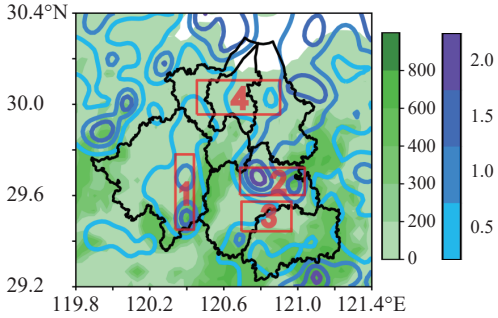


图 2 2017—2021 年绍兴及周边地区年平均雷暴大风次数 (等值线) 和地形 (填色, 单位:m) 分布 (数字为不同分区)

Fig. 2 Distribution of terrain (color, unit: m) and annual average number of thunderstorm gale (isoline) in Shaoxing and surrounding areas from 2017 to 2021 (The umbers for different partitions)

区，雷暴大风出现的频数相对较低。区域 4 为绍兴北部相对平坦的地区，雷暴大风出现年平均次数同样比较低。本文参考许霖等 (2017)、王黉等 (2020) 区域对比的方法，选取以上 4 个区域进行对比分析，这种分析方法已有文献采用，也在研究工作中取得一定的研究成果。选择区域 3 和 4 两个最低频率出现雷暴大风的山地和平原地形是为了和本地区最高频率区域 1 和 2 进行对比。

2.2 时间分布特征

利用 4 个区域内国家和区域站观测的雷暴大风统计各区域站点年平均次数的月变化和日变化，其结果见图 3。由图可见，4 个区域的雷暴大风主要出现在 3—9 月，不同区域之间存在差异。区域 2 除极个别月份外，总体上各月出现次数均最多，其中 5 月为该区域雷暴大风最活跃月份，年平均次数达 2.2 次，其次是 6、8 月 (图 3b)；区域 1、4 逐月演变趋势和区域 2 类似，但各月的次数偏少一些，其中前者次数略偏多 (图 3a、d)。区域 3 总体雷暴大风不活跃，次数明显偏少 (图 3c)。

由 4 个区域的站点年平均次数日变化可见，雷暴大风主要出现在午后至前半夜，和之前的一些研究成果 (方翀等，2017；王黉等，2020；刘彬等 2022) 相近。其中区域 2 全年出现时段跨度最大，各小时出现次数也最多，以 16:00—20:00 (北京时，下同) 为主 (图 3f)；区域 1、4 的时段跨度类似，但区域 4 雷暴大风出现的时段约偏早 1 h (图 3e、h)；区域 3 各月雷暴大风出现较少，集中在 17:00 前后 (图 3g)。此外，区域 1、2 在早晨至上午时段也会出现雷暴大风，只不过和午后相比明显偏少 (图 3e、f)。

本节探讨了绍兴及周边地区雷暴大风时空分布特征，绍兴南部山地雷暴大风年平均次数高值区和地形有一定关系，高值区分别出现在会稽山脉西侧 (区域 1) 和四明山脉西南侧 (区域 2)，而新嵊盆地中部地区 (区域 3) 和绍兴北部相对平坦的地区 (区域 4) 雷暴大风出现次数则相对较少。4 个区域中，会稽山脉西侧和四明山脉西南侧除极个别月份外，总体上各月出现次数均最多，且出现时段跨度最大，一天中各小时出现次数也最多。

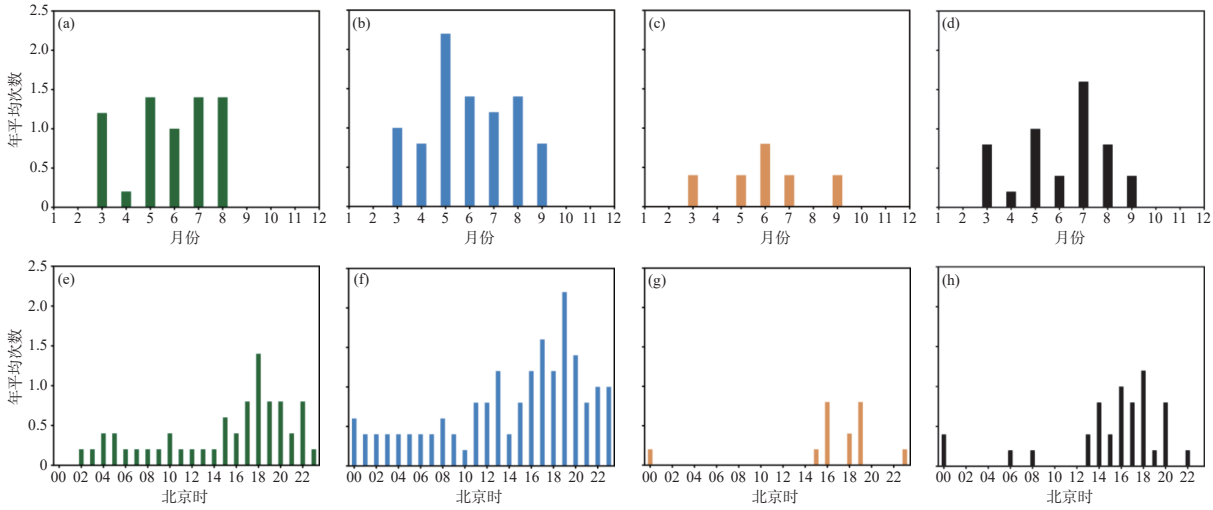


图 3 2017—2021 年绍兴地区区域 1 (a、e)、2 (b、f)、3 (c、g) 和 4 (d、h) 雷暴大风站点年平均次数月变化 (a—d) 和日变化 (e—h)

Fig. 3 (a-d) Monthly and (e-h) daily variation of the average annual frequency of thunderstorm gale in regions (a, e) 1, (b, f) 2, (c, g) 3, and (d, h) 4 of Shaoxing from 2017 to 2021

3 绍兴南部山地雷暴大风天气分型及特征

分析 2017—2021 年出现在绍兴南部山区的 89 次雷暴大风过程 850、700、500 hPa 图上冷暖平流、干湿区、槽线、切变线等分布情况，给出绍兴南部地区 3 类雷暴大风的天气形势分型：即高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型和准正压型，对其分述如下。

高空冷平流强迫型 (11.2%)：雷暴大风发生在 500 hPa 槽后西北气流中，中高层有干冷气流，低层有暖湿气流，形成上干冷下暖湿的结构，有时配合切变线，提供低层辐合抬升作用 (图 4a)；低层暖平流强迫型 (22.5%)：低层有较强的暖湿气流，500 hPa 槽前和 850 hPa 切变线促进辐合抬升作用，有利于雷暴大风的发生发展 (图 4b)；准正压型 (66.3%)：雷暴大风主要发生在西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 边缘，有时位于 500 hPa 槽前，850 hPa 配合切变线，也有时配合东风系统，从而加强该类天气过程 (图 4c)。

总体上，绍兴南部山区出现雷暴大风时的典型天气分型类似杭州地区 (樊李苗和俞小鼎，2020)，但由于其研究的是夏季，故高空冷平流强迫型、低层第

45 卷 暖平流强迫型中的副高仍有作用; 而本文以高空冷平流、低层暖平流为主, 与副高的关系不大。

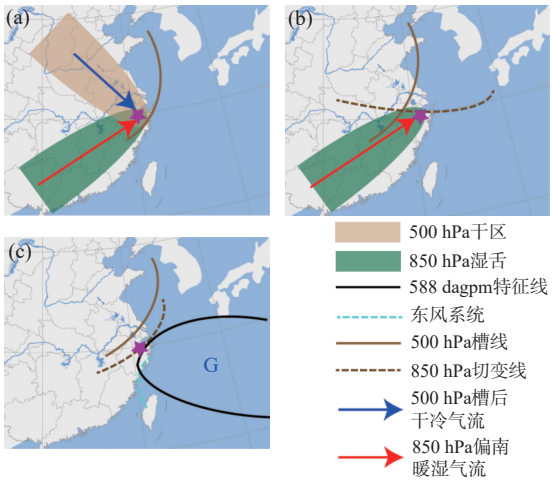


图 4 绍兴南部山区雷暴大风天气高空冷平流强迫型 (a) 、低层暖平流强迫型 (b)、准正压型 (c) 示意图 (五角星为绍兴地区)

Fig. 4 Diagram of (a) cold advection forcing category, (b) warm advection forcing category, (c) quasi-barotropic category for thunderstorm gale in the southern mountainous area of Shaoxing (The five-pointed star represents Shaoxing)

此外, 3 类天气分型中, 绍兴 4 个区域出现雷暴大风的占比也存在差异。表 1 为 2017—2021 年绍兴 4 个区域 3 类雷暴大风天气型分别占比, 在 3 个天气分型中区域 2 出现次数占比均最大, 其次是区域 1, 这与图 2 结论是相似的。区域 4 排在第 3 位, 且在不同天气分型下的占比较为接近。而区域 3 在不同天气分型下则存在着明显的差异, 在高空冷平流强迫型中该区域未出现雷暴大风, 准正压型占比 9%, 低层暖平流强迫型在 3 个天气分型下达到了最大 (表 1) 。这表明区域 1、2、3 雷暴大风出现的概率受天气型的影响, 而区域 4 中 3 种天气型出现雷暴大风的概率接近。

表 1 2017—2021 年绍兴 4 个区域 3 类雷暴大风天气型占比 (单位:%)

Table 1 Proportion (unit: %) of 3 category thunderstorm gale weather situations in four regions of Shaoxing from 2017 to 2021

天气分型	区域1	区域2	区域3	区域4
高空冷平流强迫型	30.8	46.2	0	23.0
低层暖平流强迫型	25.7	34.3	17.1	22.9
准正压型	29.9	38.7	9.0	22.4

本节分析了绍兴南部山地雷暴大风 3 种天气型: 高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型和准正压型。其中高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型天气特征分别以高空冷平流、低层暖平流为主, 而准正压型则主要发生在副高边缘。此外, 区域 1、2、3 雷暴大风出现受天气型影响, 而区域 4 各天气型出现雷暴大风的概率基本接近。

4 绍兴南部山地地形对雷暴大风的作用

前文总结了绍兴地区雷暴大风的分布特征和南部山地附近雷暴大风高发区及其与地形的关系, 表明山地地形可能影响雷暴大风的发展与演变。为此, 从 89 个绍兴南部地区的雷暴大风过程中挑选 3 个比较典型山地附近发生的雷暴大风过程, 分析地形对雷暴大风的影响, 图 5 为 3 次过程的雷暴大风分布情况及整点 2 min 风场分布。3 次过程分别为: 2017 年 6 月 30 日 18:00—21:00, 期间会稽山脉两侧出现雷暴大风, 总体沿着山脉边缘向东北方向移动 (图 5a); 2017 年 8 月 12 日 16:00—19:00, 会稽山脉西侧同样出现雷暴大风, 并沿着山脉向东北方向移动, 会稽山脉东侧雷暴大风出现后越过山脉移动 (图 5b); 2021 年 5 月 15 日 14:00—17:00, 诸暨东南角山脉边缘出现雷暴大风 (图 5c)。前 2 次大风过程为移动型, 第 3 次大风过程为局地少动型。从这 3 次雷暴大风过程的整点 2 min 风场分布图 (图 5d、e、f) 上可见, 绍兴南部山地地形对雷暴大风发生发展有一定作用, 表现为地形影响了雷暴大风的分布并改变了发展形态, 加强局地对流强度。

4.1 动力作用

气流在不同地形间移动可造成气流的辐合从而产生上升运动。2017 年 6 月 30 日 20:00 (图 5d), 会稽山脉西部边缘地区, 前 1 h 内周围地区已出现雷暴大风, 而该时刻存在前期对流产生的地面辐散风场, 且指向山脉的流线汇合, 这说明前期雷暴大风产生的下沉辐散气流, 在该区域山脉边缘空气沿着山脉被迫抬升, 从而在这一侧对流进一步发展加强, 最终使得这一次雷暴大风沿着山脉向北发展移动。2017 年 8 月 12 日 17:00 (图 5e), 此时无论是会稽山脉西侧还是东侧雷暴大风尚未发展, 从图中可见, 这两处指向山脉附近均有流线的汇合, 有利于雷暴大风天气的产生。2021 年 5 月 15 日 16:00 在诸暨东南角山脉边缘出现雷暴大风 (图 5c)。该区域的地形总体呈现为三面高一面低的特征, 其北侧海拔高度较低, 其余三个方位海拔较高, 有利于造成气流辐合。从 15:00 的整点 2 min 平均风场分布 (图 5f) 上也可以发现, 该区域有一定的辐合, 有利于局地辐合抬升, 从而触发或者加强对流, 进而在合适的其他条件下对流初生或加强为雷暴大风。以上分析结果表明, 不论是移动型还是局地少动型, 均有地形的动力抬升作用。

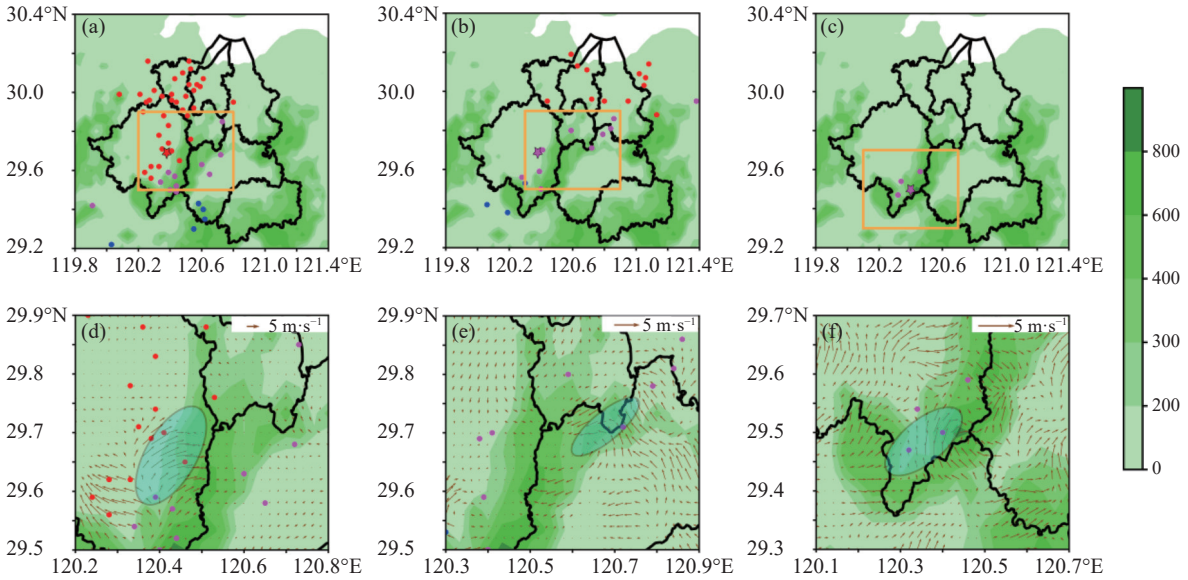


图 5 2017 年 6 月 30 日 18:00—21:00 (a)、2017 年 8 月 12 日 16:00—19:00 (b)、2021 年 5 月 15 日 14:00—17:00 (c) 雷暴大风站点分布 (圆点为小时极大风速≥15 m·s^{-1} 的站点, 其中五角星为雷暴大风过程代表站点) 及 2017 年 6 月 30 日 20:00 图 (a) 中方框区域 (d), 2017 年 8 月 12 日 17:00 图 (b) 中方框区域 (e), 2021 年 5 月 15 日 15:00 图 (c) 中方框区域 (f) 整点 2 min 风场 (矢量, 单位: m·s^{-1}) 分布 (椭圆形区域代表风场辐合区; 填色为地形高度, 单位: m)

Fig. 5 Actual distribution of thunderstorm gale stations (round dot are the stations with hourly extreme wind speed ≥ 15 m·s^{-1}, five-pointed star are the representative station of thunderstorm gale event) (a) from 18:00 BT to 21:00 BT 30 June 2017, (b) from 16:00 BT to 19:00 BT 12 August 2017, (c) from 14:00 BT to 17:00 BT 15 May 2021,and 2-minute wind (vector, unit: m·s^{-1}) distribution at (d) 20:00 BT 30 June 2017 at box area in Figure (a), (e) 17:00 BT 12 August 2017 at box area in Figure (b), (f) 15:00 BT 15 May 2021 at box area in Figure (c) (the elliptical region represents the convergence zone of the wind field; color indicates terrain, unit: m)

4.2 热力作用

地形的动力作用对雷暴大风有促进作用, 下文通过地形修改试验开展热力作用影响的研究。改变局地站点的高度, 分析其对流条件与地形高度变化是否有关系。以 2021 年 5 月 15 日 14:00—17:00 雷暴大风过程为例, 将选定站点 (图 5c 五角星标注的雷暴大风过程代表站点诸暨市开化站) 的海拔高度分别调整−50 m、0 m、50 m、100 m 共计 4 个高度, 分别计算不同地形改变量下 15:00 的对流有效位能、对流抑制能量、自由对流高度和下垫面的差值 (表 2)。计算结果显示, 在该过程中, 自由对流高度随站点高度的增加而有所下降; 其和下垫面的差值随高度的增加而减小, 原站点高度差为 1.726 km, 而站点海拔降低 50 m 后两者的高度差为 1.822 km, 增加了约 0.1 km。因此, 在一定高度变化范围内, 当地的海拔高度越高, 其需要抬升达到自由对流高度所经过的垂直距离更小, 更有利于对流发展加强; 站点海拔降低后, 对流抑制能量有所增加 (图略), 即站点高度的增加会使得对流更容易触发。孙继松等 (2006)、孙继松和陶祖钰 (2012) 研究发现, 山地更容易满足对流发生所需的条件。绍兴南部山区也同样存在几处高发区。然而, 2017 年 6 月 30 日及 2017 年 8 月 12 日这两次 17:00 之后出现雷暴大风的过程中, 自由对流高度和下垫面的差值却不随着高度减小 (图略), 即热力因素的影响不大, 说明山脉的热力作用主要表现在下午这一时段。结合绍兴南部山地的太阳辐射情况, 晴空天气背景下, 中午到下午时段辐射加热最显著, 下垫面温度也较高, 从而更容易加热下垫面以上的空气, 改变近地面层的热力状况, 因而在过程 3 中体现的比较明显。17:00 之后太阳辐射逐渐减弱, 下垫面温度逐渐下降, 热力作用的效果也逐渐减弱, 而过程 1、2 出现在傍晚到夜里, 热力作用不明显。

表 2 2021 年 5 月 15 日 15:00 开化站调整海拔高度后自由对流高度变化

Table 2 Changes of free convection altitude with adjusting altitudes of Kaihua Station at 15:00 BT on May 15, 2021

站点高度改变量/m	修正后的站点高度/km	自由对流高度/km	两者高度差/km
−50	0.451	2.273	1.822
0	0.501	2.227	1.726
50	0.551	2.193	1.642
100	0.601	2.178	1.577

本节分析了绍兴南部山地地形对雷暴大风的作用, 分为动力作用和热力作用。动力作用表现在改

变雷暴大风过程的空间分布和发展形态、增强局地动力抬升作用; 热力作用则表现在加强低层对流热力条件, 通过减小自由对流高度对地距离, 使得山地更易触发对流, 并增加雷暴大风强度。

5 结论

本文基于浙江省 714 个国家站、区域站地面和雷电观测资料、ERA5 再分析及台风路径资料, 分析了 2017—2021 年绍兴及周边地区雷暴大风分布特征以及南部山地雷暴大风天气型特征, 最后研究了地形对雷暴大风的影响机制, 得出以下结论:

(1) 绍兴及周边地区雷暴大风年平均次数高值区和地形有一定关系, 主要出现在 3—9 月的下午至前半夜, 高值区分别为会稽山脉西侧 (区域 1) 和四明山脉西南侧 (区域 2), 而新嵊盆地中部地区 (区域 3) 和绍兴北部相对平坦的地区 (区域 4) 雷暴大风出现次数则相对较少。4 个区域中, 区域 2 除极个别月份外, 总体上各月出现次数均最多, 且一天中出现时段跨度最大, 各小时出现次数也最多。

(2) 绍兴南部山地雷暴大风天气分为 3 种类型: 高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型和准正压型; 高空冷平流强迫型、低层暖平流强迫型分别以高空冷平流、低层暖平流为主, 准正压型则主要发生在副高边缘。且区域 1、2、3 雷暴大风出现的概率受天气分型存在一定的影响, 而区域 4 的 3 种天气型出现雷暴大风的概率接近。

(3) 绍兴南部山地对雷暴大风的作用体现在以下几个方面: 改变雷暴大风天气的空间分布和发展形态、增强局地动力抬升作用、加强低层对流热力条件。前两者主要是地形导致空气抬升, 从而在山脉的迎风坡增强对流, 进而引导或者加强雷暴大风。热力作用通过减小自由对流高度对地距离, 使得山地更易触发对流, 并增加雷暴大风出现的可能性或者强度, 这个作用主要在下午时段, 傍晚之后这种作用逐渐减弱, 与太阳辐射在一天中的分布有关。

参考文献 (References):

方翀,王西贵,盛杰,等.2017.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,36(5):1368−1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al. 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics [J]. Plateau Meteorology,36(5):1368−1385 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00083

樊李苗,俞小鼎.2020.杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J].气象,46(12):1621−1632. Fan L M, Yu X D. 2020. Analysis on the environment conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou [J]. Meteorological Monthly,46(12):1621−1632 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.12.009

黄小彦,崔恒立,胡贵华,等.2019.强对流天气预报预警技术与实例分析[M].北京: 气象出版社: 17-18. Hang X Y, Cui H L, Hu G H. et al. 2019. Severe Convective Weather Forecast and Early Warning Technology and Case Analysis [M]. Beijing:China Meteorological Press: 17-18 (in Chinese)

柯元惠,马明明,郑艳,等.2022.海南岛雷暴大风天气形势和环境参数特征分析[J].暴雨灾害,41(1):86−93. Ke Y H, Ma M M, Zheng Y, et al. 2022. Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm gales in Hainan [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(1):86−93 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.010

华雯丽,杨晓霞,田雪珊,等.2021.山东省雷暴大风天气学分型与物理诊断量统计特征[J].暴雨灾害,40(4):362−373. Hua W L, Yang X X, Tian X S, et al. 2021. Synoptic classification and statistical characteristics of physical diagnoses for thunderstorm gale in Shandong Province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(4):362−373. doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.04.004

刘彬,邹灵宇,李晓鹏,等.2022.云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J].气象,48(11):1402−1417. Liu B, Zou L Y, Li X P, et al. 2022. Analysis on environmental characteristics of thunderstorm gales in Yunnan [J]. Meteorological Monthly,48(11):1402−1417 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.071502

龙柯吉,郭旭,黄晓龙,等.2024.基于高密度站点的四川复杂地形下大风特征分析[J].高原山地气象研究,44(1):69−77. Long K J, Guo X, Huang X L, et al. 2024. Analysis of gale characteristics in complex terrain of Sichuan based on high-density stations [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(1):69−77. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.01.008

吕晓娜,牛淑贞,张一平,等.2020.基于概率与权重的雷暴大风潜势客观预报方法研究[J].暴雨灾害,39(1):20−29. Lv X N, Niu S Z, Zhang Y P, et al. 2020. Research on objective forecast method of thunderstorm potential based on probability and weight [J]. Torrential Rain and Disasters,39(1):20−29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.01.003

秦丽,李耀东,高守亭.2006.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,11(6):754−762. Qin L, Li Y D, Gao S T. 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research,11(6):754−762 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−9585.2006.06.010

孙继松,石增云,王令.2006.地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J].气候与环境研究,11(1):76−84. Sun J S, Shi Z Y, Wang L. 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events [J]. Climatic and Environmental Research,11(1):76−84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−9585.2006.01.007

孙继松,陶祖钰.2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164−173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some basic problems in the analysis and forecast of severe convective weather [J]. Meteorological Monthly,38(2):164−173 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.02.004

王艳春,陈宏,尉英华,等.2023.天津雷暴大风天气的环流场及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(6):119−126. Wang Y C, Cheng H, Wei Y H, et al. 2023. Circulation field and radar characteristics of thunderstorm gales in Tianjin [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(6):

119−126 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.06.016

王黉,李英,宋丽莉,等.2020.川藏地区雷暴大风活动特征和环境因子对比[J].应用气象学报,31(4):435−446. Wang H, Li Y, Song L L, et al. 2020. Comparison of characteristics and environmental factors of thunderstorm gales over the Sichuan-Tibet region [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(4):435−446 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200406

王瑶,白慧,张超,等.2024.黔东南州一次典型暴雨过程的地形敏感性试验[J].山地气象学报,48(6):18−27. Wang Y, Bai H, Zhang C, et al. 2024. Topographic sensitivity test of a typical rainstorm process in Qiandongnan prefecture of Guizhou province [J]. Journal of Mountain Meteorology,48(6):18−27. doi:10.3969/j.issn.1003−6598.2024.06.003

王选嵩,王培,姚鹏程,等.2020. 2017 年 8 月 4 日一次局地强对流过程成因分析[J].农业灾害研究,10(7):100−103. Wang X S, Wang P, Yao P C, et al. 2020. Analysis of the cause of a strong local convection process on August 4, 2017 [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 10(7):100−103 (in Chinese). doi:10.19383/j.cnki.nyzhyj.2020.07.045

韦惠红,许冠宇,刘希文,等.2022.湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征[J].暴雨灾害,41(1):66−75. Wei H H, Xu G Y, Liu X W, et al. 2022. Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):66−75. doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.008

许霖,姚蓉,王晓雷,等.2017.湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J].高原气象,36(4):993−1000. Xu L, Yao R, Wang X L, et al. 2017. Study of temporal-spatial distribution and variation characteristics of thunderstorm gales in Huna [J]. Plateau Meteorology,36(4):993−1000 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00088

周虹,高青云,李晓容.2018.南充雷暴大风天气学概念模型和环境物理量分析[J].高原山地气象研究,38(4):53−59. Zhou H, Gao Q Y, Li X R. 2018. Synoptic conceptual model and environmental physical quantity analysis of thunderstorm in Nanchong [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,38(4):53−59 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2018.04.009

邹灵宇,于璐,杨柯,等.2022.云南不同强度短时强降水和大风时空分布特征研究[J].高原山地气象研究,42(2):32−37. Zhou L Y, Yu L, Yang K, et al. 2022. Temporal-spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall and gale in Yunnan from 2013 to 2019 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(2):32−37 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.02.005

钟利华,曾鹏,李勇,等.2011.广西雷暴大风环流特征和物理量诊断分析[J].气象,37(1):59−65. Zhong L H, Zeng P, Li Y, et al. 2011. Diagnostic analysis of the circulation and physical quantities of thunderstorm gales in Guangxi [J]. Meteorological Monthly,37(1):59−65 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.1.007

郑永光,陶祖钰,俞小鼎.2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641−652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting [J]. Meteorological Monthly,43(6):641−652 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.06.001

Doswell III C A. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example [J]. Weather and Forecasting,2(1):3−16. doi:10.1175/1520−0434(1987)002<0003:TDBLSA>2.0.CO;2

Fujita T T, Byers H R. 1977. Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner [J]. Monthly Weather Review,105(2):129−146. doi:10.1175/1520−0493(1977)105<0129:seadit>2.0.co;2

Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting [J]. Weather and Forecasting,7(4):588−612. doi:10.1175/1520−0434(1992)007<0588:SLSF>2.0.CO;2

(责任编辑 张 文)