



太湖地区雷暴过程识别及闪电活动时空特征分析

张泽 吕凡超 张文娟 陆高鹏 郭凤霞 刘非凡 吕伟涛

Identification of thunderstorms and the spatiotemporal characteristics analysis of lightning activity over Lake Taihu region

ZHANG Zeshen, LYU Fanchao, ZHANG Wenjuan, LU Gaopeng, GUO Fengxia, LIU Feifan, LYU Weitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-071>

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

基于三种聚类算法的雷暴系统识别效果对比研究

Comparative research on thunderstorms identification based on three clustering methods

暴雨灾害. 2023, 42(3): 334–345 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-179>

基于聚类分析的浙江省汛期OCF降水预报分区订正试验

Regional correction calibration for OCF precipitation in flood season in Zhejiang Province based on cluster analysis

暴雨灾害. 2023, 42(6): 716–723 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-042>

2022年广西雷暴活动特征分析

Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Guangxi in 2022

暴雨灾害. 2024, 43(6): 702–712 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-117>

武汉市后官湖局地气候效应的数值模拟研究

Numerical simulation study on local climate effects of Houguan Lake in Wuhan

暴雨灾害. 2025, 44(1): 82–92 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-272>

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>

大理苍山洱海地区一次极端降水过程特征分析

Analysis of the characteristics of an extreme precipitation event in the Dali Cangshan-Erhai Lake region

暴雨灾害. 2026, 45(1): 36–46 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-156>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张泽坤,吕凡超,张文娟,等. 2026. 太湖地区雷暴过程识别及闪电活动时空特征分析[J]. 暴雨灾害, 45(5): 749–759. ZHANG Zeshen, LYU Fanchao, ZHANG Wenjuan, et al. 2026. Identification of thunderstorms and the spatiotemporal characteristics analysis of lightning activity over Lake Taihu region [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(5): 749–759 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-071

太湖地区雷暴过程识别及闪电活动时空特征分析

张泽坤^{1, 2}, 吕凡超^{1, 2, 3}, 张文娟¹, 陆高鹏⁴,
郭凤霞⁵, 刘非凡⁴, 吕伟涛^{1, 2, 3}

(1. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081; 2. 南京气象科技创新研究院, 南京 210041; 3. 江苏省强对流灾害风险预警重点实验室/中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041; 4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 5. 南京信息工程大学应急管理学院/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 太湖是中国典型的浅水湖泊, 周边下垫面复杂, 作为非均一下垫面, 其独特的水热条件显著影响当地雷暴及闪电活动。本文基于 2013—2018 年全球闪电定位网 (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) 数据, 采用空间聚类算法, 基于两组参数设置分别聚类生成两套闪电簇, 用以识别太湖地区雷暴与高闪电密度区域, 结合闪电频数和辐射能量沿雷暴传播路径的变化情况, 对闪电密度时空分布特征、雷暴分类、典型移动路径及日变化特征进行统计分析。结果表明: (1) 太湖地区闪电密度总体呈西高东低分布, 太湖西岸、北岸、东岸及中西部湖面区域为相对高值区。(2) 依据闪电活动的时空变化特征, 其母体雷暴过程可分为湖面增强型 (35.8%)、西岸耗散型 (8.1%)、局地型 (55.5%) 和合并增强型 (仅 1 例), 不同类型雷暴在移入湖面后的闪电频数和辐射能量变化上存在显著差异。进入湖面前闪电活动较活跃的雷暴移入湖面后可能因为湖效应影响被加强或维持, 而较弱的则逐渐消散。(3) 多数具有明确路径特征的雷暴始发于太湖西侧山地并向东移动; 若将湖面始发的局地雷暴纳入统计, 则约 71% 的雷暴在湖面上空出现闪电频数或辐射能量的跃增。(4) 太湖地区的雷暴活动多集中于昼间, 闪电活动峰值主要出现在午后至入夜时段; 夜间湖面始发雷暴较少, 且多表现为局地短生命史雷暴, 湖面增强型雷暴主要集中于 11—15 时及 18 时前后始发。研究结果揭示了太湖作为浅水湖泊对雷暴与闪电活动的调制作用, 可为太湖流域雷电预警业务及类似水陆过渡带的雷暴研究提供参考。

关键词: 雷暴; 太湖; 湖效应; WWLLN; 聚类分析

中图分类号: P446

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025-071

Identification of thunderstorms and the spatiotemporal characteristics analysis of lightning activity over Lake Taihu region

ZHANG Zeshen^{1, 2}, LYU Fanchao^{1, 2, 3}, ZHANG Wenjuan¹, LU Gaopeng⁴, GUO Fengxia⁵,
LIU Feifan⁴, LYU Weitao^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology/CMA Key Laboratory of Lightning, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. Nanjing Innovation Institute for Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Meteorological Sciences-Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210041; 3. Jiangsu Key Laboratory of Severe Storm Disaster Risk / Key Laboratory of Transportation Meteorology of CMA, Nanjing 210041; 4. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026; 5. Emergency Management College/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Lakes, as heterogeneous underlying surfaces, exert significant influences on local thunderstorms and lightning activity because of their unique thermodynamic and hydrological characteristics. As a typical shallow lake in China, Lake Taihu is surrounded by complex

收稿日期: 2025-04-10; 定稿日期: 2025-09-02

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (42475097); 北极阁开放研究基金项目 (BJG202401)

第一作者: 张泽坤, 主要从事雷暴电学研究。E-mail: zeshen321@outlook.com

通信作者: 吕凡超, 主要从事大气电学研究。E-mail: lyufc@cma.gov.cn

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

underlying surfaces and therefore serves as an ideal region for investigating the effects of heterogeneous surfaces. Based on the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data from 2013 to 2018, this study identified thunderstorm activity using a Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN), generating two sets of lightning clusters via two parameter configurations to identify thunderstorm activity and high-lightning-density areas over and around Lake Taihu. Combined with variations in lightning frequency and stroke energy along the propagation path, the spatial distribution, thunderstorm classification, typical movement paths, and diurnal variation characteristics of these thunderstorms were statistically analyzed. The results are as follows. (1) Lightning density in the Lake Taihu region generally exhibits a west-east decreasing pattern, with relatively high-value areas located along the western, northern, and eastern shores of the lake, as well as over the central-western lake surface. (2) According to the spatiotemporal characteristics of the lightning clusters, their parent thunderstorms can be classified into four types: lake-enhanced thunderstorm (35.8%), western-shore dissipating thunderstorm (8.1%), localized thunderstorm (55.5%), and merger-enhanced thunderstorm (only 1 case). Significant differences exist among these thunderstorm types in the variation of lightning frequency and stroke energy after moving over the lake surface. Thunderstorms with relatively active lightning activity before entering the lake may be enhanced or maintained after moving over the lake due to lake effect, whereas weaker ones may gradually dissipate. (3) Most thunderstorms with clear path characteristics originate over the mountainous area to the west of Lake Taihu and then move eastward. If localized thunderstorms initiated over the lake surface are also included, approximately 71% of thunderstorms exhibit an increase in lightning frequency or radiated energy over the lake surface. (4) Thunderstorms over and around Lake Taihu is mainly concentrated during daytime, with the peak thunderstorm occurrence from the afternoon to the early nighttime. Thunderstorms initiated over the lake surface at night are relatively few and are mostly localized, short-lived thunderstorms, while lake-enhanced thunderstorms are mainly initiated from 11:00 BT to 15:00 BT and around 18:00 BT. These findings highlight the role of shallow lakes, represented here by Lake Taihu, in modulating thunderstorm activity. They may also provide useful guidance for lightning warning services in the Lake Taihu Basin and for thunderstorm studies in other lake-land interface regions.

Key words: thunderstorm; Lake Taihu; lake effect; WWLLN; cluster analysis

引 言

近年来,地形配置和不同下垫面环境对对流系统的影响逐渐受到人们的关注 (Camberlin et al., 2018; Liu et al., 2025)。湖泊与陆地间的热力差异是影响对流过程的重要下垫面因素,这种影响被概括地称为湖效应 (Lumb, 1970)。大量数值模拟研究表明,湖陆热力差异驱动湖陆风环流,可以显著改变局地环流结构,具体表现为在暖季昼间,湖面作为冷池降低气温和潜热通量,低层气流辐散,增加大气稳定度,热对流活动和降水受到抑制 (杨显玉等, 2012; Gu et al., 2016);而在湖面相对于陆地偏暖的情形下 (如秋季或暖季夜间),湖面则作为热源促进其上空的降水和雷暴活动 (邹海波, 2020; 陶雅琴等, 2024; 刘辉志等, 2025)。Virts 和 Goodman (2020) 结合实际观测结果发现,维多利亚湖上空近 83% 的雷暴始发于暖季夜间的湖面;而 Haberlie 等 (2016) 发现水库的水陆过渡带呈现对流频发特征,但水库本体上空则表现出明显的对流抑制现象。研究结果的差异可能源于不同湖泊在纬度分布、表面积量级、水体热惯性等参数上的显著差异,因此相关作用过程仍需结合更多观测事实进一步研究。

湖效应往往受到局地地形配置的影响,使湖面本地生成和外界移入的雷暴活动特征出现一定差异。有研究表明,持续时间较长的雷暴过程大多在山区附近始发 (Shi et al., 2022; Wei et al., 2023)。

Feldmann 等 (2024) 利用 CM1 (Cloud Model 1) 模式进行敏感性试验,发现山谷与湖泊的合理配置有助于增大风暴相对旋度,提供高湿环境以维持和增强超级单体的发展。Zou 等 (2023) 对发生在鄱阳湖的一次午后雷暴过程进行数值模拟,发现湖泊附近山地的绕山气流有利于对流触发,而近岸区域的湖风在适合的风场配置下有利于使靠近湖泊的对流云快速增强。以上研究表明,湖泊与地形要素的耦合作用通过改变边界层动力热力结构,对雷暴发生发展具有重要影响。因此,有必要从观测统计角度分析地形-湖泊配置对雷暴闪电活动的影响特征,以期为理解复杂下垫面条件下雷暴演变过程提供观测依据。

太湖位于中国东南部的长江三角洲地区,面积约为 2 338 km²,是中国第三大淡水湖,平均水深为 1.9 m,是典型的浑浊浅水湖泊。太湖西接天目山北延与太湖丘陵区共同形成的地形走廊,北邻常州、无锡等城市群,东靠苏州市和洞庭西山,南连水网密布的低洼平原。其独特的地形配置为研究湖泊对不同阶段雷暴过程的影响提供了宝贵的研究样本。杨薇等 (2014) 对一次发生在太湖区域的雷暴过程进行数值敏感性试验,表明太湖湖风锋和太湖东北岸城区对雷暴起始与发展阶段有促进作用。Gu 等 (2016) 通过数值模拟发现,太湖的存在抑制了湖面大部及邻近地区的降水。但目前针对太湖地区雷暴过程的研究多聚焦于个例分析,缺乏长期统计数据来验证上

述结论, 因此有必要对该地区的雷暴过程开展深入的统计与典型个例分析, 研究雷暴在湖效应影响下的演变特征, 为揭示湖效应对雷暴活动的影响机理提供参考。

闪电活动对雷暴的发生发展具有较明显的表征作用 (Hutchins et al., 2014), 对闪电活动的时空演变特征进行分析可以从一定程度上描述雷暴的发展演变。目前常用基于样本密度的聚类算法 (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) 将闪电的空间分布聚类为闪电簇, 表征雷暴的发展 (Hutchins et al., 2014; Ccopa et al., 2021; 师正等, 2023)。有研究表明, 全球闪电定位网 (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) 数据经过 DBSCAN 算法聚类后, 闪电簇的几何边缘与 TRMM 卫星观测到降水过程的几何边缘具有很好的—致性 (Hutchins et al., 2014), 表明闪电簇可作为雷暴活动的有效代表, 用以追踪雷暴活动的演变过程。本文通过对 2013—2018 年 WWLLN 闪电定位数据进行 DBSCAN 聚类、个例分析和统计, 明确太湖及周边地区雷暴活动的时空分布特征, 以期揭示湖效应对当地雷暴活动的影响。

1 研究区域与数据

本文以太湖及周边为研究区域, 为尽可能保证经过太湖区域雷暴过程的完整性, 以太湖为中心选取 $117^{\circ}\text{—}123^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}\text{—}34^{\circ}\text{N}$ 的矩形区域作为研究区域 (图 1)。

WWLLN 是一个工作在甚低频频段的全球闪电探测网 (探测频率为 $3\text{--}30\text{ kHz}$), 它利用组时间差法对全球范围内的闪电进行定位, 并利用甚低频电磁波沿水平方向辐射能量以负指数衰减的模型简单估计闪电回击伴随的甚低频辐射能量 (以下简称辐射能量) (Dowden et al., 2002), 其要求每个闪电定位点至少需要使用 5 个测站的波形参与定位, 时空误差分别小于 $10\text{ }\mu\text{s}$ 和 10 km 。WWLLN 自 2003 年起开始运行, 至今已有二十余年, 可提供全球范围时间跨度最大的闪电定位资料。

WWLLN 站点数量从 2006 年的 25 个站点 (Rodger et al., 2006) 增加至 2024 年的约 80 个 (Rafi et al., 2024), 随着站点数量的逐年增加, 其在全球范围内的闪电探测效率和精度均大幅提高。鉴于闪电密集区往往与强对流天气系统中的雷达高反射率因子区域相一致 (De Abreu et al., 2021; Utsav et al., 2022), WWLLN 探测的地闪定位数据可作为一种准实时的、

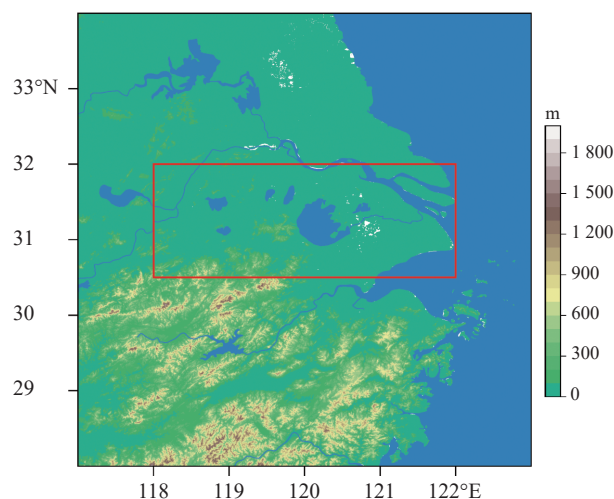


图 1 DBSCAN 算法聚类区域、研究区域 (红框) 及地形高度 (填色)

Fig. 1 Region used for DBSCAN clustering, the study area (red box), and terrain (shaded)

与强对流活动具有密切关联性的资料, 用于研究雷暴活动演变特征 (Hutchins et al., 2014; 钱勇等, 2025)。

考虑到自 2013 年后 WWLLN 平均闪电探测效率相对稳定 (Rafi et al., 2024), 而研究区域附近 WWLLN 传感器数量在 2019 年后发生较大变化, 为保证探测效率的相对一致性及统计结果的可比性, 本文选取 2013—2018 年共 6 a 的 WWLLN 闪电定位数据开展分析, 为进一步突出太湖及周边地区雷暴活动最活跃时段的时空特征, 以聚类区域内逐日闪电频数为依据, 将每年的雷暴日分别排序, 选取闪电活动最频繁的前 30 d 作为分析对象 (共计 180 d)。

2 研究方法

本文使用 DBSCAN 算法 (Sander et al., 1998) 对 WWLLN 闪电定位数据聚类得到闪电簇, 根据闪电簇的时空形态特征对雷暴过程进行分类统计, 并结合闪电频数、平均辐射能量沿雷暴云移动路径的分布分析雷暴过程的发展特征。

2.1 DBSCAN 算法介绍

传统层次聚类、K 均值聚类等基于统计距离的算法主要适用于对凸性数据集的聚类, 对于非凸性数据集的聚类效果不佳。闪电簇的形状是随机的, 可能存在非凸的情况, 使用前述算法聚类效果往往欠佳。DBSCAN 算法适用于凸性和非凸数据集, 对于任意形状的簇都有很好的识别效果。

DBSCAN 算法是一种基于样本密度的聚类算法, 它首先设定邻域半径 (ϵ , 单位: km) 和最小点数 (minPts), 遍历所有数据点, 若某点未被访问, 则计算

其 ϵ 邻域内的点数;若数量不小于 minPts , 将该点标记为核心点并创建新簇, 随后递归地将所有密度可达的邻域点 (包括边界点和核心点) 纳入同一簇中;若邻域点数不足, 则暂时标记为噪声点。重复此过程直至所有点被访问, 最终将无法被任何核心点密度触及的点判定为噪声点 (Ester et al., 1996), 因此也具备排除与簇中心空间关联性较低的定位点对闪电簇识别影响的能力。

DBSCAN 算法不需要预先给定簇数, 但对参数选取敏感, 且泛化能力较弱 (师正等, 2023)。雷暴的尺度多样, 在给定参数组的情况下, DBSCAN 算法只对特定的雷暴过程有较好的聚类效果。由于可能出现空间关联性很强但间隔时间较长的闪电定位点, Hutchins 等 (2014) 在原 DBSCAN 算法的基础上加入时间邻域半径 (ϵ_t , 单位: s)。本文采用引入时间邻域的 DBSCAN 算法对闪电定位数据进行时空聚类以识别雷暴并提取高闪电密度区域。

2.2 DBSCAN 算法参数的选取

DBSCAN 算法的参数通常可通过 K-距离拐点等传统启发式算法进行选取 (Ester et al., 1996)。但对于闪电定位资料而言, 聚类结果不仅需要在统计意义上区分出不同簇, 同时还应尽可能对应物理意义上连续的雷暴闪电活动。在 Hutchins 等 (2014) 提出使 $\epsilon \approx 13.32 \text{ km}$ 、 $\epsilon_t = 1\ 080 \text{ s}$ 、 $\text{minPts}=2$ 的参数以来, 一系列针对闪电定位资料的聚类研究根据定位数据特性 (如探测效率等)、目标过程尺度和分析目标等采用不同的参数设置, 表明 DBSCAN 算法在闪电定位数据聚类这类具有明确物理约束的任务上具有较强的任务依赖性 (Shi et al., 2022; Hayward et al., 2023; Augenstein et al., 2025), 而非存在一套普适的固定取值。

考虑到 WWLLN 数据的定位误差量级、雷暴过程中闪电活动的间歇性, 以及聚焦于中小尺度雷暴的研究目的, 本文采用如表 1 所示的两套参数设置进行聚类。其中, 参数组 1 采用较小的时空邻域半径, 能够较好地区分同一雷暴中不同区域的闪电活跃中心, 并减少相邻孤立过程被误合并的可能; 参数组 2 在 Hutchins 等 (2014) 参数的基础上适当放宽时间邻域条件, 可有效避免因闪电活动阶段性减弱或对较弱放电过程探测能力不足而将同一连续过程分

割为多个小簇的情况。同时, 参数组 2 将最小样本数设置为 10, 有助于减少零散、短时、样本数过少的闪电簇对整体统计结果的干扰。有必要指出, 本文采用的参数组基于本文研究对象和 WWLLN 数据特性的经验设置, 目的在于兼顾聚类结果的连续和可分辨性, 不一定适用于其他探测资料的雷暴闪电聚类任务。

3 闪电活动聚类结果

对前述统计周期共计 180 d 的闪电定位资料进行聚类, 筛选闪电簇明确经过太湖附近的个例, 得到 131 d 数据。图 2 展示了使用 DBSCAN 算法和 K 均值算法 (Lloyd, 1982) 对发生在 2017 年 10 月 1 日的雷暴进行聚类的效果对比。K 均值算法依赖于统计距离的构建, 处理闪电定位数据这种兼具时间和空间信息的数据时不可避免的存在空间距离和时间差所占权重的问题。本文首先分别对定位点距离和时间差分别做线性变换, 映射为一个标准化单位, 采用 Baranovskiy 等 (2017) 的参数设置, 认为当距离为 50 km 和时间差为 30 min 时, 时间和空间对 K 均值聚类结果的影响是对等的。为比较两种算法对非规则闪电活动的聚类效果, 在保持 K 均值聚类簇数与 DBSCAN 双参数聚类簇数一致的前提下进行对比试验。可以看出 DBSCAN 算法能更准确地反映雷暴的真实发展过程, 尤其是在处理具有复杂形态的闪电簇时, 能有效滤除噪声点, 捕捉雷暴云的非凸特性。以图 2b 中 DBSCAN 识别到的簇 6 为例, 由于 K 均值聚类是通过将点分配到距离簇中心统计距离最近的点实现聚类, 因此倾向于生成形状较为规则的凸型簇, 这一特性导致其在对连续过程的识别出现断裂 (对应于图 2d 中的簇 3、10 和 13), 无法体现雷暴云及闪电活动的复杂形态以及其随时间变化的动态特征。此外, K 均值算法会将时空相关性较强但很稀疏的样本误分为一簇, 如图 2d 中簇 11、12 和 15。得益于 DBSCAN 算法的去噪声能力, 此类样本在图 2b 中得到了滤除。

如前文所述, 参数组 1 确定出雷暴中的闪电活跃区, 直观地展示了雷暴过程的时空演变特征 (图 2a); 参数组 2 则框定了雷暴完整生命史期间的移动范围 (图 2b), 二者结合可以准确地给出雷暴过程的时空演变特征。从图 2b 中可见, 本次雷暴过程始发于太湖西岸的山地区域, 并逐步向东移动经过太湖; 在 6 号闪电簇的演变过程中, 靠近太湖湖面区域闪电活动显著增强, 尤其是在太湖西岸和太湖北部区域, 闪电活动频率明显增强, 可能表明湖效应在雷暴发展过

表 1 DBSCAN 算法参数选取

Table 1 Parameters for DBSCAN

参数组	空间邻域半径/km	时间邻域半径/s	最小样本数
参数组1	2	300	5
参数组2	10	2 700	10

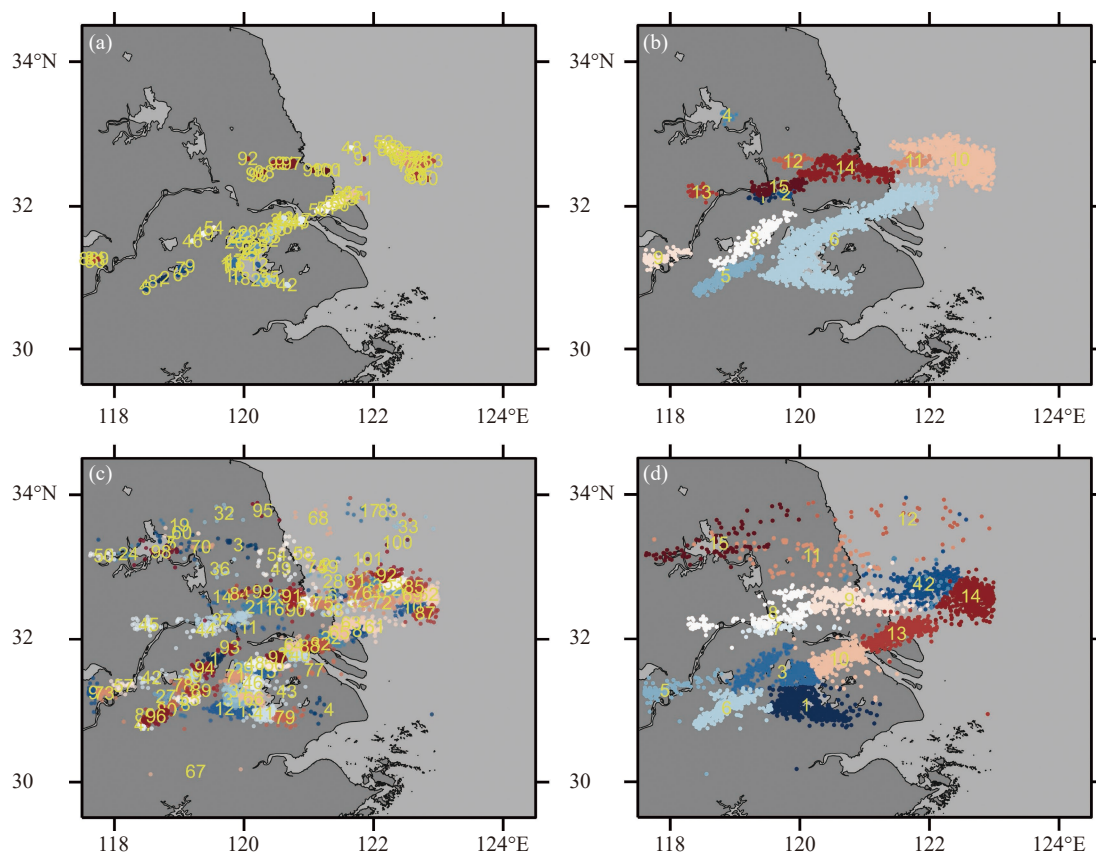


图2 以2017年10月1日为例,对太湖区域闪电资料采用参数组1(a)和参数组2(b)的DBSCAN聚类结果及对应簇数下K-均值算法(c、d)聚类效果对比(散点颜色及数字编号用于区分不同簇)

Fig. 2 Comparison of clustering results from DBSCAN using (a) parameter set 1, (b) parameter set 2, and (c, d) K-means with the same number of clusters for lightning data over the Lake Taihu region on 1 October 2017 (where colors and labels denote different clusters)

程中所起到的促进作用。

本文采用参数组1进行DBSCAN聚类中的簇数变化作为指标分析雷暴中闪电活动的变化情况。随着雷暴的发展,某一区域内参数组1聚类得到闪电簇数的激增通常意味着雷暴活动的增强,簇数和簇大小的变化能够有效反映非局地雷暴(较大闪电簇)的闪电活动强度变化,提供了一个衡量雷暴演变过程的可靠方法。通过分析参数组1聚类簇数的动态变化,可以进一步揭示雷暴活动的时空演变特征,从侧面表征太湖区域对雷暴闪电活动的影响。

4 雷暴分型及时空特征

在筛选出的131 d数据中,共有202个发生在太湖区域的闪电簇。经过人工检验,有4个可能由于参数不匹配导致明显来自不同雷暴的闪电事件被聚类成一簇的闪电簇,9个经过太湖附近而主要闪电活动不经过太湖湖面,本文不作分析。另外,在太湖东岸始发并向东移的闪电簇16个,由于太湖东岸分布有苏州、无锡等大城市群,难以区分城市下垫面和太湖对雷暴的影响,本文也暂不对其进行分析。综合

以上情况,最终得到用于统计分析的闪电簇共计173个,作为后续雷暴过程统计分析的样本。

观察到部分闪电簇中按固定时间切片,相邻切片中闪电定位点的中心点间形成的位移矢量相对一致,参照基于雷达资料的对流系统追踪算法(Dixon and Wiener, 1993),将这种特性定义为路径特征。对173个闪电簇按是否有显著路径特征分为非局地雷暴(77个)和局地雷暴(96个)。根据闪电簇的始发位置和是否在湖面上存在闪电频数或辐射能量激增现象,进一步对77个非局地雷暴进行分类,共发现从外部移入太湖并出现闪电频数或辐射能量激增的雷暴58例,在湖面始发且向东移出太湖的雷暴4例,共计62例,由于均在湖面范围内出现了闪电频数激增,两者统一定义为湖面增强型;部分簇始发于距太湖西侧稍远的区域,经过较长时间的放电,到达太湖西部附近已经减弱,在湖面附近消散的雷暴14例,定义为西岸耗散型;另有一例在湖面观测到了来自于两个不同方向雷暴的合并,定义为合并增强型。后续将重点分析湖面增强型、西岸耗散型、合并增强型和局地型这四类典型闪雷暴的活动特征。

4.1 湖面增强型雷暴

图 3 为 2015 年 6 月 24 日的一次典型湖面增强型雷暴。15 时 16 分左右太湖西岸的山地开始出现闪电, 逐渐向东发展 (图 3a)。如图 3b、c 所示, 随着雷暴主体向东移入太湖湖面, 闪电频数逐渐增大, 在太

湖中心处达到峰值, 而辐射能量逐渐减小。当移动到太湖东部的洞庭西山附近时, 辐射能量急剧上升形成次峰值, 闪电频数也略微上升。雷暴继续向东移动, 此时闪电频数和辐射能量都逐渐减小, 闪电活动进一步减弱直至结束, 估算平均移动速度为 $46.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

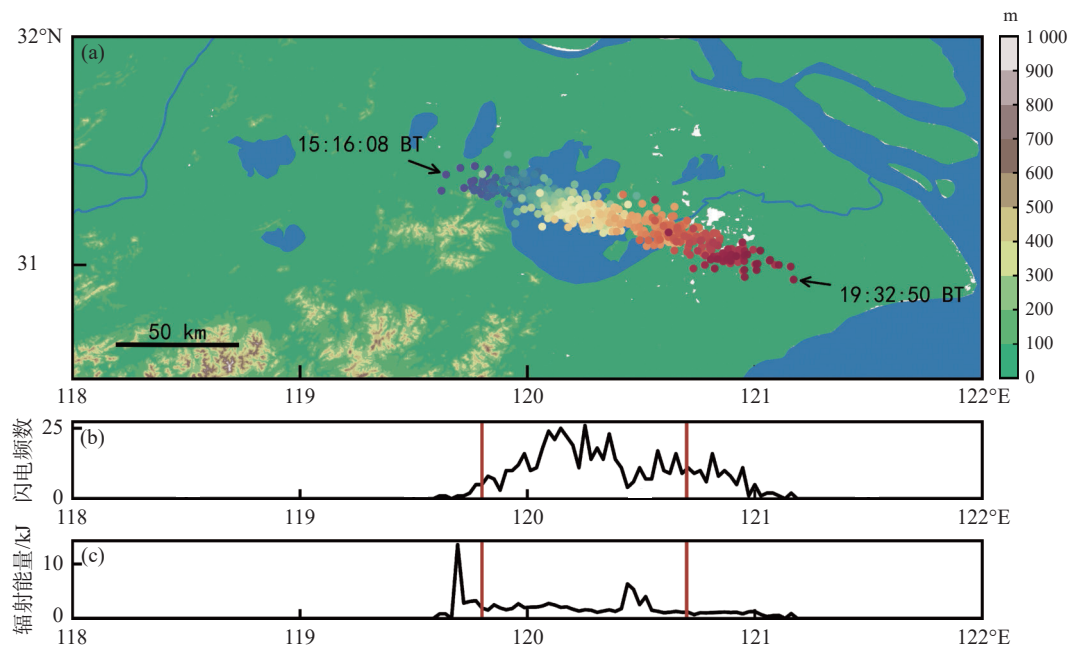


图 3 2015 年 6 月 24 日一次湖面增强型雷暴中剔除噪声点后的闪电簇 (彩色圆点, 颜色由蓝到红表示探测到的闪电放电时间由早到晚) 和地形高度 (填色) (a), 闪电簇在东—西方向上每 5 km 区域的平均闪电频数 (b) 和平均辐射能量 (c) (红色竖线代表太湖的大致范围, 下同)。

Fig. 3 The (a) lightning cluster (colored circles, with colors progressing from blue to red from earlier to later detection times of lightning discharges) after noise removal during a lake-enhanced thunderstorm and terrain elevation (shading), and the mean (b) lightning frequency and (c) radiated energy within 5-km intervals in the east–west direction on 24 June 2015 (The red vertical lines indicate the approximate extent of Lake Taihu, the same below)

4.2 西岸耗散型雷暴

与湖面增强型雷暴类似, 西岸耗散型雷暴也具有相对明确的路径特征, 但由于其移动到太湖附近时已接近消散, 湖面对其作用趋于抑制而非增强, 导致其在太湖西岸消散。以 2018 年 9 月 19 日的一次雷暴为例 (图 4), 在太平湖北部湖面与山地的共同作用下对流启动并不断增强, 于 16 时 37 分左右 WWLLN 开始记录到该雷暴的首次闪电 (图 4a)。雷暴云沿天目山脉与太湖丘陵区形成的“走廊”向东移动, 期间经历了一次过山后的闪电频数激增, 之后闪电频数逐渐减小。20 时左右雷暴移动到太湖附近, 在太湖丘陵区附近闪电频数激增。过山后闪电频数逐渐降低。但随着雷暴移入太湖湖面, 闪电频数仍然在 120°E 附近出现次峰值 (图 4b)。移入湖面后闪电活动减弱, 直至 21 时 57 分左右 WWLLN 记录到该雷暴的最后一次闪电, 估算雷暴闪电活动的平均传播速度约为 $52.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。值得注意的是, 在雷暴活动末期记录到

了整个雷暴过程中辐射能量较强的闪电事件 (图 4c), 可能与雷暴活动后期由于特殊的雷暴云结构会产生较强的正地闪放电过程有关 (Wang et al., 2016)。

4.3 合并增强型雷暴

利用 DBSCAN 算法对于非凸性数据的适用性, 还可以观察到形状相对复杂的闪电簇, 进而推测其母体雷暴的发展情况。图 5 给出了 2016 年 6 月 23 日的一次雷暴, 04 时 30 分左右在太湖西侧丘陵区域和太湖西南岸先后始发了两个对流系统, 太湖西南岸的一支沿湖陆风向东移动, 而始发于太湖西侧丘陵区域的一支向东北移动 (图 5a)。直到 09 时左右, 位于太湖湖面上的一支受湖陆风向转变的影响向北移动, 与原先向东北方向移动的一支在太湖西北部湖面合并, 短时间内闪电频数增大, 且 WWLLN 估算的闪电辐射能量在合并后出现明显增强, 如图 5b 中红色高亮区域所示。合并后的雷暴云继续向北移动, 逐渐移出太湖, 直至消散, 闪电频数也逐渐减少。由于该雷暴在太湖西

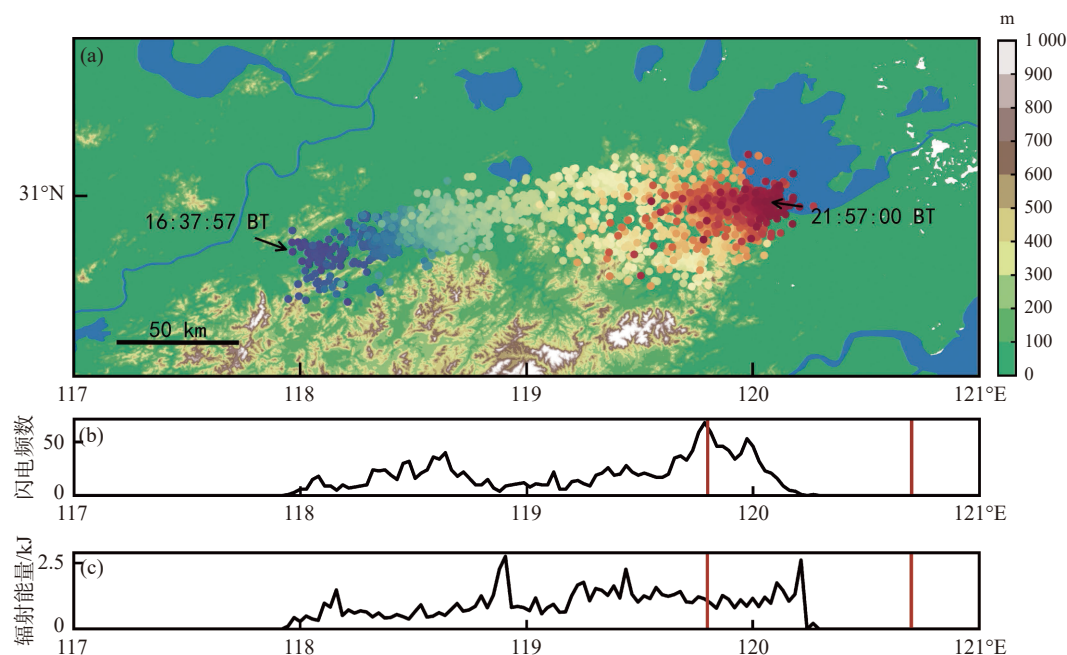


图4 同图3, 但为2018年9月19日的一次西岸耗散型雷暴

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the western-shore dissipating thunderstorm on September 19, 2018

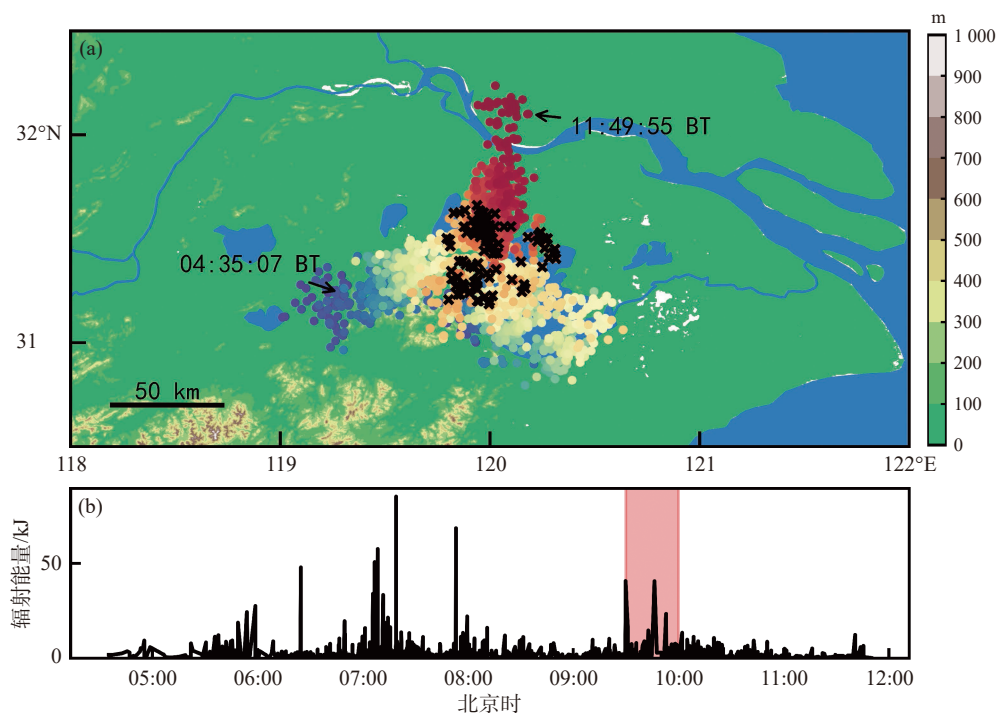


图5 2016年6月23日的一次合并增强型雷暴中剔除噪声点后的闪电簇(彩色圆点, 由蓝色到红色为时间顺序)和地形高度(填色)(a), 闪电辐射能量随时间的演变(b) (图a中黑色叉号与图b中红色区域时间段一致)

Fig. 5 The merger-enhanced thunderstorm showing (a) the lightning cluster after noise removal (colored points, ranging from blue to red represent the chronological order) and terrain (shaded), and (b) the temporal evolution of lightning energy on June 23, 2016 (The black cross markers in Fig. 5a correspond to the time period highlighted in red in Fig. 5b)

侧丘陵地带实质上出现长时间停滞, 平均速度表征意义有限, 文中不再给出。

4.4 局地型雷暴

除了具有明确路径特征的个例, 分析过程中也发现了较多生命史相对较短, 持续时间不超过2 h,

且闪电频数远少于前述类型(通常不多于100次)的雷暴过程, 由于路径特征不显著或锢囚于某一区域, 将此类过程定义为“局地型雷暴”。在筛选出的96个局地过程中, 根据其发生位置进行分组, 其中发生在太湖西岸占多数, 共有37个; 11个发生在太湖北岸,

35 个发生在太湖东岸, 3 个发生在太湖南岸, 还有 10 个发生在太湖湖面。

图 6a 给出了一次发生于 2017 年 6 月 30 日的局地型雷暴。14 时 39 分 WWLLN 记录到首个闪电, 随后该雷暴缓慢向东移入太湖湖面。虽然 WWLLN 记录到的闪电频数明显少于前文中其他三种类型的雷暴, 但闪电定位结果依然可以反映整个雷暴过程的局地性特征及闪电活动变化。以 119.9°E 线作为陆地与湖面的分界线对雷暴移动过程进行近似划分, 雷暴于 15 时 32 分移入湖面。整个雷暴过程共记录到 82 个闪电事件, 其中有 65 个定位点位于

119.9°E 线以东, 说明雷暴移入太湖湖面前闪电活动较弱, 主要放电发生在太湖湖面上, 图 6b 给出了雷暴移入太湖湖面后闪电频数的跃增现象。虽然整个过程的雷暴放电时间较短, 空间范围也非常有限, 但当其移入湖面后, 闪电频数急剧增大, 然后减少直至消散。与前述西岸耗散型个例相似, 在雷暴末期亦观测到较大闪电辐射能量 (图 6c)。图 6 中给出的局地型雷暴是闪电活动相对较强的 1 例, 多数的局地型雷暴往往水平尺度不超过 10 km, 闪电频数也较少, 且路径特征相对不明显, 生命史较前三型也更短。

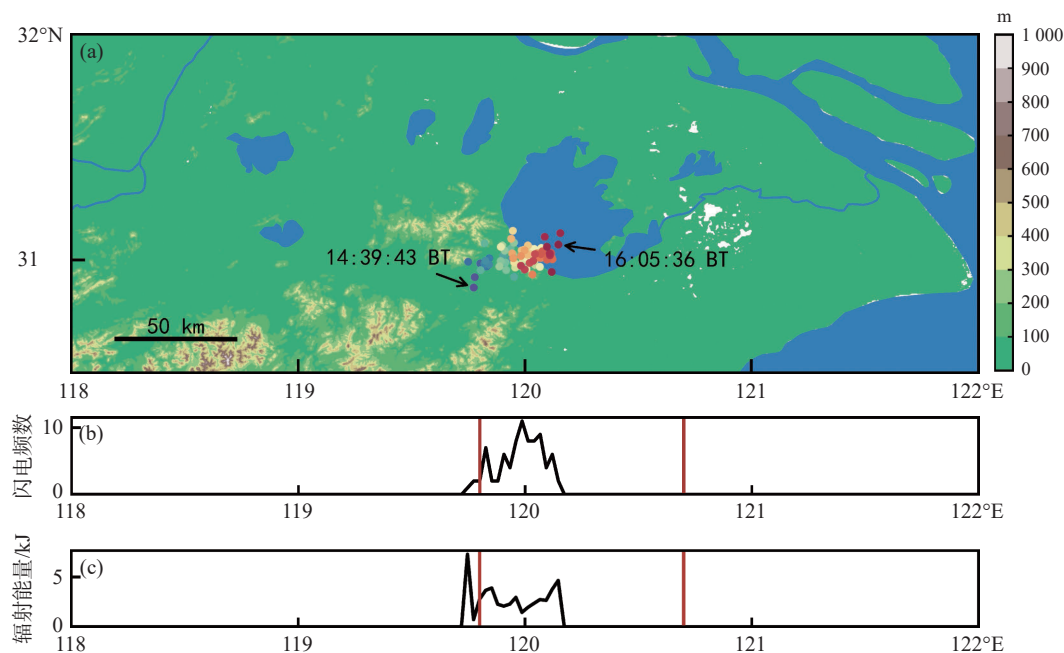


图 6 同图 3, 但为 2017 年 6 月 30 日的一次局地型雷暴

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the localized thunderstorm on June 30, 2017

4.5 闪电时空分布特征

为了解太湖区域雷暴闪电活动的整体分布情况, 图 7 给出了 2013—2018 年 WWLLN 闪电活动的年平均空间分布和日变化频数分布。由图 7a 可见, 太湖西岸存在一闪电密度高值区, 中部和西部湖面的闪电密度为次高值区, 而太湖东部湖面闪电密度相对较低。太湖东岸的苏州市和北岸的无锡市存在另一相对高值区, 这可能与城市下垫面对对流过程的促进作用及湖风锋的形成有关 (杨薇等, 2014)。图 7b 分别给出了所示区域内闪电的逐时分布情况和湖面增强型个例始发时间逐小时分布情况。昼间增强型雷暴在太湖西侧丘陵山地率先触发, 12 时左右始发频率达到峰值, 并在 18 时出现次峰值。13 时和 16 时闪电频数分别出现两次峰值, 且 16—21 时闪电频数一直维持在相对高值。这与 Zou 等 (2023) 报道

的发生在鄱阳湖流域的一次短时强对流事件具有相似特征, 研究指出对流单体自湖泊西侧地形抬升区触发, 移动至湖区附近后受成熟湖风环流的影响而增强, 从而增强闪电活动。对于较强的雷暴, 太湖可提供充足的水汽与潜热支撑, 湖区低层辐散气流的抑制作用相对较弱。对于较弱的雷暴, 湖区低空的辐散性气流则可能抑制其发展。尽管 19 时以后图 7a 所示区域内, 闪电活动仍然相对活跃, 但夜间起始的湖面增强型雷暴极少 (图 7b), 一般为湖面上空始发的局地型雷暴且生命史较短, 如图 7b 中 00—04 时仅出现少数几例湖面始发的局地型雷暴。

统计结果表明, 经过太湖湖面且具有显著路径特征的雷暴往往自西向东移动。为进一步分析湖效应对雷暴影响的一般特性, 本文进一步筛选出具有显著路径特征且近似呈自西向东走向的雷暴共

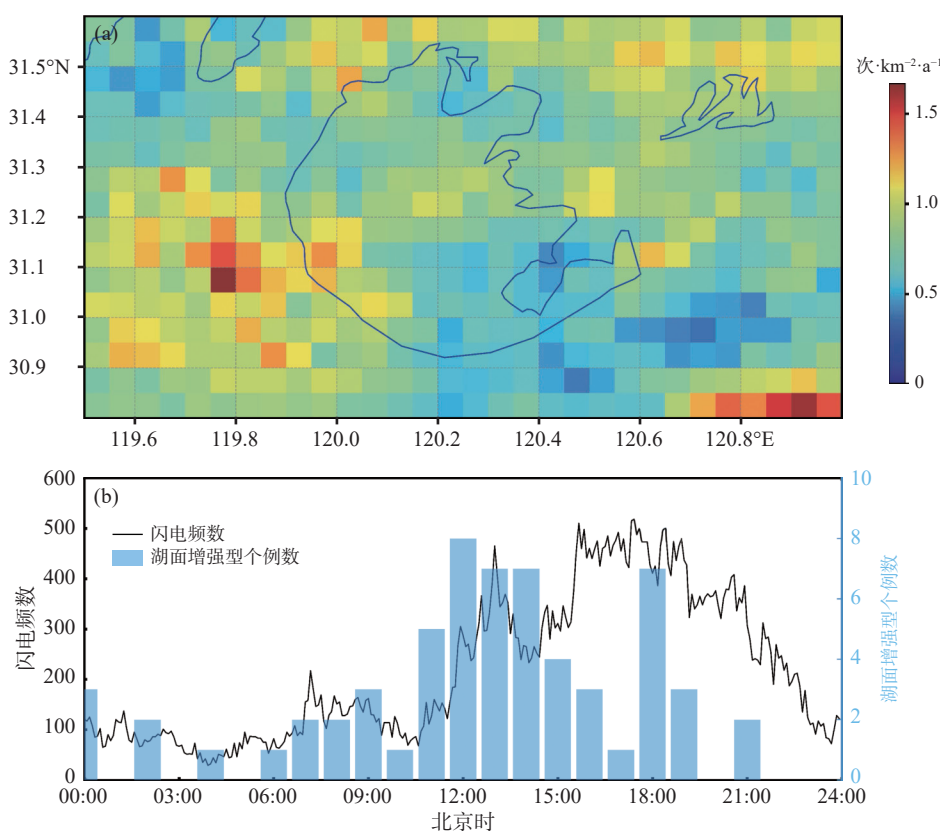


图7 2013—2018年平均闪电密度(填色)图(a)和图a所示区域内闪电活动频数及按始发时间统计的湖面增强型雷暴频数的逐时分布(b)(图a中蓝色曲线封闭区域为太湖)

Fig. 7 (a) Spatial distribution of annual mean flash density (shaded) and (b) diurnal distribution of total strokes in the region shown in Fig. 7a and the occurrence frequency distribution of initiation timing of lake enhancement thunderstorms from 2013 to 2018 (The enclosed area represented by the blue curve is Taihu Lake in Fig. 7a)

计88例, 计算平均每公里闪电频数和每公里闪电能量沿路径的变化情况(图8)。闪电频数的平均分布变化反映了雷暴在太湖西侧始发, 并向东移入太湖的一般特征。太湖湖面上同时出现平均闪电频数(图8a)及平均能量(图8b)的极值, 可能与湖面对雷暴的增强作用有关。而图7a中太湖西岸的高值区并未在图8a的东—西向投影中显示, 说明太湖西

岸的高值区主要由发生在太湖西岸的局地型和西岸耗散型雷暴贡献。由于雷暴所处阶段不同, 其闪电频数与闪电能量分布沿东西向投影亦具有一定差异, 但在太湖西侧山地和湖面上均出现峰值。此外, 午后山地暖湿空气抬升也可触发雷暴, 图1中可以看出, 太湖西侧山地呈现“口”字形分布, 这一独特的地形配置导致在该丘陵区域始发的雷暴过

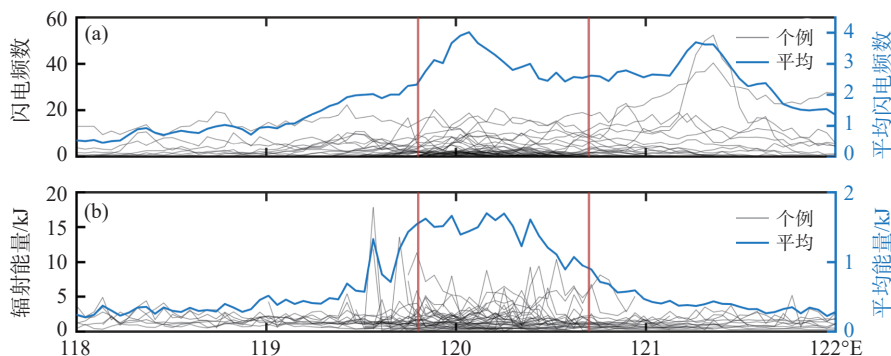


图8 2013—2018年太湖及周边地区88例近似东西向移动的雷暴在移动方向上每5 km区域的平均闪电频数(a)和辐射能量(b)

Fig. 8 Distributions of mean lightning (a) frequency and (b) radiated energy averaged in 5-km bins along the propagation direction for 88 thunderstorms with approximately east-westward propagation over the Lake Taihu region from 2013 to 2018

程多为局地过程,难以向西移入太湖,进而形成太湖西岸闪电密度的高值区。

5 结果与讨论

本文基于 2013—2018 年 WWLLN 闪电定位资料,采用两组参数设置的 DBSCAN 聚类方法对太湖地区的雷暴过程进行了识别和分类,并结合闪电频数和辐射能量沿雷暴传播路径的变化,对雷暴及闪电活动的时空分布特征、雷暴分型、典型路径及日变化进行了统计分析。主要得到以下结论:

(1) 太湖区域闪电密度总体呈西高东低分布。太湖西岸、北岸、东岸以及中西部湖面区域为相对高值区,在空间分布上具有显著的不均匀性。

(2) 根据闪电簇的时空变化特征,样本中的雷暴过程可分为局地型(约 55.5%)、湖面增强型(约 35.8%)、西岸耗散型(约 8.1%)和合并增强型(仅 1 例)。其中,湖面增强型、西岸耗散型和合并增强型过程具有较明确的路径特征,局地型过程则表现为持续时间较短、水平尺度较小、路径特征不明显。

(3) 多数具有明确路径特征的雷暴过程始发于太湖西侧山地并向东移动。若将湖面始发的局地过程纳入统计,则在 87 个与湖面直接相关的过程中,有 62 个在湖面范围内表现为闪电频数或辐射能量的明显跃增,占比约 71.3%。

(4) 太湖地区的雷暴活动多集中于昼间,峰值出现在午后至入夜时段;夜间湖面始发的雷暴较少,且多为局地、短生命史过程。湖面增强型雷暴主要集中在 11 时至 15 时及 18 时前后始发,夜间湖面增强型雷暴极少。

太湖湖面始发的雷暴多表现为局地、短生命史过程。在统计时段内,14 次湖面始发的雷暴中仅有 4 次逐渐增强并向东移出太湖。已有研究表明,维多利亚湖上空强雷暴多始发于湖面且以夜间过程为主(Virts and Goodman, 2020),而太湖区域湖面始发的强雷暴相对较少,闪电活动主要集中于午后至傍晚,两者存在显著差异。这种差异可能与湖泊热力性质有关:维多利亚湖水深较深、热惯性强,夜间仍可维持较强的湖—陆热力差异及低层辐合,而太湖水深较浅、热惯性较弱,夜间湖面增强作用有限。此外,太湖及周边地区地形与水体分布复杂,湖泊影响可能与周边地形耦合,形成“地形触发—湖效应增强”的协同作用(Zou et al., 2023)。统计结果显示,西侧山地区域对应较高的闪电频数和辐射能量,水陆交界带亦常出现闪电跃增,表明湖岸过渡区可能是对流影响较为显著的区域。不同雷暴移入湖面后的演变亦

存在差异:处于衰减阶段的雷暴多在湖岸附近短时增强后迅速消散,而仍处于活跃阶段的则可能在湖面维持或进一步增强。这表明湖面对雷暴的影响并非单一增强或抑制,与雷暴活动所处发展阶段亦存在一定关系。

本文主要基于 2013—2018 年每年闪电频数最多的前 30 d 样本,对太湖及周边地区雷暴活动特征进行分析,揭示了太湖作为非均一下垫面对局地雷暴生命史及闪电活动的调制作用,为理解水陆交界区域对流演变特征提供了观测依据。需要指出的是,不同天气背景和不同纬度带湖泊的湖效应存在显著差异,后续仍需结合更多区域个例、环境场资料及数值模拟,针对雷暴对于不同特征湖泊的响应特征开展进一步研究。

参考文献 (References):

- 刘辉志,许鲁君,杜群,等.2025.高原湖泊湖-气相互作用研究[J].高原山地气象研究,45(2):1-11. Liu H Z, Xu L J, Du Q, et al. 2025. Study on lake-atmosphere interaction in plateau lakes [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(2):1-11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.02.001
- 钱勇,郑栋,叶发新,等.2025.新疆雷暴云活动特征研究[J].沙漠与绿洲气象,19(6):114-121. Qian Y, Zheng D, Ye F X, et al. 2025. Research on the characteristics of thunderstorm clouds activity in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(6):114-121 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.2097-6801.2401.09002
- 师正,吴子珉,孙京,等.2023.基于三种聚类算法的雷暴系统识别效果对比研究[J].暴雨灾害,42(3):334-345. Shi Z, Wu Z M, Sun J, et al. 2023. Comparative research on thunderstorm identification based on three clustering methods [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):334-345 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-179
- 陶雅琴,闵锦忠,徐渊,等.2024.鄱阳湖影响过湖对流强度的数值模拟及机理分析[J].热带气象学报,40(1):101-114. Tao Y Q, Min J Z, Xu Y, et al. 2024. Numerical simulation and mechanism of the influence of Poyang Lake on the intensity of severe convection over the lake [J]. Journal of Tropical Meteorology,40(1):101-114 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2024.011
- 杨显玉,文军.2012.扎陵湖和鄂陵湖大气边界层特征的数值模拟[J].高原气象,31(4):927-934. Yang X Y, Wen J. 2012. Numerical simulation of characteristic of atmospheric boundary layer over Lake Gyaring and Ngoring [J]. Plateau Meteorology,31(4):927-934 (in Chinese)
- 杨薇,苗峻峰,谈哲敏.2014.太湖地区湖陆风对雷暴过程影响的数值模拟[J].应用气象学报,25(1):59-70. Yang W, Miao J F, Tan Z M. 2014. Numerical simulation of the lake breeze impact on thunderstorm over the Taihu area [J]. Journal of Applied Meteorological Science,25(1):59-70 (in Chinese)
- 邹海波.2020.鄱阳湖湖效应降水的统计分析 with 个例研究[D].兰州:兰州大学. Zou H B. 2020. Statistical analysis and case studies of lake-effect precipitation over Poyang Lake [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)

- Augenstein M, Mohr S, Kunz M. 2025. Influence of the North Atlantic Oscillation on annual spatio-temporal lightning clusters in western and central Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25:4921–4939. doi:10.5194/nhess-25-4921-2025
- Baranovskiy N V, Karanin A, Glebova A, et al. 2017. Methods to estimate lightning activity using WWLLN and RS data [C]// Romanovskii O A. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Irkutsk, Russian Federation: SPIE, 126. doi:10.1117/12.2286780
- Camberlin P, Gitau W, Planchon O, et al. 2018. Major role of water bodies on diurnal precipitation regimes in Eastern Africa [J]. *International Journal of Climatology*, 38(2):613–629. doi:10.1002/joc.5197
- Cocopa J G A, Tacza J, Raulin J P, et al. 2021. Estimation of thunderstorms occurrence from lightning cluster recorded by WWLLN and its comparison with the universal Carnegie curve [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221:105682. doi:10.1016/j.jastp.2021.105682
- De Abreu L P, Gonçalves W A, Mattos E V, et al. 2021. Clouds' microphysical properties and their relationship with lightning activity in northeast Brazil [J]. *Remote Sensing*, 13(21):4491. doi:10.3390/rs13214491
- Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785–797. doi:10.1175/1520-0426(1993)010<0785:titaa>2.0.co;2
- Dowden R L, Brundell J B, Rodger C J. 2002. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(7):817–830. doi:10.1016/S1364-6826(02)00085-8
- Ester M, Kriegl H P, Sander J, et al. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C]// Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 226–231. doi:10.5555/3001460.3001507
- Feldmann M, Rotunno R, Germann U, et al. 2024. Supercell thunderstorms in complex topography—how mountain valleys with lakes can increase occurrence frequency [J]. *Monthly Weather Review*, 152(2):471–489. doi:10.1175/MWR-D-22-0350.1
- Gu H, Ma Z, Li M. 2016. Effect of a large and very shallow lake on local summer precipitation over the Lake Taihu basin in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(15):8832–8848. doi:10.1002/2015JD024098
- Haberlie A M, Ashley W S, Fultz A J, et al. 2016. The effect of reservoirs on the climatology of warm-season thunderstorms in southeast Texas, USA [J]. *International Journal of Climatology*, 36(4):1808–1820. doi:10.1002/joc.4461
- Hayward L, Whitworth M, Pepin N, et al. 2023. Thunderstorm tracking in Northwest Europe for enhanced hazard preparedness [J]. *International Journal of Climatology*, 43(11):4894–4916. doi:10.1002/joc.8123
- Hutchins M L, Holzworth R H, Brundell J B. 2014. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(1):620–629. doi:10.1002/2013JA019593
- Liu H, Liang Z, Li L, et al. 2025. What locks the position of nighttime convection initiation center in Hainan Island? [J]. *Geophysical Research Letters*, 52(20):e2025GL118097. doi:10.1029/2025GL118097
- Lloyd S P. 1982. Least squares quantization in PCM [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2):129–137. doi:10.1109/TIT.1982.1056489
- Lumb F E. 1970. Topographic Influences on Thunderstorm Activity Near Lake Victoria [J]. *Weather*, 25(9):404–410. doi:10.1002/j.1477-8696.1970.tb04129.x
- Rafi M H, Holzworth R H, Mostafa M G. 2024. Evaluation of detection efficiency of World Wide Lightning Location Network in southeast Asian region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15):e2024JD041160. doi:10.1029/2024JD041160
- Rodger C J, Werner S, Brundell J B, et al. 2006. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study [J]. *Annales Geophysicae*, 24(12):3197–3214. doi:10.5194/angeo-24-3197-2006
- Sander J, Ester M, Kriegl H-P, et al. 1998. Density-based clustering in spatial databases: The algorithm GDBSCAN and its applications [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2):169–194. doi:10.1023/A:1009745219419
- Shi M, Zhang W, Fan P, et al. 2022. Modelling deep convective activity using lightning clusters and machine learning [J]. *International Journal of Climatology*, 42(2):952–973. doi:10.1002/joc.7282
- Utsav B, Deshpande S M, Das S K, et al. 2022. Relationship between convective storm properties and lightning over the western Ghats [J]. *Earth and Space Science*, 9(9):e2022EA002232. doi:10.1029/2022EA002232
- Virts K S, Goodman S J. 2020. Prolific lightning and thunderstorm initiation over the Lake Victoria basin in East Africa [J]. *Monthly Weather Review*, 148(5):1971–1985. doi:10.1175/MWR-D-19-0260.1
- Wang F, Zhang Y, Liu H, et al. 2016. Characteristics of cloud-to-ground lightning strikes in the stratiform regions of mesoscale convective systems [J]. *Atmospheric Research*, 178–179:207–216. doi:10.1016/j.atmosres.2016.03.021
- Wei Q, Sun J, Zhang Y, et al. 2023. Statistical characteristics of thunderstorm activity in the middle reaches of the Yangtze River basin based on a five-year cloud-to-ground lightning data set [J]. *Geophysical Research Letters*, 50(24):e2023GL106498. doi:10.1029/2023GL106498
- Zou H, Tian M, Huang A, et al. 2023. A strong short-duration convection near Poyang Lake in daytime of warm season [J]. *Science of the Total Environment*, 891:164659. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164659

(责任编辑 唐国瑛)