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

近43 a影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征

蔡志颖 郑艳 张程明 马静 肖王星 顾思南

Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorms nearly 43 years

CAI Zhiying，ZHENG Yan，ZHANG Chengming，MA Jing，XIAO Wangxing，GU Sinan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-074

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

基于逻辑回归法的浙江省低涡型暴雨落区预报研究

The potential falling area forecast for rainstorm induced by vortex in Zhejiang Province based on logistic regression algorithm

暴雨灾害. 2024, 43(1): 32-44 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-009

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析

Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin

暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析

Objective assessment and analysis of abnormal causes of regional rainstorm events in South China

暴雨灾害. 2021, 40(3): 306-315 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.009

湖南省西南涡暴雨的分类研究

Classification of rainstorms in Hunan Province affected by the Southwest China vortex

暴雨灾害. 2021, 40(1): 52-60 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.007

湖北省区域性暴雨雨团识别及特征分析

Rain clusters identification and characteristics analysis of regional rainstorms in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(5): 505-512 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.007

1961—2020年安徽省区域性暴雨和干旱过程识别及演变特征

Characteristics of identification and evolution of regional rainstorm and drought processes in Anhui Province during 1961-2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 671-678 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-088

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡志颖,郑艳,张程明,等.2025.近 43 a 影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征[J].暴雨灾害,44(2):215−225. CAI Zhiying, ZHENG Yan, ZHANG Chengming, et al. 2025. Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorms nearly 43 years [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):215−225 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−074

近 43 a 影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征

蔡志颖[1], 郑艳[2], 张程明[1], 马静[3, 4], 肖王星[1], 顾思南[5]

(1. 浙江省宁波市气象台, 宁波 315000; 2. 浙江省宁波市镇海区气象局, 宁波 315200; 3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044; 4. 南京信息工程大学大气科学与环境气象国家级教学示范中心, 南京 210044; 5. 浙江省宁波市生态环境气象中心, 宁波 315000)

摘　要: 利用 1979—2021 年美国国家环境预测中心气候预测系统再分析资料和浙江省历史降水资料, 采用大气涡旋客观识别和追踪算法, 统计分析了近 43 a 影响浙江和引发区域性暴雨的大气涡旋气候特征。结果表明: (1) 影响浙江的大气涡旋主要位于安徽中东部、江西东北部和江苏中南部; 活跃于 4—6 月, 以 6 月频数最多; 夜间至清晨的大气涡旋易影响浙江, 且更易引发区域性暴雨, 但生命史较短。(2) 引发浙江区域性暴雨的大气涡旋统计特征与影响浙江的大气涡旋类似, 大气涡旋在夏季 (6—8 月) 最易引发区域性暴雨。(3) 大气涡旋引发浙江区域性暴雨天气时, 浙江多位于高空浅槽前部、低层高能量区, 受大气涡旋东侧暖式切变线影响, 源自南海的西南气流向浙江输送水汽。(4) 梅雨期的 6 月大气涡旋强度强、浙江省内温度经向梯度、西南风速大, 大气涡旋引发的区域性暴雨降水主要位于浙江西部, 以暴雨为主; 西太平洋副热带高压峰期的 8 月, 大气涡旋引发的区域性暴雨降水主要在浙江东南沿海, 以分散性大暴雨为主。

关键词: 大气涡旋; 客观识别; 追踪算法; 暴雨

中图法分类号: P456.8　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−074

Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorms nearly 43 years

CAI Zhiying[1], ZHENG Yan[2], ZHANG Chengming[1], MA Jing[3, 4], XIAO Wangxing[1], GU Sinan[5]

(1. *Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315000; 2. *Ningbo Zhenhai Meteorological Bureau of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315200; 3. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters* (*CIC-FEMD*)/ *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education* (*KLME*)/*Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change* (*ILCEC*), *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044; 4. *National Demonstration Center for Experimental Atmospheric Science and Environmental Meteorology Education*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044; 5. *Ningbo Ecological Environment Meteorological Center of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315000)

Abstract: Based on reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis and historical precipitation data from Zhejiang Province, characteristics of vortexes that have affected Zhejiang and induced regional heavy rainstorms over the past 43 years are statistically analyzed with the objective identification and tracking algorithm. The results are as follows. Firstly, vortexes affecting Zhejiang are mainly located in the middle and east of Anhui, the northeast of Jiangxi, and the middle and south of Jiangsu. They are usually active from April to June, with the highest frequency in June. Vortexes from night to early morning are more likely to affect Zhejiang, and cause regional heavy rainstorms, but the lifetime of these rainstorms tends to be short. Secondly, the statistical characteristics of vortexes inducing rainstorms in Zhejiang are similar to those affecting Zhejiang. The vortexes are most likely to cause regional rainstorms in summer (June to August). Thirdly, when vortexes cause regional rainstorms, Zhejiang is usually located in

收稿日期: 2023−04−26; **定稿日期:** 2023−10−09

资助项目: 浙江省宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目 (2023Z139); 浙江省自然科学基金联合基金项目 (LZJMZ23D050004); 浙江省宁波市公益性科技计划项目 (2023S061); 浙江省宁波市气象局一般项目 (NBQX2023001B)

第一作者: 蔡志颖, 主要从事天气预报服务与研究。E-mail: nbqx_czy@163.com

通信作者: 张程明, 主要从事天气预报服务与研究。E-mail: 171429617@qq.com

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

front of the upper shallow trough, and the low-level high-energy region. Affected by the warm shear line on the east side of the vortexes, the southwest warm and wet airflow from the South China Sea continuously transports water vapor to Zhejiang. Finally, in June during the Mei-yu season, the intensity of vortexes is strong, and the temperature meridian gradient and the southwest wind speed on the south side of vortexes are large. The regional rainstorm precipitation induced by vortexes is mainly located in the west of Zhejiang and is dominated by heavy rainfall. In August during the western Pacific subtropical high period, the regional rainstorm precipitation induced by vortexes is mainly in the southeast coastal area of Zhejiang, and characterized by scattered heavy rainfall.

Key words: atmospheric vortexes; objective identification; tracking algorithm; rainstorm

引　言

我国多数区域的暴雨天气产生与大气涡旋相关，这些大气涡旋系统除了热带气旋外，主要包括不同地区的气旋和低涡，如西南涡、江淮气旋等 (郁淑华等, 2021)。在我国西南涡引发的暴雨灾害强度、频数和范围仅次于热带气旋，许多罕见的特大洪涝灾害均与西南涡密切相关 (陈忠明等, 2003)。大部分西南涡在原地生消，但部分发展东移的西南涡可造成下游地区大范围暴雨、雷暴等灾害性天气 (梁红丽等, 2012; 华维等, 2024)。当西南涡向偏东方向移动时，在大气中激发气旋波，长江中下游地区会出现成片雨区；当西南涡向东南方向移动时，可造成华南阴雨天气，云、贵等地易出现强降水 (刘红武等, 2016)。西南涡东移过程中，受高空槽前正涡度平流的影响，可加深发展为江淮气旋。江淮气旋作为活跃于江淮地区并造成该地区暴雨的重要天气系统，春季及 4 月是其最活跃的季节和月份 (周越和夏兰, 2017; 黄文彦等, 2020)，4—8 月出现的江淮气旋常带来暴雨、大风等高影响天气。已有学者开展了江淮气旋统计特征的研究 (Wang et al., 2009; Zhang et al., 2012; Qin et al., 2017)。如，王艳玲等 (2015) 借助美国国家环境预测中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 再分析资料统计了春末夏初江淮气旋活动的年际和年代际变化特征，结果表明西风带上异常扰动向东亚地区的传播导致了 21 世纪初期气旋频数有所增加。周越和夏兰 (2017) 分析 1979—2010 年江淮气旋的气候特征并指出气旋频数虽有显著年际变化，但长期趋势并不明显。

大气涡旋是影响浙江的高频天气系统，每年均会在浙江造成区域性暴雨或大暴雨，并引起不同程度的灾害 (蔡志颖等, 2024)。气象工作者对此类天气系统做了相关研究，但主要是集中在个例分析，缺乏对大气涡旋长时间演变特征的研究，致使目前学术界对影响浙江的大气涡旋统计特征仍不够了解。客观识别和追踪算法可客观识别大气涡旋位置，并追踪其移动路径，是当前研究大气涡旋的重要手段，已应用于江淮气旋的统计分析中 (Qin et al., 2017, 2019; 周越和夏兰, 2017; 黄文彦等, 2020)。该算法使研究大气涡旋的长时间演变特征成为可能，本文利用 1979—2021 年 NCEP 再分析资料，采用大气涡旋客观识别和追踪算法来识别影响浙江和引发区域性暴雨的大气涡旋系统，并对两者的气候特征及影响进行统计分析，以期加深对大气涡旋活动规律及其引发的暴雨降水特征的认知。

1 资料与方法

1.1 资料说明

采用的研究资料包括：(1) 1979—2021 年 NCEP 气候预测系统再分析数据集 (Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)，来源于网站 https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/。具体包括 500 hPa、850 hPa 经纬向风速、位势高度、大气比湿和温度，数据覆盖全球范围，水平分辨率为 0.5°×0.5°，时间分辨率为 6 h，用于识别和统计影响浙江和引发区域性暴雨的大气涡旋。(2) 1979—2021 年浙江省气象局和水利厅联合发布的 08—08 时 (北京时，下同) 逐日网格化降水数据，水平分辨率为 0.01°×0.01°，用于统计大气涡旋对浙江造成的降水影响。

1.2 研究方法

采用 Lu (2017)、Qin 等 (2017) 提出的基于最外围闭合等高线的大气涡旋区域识别方法进行涡旋客观识别。以逐日 4 次 850 hPa 位势高度为识别要素，将局地位势高度低值初步定义为大气涡旋中心，从中心点向外搜索闭合等高线并以最外围闭合等值线内的区域作为大气涡旋影响区。若影响区位于浙江省内，则将该涡旋定义为影响浙江的大气涡旋 (以下简称影响涡旋)。大气涡旋影响区确定后，所包含的网格点重心定义为最终大气涡旋中心，基于位势高度并采用双线性插值法得到涡旋中心强度。从大气涡旋影响区覆盖的球面面积计算等面积圆，将圆的直径 d 作为大气涡旋的相当直径 (以下简称直径)。

客观识别出每个时次的大气涡旋中心后，可追踪大气涡旋移动路径。以当前时次涡旋中心为起点，计算其与下一时次所有大气涡旋中心的距离，挑选出距离最近的中心，并要求最近距离小于 600 km (Lu, 2017; Qin et al., 2017)，而后将这两个时次的大气涡旋中心相连接，作为一条大气涡旋移动路径。若在该距离内未找到符合条件的涡旋中心，则认为大

气涡旋消亡。为节省搜索时间, 实际客观识别与追踪仅在东亚地区 (90°—145°E, 15°—65°N) 进行。为消除海上台风或东风系统对本文所关注的陆地大气涡旋统计结果的影响, 当识别的移动路径同时满足以下 2 个条件时, 便剔除整条路径上的大气涡旋信息: (1) 大气涡旋路径至少包含 2 个及以上时次的中心位置; (2) 路径的前 2 个大气涡旋中心位于海洋上。经算法初步剔除, 再加以人工判别, 从而得到陆地大气涡旋数据集。

探讨影响涡旋与浙江省区域性暴雨的关系时, 第一步便是识别区域性暴雨。按牛若芸等 (2018) 对我国 95°E 以东地区区域性暴雨的定义, 并结合浙江省格点降水资料的特点, 定义浙江省区域性暴雨为日累计降水量达暴雨以上量级 (≥50 mm) 的格点数≥750 个, 且这些格点相连成片。此处“相连成片”是指该区域内的每一个格点均至少有另外一个格点与之相连接 (包含对角相连)。统计发现, 近 43 a 浙江省共出现 1 604 次区域性暴雨。当浙江省某一天出现区域性暴雨, 便在发生区域性暴雨的格点上记一次频数, 并记录此格点降水量。遍历 43 a 的逐日降水场, 并累计每次区域性暴雨发生格点上的频数和降水量。最后, 对累计频数求年平均值以求得浙江省发生区域性暴雨的平均频数空间分布。

当浙江省某一天出现区域性暴雨且当天有影响涡旋, 便称此影响涡旋为致暴涡旋, 此次暴雨过程认为由大气涡旋引发 (黄文彦等, 2020)。由致暴涡旋引发的区域性暴雨频数计算过程与上述类似。但同一天内仅对一个致暴涡旋的降水场进行区域性暴雨的识别并在相应格点上累计频数和降水量。

2 结果分析

2.1 大气涡旋客观识别和追踪算法的检验

按影响涡旋直径 d 将其划分为中尺度 (d<300 km)、次天气尺度 (300 km≤d≤1 000 km) 和天气尺度 (d>1 000 km)。为测试客观识别算法对大气涡旋的识别能力, 图 1 给出不同尺度大气涡旋个例客观识别结果, 可见封闭等高线轮廓与气旋性风矢量匹配一致, 表明该客观识别算法能准确检测到大气涡旋边界。

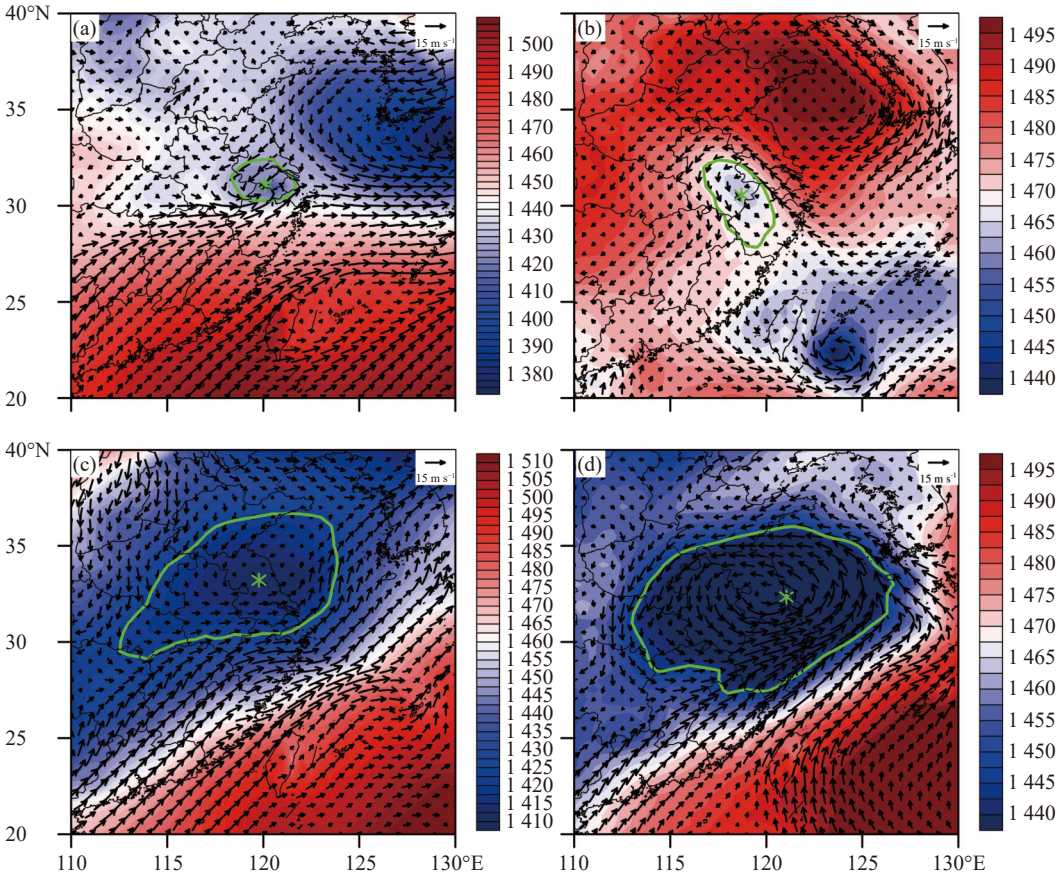


图 1 大气涡旋客观识别算法识别的 1979 年 7 月 17 日 14 时 (a)、5 月 30 日 08 时 (b)、3 月 9 日 20 时 (c) 和 5 月 13 日 08 时 (d) 大气涡旋边界 (绿色实线) 和大气涡旋中心 (绿色"*") (阴影表示 850 hPa 位势高度场,单位: gpm;箭矢表示 850 hPa 风场)

Fig. 1 Dentified boundary (green solid line) and center (green star) of atmospheric vortexes by vortex identification algorithm at (a) 14:00 BT on 17 July, (b) 08:00 BT on 30 May, (c) 20:00 BT on 9 March and (d) 08:00 BT on 13 May 1979 (shadow represent the 850 hPa geopotential height field, unit: gpm, vector arrow represent the 850 hPa wind field)

图 1a 中，江苏南部和浙江北部交界处出现一中尺度影响涡旋 d=272 km)，中心强度为 1 418.6 gpm，其对浙江省的影响范围较小。图 1b、c 分别展示一较小 (d=378 km) 和较大 (d=850 km) 范围的次天气尺度影响涡旋，它们对浙江省的影响范围稍大，主要影响区分别出现在浙江西部和北部。图 1d 中，一中心位于江苏中部的天气尺度影响涡旋 (d=1 035 km) 除覆盖浙江外，还影响山东、安徽、湖北、江西和上海等地。

为进一步测试追踪算法对涡旋路径的识别能力，随机选取一个有观测记录的江淮气旋个例加以对比。实测记录中，2009 年 4 月 19 日 08 时在 (113°E, 28°N) 处有大气涡旋生成，生成后的涡旋逐渐增强并向东北方向移动；20 日 02—08 时大气涡旋中心入海并继续增强；20 日 20 时大气涡旋中心移至朝鲜，随后继续东北向移动直至消亡。图 2 给出追踪算法得到的此次大气涡旋路径和其中心强度变化，可见客观识别的大气涡旋发生于 19 日 02 时，较观测提前了 6 h，这与周越和夏兰 (2017) 的客观识别结果相近；08 时大气涡旋中心位于湖南境内 (112°E、29°N)，位置稍偏北，但涡旋向东北方向移动，追踪算法也能很好地描述 20 日 02—08 时的入海过程。大气涡旋中心位势高度值越低，表明涡旋强度越强。从大气涡旋中心强度变化看，大气涡旋经湖南向东北方向移动时，强度不断增强，在抵达朝鲜半岛后才逐渐减弱消亡，这与观测记录较为吻合 (徐迎春等, 2011)。

综上，本文采用大气涡旋客观识别和追踪算法来识别、追踪大气涡旋是可靠的，且由于采用统一标准，相比于人工识别结果更为客观，所得结果可用于后续影响涡旋气候特征的统计分析。

2.2 影响涡旋的统计特征

2.2.1 影响涡旋的时空分布特征

为分析浙江省影响涡旋的空间分布特征，将 1979—2021 年客观识别到的影响涡旋中心投影到 1°×1°的经纬度网格内，图 3 给出 1979—2021 年影响涡旋频数的空间分布及其强度−直径热力图。可见影响涡旋主要出现在安徽中东部、江西东北部和江苏中南部，在大别山东部和鄱阳湖等区域更易出现，

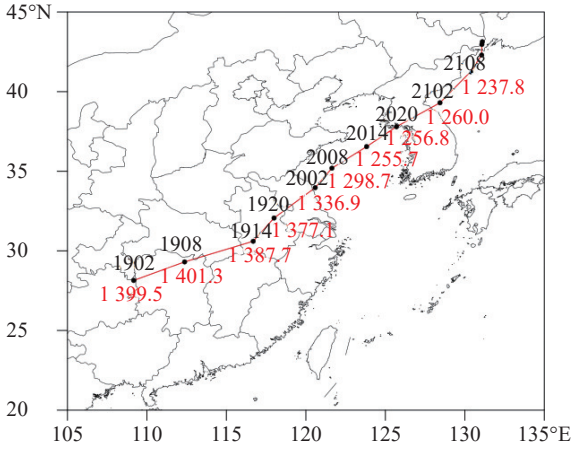


图 2 追踪算法识别的 2009 年 4 月一次大气涡旋个例路径 (红色实线表示路径,黑色圆点表示客观识别的涡旋中心,黑色数字表示客观识别的涡旋中心过境时间,如 1902 表示 19 日 02 时) 和中心强度 (红色数字表示客观识别的涡旋中心位势高度,单位: gpm)

Fig. 2 Dentified track (red solid line represents the track, black dot represents the identified center, black number represents the transit time of the vortex center, such as 1902 means 02:00 BT on 19th) and its central intensity (red number below represents its central geopotential height, unit: gpm) of vortexes in April 2009

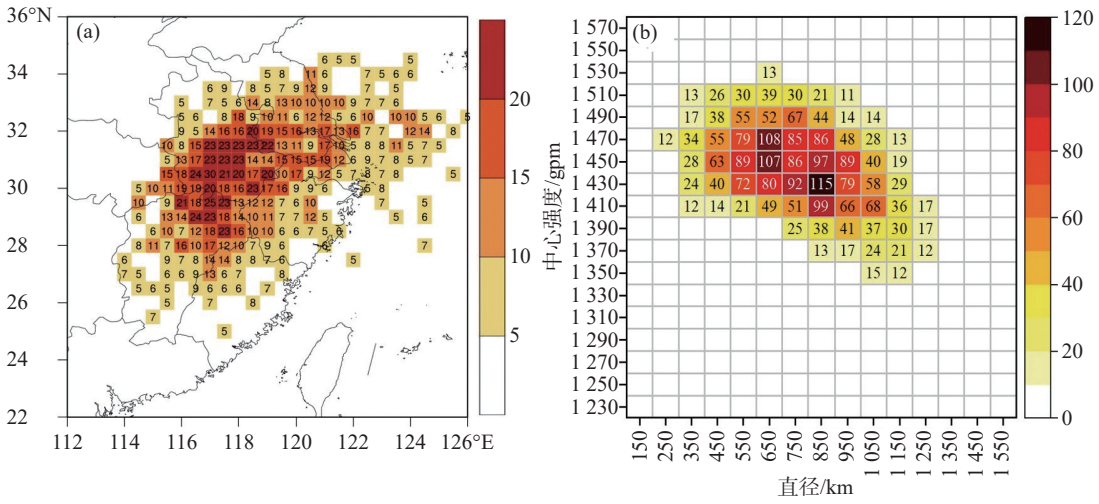


图 3 1979—2021 年浙江省影响涡旋频数 (单位:个) 的空间分布 (a) 和影响涡旋的中心强度−直径热力图 (b) (阴影和网格中数字表示影响涡旋频数)

Fig. 3 Spatial distribution of (a) frequency of vortexes affecting Zhejiang and (b) heatmap of its central intensity and diameter from 1979 to 2021 (Shadow and number in the grid represent the frequency of vortexes)

达 20 个以上 (图 3a)。这一方面是由于大气低值系统易生成在地形背风坡处, 另一方面大湖区的表面温度较高、水汽充足, 利于大气涡旋的生成和维持 (周越和夏兰, 2017)。这些影响涡旋主要为次天气尺度, 直径多在 400~1 000 km, 强度在 1 400~1 480 gpm (图 3b)。由于影响涡旋主要出现在浙江西北侧, 因此浙江省影响涡旋呈西北多、东南少特征分布, 浙江西北部的湖州、杭州、衢州和金华等地, 平均每年会受 50 个以上的大气涡旋影响, 而位于浙江东南部的台州和温州受大气涡旋影响较少, 平均每年 20 个左右 (图略)。

统计表明 1979—2021 年浙江省影响涡旋共 3 189 个, 平均每年 74 个。图 4a 给出影响涡旋频数的年际变化, 可见影响涡旋频数最多的年份为 1999 年, 有 122 个; 最少的年份为 1995 年, 仅 42 个。虽然影响涡旋频数有明显的年际变化, 但趋势系数仅 0.16, 未通过信度 0.05 的 t 检验, 即增加趋势并不显著。

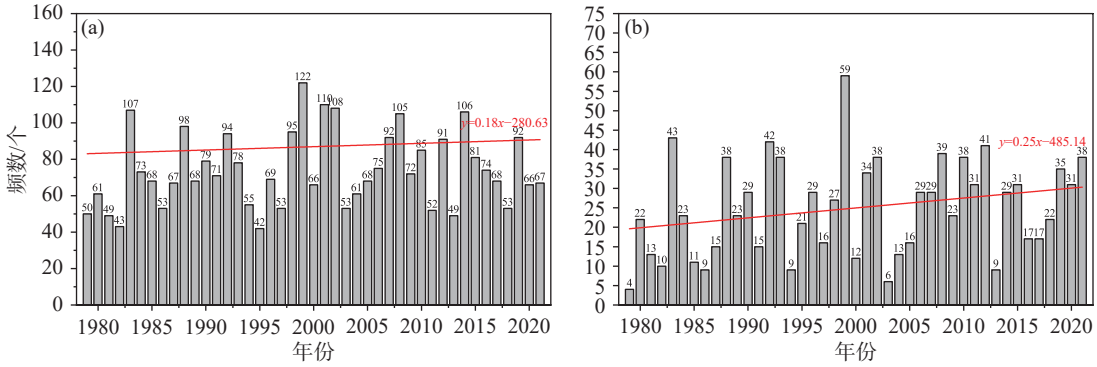


图 4 1979—2021 年浙江省影响涡旋 (a) 和致暴涡旋 (b) 频数的年际变化 (红色直线表示回归直线)

Fig. 4 Interannual variation of (a) vortexes affecting Zhejiang and (b) rainstorm-causing vortexes in Zhejiang from 1979 to 2021 (Red line represents the regression line)

图 5 是 1979—2021 年浙江省影响涡旋频数、中心强度和直径的月变化。从影响涡旋频数的月变化看, 其总体呈先增后减趋势, 1—6 月影响涡旋频数逐渐增多, 6—12 月逐渐减少, 其中 6 月份最多, 有 668 个, 12 月份最少, 仅 35 个; 4—8 月是影响涡旋最活跃的月份, 这 5 个月的影响涡旋频数占比约 70.9%, 这与刘佳颖 (2012)、周越和夏兰 (2017) 对江淮气旋的统计结果一致。从影响涡旋的中心强度月变化看, 7 月影响涡旋中心强度最强, 12 月份中心强度最弱, 两者平均相差近 80 gpm; 6—7 月影响涡旋中心强度偏强, 主要是由于此时正处梅雨季, 大气水汽含量充沛且凝结潜热释放强烈, 利于大气涡旋发展。从影响涡旋直径的月变化看, 影响涡旋直径在 675~825 km, 主要属次天气尺度, 其中 5 月影响涡旋的尺度最大, 平均在 825 km 左右, 12 月份影响涡旋的尺度最小, 在 690 km 左右。

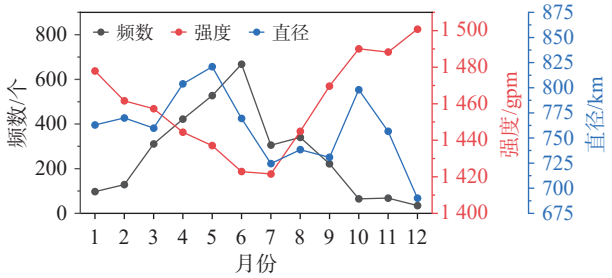


图 5 1979—2021 年浙江省影响涡旋频数、平均中心强度和直径的月变化

Fig. 5 Monthly change of frequency, averaged central intensity, and diameter of vortexes affecting Zhejiang from 1979 to 2021

统计影响涡旋各季节的频数 (表 1) 可知, 夏季最多, 占比约 41.2%; 其次是春季, 占比约 39.5%; 秋、冬季影响涡旋较少, 占比 10% 左右。夏季影响涡旋较多的主要原因是西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 逐渐西伸北抬, 冷空气势力减弱, 6—7 月冷暖空气常对峙于江淮流域, 多静止锋活动, 7—8 月, 虽然副高逐渐控制江淮地区, 但冷暖气流交汇于 35°N 以北, 黄、渤海气旋较多 (朱乾根等, 2010)。春季冷空气活动频繁, 在强度适宜的情形下, 能与副高北侧的西南暖湿气流交汇, 也易生成江淮气旋 (刘佳颖, 2012)。秋、冬季冷空气活跃而暖空气减弱, 冷暖气流汇合带移至华南, 江淮地区大气涡旋的频数减少。

2.2.2 影响涡旋的生命史和中心强度变化特征

统计影响涡旋各时次的频数 (表 1) 可知, 影响涡旋多出现在 14 时和 02 时, 分别为 828 和 929 个 (占比 26.0% 和 29.1%)。夜间 (20—08 时) 出现的影响涡旋频数为 1 630 (占比 51.1%), 略大于白天 (08—20 时) 的 1 559 (占比 48.9%)。因此, 对浙江省而言, 午后及半夜是影响涡旋出现的高频时次, 而夜间至清晨是较易受涡旋影响的时段。对影响涡旋的生命

表 1 1979—2021 年浙江省不同季节、时次和生命史影响涡旋的频数和占比

Table 1 Frequency and proportion of seasons, times and lifetimes of vortexes affecting Zhejiang from 1979 to 2021

分类标准	统计标准	频数/个	占比/%
季节	春	1 260	39.5
	夏	1 313	41.2
	秋	355	11.1
	冬	261	8.2
时次	08时	731	22.9
	14时	828	26.0
	20时	701	22.0
	02时	929	29.1
时长/h	<6	790	53.2
	[6,12)	305	20.5
	[12,24)	245	16.5
	[24,36)	87	5.9
	[36,48)	36	2.4
	≥48	22	1.5

史 (是指从对浙江省开始产生影响至无影响所经历的时间) 统计表明, 只在 1 个时次出现的影响涡旋, 其生命史小于 6 h; 在 2 个时次出现, 其生命史为 6 h, 以此类推。在影响涡旋中, 共识别到 1 485 条移动路径。从其生命史统计结果 (表 1) 看, 影响涡旋生命史普遍较短, 超半数 (790 个) 的生命史不足 6 h, 约 90% (1 340 个) 在 24 h 以下, 仅 10% (145 个) 在 24 h 以上。

图 6a 给出影响涡旋中心平均变高率分布, 即在影响涡旋移动过程中每 6 h 的中心变高平均值。需要注意的是, 统计仅针对生命史超 6 h 的影响涡旋, 共 695 条路径。可见影响涡旋中心平均变高率总体呈单峰分布, 影响涡旋以发展型为主, 占比 57.1%。在发展型影响涡旋中, 大多数影响涡旋中心平均变高率在 0~−3 gpm·(6 h)$^{-1}$ 内, −3 gpm·(6 h)$^{-1}$ 以上的非常少 (占比 6.7%)。其中, 0~−1 gpm·(6 h)$^{-1}$ 占比 27.1%, 有 188 个, −1~−2 gpm·(6 h)$^{-1}$ 占比 15.5%。由此可见, 浙江省影响涡旋多缓慢发展, 不易发展强大。图 6b 给出影响涡旋中心最大变高率分布, 即在其移动过程中逐 6 h 出现的中心最大变高值。若影响涡旋在短时间内增强, 会带来大风和短时强降水等天气。可见影响涡旋中心最大变高率也呈单峰分布, 多在 0~−4 gpm·(6 h)$^{-1}$, 占比 63.0%, 最大变高率超过−6 gpm·(6 h)$^{-1}$ 的较少, 仅 12 个, 表明影响涡旋能够爆发性增强的可能性很低。这主要是由于影响涡旋多位于陆地 (图 3a), 地面摩擦及较差的水汽均使得影响涡旋在发展过程中的中心平均变高和最大变高率不大。

2.3 致暴涡旋的统计特征

2.3.1 致暴涡旋的时空分布特征

分析图 7a 可知, 浙江省致暴涡旋频数的空间分布与影响涡旋类似, 主要出现在安徽南部、江西东北部和江苏中南部, 在大别山和鄱阳湖等地可达 10 个

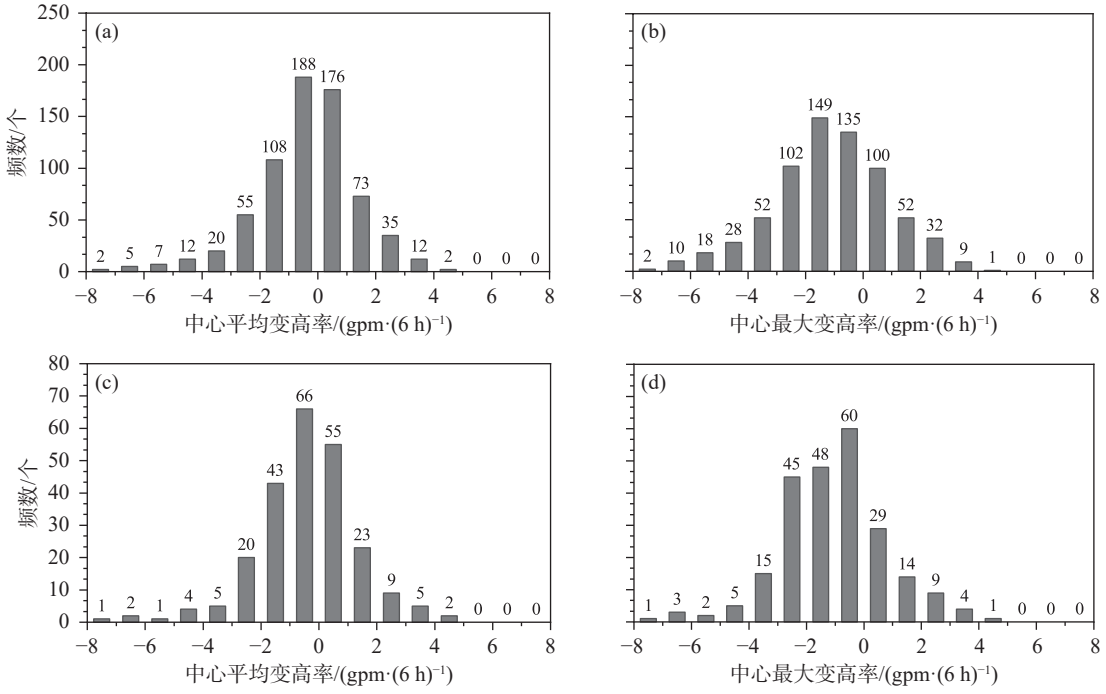


图 6 1979—2021 年浙江省影响涡旋 (a、b) 和致暴涡旋 (c、d) 的中心平均变高率 (a、c) 和中心最大变高率 (b、d) 分布

Fig. 6 Distribution of (a, c) averaged center elevation rate and (b, d) maximum center elevation rate during processes of (a, b) vortexes affecting Zhejiang and (c, d) rainstorm-causing vortexes in Zhejiang from 1979 to 2021

以上。从致暴涡旋的强度−直径热力图 (图 7b) 可见, 致暴涡旋也以次天气尺度为主, 直径在 400~1 000 km, 强度在 1 400~1 480 gpm。从 1979—2021 年浙江省致暴涡旋频数的年际变化可见 (图 4b), 不同年份致暴涡旋频数有明显差异, 1999 年致暴涡旋多达 59 个, 除少数年份不足 10 个外 (如 1979、1986、1994、2004 和 2013 年), 大多数年份致暴涡旋约在 30 个。致暴涡旋的年际变化趋势系数为 0.26, 未通过信度 0.05 的 t 检验, 即近 43 a 来浙江省致暴涡旋频数没有明显的增多趋势。

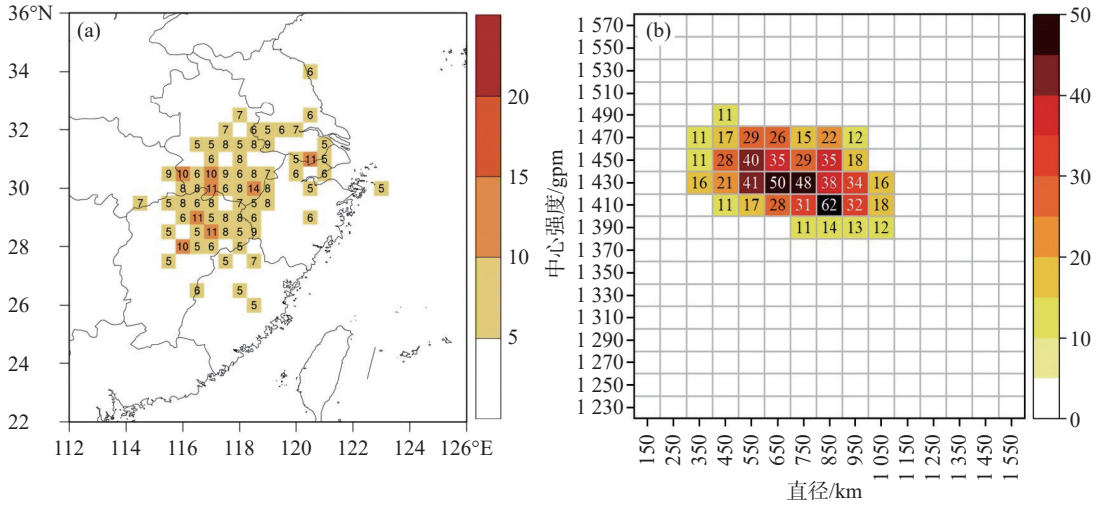


图 7 同图 3,但为浙江省致暴涡旋频数 (单位:个) 的空间分布 (a) 和中心强度−直径热力图 (b)

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for (a) frequency of rainstorm-causing vortexes in Zhejiang and (b) heatmap of its central intensity and diameter from 1979 to 2021

统计发现致暴涡旋频数的月变化与影响涡旋频数 (图 5) 特征类似, 呈先增后减趋势, 1—6 月致暴涡旋频数逐渐增多, 6—12 月频数逐渐减少; 夏季 (6—8 月) 致暴涡旋出现频繁, 共 691 个, 以 6 月最多, 为 362 个; 其余月份内致暴涡旋频数较低, 冬季最少, 仅 16 个。将各月致暴涡旋与影响涡旋频数的比值定义为致暴率, 从致暴率的月变化 (图略) 看, 6—8 月的致暴率明显高于其它月份, 6 月份最高, 达 54.2%, 其余月份均不足 40%。这表明夏季影响涡旋更易在浙江省引发区域性暴雨。

2.3.2 致暴涡旋的生命史和中心强度变化特征

对致暴涡旋发生时次进行统计 (表略) 可知, 1979—2021 年出现的致暴涡旋中, 分别有 190 和 264 个出现在 08 和 14 时, 252 和 368 个出现在 20 和 02 时, 夜间出现的致暴涡旋频数大于白天。因此, 夜间至清晨的大气涡旋更易在浙江引发区域性暴雨。对致暴涡旋路径进行追踪, 共探测到 564 条移动路径。从致暴涡旋的生命史统计结果 (表 2) 可知, 58.2% (328 个) 的致暴涡旋生命史不足 6 h, 约 94% (527 个) 致暴涡旋在 24 h 以下, 仅约 6% (37 个) 维持 24 h 以上。

对生命史超 6 h 的致暴涡旋中心强度进行分析。图 6c 给出致暴涡旋中心平均变高率分布, 可见致暴涡旋中心平均变高率也呈单峰型分布, 致暴涡旋以发展型为主, 共 142 条次, 占比 60.2%。在发展型致暴涡旋中, 大多数中心平均变高率在 0~−3 gpm·(6 h)$^{-1}$ 内, −3 gpm·(6 h)$^{-1}$ 以上的非常少 (占比 5%)。其中, 0~−1 gpm·(6 h)$^{-1}$ 占比 28.0%, −1~−2 gpm·(6 h)$^{-1}$ 占比 18.2%。45.8% 的致暴涡旋中心最大变高率在 0~−2 gpm·(6 h)$^{-1}$, 有 108 个(图 6d)。由此可见, 浙江省致暴涡旋也多是缓慢发展、不易发展强大。

2.3.3 致暴涡旋与浙江区域性暴雨的关系

除大气涡旋外, 台风、梅雨锋和强对流均可引发浙江省区域性暴雨 (王镇铭等, 2013)。图 8a 给出浙江省发生区域性暴雨的平均频数的空间分布。可见, 浙江西部和浙江东南沿海是区域性暴雨的高发区, 极大值中心出现在衢州和温州南部, 平均每年可

表 2 1979—2021 年浙江省不同生命史致暴涡旋的频数和占比

Table 2 Frequency and proportion of rainstorm-causing vortexes with different lifetimes in Zhejiang from 1979 to 2021

生命史/h	频数/个	占比/%
<6	328	58.2
[6, 12)	103	18.3
[12, 24)	96	17.0
[24, 36)	28	5.0
[36, 48)	8	1.4
≥48	1	0.1

发生 7 次; 次大值中心位于台州南部, 平均每年 5 次左右。单独考虑致暴涡旋影响下的区域性暴雨频数, 可见其分布形态与区域性暴雨总频数的空间分布相似 (图 8b), 极大值区主要出现在浙江西部的衢州和丽水, 平均每年 3~4 次。这表明致暴涡旋引发的区域性暴雨频数虽然在总暴雨频数中占比不大, 但也是引发浙江西部区域性暴雨的重要系统之一。

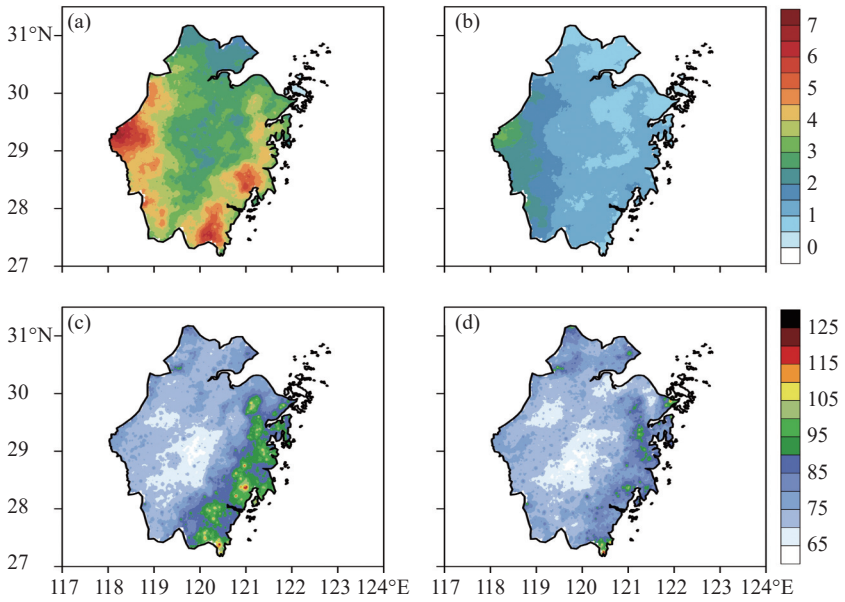


图 8 1979—2021 年浙江省发生区域性暴雨的平均频数 (a,单位:次) 和致暴涡旋影响下发生区域性暴雨平均频数 (b,单位:次) 的空间分布,以及浙江省区域性暴雨对应的平均降水量 (c,单位: mm) 和致暴涡旋影响下发生区域性暴雨平均降水量 (d,单位: mm) 的空间分布

Fig. 8 Distribution of averaged (a) frequency of regional rainstorm and (b) frequency of regional rainstorm induced by rainstorm-causing vortexes from 1979 to 2021, and averaged (c) rainfall of regional rainstorm (unit: mm) and (d) rainfall of regional rainstorm induced by rainstorm-causing vortexes (unit: mm) from 1979 to 2021

利用各格点区域性暴雨累计降水量除以累计频数, 得到平均降水量。图 8c 为浙江省区域性暴雨对应的平均降水量, 可见降水量大值主要位于浙江东南沿海, 强度可达大暴雨量级, 且与区域性暴雨频数分布对应较好 (图 8a)。这主要是由于浙江东南沿海易受海上台风和东风系统的影响, 西北向登陆浙江的台风在沿海地区造成暴雨的概率在 85% 以上 (董加斌和黄新晴, 2019)。而浙江西部的衢州等地, 虽然区域性暴雨频数高, 但平均降水量仅 70 mm 左右。从致暴涡旋影响下区域性暴雨平均降水量空间分布 (图 8d) 可知, 浙江东南沿海存在零散极值中心, 降水极值主要位于山脉处, 从北向南依次位于宁波宁海至台州三门、温州乐清和温州苍南; 浙江西部的平均降水量与图 8c 中区域性暴雨降水量的空间分布相似且量级相当, 这也说明浙江西部的区域性暴雨主要由致暴涡旋造成, 该处明显的区域性暴雨与致暴涡旋伴随的低层水汽通量散度、速度散度的辐合紧密相关 (图略)。

2.3.4 致暴涡旋的环流形势特征

暴雨是各天气尺度系统相互作用的产物 (朱乾根等, 2010)。利用 CFSR 0.5°×0.5°再分析资料, 选取浙江所有致暴涡旋 (共 1 074 个) 进行合成分析, 以了解致暴涡旋的环流形势。合成分析时, 取所有致暴涡旋出现时次的大气物理量场进行数学平均以计算各对应格点的平均值, 得到合成的物理量场。在合成的 500 hPa 高空形势图 (图略) 上, 浙江省位于高空浅槽前的偏西南气流中, 槽前正涡度平流的减压作用利于低层减压和气旋性涡度增大。图 9 给出 1979—2021 年浙江省致暴涡旋对应的 850 hPa 环流形势合成场, 可见 850 hPa 上安徽南部有一明显致暴涡旋中心存在, 从山东向内陆延伸的温度槽线在浙江省内构成温度梯度大值区, 即高能量区; 整个浙江省受低层暖式切变线影响, 位于致暴涡旋南侧的西南暖湿气流中, 强风速带主要位于浙江东南沿海地区。从风场、比湿场的配置看, 一支源自南海的暖湿气流不断向浙江输送水汽, 浙江省 850 hPa 水汽含量普遍在 12 $g \cdot kg^{-1}$ 以上。水汽的来源或水汽输送通道是由大范围环流形势决定的, 致暴涡旋引发区域性暴雨时, 由于副高位置偏南且主体位于洋面, 副高西北侧较强的西南气流或低空急流从南海或孟加拉湾给浙江省带来充足水汽。

致暴涡旋的大气环流合成场特征 (图 9) 虽然带有斜压性, 但在不同月份存在差异。如在浙江省梅汛期 (6—7 月) 和台汛期 (8—10 月), 致暴涡旋环流形势有所不同。前者浙江省主要受梅雨锋区影响, 当

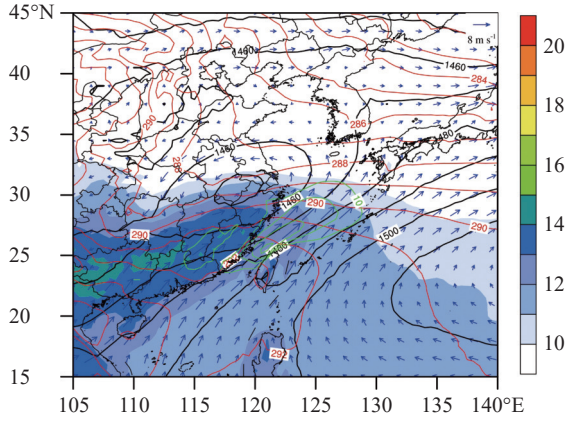


图 9 1979—2021 年浙江省致暴涡旋对应的 850 hPa 环流形势合成场 (黑色等值线表示位势高度场,单位: gpm;红色等值线表示温度场,单位: K;阴影表示比湿场,单位: g·kg^{-1};绿色等值线表示风速,单位: m·s^{-1};蓝色矢量表示风场)

Fig. 9 Composite atmospheric field of rainstorm-causing vortexes in Zhejiang at 850 hPa from 1979 to 2021 (Black contour represents the geopotential height, unit: gpm. The red contour represents the atmospheric temperature, unit: K. Shadow represents the specific humidity, unit: g·kg^{-1}. The green contour represents the wind speed, unit: m·s^{-1}. The blue vector arrow represents the wind field)

锋区上出现天气尺度扰动形成大气涡旋时, 易引发区域性暴雨 (陆汉城, 2019), 对应 6 月致暴涡旋最多 (图略)。而在台汛期, 虽然副高处于峰期, 浙江省多为副高控制或位于副高边缘, 但在 8 月仍有较高的致暴率 (图略)。因此需要进一步讨论 6 月和 8 月致暴涡旋对应的高、低空环流特征 (图 10)。可见 6 月致暴涡旋出现时, 500 hPa 伴有冷性浅槽, 浙江位于浅槽底部的偏西或西南气流中, 副高势力弱位于 130°E 以东并呈东西向, 脊线在 20°N 附近 (图 10a)。低空 850 hPa 上 (图 10c), 致暴涡旋中心位于安徽南部, 强度约 1 440 gpm, 致暴涡旋西侧伴有明显温度槽线, 浙江省内温度经向梯度明显; 整个浙江省受低层暖式切变线影响, 位于致暴涡旋南侧的西南气流中, 强风速带主要位于浙江东南沿海地区, 省内 850 hPa 水汽含量普遍在 12 g·kg^{-1} 以上。从致暴涡旋造成的区域性暴雨平均降水量的空间分布 (图 10e) 来看, 6 月致暴涡旋主要影响 120°E 以西的浙江西部地区, 致暴涡旋在浙江腹地及东南沿海地区造成的降水较弱。8 月出现致暴涡旋时, 浙江省位于 500 hPa 高空冷槽前的西南气流中, 中纬度环流经向度加大, 副高东退入海呈东北—西南向 (图 10b)。低空 850 hPa 上 (图 10d), 致暴涡旋中心南落且强度明显减弱 (约 1 460 gpm), 温度经向梯度大值区 (高能量区) 位于浙

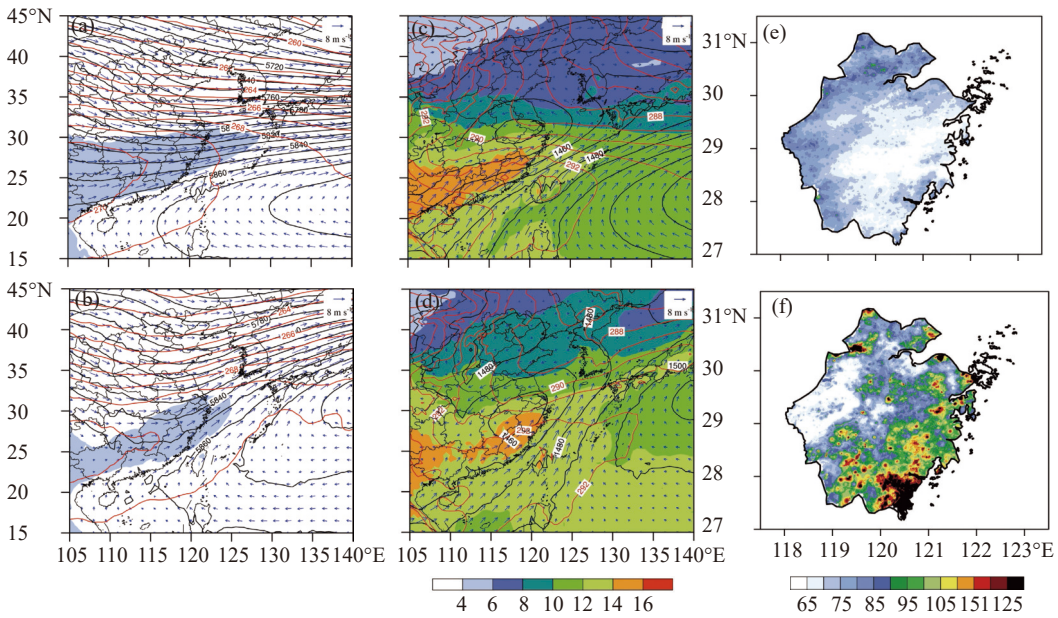


图 10 1979—2021 年浙江省 6 月 (a, c, e) 和 8 月 (b, d, f) 致暴涡旋对应的 500 (a, b)、850 hPa (c, d) 环流形势合成场 (黑色等值线表示位势高度场,单位: gpm;红色等值线表示温度场,单位: K;阴影表示比湿场,单位: g·kg^{-1};矢量表示风场) 和致暴涡旋造成的区域性暴雨平均降水量场 (e, f;阴影,单位: mm)

Fig. 10 Composite atmospheric field of vortexes causing rainstorm at (a, b) 500, (c, d) 850 hPa (Black contour represents the geopotential height, unit: gpm. The red contour represents the atmospheric temperature, unit: K. Shadow represents the specific humidity, unit: g·kg^{-1}. Wind arrow represents the wind field) and averaged (e, f) rainfall (shaded, unit: mm) of regional rainstorm induced by rainstorm-causing vortexes in Zhejiang in (a, c, e) June and (b, d, f) August from 1979 to 2021

江北部; 浙东地区位于致暴涡旋底前部的西南暖湿气流中, 浙江南部比湿约 14~16 g·kg^{-1}。与 6 月致暴涡旋造成的区域性暴雨平均降水分布明显不同(图 10f), 8 月致暴涡旋造成的区域性暴雨平均降水主要集中在 120°E 以东的东南沿海地区, 浙江西部衢州、杭州降水明显减弱; 降水强度明显增强, 全省多分散性大暴雨, 在浙江南部温州地区最为明显。8 月致暴涡旋造成的区域性暴雨平均降水之所以如此之强, 由于 8 月浙江大气不稳定性强、易发对流性降水。

综上, 梅雨期的 6 月及副高峰期的 8 月, 致暴涡旋均带有一定斜压型。相较而言, 6 月致暴涡旋强度更强, 浙江省内温度经向梯度和致暴涡旋南侧的西南风速更大, 致暴涡旋造成的区域性暴雨降水主要位于浙江西部且以暴雨为主。而 8 月致暴涡旋造成的区域性暴雨降水主要在浙江东南沿海地区, 以分散性大暴雨为主。由于致暴涡旋主要发生在 6 月且强度更强, 因此致暴涡旋影响下 850 hPa 环流形势合成场特征 (图 9) 和致暴涡旋造成的区域性暴雨降水场 (图 8) 均表现为梅雨期的 6 月型特点。

3 结论与讨论

本文利用 NCEP 的 CFSR 再分析资料, 采用大气涡旋客观识别和追踪算法, 分析近 43 a 影响浙江和引发区域性暴雨的大气涡旋气候特征, 主要得到以下结论:

(1) 影响涡旋主要出现在安徽中东部、江西东北部和江苏中南部, 空间尺度多在 400~1 000 km, 强度在 1 400~1 480 gpm。近 43 a 影响涡旋虽有明显的年际变化, 但变化趋势并不明显。

(2) 4—6 月是影响涡旋最活跃的季节和月份, 6 月份影响涡旋频数最多, 且 6 月、7 月影响涡旋的中心强度最强。这主要是由于此时正处江淮地区梅雨季, 充沛的水汽和凝结潜热释放利于影响涡旋发展。

(3) 午后及半夜是影响涡旋发生的高频时段, 夜间至清晨的涡旋较容易影响浙江。影响涡旋多缓慢发展且生命史较短, 绝大部分生命史在 24 h 以内。

(4) 致暴涡旋的时空分布、生命史、中心强度变化等特征与影响涡旋类似, 且大气涡旋致暴能力在夏季最强。致暴涡旋出现时, 浙江省位于高空浅槽前部, 低层高能量区, 受其东侧暖式切变线影响, 源自南海的西南气流不断向浙江输送水汽, 为区域性暴雨的发生提供了有利环流条件。

(5) 夏季 6 月致暴涡旋强度更强、浙江省内温度经向梯度和西南风速更大, 致暴涡旋造成的区域性暴雨降水主要位于浙江西部且以暴雨为主。而 8 月致暴涡旋造成的区域性暴雨降水主要在浙江东南沿海, 以分散性大暴雨为主。由于致暴涡旋主要发生在 6 月且强度更强, 因此致暴涡旋影响下的低空环流及降水场特征均表现为梅雨期的 6 月型特点。

本文基于 850 hPa 位势高度进行涡旋客观识别, 可一定程度避免浙江境内地形对大气涡旋中心确定的影响, 但在 925 hPa 或地面海平面气压场上进行客观识别将受地形影响较大。本文虽对浙江省影响涡旋气候特征做了统计分析, 但对这些特征的季节差异和形成机制并未做深入研究。此外, 影响涡旋未做气旋 (如江淮气旋、黄淮气旋等) 和低涡 (如西南低涡, 大别山低涡, 东北冷涡等) 的细致划分, 其各自影响的统计特征可进一步区分。未来也可对影响涡旋做更精细的分类, 讨论不同类型下 (如发展型、减弱型) 的大气涡旋结构和特征。本文统计了致暴涡旋的大气环流合成场特征, 但合成分析会模糊不同发展条件、不同机理下的致暴涡旋个例, 未来可从分析典型个例的角度, 利用更为丰富的数学统计方法 (如多变量 EOF 分解、分类方法), 探讨致暴涡旋引发区域性暴雨的环流形势。

参考文献 (References):

陈忠明,徐茂良,闵文彬,等.2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J].高原气象,22(2):162−167. Chen Z M, Xu M L, Min W B, et al. 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998 [J]. Plateau Meteorology,22(2):162−167 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2003.02.010

蔡志颖,郑艳,张程明,等.2024.基于逻辑回归法的浙江省低涡型暴雨落区预报研究[J].暴雨灾害,43(1):32−44. Cai Z Y, Zheng Y, Zhang C M, et al. 2024. The potential falling area forecast for rainstorm induced by vortex in Zhejiang Province based on logistic regression algorithm [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):32−44 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−009

董加斌,黄新晴.2019.登陆浙江的台风路径分类和暴雨落区分析[J].浙江气象,40(3):13−19. Dong J B, Huang X Q. 2019. Classification of typhoon path and rainstorm landing area for landing in Zhejiang province [J]. Journal of Zhejiang Meteorology,40(3):13−19 (in Chinese). doi:10.16000/j.cnki.zjqx.2019.03.003

华维,邓浩,夏昌基,等.2024.青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,18(2):1−11. Hua W, Deng H, Xia C J. 2024. Advance of research on plateau vortex and multi-monsoon interaction inwater cycle of Tibetan Plateau [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):1−11 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.001

黄文彦,孙燕,卢楚翰,等.2020.春季江淮气旋及影响的统计分析[J].气象与环境科学,43(1):43−51. Huang W Y, Sun Y, Lu C H, et al. 2020.

Statistical analysis of Jiang-huai cyclone and its influence in spring [J]. Meteorological and Environmental Sciences,43(1):43−51 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2020.01.006

陆汉城.2019.江淮以南地区暴雨和强降水的中尺度天气动力学研究进展[J].暴雨灾害,38(5):440−449. Lu H C. 2019. The major research advance of rainstorm and heavy precipitation regarding the mesoscale weather dynamics in south of Yangtze-Huaihe River basin [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):440−449 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.05.006

梁红丽,段旭,符睿,等.2012.影响云南的西南低涡统计特征[J].高原气象,31(4):1066−1073. Liang H L, Duan X, Fu R, et al. 2012. Statistical characteristic of southwest vortex influencing Yunnan region [J]. Plateau Meteorology,31(4):1066−1073 (in Chinese)

刘红武,邓朝平,李国平,等.2016.东移影响湖南的西南低涡统计分析[J].气象与环境科学,39(1):59−65. Liu H W, Deng C P, Li G P, et al. 2016. Statistical analysis of the eastward southwest vortexes influenced Hunan [J]. Meteorological and Environment Sciences, 39(1):59−65 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2016.01.008

刘佳颖.2012.江淮气旋气候学特征的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Liu J Y. 2012. Study on the characteristics of Jiang-huai cyclone,Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

牛若芸,刘凑华,刘为一,等.2018.1981-2015 年中国 95°E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征[J].气象学报,76(2):182−195. Niu R Y, Liu C H, Liu W Y, et al. 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981-2015 [J]. Acta Meteorological Sinica,76(2):182−195 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.092

王艳玲,管兆勇,金大超,等.2015.1980-2012 年春末夏初江淮气旋活动的气候特征及其年际、年代际变化[J].大气科学学报,38(4):354−361. Wang Y L, Guan Z Y, Jin D C, et al. 2015. Climatic characteristics and interannual (interdecadal) variations of cyclones over Changjiang-Huaihe River basin during late spring and early summer from 1980 to 2012 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,38(4):354−361 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki,dqkxxb.20130413010

王镇铭,杜惠良,杨诗芳.2013.浙江省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社. Wang Z M, Du H L, Yang S F. 2013. Zhejiang province weather forecast manual [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

徐迎春,魏建苏,朱伟军.2011.一次江淮气旋的模拟和海洋敏感试验[J].气象科学,31(6):726−731. Xu Y C, Wei J S, Zhu W J. 2011. A numerical simulation and marine sensitive experiments of Jiang-Huai cyclones [J]. Journal of the Meteorological Sciences,31(6):726−731 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−0827.2011.06.008

郁淑华,高文良,彭骏.2021. 2012-2017 年不同涡源西南低涡多发的影响因素分析[J].暴雨灾害,40(6):577−588. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2021. Analysis of influencing factors on frequent occurrence of Southwest China Vortexes with different vortex sources from 2012 to 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):577−588 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.06.002

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2010.天气学原理与方法 (第四版)[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2010. Principles and methods of meteorology,fourth edition [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese)

周越,夏兰.2017.江淮气旋气候学特征的统计研究[J].气象与环境科学,40(3):79−85. Zhou Y, Xia L. 2017. Statistical research on climatic characteristics of Jianghuai cyclones [J]. Meteorological and Environmental Sciences,40(3):79−85 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2017.03.013

Lu C H. 2017. A modified algorithm for identifying and tracking extratropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(7):909−924. doi:10.1007/s00376−017−6231−2

Qin Y J, Lu C H, Li L P. 2017. Multi-scale cyclone activity in the Changjiang River–Huaihe River valleys during spring and its relationship with rainfall anomalies [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(2):246−257. doi:10.1007/s00376−016−6042−x

Qin Y J, Hu Y, Lu C H. 2019. Patterns of cyclone activity influencing Changjiang River and Huaihe River valleys in spring revealed using the cyclone area algorithm [J]. Journal of Tropical Meteorology, 25(4):483−497. doi:10.16555/j.1006−8775.2019.04.006

Wang X M, Zhai P M, Wang C C. 2009. Variations in extratropical cyclone activity in northern East Asia [J]. Advances in Atmospheric science,26:471−479. doi:10.1007/s00376−009−0471−8

Zhang Y X, Ding Y H, Li Q P. 2012. A climatology of extratropical cyclones over East Asia during 1958-2001 [J]. Acta Meteorological Sinica,26(3):261−277. doi:10.1007/s13351−012−0301−2

(责任编辑　唐永兰)