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

浙江低涡暴雨环流分型及其优选集合动力因子研究

郑艳 蔡志颖 张程明 肖王星 吴俊杰 水旭琼 顾思南

Circulation classification and preferred ensemble dynamic factors of rainstorm induced by vortexes in Zhejiang

ZHENG Yan，CAI Zhiying，ZHANG Chengming，XIAO Wangxing，WU Junjie，SHUI Xuqiong，Gu Sinan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-045

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

四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析

Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin

暴雨灾害. 2024, 43(6): 627-636 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-239

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

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

2012—2017年不同涡源西南低涡多发的影响因素分析

Analysis of influencing factors on frequent occurrence of Southwest China Vortexes with different vortex sources from 2012 to 2017

暴雨灾害. 2021, 40(6): 577-588 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.002

东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析

Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices

暴雨灾害. 2023, 42(2): 144-149 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-014

关注微信公众号，获得更多资讯信息

郑艳,蔡志颖,张程明,等.2025.浙江低涡暴雨环流分型及其优选集合动力因子研究[J].暴雨灾害,44(5):700−712. ZHENG Yan, CAI Zhiying, ZHANG Chengming, et al. 2025. Circulation classification and preferred ensemble dynamic factors of rainstorm induced by vortexes in Zhejiang [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):700−712 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−045

浙江低涡暴雨环流分型及其优选集合动力因子研究

郑艳[1], 蔡志颖[2], 张程明[2], 肖王星[2], 吴俊杰[2], 水旭琼[3], 顾思南[4, 5]

(1. 浙江省宁波市镇海区气象局, 宁波 315200; 2. 浙江省宁波市气象台, 宁波 315000; 3. 浙江省宁波市江北区气象局, 宁波 315000; 4. 浙江省宁波市生态环境气象中心, 宁波 315000; 5. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

摘　要: 低涡是造成浙江区域性暴雨 (以下简称低涡暴雨) 的重要天气系统, 为了解浙江低涡暴雨的大气环流分型及不同环流型的高相关集合动力因子, 基于 2016—2023 年浙江及周边地区格点日降水量和 NCEP-FNL 再分析资料, 利用多变量经验正交分解法 (Multi-Variable Empirical Orthogonal Functions, MVEOF) 及模拟退火算法和多元随机化技术相结合的客观分型法 (Simulated ANnealing and Diversified RAndomization, SANDRA) 对 2016—2023 年浙江 44 个低涡暴雨日的环流场进行分型, 并优选不同环流型的主要集合动力因子。结果表明, MVEOF 和 SANDRA 两种分型方法都将浙江低涡暴雨分为暖区型、锋面型和回流型, 以暖区型发生频次最多, 锋面型次之, 回流型最少。各环流型低涡多在浙江中西部造成降水, 以整层一致西南风暖区型低涡暴雨强度及落区最大。不同环流型造成浙江暴雨的外部条件不同: 暖区型低涡暴雨, 中尺度类的集合动力因子是优选因子; 锋面型低涡暴雨, 其优选因子既包含中尺度类因子, 大尺度水汽和垂直运动与暴雨发生也有较大关联; 回流型低涡暴雨, 中尺度类因子相关性减弱, 优选因子为大尺度散度及其相关因子。

关键词: 低涡暴雨; MVEOF; SANDRA; 集合动力因子

中图法分类号: P462.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−045

Circulation classification and preferred ensemble dynamic factors of rainstorm induced by vortexes in Zhejiang

ZHENG Yan[1], CAI Zhiying[2], ZHANG Chengming[2], XIAO Wangxing[2], WU Junjie[2], SHUI Xuqiong[3], Gu Sinan[4, 5]

(1. *Ningbo Zhenhai Meteorological Bureau of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315200; 2. *Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315000; 3. *Ningbo Jiangbei Meteorological Bureau of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315000; 4. *Ningbo Ecological Environment Meteorological Center of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315000; 5. *Zhejiang Institute of Meteorological Sciences*, *Hangzhou* 310008)

Abstract: The vortexes are important weather systems that cause regional rainstorms in Zhejiang. To investigate the atmospheric circulation patterns and their associated dominant ensemble dynamic factors, we classify the circulations of 44 vortexes that induced rainstorm in Zhejiang and surrounding areas based on grided daily precipitation data, as well as the NCEP-FNL reanalysis data from 2016 to 2023. The classification is achieved using the Multi-Variable Empirical Orthogonal Functions (MVEOF) combined with an objective typing method that integrates Simulated Annealing and Diversified Randomization (SANDRA). Additionally, we diagnose the preferred ensemble dynamic factors contributing to the rainstorms under different circulation patterns. Results show that both classification methods categorize rainstorm-induced vortexes into three types: warm sector type, frontal type, and return flow type, with warm sector type occurring most frequently, followed by the frontal type, and the return flow type being the least common. Under various circulation patterns, vortexes typically induce precipitation in central and western Zhejiang. The warm-sector type, characterized by consistent southwesterly winds, produces the strongest rainstorm and widest coverage. The diagnosis and selection of ensemble dynamic factors

收稿日期: 2024−03−15; **定稿日期**: 2024−09−20

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

第一作者: 郑艳, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 1102464847@qq.com

通信作者: 张程明, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 171429617@qq.com

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

under different circulation patterns reveal that external conditions causing rainstorms in Zhejiang vary among types. For the warm sector type, mesoscale dynamic factors are the preferred factors; in the frontal type, in addition to mesoscale factors, large-scale water vapor and vertical motion induced by the vortexes also play a role; in the return flow type, the influence of mesoscale factors diminishes, while the role of large-scale divergence-related factors increases significantly.

Key words: rainstorm induced by vortexes; MVEOF decompose; SANDRA clustering; dynamic factors

引　言

长江流域及其中下游地区是暴雨洪涝灾害多发地区, 降水系统种类多样, 其中低涡所造成的暴雨频次与强度均名列前茅 (孙建华等, 2024; 华维等, 2024)。作为影响浙江的重要天气系统, 每年低涡均会造成区域性暴雨或大暴雨 (以下简称低涡暴雨), 并引起不同程度的灾害, 因此浙江低涡暴雨研究成果较为丰富。例如, 梅雨季 (5—7 月) 浙江低涡暴雨多发, 且其发生频数具有明显的年际变化特征 (蔡志颖等, 2024)。蔡志颖等 (2025) 统计分析近 43 a 影响浙江并引发区域性暴雨的低涡系统发现, 造成浙江低涡暴雨的低涡中心主要位于安徽中东部、江西东北部和江苏中南部, 低涡活跃于 4—6 月, 以 6 月频数最多; 夜间至清晨的低涡系统更易引发暴雨, 但生命史较短。浙江低涡暴雨突发性强, 预报难度大, 实际业务中, 环流分型是有效的预报方法, 蔡志颖等 (2024) 虽然基于“配料法”并结合逻辑回归方法构建了浙江低涡暴雨落区预报模型, 但并未考虑不同环流配置下的模型差异, 浙江低涡暴雨预报准确性还有进一步提升的空间。

研究表明, 不同环流配置下, 低涡造成的暴雨分布特征有所不同 (毛紫怡和刘金卿,2021)。基于历史个例的环境场特征, 采用聚类分型的方法能较好地寻找到当前环境场和历史上低涡暴雨形势相关性高的类别特征。天气系统客观分型是研究大气环流的重要方式, 具体方法也较多 (Marzban and Sandgathe, 2006; Zhang et al., 2018)。如 K 均值法、主成分分析法 (包括倾斜旋转 T 模态和正交旋转 T 模态), Lund 领导者算法、Kirchhofer 领导者算法、模拟退火算法和多元随机化技术相结合法 (Simulated ANnealing and Diversified RAndomizatio, SANDRA) 等。从主成分分析法还可衍生出各类经验正交分解法 (Empirical Orthogonal Functions, EOF), 各类 EOF 分解法用于环流分型的侧重点不同, 如旋转经验正交分解 (Rotated Empirical Orthogonal Functions, REOF) 可最大限度地捕获到同类天气过程单一变量的局地变化特征, 多变量经验正交分解 (Multi-Variable Empirical Orthogonal Functions, MVEOF) 可揭示多个变量间的耦合关系。毛紫怡和刘金卿 (2021) 采用 MVEOF 和 K 均值法分类研究了多年湖南省西南涡暴雨, 指出影响湖南的西南涡暴雨环流型分为暖区型、回流型和锋面型, 且以暖区型下的暴雨强度最强。由于环流分型方法较多, 需要比较分型后的效果, 黎慧琦等 (2019) 评估了不同分型方法对北京强降水环流场的分型效果, 发现 SANDRA 方法表现最优, 原因在于 SANDRA 方法是一种类似 K 均值法的非系统聚类分析方法 (Philipp et al., 2007), 其效果往往要优于传统 K 均值。关于浙江暴雨环流分型, 王镇铭等 (2013) 研究发现造成浙江暴雨的环流可分为三类七型, 其中与低涡有关的类型为北槽南涡型 (属西风带类), 但这种分类是基于经验的主观分型。迄今尚无研究发现将客观分型法应用于浙江低涡暴雨分析。因此有必要对浙江低涡暴雨的环流形势进行客观分型研究, 同时也可检验其它地区以往学者的客观天气分型成果在浙江地区应用的普适性。

环流分型的目的是将相似天气形势聚类分析, 针对的具体对象是气象要素, 从业务预报角度, 挑选与暴雨天气系统密切相关的某些要素并建立天气模型是可行的。高守亭等 (2013) 基于广义位温和中尺度波流相互作用理论, 结合暴雨热、动力学特点已建立了多个具有明确物理意义的气象因子, 统称为集合动力因子。这些因子在地形、强对流或台风降水诊断中均表现出较好的效果, 对暴雨系统的发展、演变有一定的指示作用 (冉令坤和楚艳丽, 2009)。因此, 对浙江低涡暴雨环流分型后, 还需要优选不同环流型暴雨的高相关集合动力因子以建立浙江低涡暴雨分类天气模型。

本文参考毛紫怡和刘金卿 (2021) 对西南涡暴雨的环流分型研究方法, 基于 2016—2023 年浙江及周边地区格点日降水量和 NCEP-FNL 再分析资料, 首先利用 MVEOF 分解和 SANDRA 方法分别对 2016—2023 年浙江低涡暴雨环流场进行分型和交叉验证, 然后基于客观分型的结果, 优选不同环流形势下与浙江低涡暴雨高相关的集合动力因子, 分析低涡暴雨不同环流型的高相关要素特征, 最后建立浙江低涡暴雨分类天气模型, 研究成果旨在提高浙江低涡暴雨的预报预警水平。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

研究资料包括: (1) 浙江省气象信息网络中心提供的浙江省及周边地区 (117.65°—123.35°E, 27.10°—31.25°N) 2016—2023 年 08—08 时 (北京时, 下同) 格点日降水数据, 空间分辨率为 0.05°×0.05°。该降水资料由浙江全省及周边地区气象站 (含国家站和区域站) 观测数据, 经反距离权重法处理得到, 用于浙江低涡暴雨的客观识别及环流分型。(2) 2016—2023 年美国国家环境预报中心全球再分析资料 (National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis, NCEP-FNL), 垂直分辨率 31 层, 水平分辨率 0.25°×0.25°, 时间分辨率 6 h (Li et al., 2024)。具体包括各等压面上的经纬向风速、垂直速度、相对湿度、位势高度和温度场, 其中位势高度用于低涡的客观识别, 其它要素用于集合动力因子的计算。

1.2 研究方法

首先, 对 2016—2023 年浙江省低涡暴雨进行客观识别。然后, 利用 MVEOF 分解和 SANDRA 方法对低涡暴雨发生时的环流场进行分型研究。其中, MVEOF 分解用于分析多变量间的联合分布特征, 可提供主要空间模态或典型低涡暴雨日, 但不可给出所有低涡暴雨日环流的分类标签, 需与其它分型法配合使用, SANDRA 方法可给出所有低涡暴雨日环流的所属类别, 两个方法的结果进行交叉验证。最后, 优选不同环流型中与低涡暴雨高相关的集合动力因子建立浙江低涡暴雨天气模型。

1.2.1 低涡暴雨的客观识别

采用 Qin 等 (2017) 提出的基于 850 hPa 最外围闭合等高线的低涡区域识别方法进行低涡客观识别。具体以逐日 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低涡中心, 从中心点向外搜索最外围闭合等高线并以最后一圈闭合等值线内的区域作为低涡影响区, 当一天 4 个识别时次中有 1 个时次的低涡影响区有位于浙江省部分时, 便认为浙江省当天受低涡影响 (蔡志颖等, 2024)。进一步基于 Qin 等 (2019) 提出的低涡追踪算法对影响浙江的低涡进行路径追踪。具体以当前时次低涡中心为起点, 计算其与下一时次所有低涡中心的距离, 挑选出距离最近的中心, 并要求最近距离小于 600 km, 然后将这两个时次的低涡中心相连接, 作为一条低涡移动路径。若在该距离内未找到符合条件的低涡中心, 则认为低涡消亡。为规避海上台风或东风系统的影响, 规定当识别的低涡移动路径同时满足以下 2 个条件时, 便剔除整条路径上的低涡信息: (1) 低涡路径至少包含 2 个及以上时次的中心位置; (2) 路径的前 2 个低涡中心位于海洋上。经算法初步剔除, 再加以人工判别, 可形成 2016—2023 年影响浙江的陆地低涡数据集。

同时按牛若芸等 (2018) 对我国 95°E 以东区域性暴雨的定义, 并结合浙江省格点降水资料分辨率, 定义浙江省区域性暴雨为浙江省内日降水量达暴雨 (≥50 mm) 以上量级的降水格点数≥150 个, 且这些格点相连成片 (含对角相连)。当浙江省某日出现区域性暴雨且当天受低涡影响, 便认为此次暴雨过程由低涡引发, 计为一个低涡暴雨日。统计结果显示, 2016—2023 年浙江省总共出现 172 个区域性暴雨日, 其中低涡暴雨日 44 个, 占比 25.6%。

1.2.2 MVEOF 分解法

利用 MVEOF 分解法探讨浙江低涡暴雨发生时多气象要素间的协同变化特征, 并分析不同空间模态下的典型低涡暴雨日分类环流特征。鉴于大气低层及边界层的中尺度辐合线或低空急流等系统对我国江南地区强降水位置有很好的指示作用, 同时边界层气象要素在低涡暴雨环流客观分型中有更好的区分效果 (毛紫怡和刘金卿, 2021), 本文选取标准化的 925 hPa 经纬向风场、假相当位温、850 hPa 位势高度和地面格点降水进行 MVEOF 分解。MVEOF 分解时, 为匹配降水与气象要素的空间分辨率, 利用双线性方法将格点降水插值为 0.25°×0.25°。分析时刻取所有低涡暴雨日的 08 时, 区域取浙江及周边地区 (117.65°—123.35°E, 27.10°—31.25°N)。分解得到的空间模态可表征边界层 925 hPa 风场、假相当位温、850 hPa 位势高度及地面降水的协同分布特征。MVEOF 计算公式如下

$$V = EP^T \tag{1}$$

式中, V 为不同气象要素场组成的矩阵向量, E 为分解后的典型空间模态, P 为时间序列, T 为转置。由于 MVEOF 分解的空间模态仅表征各要素对各自平均状态的偏离程度, 不能完全反映气象要素与降水场配置。为直观分析主要模态对应的大气环流形势, 对分解后的典型低涡暴雨日 (取标准化时间序列≥1 或≤−1) 提取原始场进行合成分析, 合成分析时, 取相应低涡暴雨日 08 时的原始大气物理量场进行数学平均以得到合成场。

1.2.3 SANDRA 客观分型法及效果评估

利用 SANDRA 方法 (Philipp et al., 2007) 对浙江省 2016—2023 年低涡暴雨日环流进行客观分类。该

方法计算区域与 MVEOF 方法相同, 使用参数为浙江所有低涡暴雨日 08 时经标准化处理后的格点 925 hPa 经纬向风场、假相当位温、850 hPa 位势高度及地面降水。在其中的模拟退火聚类分析步骤中, 初始分类是随机的, 每次迭代都会检查每个对象是否被归到适当的类别中, 若不是则重新调整。在整个迭代过程中, 结合使用多元随机化技术, 随机对每个对象和类别排序, 以减小向局部最优解收敛的可能性。总的来说, SANDRA 方法中, 执行模拟退火聚类分析 1 000 次, 设置冷却系数为 0.99, 最后取分类效果最优者。分类效果的好坏采用可解释性方差E_v为评估指标, 计算公式如下

$$E_v = 1 - \frac{W_{ss}}{T_{ss}} \tag{2}$$

式中, W_{ss}为每一类别中每个元素偏离该类别中心的偏差平方和, T_{ss}是所有元素偏离总体中心的偏差平方和。E_v越大, 表示各类内的成员越相近, 分类效果越好。

1.2.4 集合动力因子选取

参考高守亭等 (2013) 以暴雨触发机制为出发点建立集合动力因子预报系统 (共包含 47 个集合动力因子) 的方法, 通过文献搜集和分析比较, 采用其中的 26 个集合动力因子 (表 1) 和浙江不同分型低涡暴雨进行相关性研究。部分集合动力因子采用原始大气物理量场进行计算, 表征大尺度的大气热、动力学特征。另外, 在中尺度波流相互作用理论基础上, 又相继发展了含各类波作用密度的集合动力因子, 以表征中尺度的热、动力信息。因此, 表 1 将集合动力因子分成大尺度和中尺度两类。在计算所有中尺度类的集合动力因子时, 利用 Barnes 低通滤波技术对原始场进行空间滤波, 滤波权重参数取 30 000, 修正权重常数取 0.35, 滤波结果作为基本态场可有效保留波长约 1 250 km 以上的波段, 从原始场中减去基本态即得扰动态 (Maddox, 1980)。利用点双列相关分析法 (Sheskin, 2007) 计算各集合动力因子与低涡暴雨的相关系数, 分析两者的相关性并优选相关系数排名前五的显著集合动力因子。具体计算相关系数时, 首先利用双线性方法将低涡暴雨日的格点降水插值为 0.25°×0.25°, 然后对低涡暴雨日的浙江暴雨二分化序列和浙江网格点上各个因子从 1 000—500 hPa 的质量权重垂直积分, 即$-\int_{1\,000}^{500}|A|\mathrm{d}p$, 其中$|A|$代表表 1 中的集合动力因子, 进行点双列相关计算, 以分析动力因子与低涡暴雨的相关性。需要注意的是, 每个网格点上的集合动力因子取一天 4 个时次中的最大值。

表 1 集合动力因子名称及文献来源

Table 1 The name and reference of ensemble dynamic factors

	因子分类	
	大尺度类	中尺度类
因子名称	质量散度(李琴等, 2016) 散度垂直通量(冉令坤等, 2009) 密度散度垂直通量(李琴等, 2016) 凝结潜热散度垂直通量(高守亭等, 2013) 广义$\boldsymbol{Q}$矢量散度(Yang et al., 2007) 垂直螺旋度(李琴等, 2016) 质量垂直螺旋度(李琴等, 2016) 水汽垂直螺旋度(李琴等, 2016) 凝结潜热螺旋度(高守亭等, 2013) 水汽散度通量(冉令坤等, 2009) 热力散度垂直通量(高守亭等, 2013) 热力垂直螺旋度(高守亭等, 2013) 广义湿位涡(高守亭等, 2013) 湿热力平流参数(高守亭等, 2013) 二级位涡(高守亭等, 2013) 广义对流涡度矢量垂直分量(高守亭等, 2013)	凝结潜热波作用密度(高守亭等, 2013) 凝结潜热位势切变形变波作用密度(高守亭等, 2013) 凝结潜热位势伸缩变形波作用密度(高守亭等, 2013) 热力波作用密度(高守亭等, 2013) 凝结潜热位涡波作用密度(高守亭等, 2013) 热力位势伸缩形变波作用密度(高守亭等, 2013) 热力位涡波作用密度(高守亭等, 2013) 热力位势切变形变波作用密度(高守亭等, 2013) 热力位势散度波作用密度(高守亭等, 2013) 凝结潜热位势散度波作用密度(高守亭等, 2013) 凝结潜热波作用密度(高守亭等, 2013) 热力位涡波作用密度(高守亭等, 2013)

2 结果分析

2.1 浙江低涡暴雨日环流分型

MVEOF 分解虽可用于分型，但在合成时只能是主要模态 (即典型低涡暴雨日)，并不包含所有低涡暴雨日，而 SANDRA 方法可给出所有低涡暴雨日的所属分类，本节使用 MVEOF 分解和 SANDRA 方法对 2016—2023 年浙江 44 次低涡暴雨日 08 时的环流场进行客观分型和相互验证。

2.1.1 MVEOF 分解法环流分型

图 1 是 MVEOF 分解的前两个空间模态，两模态方差贡献率分别为 39.2% 和 13.5%，通过 North 显著性检验，表明前两个模态相互独立且能与其它模态显著区分，累计方差贡献率达 52.7%，表明前两个特征向量已基本体现浙江低涡暴雨时空变化的典型特征。两模态对应的降水空间分布 (图 1a、b) 显示，两者均反映出浙江中西部和浙江东南沿海降水反相分布的特点。从气象要素的协同变化可见，第一模态下浙江省 925 hPa 受一致异常风场和温度平流影响 (图 1c)，850 hPa 为一致异常位势高度 (图 1e)。当时间序列为正时，浙江省 925 hPa 主要为一致西南风和假相当位温正异常影响，850 hPa 位势高度偏低，此时低涡位于浙江北侧，浙江中西部降水偏多 (图 1a)。当时间序列为负时，浙江省 925 hPa 主要为东北风和假相当位温负异常影响，850 hPa 位势高度偏高，此时浙江省低层将受高压环流影响，浙江东南沿海降水偏多，而浙江中西部降水偏少。

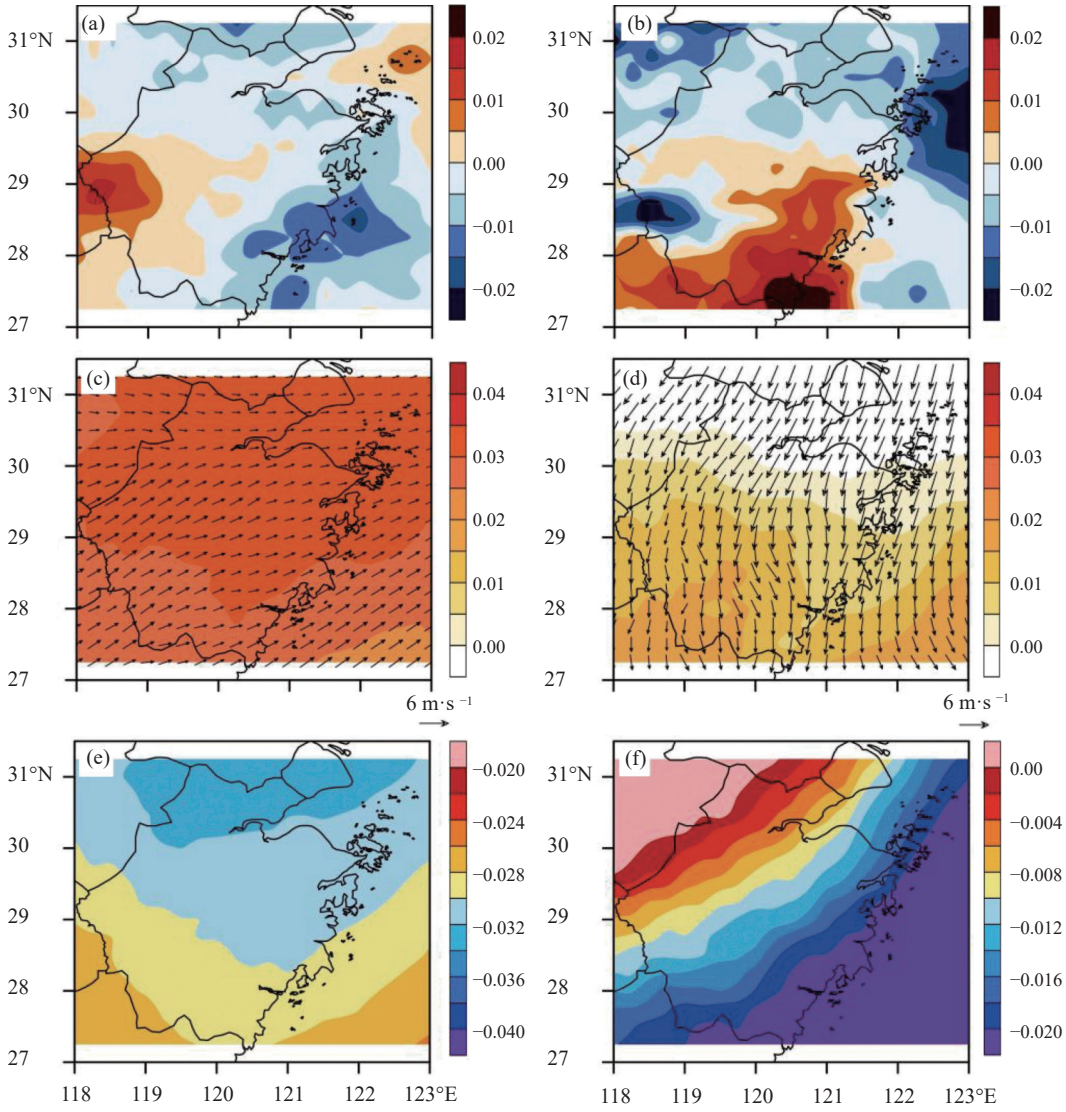


图 1 2016—2023 年浙江低涡暴雨日经 MVEOF 分解的第一模态 (a、c、e) 和第二模态 (b、d、f) 地面降水载荷 (a、b，色斑，单位：mm)、925 hPa 风场 (矢量，单位：10^2 m·s^{-1}) 和假相当位温 (色斑，单位：K) 载荷 (c、d) 及 850 hPa 位势高度载荷 (e、f，色斑，单位：gpm) 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the (a, c, e) first and (b, d, f) second leading MVEOF mode of (a, b, shaded) precipitation (unit: mm), (c, d) wind (vector, unit: 10^2 m·s^{-1}) and equivalent potential temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa and (e, f, shaded) geopotential height at 850 hPa (unit: gpm) of rainstorm days induced by vortexes in Zhejiang from 2016 to 2023

第二模态下, 浙江省 925 hPa 受明显异常风场形成的切变和假相当位温梯度影响 (图 1d), 850 hPa 仍为一致异常位势高度 (图 1f)。当时间序列为正时, 925 hPa 浙江中部 29°N 附近存在异常东北风和偏北风形成的冷式切变, 且有明显假相当位温梯度, 850 hPa 位势高度负异常大值主要在浙江东部, 表明低涡位于浙江东侧, 其西侧冷式切变南侧的浙江东南沿海降水偏多 (图 1b)。当时间序列为负时, 浙江南部 925 hPa 转为异常偏南风, 浙江北部为异常西南风, 全省为假相当位温负异常, 850 hPa 位势高度负异常位于浙江西北部, 表明低涡位于浙江西北部, 浙江北部及浙江中西部的相对暖区降水偏多, 浙江东南沿海降水偏少。

根据 MVEOF 分解得到的标准化时间序列结果 (图略), 取第一模态低涡暴雨日 12 个 (含正、负异常低涡暴雨日各 6 个), 第二模态低涡暴雨日 14 个 (含正、负异常低涡暴雨日各 7 个), 即 26 个典型低涡暴雨日, 具体日期见表 2。

图 2 是基于表 2 四类典型低涡暴雨日合成的高低空环流场, 根据高低空环流配置, 可分为三类环流型, 称为暖区型、回流型和锋面型, 其中暖区型对应第一模态正异常和第二模态负异常。

表 2 2016—2023 年经 MVEOF 分解的第一、二模态正负异常浙江典型低涡暴雨日期

Table 2 The typical rainstorm days induced by vortexes of the positive and negative anomalies on the first and second mode based on MVEOF decomposition in Zhejiang from 2016 to 2023

分类状态	典型低涡暴雨日/(年-月-日)
第一模态正异常	2016-06-15; 2017-06-24; 2019-07-13; 2020-06-29; 2022-06-05; 2022-06-20
第一模态负异常	2016-09-11; 2017-04-25; 2018-04-13; 2020-03-27; 2020-03-29; 2021-10-20
第二模态正异常	2018-06-20; 2019-06-22; 2019-07-09; 2019-07-14; 2020-03-27; 2021-06-19; 2023-06-21
第二模态负异常	2017-04-25; 2019-06-06; 2020-05-05; 2020-06-29; 2022-03-25; 2022-04-25; 2023-06-24

第一类是暖区型环流配置, 对应第一模态正异常和第二模态负异常典型低涡暴雨日。在第一模态正异常的典型低涡暴雨日合成场中, 500 hPa 中高纬度地区在 120°E 附近存在一明显槽线, 低纬度地区的西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 呈块状分布, 主体位于海上, 脊线在 20°N 附近。浙江处高空槽底部, 副高北侧, 为偏西或西南气流, 大气比湿在 4 g·kg^{-1} 以上 (图 2a); 低空 850 hPa 低涡中心位于江苏东部, 中心强度小于 1 410 gpm, 与低涡伴随的锋区和切变线位于江苏至安徽一带, 浙江受一致西南风和假相当位温大于 340 K 的暖湿气流控制, 低空风速达急流强度, 全省水汽充沛, 大气比湿在 12 g·kg^{-1} 以上 (图 2e); 边界层 925 hPa 上, 江苏东部依旧可见明显低涡, 浙江处低涡底前部的西南气流中, 边界层内水汽充沛, 浙江西部和南部大气比湿在 16 g·kg^{-1} 以上, 并有假相当位温大值区 (图 2i)。不同于第一模态正异常, 第二模态负异常下, 500 hPa 中高纬度地区槽线位置偏西位于 115°E 附近, 低纬度副高呈东西带状分布, 西伸至 110°E, 浙江位于高空槽前的西南气流中 (图 2d); 850 hPa 低涡中心位于安徽附近, 中心强度在 1 440 gpm 左右, 虽然浙江省内的热力、水汽条件较第一模态正异常低涡暴雨日合成场 (图 2e) 有所减弱, 大气比湿和假相当位温分别小于 12 g·kg^{-1} 和 334 K, 但 850 hPa 低空急流依旧存在, 低涡东侧暖式切变线附近存在西北—东南向锋区 (图 2h); 边界层 925 hPa 上, 浙江省西南风分量减弱, 转为更强的偏南风, 浙江东南沿海有明显暖舌 (图 2l)。从两种情形的高低空环流合成场看, 虽然浙江省均位于高空西南气流、低空西南急流控制下, 低涡后部携带的冷空气距离浙江均较远, 但两者在低空低涡的位置、强度以及浙江省内的水汽、热力和边界层西南风分量上有所区别。平均而言, 第一模态下低涡强度更强, 位置更东, 浙江省内水汽、热力条件更好, 高低层为一致的西南风控制。

第二类是回流型环流配置, 对应第一模态负异常典型低涡暴雨日。此时, 500 hPa 中高纬度地区为平直偏西气流, 中低纬度 110°E 附近存在一南支槽, 虽然浙江位于南支槽前的西南气流中, 但大气比湿不足 4 g·kg^{-1} (图 2b); 低空 850 hPa 低涡中心偏西, 浙江南部位于低涡东侧的偏南风与东南风的暖式切变附近, 暖式切变附近也有锋区存在, 浙江南部大气比湿在 8~10 g·kg^{-1}, 假相当位温在 320 K 以上 (图 2f); 边界层 925 hPa 低涡位置大抵与 850 hPa 接近, 其北侧明显有一高压环流, 浙江省主要受高压底部的偏东气流影响, 假相当位温线密集区位于 29°N 附近, 在大气低层形成了明显干冷垫 (图 2j)。回流型天气形势表现为中高层西南气流和近地面高压底部的偏东风回流的共同影响。

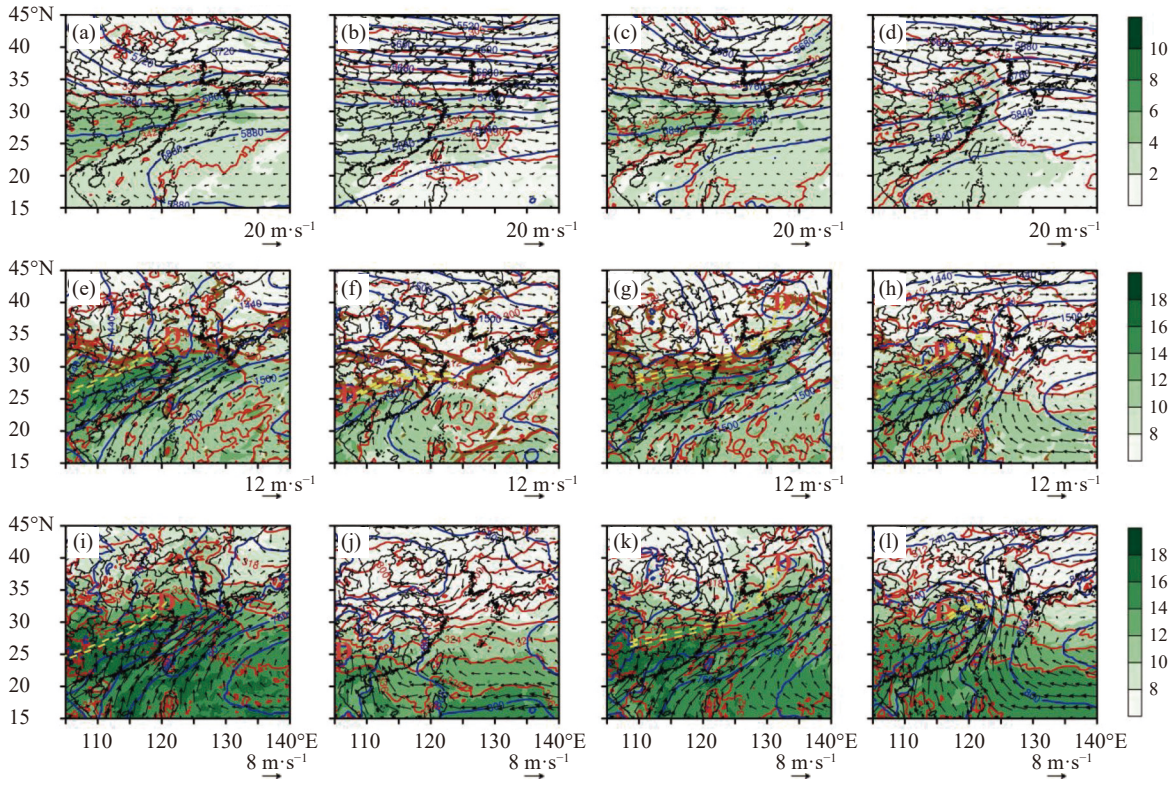


图 2 基于表 2 的第一模态正异常 (a、e、i)、第一模态负异常 (b、f、j)、第二模态正异常 (c、g、k) 和第二模态负异常 (d、h、l) 浙江典型低涡暴雨日 500 hPa (a—d)、850 hPa (e—h)、925 (i—l) hPa 位势高度 (蓝色等值线, 单位: gpm)、假相当位温 (红色等值线, 单位: K)、比湿 (色斑, 单位: g·kg^{-1})、风场 (矢量, 单位: m·s^{-1}) 合成图 (棕色区表示假相当位温水平梯度≥ 4 K·(100 km)$^{-1}$ 的区域即锋区, 黄双虚线表示切变线, 红 D 表示低涡位置)

Fig. 2 Composite field of geopotential height (blue contours, unit: gpm), equivalent potential temperature (red contours, unit: K), specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}), wind (vector, unit: m·s^{-1}) at (a—d) 500 hPa, (e—h) 850 hPa and (i—l) 925 hPa of typical rainstorm days of (a, e, i) first mode of positive anomaly, (b, f, j) first mode of negative anomaly, (c, g, k) second mode of positive anomaly and (d, h, l) second mode of negative anomaly induced by vortexes in Zhejiang in Table 2 (The brown shadow represent horizontal gradient of equivalent potential temperature ≥ 4 K·(100 km)$^{-1}$, yellow double dashed line represent the shear line, red D represent the position of the atmospheric vortex)

第三类是锋面型环流配置, 对应第二模态正异常典型低涡暴雨日。此时, 500 hPa 中高纬度地区在 125°E 附近存在一明显槽线, 副高呈带状, 脊线在 18°N 附近。浙江处高空槽底后部的偏西气流中, 大气比湿在 4~6 g·kg^{-1} (图 2c); 850 hPa 低涡中心位于朝鲜半岛东部海面上, 29°—30°N 的浙江中北部受低涡西侧的冷式切变影响并伴有锋区, 切变线北侧为东北风, 南侧为较弱的偏西风 (图 2g); 边界层 925 hPa 上, 浙江中部也有明显的东西向切变线和假相当位温线密集区 (图 2k)。此类型下, 浙江南部有较好的热力、水汽条件, 假相当位温大于 330 K, 大气比湿在 14 g·kg^{-1} 以上。该类型合成场不仅与浙江省西风带暴雨天气模型中的冷锋切变型概念模型相似 (王镇铭等, 2013), 也与李争辉 (2019) 提出的华南前汛期锋面降水天气概念模型相似。

进一步给出典型低涡暴雨日 (表 2) 浙江省日降水量的合成分布 (图 3)。第一模态正异常和第二模态负异常典型低涡暴雨日 (暖区型) 分别合成的地面降水量分布较为相似, 暴雨落区位于 120°E 以西的浙江中西部, 降水量向东南方向逐渐减少, 浙江东南沿海降水量不足 15 mm(图 3a、d)。由于第一模态正异常典型低涡暴雨日在浙江省内的水汽、热力条件更好, 因此浙江中西部的降水量及暴雨落区更大。第一模态负异常典型低涡暴雨日 (回流型) 下, 浙江省以大雨为主, 明显降水区位于 29°N 以南, 浙江西南部降水最为明显 (图 3b)。第二模态正异常典型低涡暴雨日 (锋面型) 下, 浙江北部合成降水量较少, 浙江西南部降水量更大 (图 3c)。综合看, 三类低涡暴雨环流形势, 以暖区型造成的暴雨强度最大, 但无论何种环流型, 低涡均易对浙江中西部和西南部造成明显降水。

2.1.2 SANDRA 方法环流分型

采用 SANDRA 方法对浙江 44 次低涡暴雨日的环流进行分型, 当分成四类时, E_v为 0.43, 分类得到的各类别具体日期见表 3。在浙江 44 次低涡暴雨日

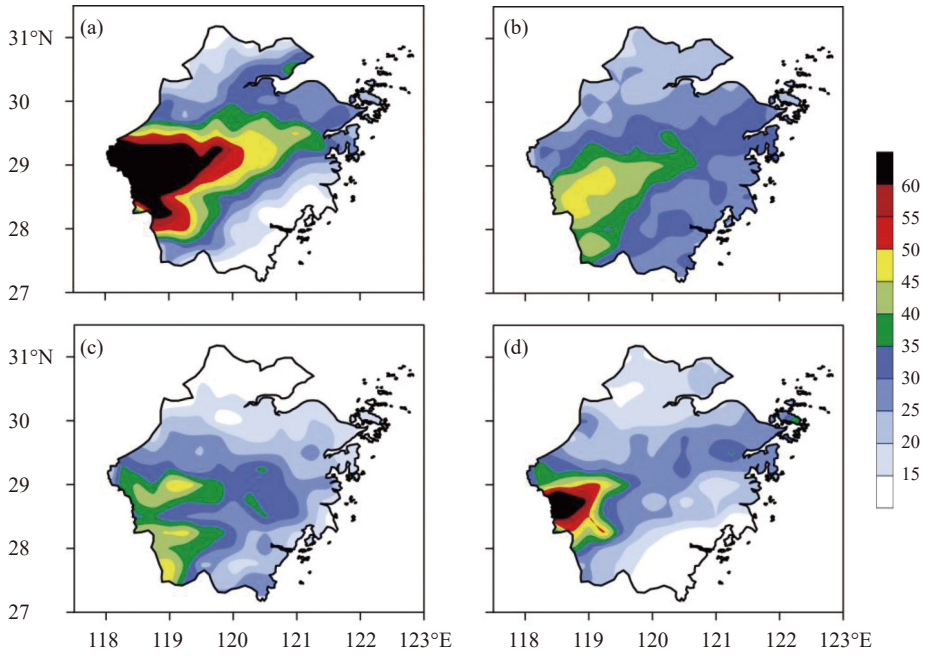


图 3 基于表 2 的经 MVEOF 分解的第一模态正异常 (a)、第一模态负异常 (b)、第二模态正异常 (c) 和第二模态负异常 (d) 浙江典型低涡暴雨日降水量合成图 (单位: mm)

Fig. 3 Composite filed of daily precipitation (unit: mm) of typical rainstorm induced by vortexes days of (a) first mode of positive anomaly, (b) first mode of negative anomaly, (c) second mode of positive anomaly and (d) second mode of negative anomaly based on MVEOF decomposition in Zhejiang in Table 2

中, 第三类别出现频次最多, 有 20 次, 占比约 45.4%, 其次是第一和第二类别, 分别有 13 和 8 次, 占比约 29.5% 和 18.2%, 第四类别出现频次最少, 仅 3 次。

图 4 给出基于 SANDRA 客观分型结果 (表 3) 的高低空环流合成场。第一类别大气环流形势属于锋面型, 并包含 85.7% 的典型锋面型低涡暴雨日 (表 2)。此时 500 hPa 中高纬度地区在 130°E 附近存在槽线, 副高呈带状分布并西伸至 110°E, 其脊线在 18°N 附近, 浙江北部为槽后西北气流, 中南部则为偏西气流, 全省大气比湿在 4~6 g·kg^{-1}(图 4a); 850 hPa 浙江中北部至安徽南部存在近乎东西向的锋区, 锋区北侧的浙江北部为东北风, 锋区南侧为较弱的偏西或西南风, 即锋区附近亦伴有切变线, 浙江省大部分地区大气比湿在 12 g·kg^{-1} 以上, 局部可达 14 g·kg^{-1} (图 4e); 边界层 925 hPa 上, 江苏东部可见闭合低涡中心, 浙江省北部的假相当位温线密集区与切变线仍旧存在, 热力、水汽条件较好, 假相当位温大于 336 K, 大气比湿在 14 g·kg^{-1} 以上 (图 4i)。相较于 MVEOF 结果中的锋面型环流合成场 (图 2c、g、k), 由于其低层的暖湿气流更强且北方冷空气更弱, 因此 850 hPa 锋区及切变线位置偏北。

第二及第三类别对应的高低空环流合成场均表现为暖区型。第二类别下, 500—925 hPa (图 4b、f、j) 浙江省为一致西南风; 低空 850 hPa 存在明显西南急流, 低涡位于江苏附近, 其中心强度小于 1 420 gpm, 浙江省位于低涡底部 (图 4f); 边界层 925 hPa 浙江省有明显暖区发展, 出现假相当位温大于 340 K 的暖舌 (图 4j)。该类别的大气环流合成场与 MVEOF 分解的第一模态正异常典型低涡暴雨日 (图 2a、e、i) 合成场较为相似, 并包含了 100% 的正异常低涡暴雨

表 3 基于 SANDRA 方法的 2016—2023 年浙江低涡暴雨日分类

Table 3 The classification of the rainstorm days induced by vortexes in Zhejiang based on SANDRA clustering from 2016 to 2023

类别	日期/(年-月-日)	频次
第一类	2017-06-01; 2018-06-20; 2019-06-22; 2019-07-04; 2019-07-09; 2019-07-14; 2020-06-05; 2020-07-08; 2021-06-19; 2021-06-27; 2021-06-30; 2023-06-21; 2023-08-28	13
第二类	2016-06-15; 2017-06-24; 2019-06-06; 2019-07-13; 2020-06-29; 2021-05-20;2022-06-05; 2022-06-20	8
第三类	2016-05-09; 2016-06-26; 2016-09-11; 2017-04-09; 2017-04-25; 2017-06-12; 2018-04-13; 2018-04-23; 2019-05-15; 2019-06-25; 2019-07-12; 2020-05-05; 2020-09-17; 2021-05-19; 2021-05-23; 2022-03-25; 2022-04-13; 2022-04-25; 2023-06-23; 2023-06-24	20
第四类	2020-03-27; 2020-03-29; 2021-10-20	3

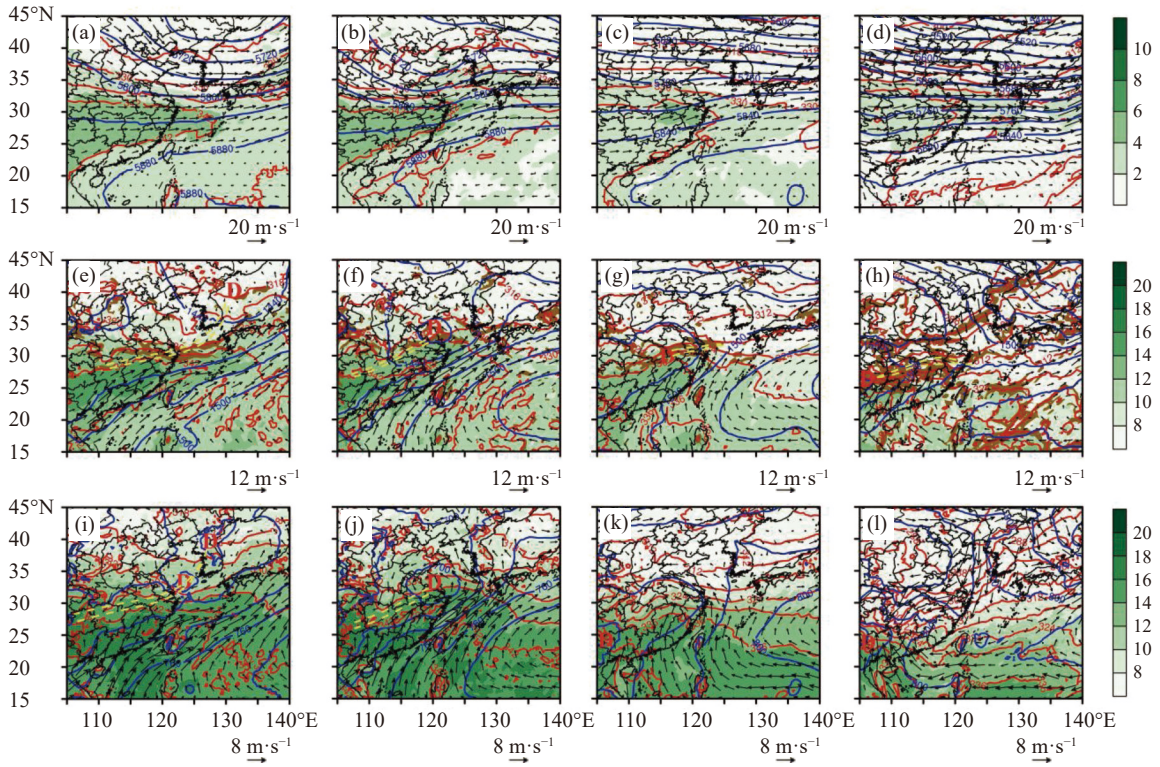


图 4 基于表 3 的第一类 (a、e、i)、第二类 (b、f、j)、第三类 (c、g、k)、第四类 (d、h、l) 浙江低涡暴雨日的 500 hPa (a—d)、850 hPa (e—h) 和 925 hPa (i—l) 位势高度 (蓝色等值线, 单位: gpm)、假相当位温 (红色等值线, 单位: K)、比湿 (色斑, 单位: $g \cdot kg^{-1}$)、风场 (矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 的合成图 (棕色区表示假相当位温水平梯度≥ 4 $K \cdot (100\ km)^{-1}$ 的区域即锋区, 黄双虚线表示切变线, 红 D 表示低涡位置)

Fig. 4 Composite field of geopotential height (blue contours, unit: gpm), equivalent potential temperature (red contours, unit: K), specific humidity (shaded, unit: $g \cdot kg^{-1}$), wind (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) at (a—d) 500 hPa, (e—h) 850 hPa and (i—l) 925 hPa of rainstorm days induced by vortexes of (a, e, i) first category, (b, f, j) second category, (c, g, k) third category, (d, h, l) fourth category in Zhejiang in Table 3 (The brown shadow represent horizontal gradient of equivalent potential temperature ≥ 4 $K \cdot (100\ km)^{-1}$, yellow double dashed line represent the shear line, red D represent the position of the atmospheric vortex)

日。第三类别下, 500 hPa 中高纬度气流平直, 浙江高空为西南气流 (图 4c); 低空 850 hPa 低涡位于安徽南部, 安徽南部至江苏南部存在东西向的锋区及西南风和东南风的切变 (图 4g); 925 hPa 的假相当位温线密集区仍旧存在并伴有倒槽发展, 浙江省内转为偏南风 (图 4k)。与第三类别相比, 第二类别下的暖区特征更明显, 合成场中浙江省内的水汽、热力条件更优, 且 850 hPa 的低涡和西南风强度更强。

第四类别大气环流形势属于回流型, 并包含 50% 的 MVEOF 分解法回流型日期 (表 2)。此时高空 500 hPa 在 110°E 附近存在一南支槽, 浙江为偏西气流 (图 4d); 低空 850 hPa 上的低涡位置偏西, 低涡东侧的暖式切变及锋区主要影响浙江南部地区, 浙江北部主要为高压环流底部的偏东气流 (图 4h); 边界层 925 hPa 上, 高压环流对应的冷空气渗透更为明显, 浙江省主要为东北或偏东气流 (图 4l)。此类别下, 浙江省内热力、水汽条件均较差, 低层大气比湿不足 10 $g \cdot kg^{-1}$。结合 SANDRA 分类频次 (表 3) 及合成结果 (图 4) 可见, 浙江低涡暴雨日的环流形势主要为暖区型 (第二和第三类别) 和锋面型 (第一类别), 并以低层偏南风的暖区型 (第三类别) 为最多。

从四个类别 (表 3) 浙江低涡暴雨日对应的日降水量合成分布可见 (图 5), 第一类别 (锋面型) 对应的浙江省降水量主要表现为两个大值中心, 分别出现在浙江中西部和西南部, 浙江北部降水较少, 这与 MVEOF 结果合成的降水量空间分布类似 (图 3c)。第二类别 (整层一致西南风的暖区型) 对应的浙江省降水量空间分布 (图 5b) 与典型低涡暴雨日对应的降水量合成场 (图 3a) 十分类似, 降水大值主要在浙江中西部, 在所有类别中造成的暴雨强度及落区最大。虽然第三类别 (低层偏南风的暖区型) 对应的浙江省降水量也主要在浙江西部, 但强度仅为大雨量级 (图 5c), 这主要是由于不同个例降水量的空间分布差异大, 导致其与 MVEOF 典型低涡暴雨日下的降水量合成场 (图 3d) 有差异。第四类别 (回流型) 下, 浙江省降水在大雨量级以上, 其中暴雨落区位于浙

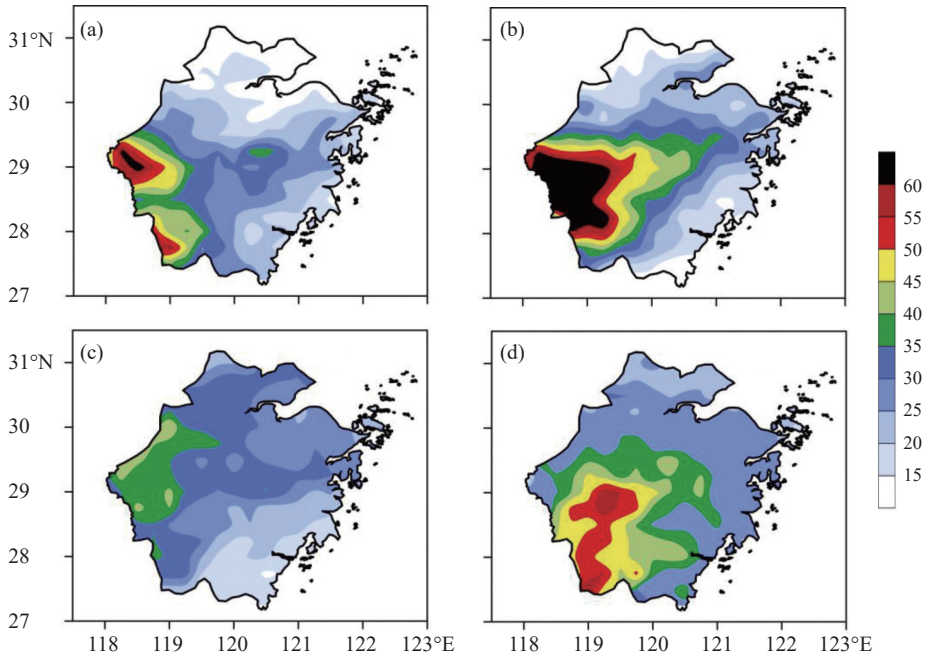


图 5 基于表 3 的第一类 (a)、第二类 (b)、第三类 (c)、第四类 (d) 浙江低涡暴雨日的降水量合成图 (单位: mm)

Fig. 5 Composite filed of daily precipitation (unit: mm) of rainstorm days induced by vortexes of (a) first category, (b) second category, (c) third category and (d) fourth category based on Table 3 in Zhejiang

江西南部 (图 5d), 较典型低涡暴雨日的合成降水量更强, 暴雨落区更大 (图 3b)。

从 MVEOF 分解 (图 3) 或 SANDRA 客观分型 (图 5) 得到的低涡暴雨日降水量合成结果可见, 虽然不同环流型低涡造成的降水均主要在浙江西部 (118°—119°E), 但降水强度存在差异。由于 SANDRA 方法包含所有低涡暴雨日, 因此进一步分析此类结果下低涡暴雨日 08 时浙江西部的平均垂直速度及水汽通量垂直剖面分布 (图 6)。在第一类别下 (图 6a), 垂直上升运动主要在 500—850 hPa 的浙江中部 29°N 附近, 最强上升运动出现在 700 hPa, 强度在 0.6~0.8 Pa·s^{-1}, 水汽通量局限在 29°N 以南的大气低层, 850 hPa 的水汽通量最大可达 15 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}。在第二类别下 (图 6b), 30°N 以南的垂直上升运动明显增强且延伸高度可达 200 hPa, 500—850 hPa 有深厚的上升运动, 最大垂直速度达-1.2 Pa·s^{-1}, 大气低层水汽含量充沛, 最大水汽通量在 850 hPa, 29°N 附近可达 18 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1} 以上。在第三类别下 (图 6c), 29°N 以北的垂直上升运动较为明显, 但水汽通量主要在 29°N 以南, 大气低层水汽含量仍较高, 水汽通量在 12 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1} 以上。在第四类别下 (图 6d), 虽然 29°N 以北的 500—700 hPa 有明显的垂直上升运动, 但水汽通量主要在 29°N 附近。对比来看, 四种类别在浙江南侧均有较好的水汽条件, 其中第二类别下浙江省的水汽、动力抬升条件最佳, 因此对应最明显的地面降水量 (图 5b)。

综上, 两种客观分型法都表明浙江低涡暴雨环流场可分为暖区型、锋面型和回流型, 其中暖区型浙江省低层可表现为一致西南风或主体偏南风。无论何种大气环流型, 低涡多在浙江中西部及南部造成暴雨, 且以一致西南风的暖区型造成的暴雨强度及落区最大。在一致西南风的暖区型环流场下, 29°N 以南的浙江西部有丰富的水汽和强烈深厚的上升运动相配合。

2.2 低涡暴雨不同分型集合动力因子优选

两种分型方法都将浙江低涡暴雨分成暖区、锋面和回流型, 其中暖区型还可分为低层南风 (暖区型) 和低层西南风 (暖区型) 两小类, 两者虽然都属于暖区天气形势, 但在环流形势上有所区别。表 2 的四类分类结果是 MVEOF 结果。不包含所有的个例, 用其计算会丢失个例; 只有表 3 的分类结果是包含了所有的个例, 因此用于动力因子相关性的计算和分析。

利用浙江所有低涡暴雨日一天 4 次的 NCEP-FNL 资料, 探讨与低涡暴雨高相关的集合动力因子。基于表 3 的分类结果, 计算四个类别低涡暴雨日的浙江暴雨二分化序列和网格点上各集合动力因子的点双列相关系数 (图 7)。由于不同类别的低涡暴雨日数不同, 因此用于计算相关系数的格点数不同, 对应不同临界相关系数值。由图 7 可见, 不同类别中与低涡暴雨相关性较好的前 5 个显著集合动力因子各不相同, 表现为相关系数大小有差异。不过

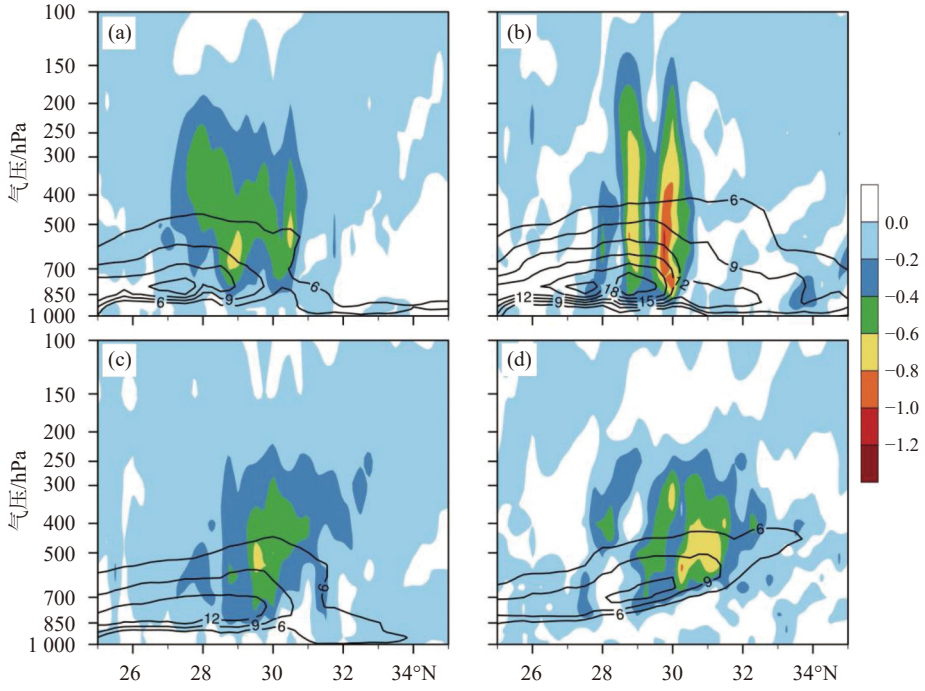


图 6 基于表 3 的第一类 (a)、第二类 (b)、第三类 (c)、第四类 (d) 浙江低涡暴雨日合成流场在浙江西部 (118°—119°E) 的平均垂直速度 (色斑, 单位: Pa·s^{-1}) 及水汽通量 (等值线, 单位: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) 经向垂直剖面图

Fig. 6 Meridional vertical profile of water vapor flux (contours, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and vertical velocity (shaded, unit: Pa·s^{-1}) in western Zhejiang (118°-119°E) of synthetic flow field of rainstorm days induced by vortexes of (a) first, (b) second, (c) third and (d) fourth category in Zhejiang in Table 3

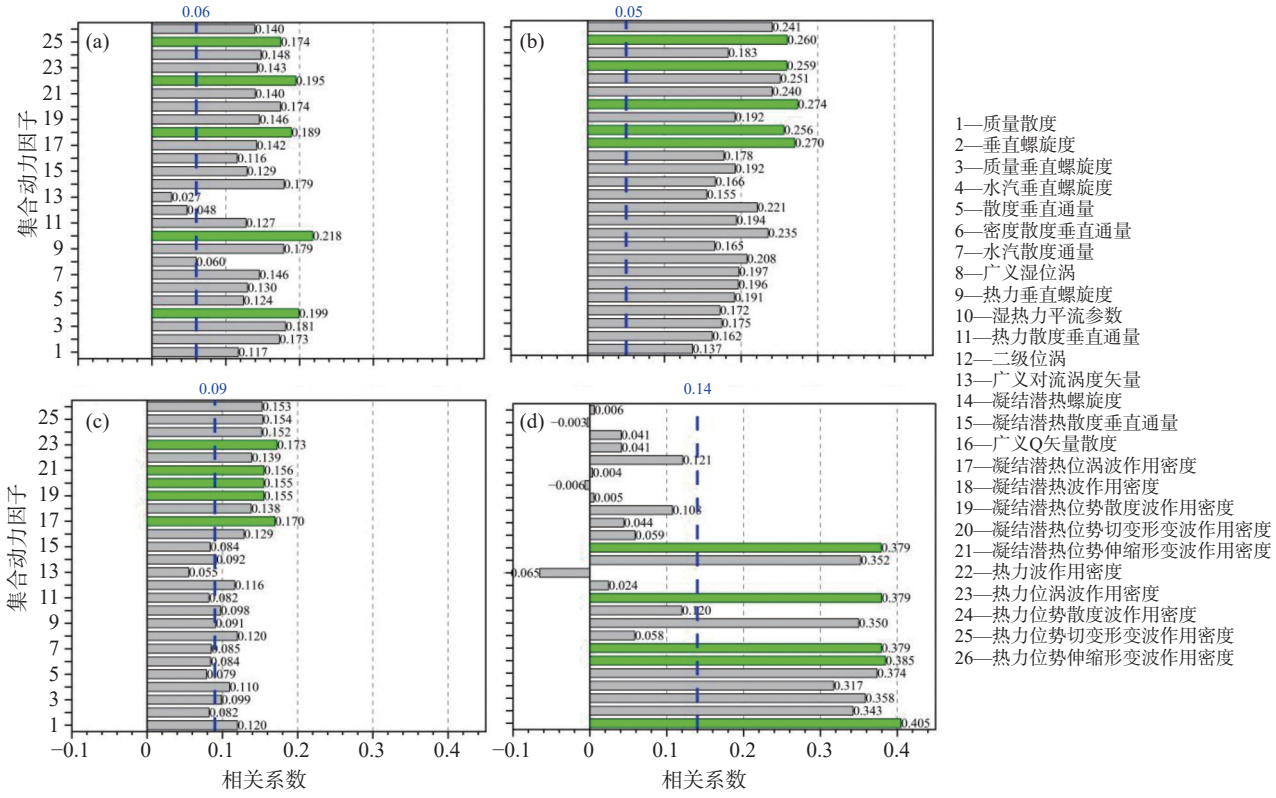


图 7 基于表 3 的第一类 (a)、第二类 (b)、第三类 (c)、第四类 (d) 浙江低涡暴雨日集合动力因子与浙江暴雨的相关系数 (蓝色虚线表示置信水平为 0.01 的临界相关系数, 各类别中相关系数排名前 5 的动力因子使用绿色标记)

Fig. 7 Correlation coefficients between rainstorm and ensemble dynamic parameters of rainstorm days induced by vortexes of (a) first, (b) second, (c) third and (d) fourth category in Zhejiang in Table 3 (blue dashed line indicates correlation coefficients with a confidence level of 0.01, top five factors with correlation coefficients in each category are marked in green)

也有共同特点, 如在两类暖区环流型中 (图 7b、c), 与中尺度对流系统相关的集合动力因子和浙江省低涡暴雨均表现出较高相关性。其中, 凝结潜热位涡波作用密度和热力位涡波作用密度是两类暖区型低涡暴雨的共同优选因子, 两者在两类暖区型低涡暴雨日下的相关系数分别在 0.17 和 0.27 左右。其它动力因子如: 凝结潜热波作用密度、凝结潜热位势散度波作用密度、凝结潜热位势切变形变波作用密度、凝结潜热位势伸缩形变波作用密度、热力位势切变形变波作用密度、热力位势伸缩形变波作用密度与浙江暴雨的相关性也较高。以上集合动力因子由于包含中尺度的扰动信息, 因而与暴雨发生紧密联系, 这与苏冉等 (2019) 对华南暖区暴雨的研究结果一致, 对华南暖区暴雨而言, 中尺度的水汽辐合抬升及相应的凝结潜热释放至关重要。

在第一类别的锋面型中 (图 7a), 与低涡暴雨相关性较好的前 5 个集合动力因子分别是: 水汽垂直螺旋度、湿热力平流参数、凝结潜热波作用密度、热力波作用密度和凝结潜热位涡波作用密度, 这些因子的相关系数在 0.17~0.22。表明锋面型个例中, 除中尺度系统的凝结潜热、热力扰动外, 低涡对暖湿气流的抽吸, 热量的平流输送和水汽通量涡度的垂直输送与暴雨发生也有较大关联。

与前三类别相比, 第四类别回流型中优选因子发生明显变化 (图 7d)。主要因子为散度相关量, 具体包括质量散度、密度散度垂直通量、水汽散度垂直通量、热力散度垂直通量和凝结潜热散度垂直通量, 这 5 个优选因子与暴雨的相关系数在 0.38~0.41。而在前三类中优选的中尺度类因子相关性明显减弱, 这主要是由于回流型下, 浙江省大气低层为冷垫, 不太利于对流系统触发。

综上, 不同环流型的浙江低涡暴雨日中, 与暴雨高相关的集合动力因子是不同的。当大气环流型为暖区型时, 与中尺度热力、动力扰动信息关联的集合动力因子是与浙江省暴雨相关的优选因子。当环流型为锋面型时, 主要影响因子除包含中尺度类集合动力因子外, 低涡造成的水汽和垂直运动与暴雨发生也有较大关联。当环流型为回流型时, 中尺度类的集合动力因子相关性减弱, 优选因子为大尺度散度相关量。

3 结论与讨论

本文基于 2016—2023 年浙江省逐日格点降水量和 NCEP-FNL 再分析数据, 利用 MVEOF 分解和 SANDRA 客观分型法对浙江低涡暴雨日的环流场进行了分型和对比验证, 并对不同环流型下的集合动力因子进行优选, 得出以下结论:

(1) 在近 8 a 浙江 44 个低涡暴雨日中, 浙江低涡暴雨环流形势可分为三类, 暖区型、锋面型和回流型, 暖区型发生频次最多 (占比约 63.6%), 其次是锋面型 (占比约 29.5%), 回流型最少 (占比约 6.8%)。暖区型下, 浙江边界层可表现为一致西南风或主体偏南风, 其中一致西南风的暖区型在浙江引起的暴雨强度、落区最大。

(2) 无论何种天气型, 低涡多易在浙江中西部及南部地区造成暴雨天气, 在浙江南部均有较好的水汽条件, 并以一致西南风的暖区型在浙江省的水汽、动力抬升条件最佳。

(3) 不同天气型下, 与浙江低涡暴雨相关的主要集合动力因子不同。暖区型下, 与暴雨相关的优选因子与中尺度热、动力扰动信息相关联。锋面型下, 主要影响因子除包含中尺度类因子外, 还包括低涡造成的水汽和垂直运动。回流型下, 中尺度类因子相关性减弱, 优选动力因子主要是大尺度散度相关量。

本文对浙江低涡暴雨日的环流场客观分型, 并且探讨了不同环流型暴雨的高相关集合动力因子。鉴于不同大气再分析资料会影响低涡的客观识别, 进而影响后续低涡暴雨日环流的客观分型结果, 为保证本文结论的可靠性, 还使用了 2016—2023 年空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 6 h 的 ERA5 资料进行浙江省低涡暴雨的客观识别及环流客观分型, 共识别出 42 个低涡暴雨日, 环流型也可分为三类, 结论与本文基本一致。未来可继续利用不同低涡暴雨环流型中提炼的优选集合动力因子, 与历史实况降水建立多元线性回归模型, 进一步提升浙江低涡暴雨的预报预警能力。此外, 受限于浙江省格点降水观测资料时间长度, 本文研究年份较短, 还可尝试使用其它多源降水观测资料进行长时段的统计分析。最后, 不同地区的低涡客观识别算法仍有区别, 本文仅利用单一要素 850 hPa 位势高度进行低涡客观识别或许存在不足, 这也是本研究的局限所在, 未来可从闭合风场、涡度场等角度对低涡进行约束, 以便更准确的识别低涡系统。

参考文献 (References):

蔡志颖,郑艳,张程明,等.2025.近 43 a 影响浙江和引发区域性暴雨的大气低涡统计特征[J].暴雨灾害,44(2):215−225. Cai Z Y, Zheng Y, Zhang C M, et al. 2025. Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorm nearly 43 years [J].

Torrential Rain and Disasters,44(2):215−225 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−074

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

高守亭,冉令坤,李娜,等.2013.集合动力因子暴雨预报方法研究[J].暴雨灾害,32(4):289−302. Gao S T, Ran L K, Li N, et al. 2013. The “Ensemble Dynamic Factors” approach to predict rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters,32(4):289−302 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.04.001

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, et al. 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

黎慧琦,崔晓鹏,李琴,等.2019. SANDRA 法对北京小时强降水扰动环流场的分型研究[J].气候与环境研究,24(4):445−454. Li H Q, Cui X P, Li Q, et al. 2019. Anomaly-based classification study of synoptic patterns associated with hourly heavy rainfall over Beijing by SANDRA method [J]. Climatic and Environmental Research,24(4):445−454 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2018.18046

李琴,杨帅,崔晓鹏,等.2016.四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J].大气科学,40(2):341−356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,40(2):341−356 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1507.14296

李争辉.2019.华南前汛期降水及其天气背景的统计特征[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Li Z H. 2019. Statistical characteristics of precipitation and weather background during the pre-flood season in south China [D].Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

毛紫怡,刘金卿.2021.湖南省西南涡暴雨的分类研究[J].暴雨灾害,40(1):52−60. Mao Z Y, Liu J Q. 2021. Classification of rainstorms in Hunan Province affected by the Southwest China vortex [J]. Torrential Rain and Disasters,40(1):52−60 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.01.007

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/qxxb2017092

冉令坤,楚艳丽.2009.强降水过程中垂直螺旋度散度通量及其拓展形式的诊断分析[J].物理学报,58(11):8094−8106. Ran L K, Chu Y L. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events [J]. Acta Physica Sinica,58(11):8094−8106 (in Chinese). doi:10.7498/aps.58.8094

孙建华,周玉淑,傅慎明,等.2024.近十年我国涡旋系统的研究进展[J].大气科学,48(1):228−260. Sun J H, Zhou Y S, Fu S M, et al. 2024. Progress on vortices in China in the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(1):228−260 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2311.23323

苏冉,廖菲,齐彦斌.2019.华南暖区暴雨集合动力因子的诊断分析[J].气象,45(11):1517−1526. Su R, Liao F, Qi Y B. 2019. Diagnostic analysis of ensemble dynamic factors during the warm-sector torrential rain in South China [J]. Meteorological Monthly,45(11):1517−1526 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.11.002

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)

Li Z H, Peng J, Zhang L F, et al. 2024. Exploring the differences in kinetic energy spectra between the NCEP FNL and ERA5 datasets [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,81(2):363−380. doi:10.1175/JAS−D−23−0043.1

Maddox R A. 1980. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data [J]. Monthly Weather Review,108(8):1108−1121.doi:10.1175/1520−0493(1980)108<1108:AOTFSM>2.0.CO;2

Marzban C, Sandgathe S. 2006. Cluster analysis for verification of precipitation fields [J]. Weather and Forecasting,21(5):824−838. doi:10.1175/WAF948.1

Philipp A, Della-Marta P M, Jacobeit J. et al. 2007. Long-term variability of daily north atlantic-european pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering [J]. Journal of Climate, 20(16):4065−4095. doi:10.1175/jcli4175.1

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

Sheskin D J. 2007. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures [M]. Chemical Rubber Company

Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007. Diagnostic analyses of the ageostrophic Q vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow [J]. Journal of Geophysical Research,112:D09114. doi:10.1029/2006JD008142

Zhang X W, Chen D L, Yao T D. 2018. Evaluation of circulation-type classifications with respect to temperature and precipitation variations in the central and eastern Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology,38(13):4938−4949. doi:10.1002/joc.5708

(责任编辑 张 文)