



2024年浙江梅雨期降水的典型与非典型时空特征分析

方雨 马浩 曹龙

Analysis on typical and atypical spatiotemporal characteristics of Meiyu precipitation over Zhejiang Province in 2024

FANG Yu, MA Hao, CAO Long

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-040>

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

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu
暴雨灾害. 2023, 42(5): 532–540 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128>

江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征

The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province
暴雨灾害. 2025, 44(4): 473–482 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-033>

近43 a影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征

Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorms nearly 43 years
暴雨灾害. 2025, 44(2): 215–225 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-074>

江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析

Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period
暴雨灾害. 2024, 43(2): 121–134 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-202>

云南夜雨气候特征分析

Climatological characteristics of night rain in Yunnan Province
暴雨灾害. 2021, 40(2): 160–166 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.007>

江西春季降水异常的环流特征及其对ENSO事件的响应

Characteristics of atmospheric circulation for spring precipitation anomalies in Jiangxi Province and its response to ENSO Events
暴雨灾害. 2021, 40(4): 410–418 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.009>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

方雨,马浩,曹龙. 2024年浙江梅雨期降水的典型与非典型时空特征分析[J]. 暴雨灾害, 45(4): 576–587. FANG Yu, MA Hao, CAO Long. 2026. Analysis on typical and atypical spatiotemporal characteristics of Meiyu precipitation over Zhejiang Province in 2024 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4): 576–587 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-040

2024年浙江梅雨期降水的典型与非典型时空特征分析

方雨¹, 马浩², 曹龙³

(1. 杭州市气象局, 杭州 310051; 2. 浙江省气候中心, 杭州 310052; 3. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310058)

摘要: 浙江省梅雨期降水时空分布不均、年际差异显著, 分析其典型与非典型特征对理解降水异常具有重要意义。利用1973—2024年6—8月浙江省66个国家气象观测站逐日降水量观测、NCEP/NCAR逐日再分析、国家气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)的东亚夏季风、西北太平洋副热带高压(以下简称副高)和南亚高压指数以及ERSSTv5海温月数据, 首先分析了2024年梅雨期降水的典型与非典型时空分布特征, 然后研究其阶段性特征及环流和前期海温背景, 最后初步探讨了历年梅雨正常年份的多样性和复杂性。结果表明: (1) 2024年浙江省梅雨在统计特征上总体接近常年, 6月9日入梅、7月4日出梅, 梅雨量和梅雨强度指数均处于正常水平, 属于典型的梅雨正常年份。但降水空间分布呈非典型特征, 整体表现为“西多东少”, 降水强度偏强, 中雨以上降水日数偏多, 同时部分非梅雨区出现显著异常降水, 非梅雨量接近梅雨量的90%。(2) 2024年浙江省梅雨过程具有明显阶段性特征。6月9—18日强降水主要出现在浙西南地区, 6月19日以后转移至浙西北地区。6月19日前后为关键转折时期, 因东亚夏季风增强、副高发展并北跳以及南亚高压调整等多系统协同影响, 浙江省降水增强并出现降水中心北移。海温背景上, 前冬春季厄尔尼诺及多海域海温异常通过增强水汽输送并抑制冷空气南下共同影响初夏环流, 其相互制约可能使2024年浙江梅雨强度总体接近常年。(3) 浙江省9个梅雨正常年份的降水空间分布并不完全呈典型的“浙中北梅雨”特征, 不同年份降水空间分布差异较大, 非梅雨区亦可能出现强降水, “梅雨量正常”并不意味着降水空间分布特征接近气候平均态。

关键词: 梅雨; 空间分布; 非梅雨区降水; 西北太平洋副热带高压

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025-040

Analysis on typical and atypical spatiotemporal characteristics of Meiyu precipitation over Zhejiang Province in 2024

FANG Yu¹, MA Hao², CAO Long³

(1. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051; 2. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310052; 3. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: The spatial distribution of Meiyu precipitation in Zhejiang Province is highly heterogeneous, with pronounced interannual variability. Investigating both its typical and atypical characteristics is therefore essential for understanding precipitation anomalies. Using daily precipitation observations from 66 national meteorological stations in Zhejiang Province from 1973 to 2024 (June–August), daily NCEP/NCAR reanalysis data, the East Asian summer monsoon, western North Pacific subtropical high (hereafter referred to as the subtropical high), and South Asian high indices from the Climate Monitoring and Prediction Analysis System (CIPAS3.1), as well as monthly ERSSTv5 sea surface temperature (SST) data, this study first analyzes the spatial and temporal characteristics of the 2024 Meiyu precipitation, then investigates its stage-dependent characteristics, associated atmospheric circulation, and preceding SST background, and finally preliminarily explores the diversity and complexity of normal Meiyu years. The results are as follows. (1) The statistical characteristics of the 2024 Meiyu over Zhejiang Province were generally close to the climatological mean. The Meiyu season started on 9 June and ended on 4 July, and both the Meiyu precipitation amount and Meiyu intensity index were within the normal range, indicating a typical normal Meiyu year. However, its precipitation exhibited atypical spatial distribution characteristics, with an overall pattern of

收稿日期: 2025-03-04; 定稿日期: 2025-06-29

资助项目: 浙江省自然科学基金联合基金重大项目 (LZJMD24D050002); 浙江省基础公益研究计划项目 (LGF19D050001); 上海市自然科学基金滚动项目 (24ZR1492500)

第一作者: 方雨, 主要从事气候变化研究。E-mail: 12438047@zju.edu.cn

通信作者: 马浩, 主要从事短期气候预测和气候动力学研究。E-mail: mahao20032003@aliyun.com

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

“more precipitation in the west and less precipitation in the east”. Precipitation intensity was relatively strong, the number of days with moderate or heavier precipitation increased significantly, and some non-Meiyu regions also experienced notable precipitation anomalies, with the non-Meiyu precipitation amount reaching nearly 90% of the Meiyu precipitation amount. (2) The 2024 Meiyu precipitation process showed distinct stage-dependent characteristics. During 9–18 June, heavy precipitation mainly occurred in southwestern Zhejiang, while after 19 June, the precipitation center shifted to northwestern Zhejiang. Around 19 June, a critical transition occurred due to the coordinated influences of an enhanced East Asian summer monsoon, the development and northward shift of the subtropical high, and the adjustment of the South Asian high, leading to intensified precipitation and a northward migration of the precipitation center. The preceding winter-spring El Niño event and multi-basin SST anomalies affected the early-summer circulation by enhancing moisture transport and suppressing southward cold-air intrusions. Their opposite effects may have partially offset each other, contributing to the near-normal Meiyu intensity in Zhejiang Province in 2024. (3) The precipitation spatial patterns of the nine normal Meiyu years in Zhejiang Province did not always exhibit the typical “central and northern Zhejiang Meiyu” pattern. Large interannual differences existed in precipitation distributions, and heavy precipitation could also occur in non-Meiyu regions. These findings indicate that a normal Meiyu precipitation amount does not necessarily correspond to a precipitation spatial pattern close to the climatological mean state.

Key words: Meiyu; spatial distribution; precipitation in non-Meiyu regions; northwestern Pacific subtropical high

引言

梅雨是初夏时节发生在东亚副热带地区的独特气候现象(陶诗言等, 1958)。在东亚夏季风自南向北的推进过程中, 冷暖气流在江南到淮河之间的广阔区域交绥并长期对峙、形成准静止锋, 从而产生了中国梅雨。根据国家标准《梅雨监测指标》(GB/T 33671—2017)(中国气象局, 2017)(以下简称梅雨国标)的规定, 中国梅雨带涉及湖南、江西、浙江、上海、江苏、湖北、安徽共六省一市。已有研究表明, 不同区域的梅雨存在较强的年际变化(陈旭和李栋梁, 2016), 给梅雨预测带来较大难度(马浩等, 2022), 也对梅汛期强降水的防御和应对提出了严峻挑战(张小玲等, 2006)。由于梅雨期降水具有明显的年际差异, 不同年份的降水空间分布特征及其形成机制存在显著差异, 仅依靠长期序列分析难以全面揭示梅雨期降水的多尺度演变过程。因此, 针对丰梅年、枯梅年及异常入梅年等典型年份开展个例研究, 深入分析其环流结构、水汽输送及多尺度相互作用特征, 对于揭示梅雨异常形成和演变的物理机制具有重要意义, 个例研究已成为梅雨研究的重要途径之一。越来越多的研究针对长江中下游和江淮地区的多次强梅雨事件开展了深入分析, 表明西北太平洋副热带高压(以下简称副高)的持续稳定对强梅雨形成具有关键作用(牛若芸和周兵, 2021; 周天军等, 2021; 周胜男等, 2024)。此外, 副高与不同区域、不同层次的大尺度环流系统之间存在复杂相互作用, 其结构特征及外强迫因子在不同年份呈现明显差异(Ding et al., 2020)。

浙江省地处江南地区东部, 作为梅雨带北推过程中的“必经之地”, 深受梅雨的影响(苗长明等, 2014)。根据梅雨国标, 浙江省梅雨量为浙江梅雨区(同时包

括江南梅雨区和长江梅雨区)内49个国家级气象观测站梅雨期降水量的空间平均值, 因此浙江省梅雨兼有江南梅雨和长江梅雨的特点, 其气候特征、成因机理和变异规律较为复杂(俞燎霓等, 2010)。已有研究针对梅雨偏强年的降水特征和环流背景开展了广泛探讨, 均表明副高、南亚高压、中高纬阻塞系统、高低空急流、西南季风和水汽输送对浙江梅汛期持续性强降水有重要影响(张春艳等, 2012; 杜雪婷等, 2023)。马浩等(2024)针对梅雨偏弱年的环流特征和前兆信号也开展了少量工作, 指出梅雨强弱年份的大尺度环流形势并非完全对称。然而, 已有研究多集中于梅雨偏强或偏弱年份, 对正常年份的梅雨特征关注相对不足。需要指出的是, “梅雨正常”仅指梅雨总量接近气候平均态(与气候平均态偏差小于10%), 并不意味着降水在时间和空间分布上均匀合理。若降水阶段集中或空间分布高度不均, 即便总量接近常年, 仍可能引发区域性洪涝或干旱灾害(徐祥德等, 2024)。因此, 有必要区分梅雨期降水的典型特征与非典型特征。针对梅雨正常年份, 尤其是梅雨量正常但发生极端旱涝事件的年份开展研究, 对于揭示梅雨期降水空间分布异常及提升灾害风险预估能力仍具有重要科学意义和业务应用价值。

2024年浙江省于6月9日入梅、7月4日出梅, 梅雨量347.7 mm、接近常年(常年值为1991—2020年气候平均值346.2 mm)。然而, 该年梅雨期内多地频发暴雨至大暴雨, 引发洪涝灾害及地质灾害, 其中6月24日新安江水库因持续强降水导致水位超警戒线而启动七孔泄洪, 充分体现了2024年浙江省梅雨期降水时空分布的极端不均匀性。本文利用国家级气象观测站(以下简称国家站)逐日降水、NCEP/NCAR再分析、国家气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)的东亚夏季风、副高和南亚高压指数, 以及ERSSTv5

海温资料等数据深入研究 2024 年浙江省梅雨期降水的典型和非典型时空分布特征、揭示梅雨期降水空间分布的阶段性和大尺度环流演变及前期海温背景的联系,并探讨历年梅雨正常年份的降水空间分布特征,为浙江省梅雨期降水异常的研究探索新的路径。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所使用的资料包括:(1)浙江省气象信息网络中心提供的浙江省 66 个国家站 1973—2024 年 6—8 月逐日降水量观测数据(1973 年开始浙江国家站数量稳定达到 66 个且观测记录基本连续,因此本文采用 1973 年以来 66 个国家站的逐日降水数据),站点分布见图 1,用于分析 2024 年和历年气候态梅雨期降水时空分布。(2)美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的 NCEP/NCAR 第一代再分析逐日数据(Kalnay et al., 1996),分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,涉及位势高度、水平风速、相对湿度等变量,用于分析 2024 年环流背景场。(3)国家气候中心研发的气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)提供的东亚夏季风、副高和南亚高压逐日监测指数及其常年值资料(刘北等, 2023),用于表征环流系统的活动特征。(4)国际海洋大气综合数据集(ICOADS)的全球月度海面温度数据集(ERSSTv5),分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,用于分析 2024 年前期海温背景。

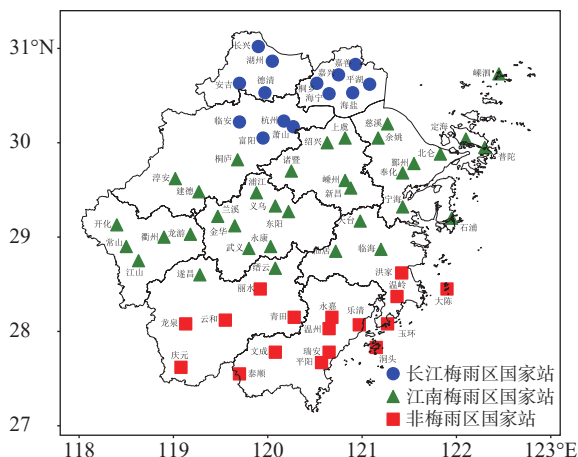


图 1 研究区域国家站的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of national stations in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 非梅雨量计算方法

根据梅雨国标的规定(中国气象局, 2017),浙江省的国家站分布于江南梅雨区(35 站)、长江梅雨区(14 站)和非梅雨区(17 站)三个区域(图 1)。根据浙

江省梅雨量的定义,为进一步分析非梅雨区降水贡献,本文将非梅雨区内 17 个国家站的梅雨期平均降水量定义为非梅雨量。这一方法将降水分析的范围从梅雨区延伸至全省,能够更完整地认识梅雨期浙江省全省不同区域的降水特征。

1.2.2 平均降水强度和强度指数计算方法

平均降水强度为区域内所有站点在梅雨期总日降水量的均值。根据梅雨国标(GB/T 33671—2017)(中国气象局, 2017)的规定,区域梅雨强度指数计算公式如下

$$M = \frac{L}{L_0} + \frac{0.5 \times \left(\frac{R}{L}\right)}{\frac{R_0}{L_0}} + \frac{R}{R_0} - 2.5 \quad (1)$$

其中, M 为区域梅雨强度指数, L 为某年梅雨期长度, L_0 为梅雨期长度的气候平均值(取 1991—2020 年平均梅雨期长度), R 为某年梅雨量, R_0 为梅雨量的气候平均值(取 1991—2020 年平均梅雨量, 为 346.2 mm)。根据计算结果,对区域梅雨强度指数 M 作如下划分: $M \leq -1.25$ 时,区域梅雨强度指数“弱”; $-1.25 < M \leq -0.375$ 时,区域梅雨强度指数“偏弱”; $-0.375 < M < 0.375$ 时,区域梅雨强度指数“正常”; $0.375 \leq M < 1.25$ 时,区域梅雨强度指数“偏强”; $M \geq 1.25$ 时,区域梅雨强度指数“强”。仿照梅雨强度指数的定义,本文定义非梅雨强度指数,即将 R 和 R_0 分别取为浙江省某年非梅雨量和非梅雨量平均值(浙江 1991—2020 年平均非梅雨量)、 L 和 L_0 仍然为浙江某年梅雨期长度和浙江梅雨期长度常年值。

1.2.3 各指数计算方法

本文选取东亚夏季风指数及副高和南亚高压等特征指数,定量刻画 2024 年梅雨期的大气环流背景及其演变特征。

东亚夏季风指数(Wang et al., 2008): 分别计算区域 1 (90° — 130°E , 5° — 15°N) 与区域 2 (110° — 140°E , 22.5° — 32.5°N) 内 850 hPa 纬向风的区域平均值,随后将区域 2 平均值减去区域 1 平均值。

副高形态复杂且变化明显,仅通过环流图难以定量刻画其演变特征。为此,本文参考刘芸芸等(2012)的方法,引入副高面积指数、强度指数、西段脊线指数和西伸脊点指数,以综合反映副高的西伸程度及南北摆动特征。各指数定义如下:

(1) 副高面积指数。在区域 (110° — 180°E , 10° — 50°N) 内,统计 500 hPa 位势高度场上所有 ≥ 588 dagpm 的格点所围成的面积总和。

(2) 副高强度指数。在相同区域内,计算所有 $\geq$

588 dagpm 格点的面积与该格点位势高度值减去 587 dagpm 所得差值的乘积之和。

(3) 副高西段脊线指数。为 (110° — 130° E, 10° — 50° N) 区域范围内副高脊线所在纬度位置的平均值,具体计算方法如下:1) 基于 500 hPa 位势高度再分析格点资料,逐日判断 (110° — 130° E, 10° — 50° N) 范围内位势高度 ≥ 5880 gpm 等值线所包围区域内的东西风分界线 (纬向风 $u=0$),保证分界线以南的纬向风为东风 ($u<0$) 且其以北的纬向风为西风 ($u>0$)。计算满足这些条件的点所在纬度的平均值即为副高西段脊线指数。2) 若 (10° — 50° N, 110° — 130° E) 范围内没有满足位势高度 ≥ 5880 gpm 的点,则以 5840 gpm 作为阈值进行计算,方法同 1)。3) 若 1)、2) 两个条件均无法满足,则当日副高西段脊线指数为缺测。

(4) 副高西伸脊点指数。在区域 (90° — 180° E, 10° — 40° N) 内,取 500 hPa 位势高度场上 588 dagpm 最西端格点所在的经度值;若该经度位于 90° E 以西,则统一记为 90° E。

(5) 南亚高压强度指数。定义为区域 (0° — 180° E, 0° — 55° N) 内 100 hPa 纬向风为零时的位势高度最大值;南亚高压中心经纬度位置则取该最大值所在格点的经、纬度坐标。

1.2.4 不同等级降水定义

日降水量等级采用中央气象台定义标准,小雨: [0.1, 10) mm; 中雨: [10, 25) mm; 大雨: [25, 50) mm; 暴雨: [50, 100) mm; 大暴雨: [100, 250) mm; 特大暴雨: ≥ 250 mm。

1.2.5 空间相似系数

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

空间相似系数常用于衡量不同年份或不同样本间气象场空间分布特征的相似程度。其中, x_i 和 y_i 分别为两个年份第 i 个格点的降水量, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为两个年份的空间平均值, n 为有效格点数。 r 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。

2 结果与分析

2.1 梅雨期降水的典型和非典型特征

从历史排序来看 (图 2), 2024 年浙江省梅雨期长度为 25 d、排名 1973 年以来第 31 位 (图 2a), 梅雨量排名则为第 22 位 (图 2b), 梅雨期长度与梅雨量均未表现出明显异常; 梅雨强度指数为 -0.06, 强度正常,

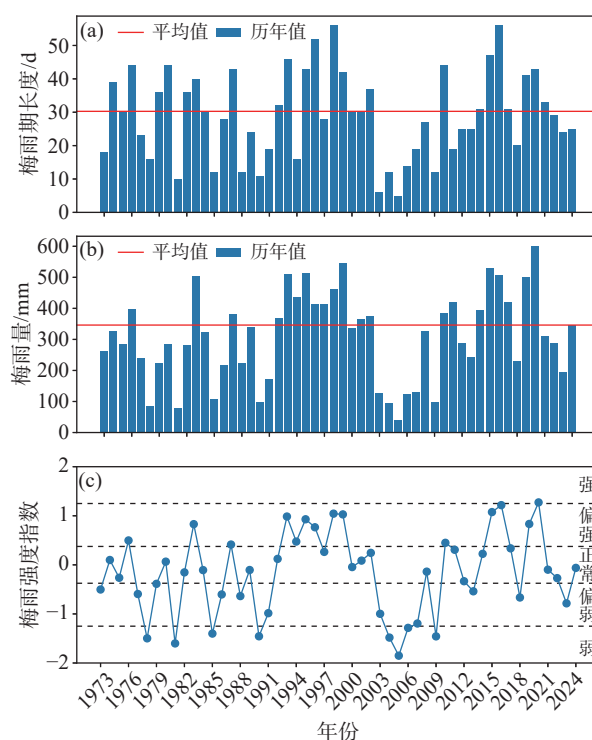


图2 浙江省 1973—2024 年逐年梅雨期长度 (a)、梅雨量 (b) 和梅雨强度指数 (c) 时间序列

Fig. 2 Annual variations in (a) Meiyu period length, (b) Meiyu rainfall, and (c) Meiyu intensity index in Zhejiang Province from 1973 to 2024

排名第 32 位 (图 2c)。因此, 从梅雨期长度、梅雨量和梅雨强度指数特征来看, 2024 年浙江省梅雨接近常年气候态平均值, 属于典型的梅雨正常年份。在浙江省梅雨研究中, 梅雨期降水通常呈现出明显的区域特征, 其典型空间分布特征表现为降水大值区主要位于浙中北地区 (黄娟等, 2012), 浙南地区特别是浙南的中南部降水相对较弱, 该空间分布型态被称为“浙中北梅雨” (雷媛等, 2016)。然而, 从梅雨期间全省降水量空间分布 (图 3a) 来看, 300 mm 以上的大值区主要分布在浙北北部和西南部、浙西南地区以及台州和温州的部分地区, 呈现“西多东少”特征; 在非梅雨区, 浙南地区的丽水中南部和温州南部也出现了强降水, 且丽水全境和温州大部的降水量距平百分率达到 2 成以上、部分地区达到 5 成以上 (图 3b), 这是异于典型梅雨的重要特征。2024 年作为“梅雨正常年份”, 在浙南地区却出现了降水大值区, 可见“正常年份有异常”, 这一现象出现的原因将在后文详细分析。

由梅雨期全省平均降水强度的时间序列 (图 4a) 来看, 2024 年平均降水强度并不弱, 达到 $13.50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 位居 1973 年以来第 7 位; 说明尽管梅雨区降水强度中等, 但非梅雨区降水强度突出, 因此二者复合形成的全省平均降水强度能够达到较强水平。从空间分

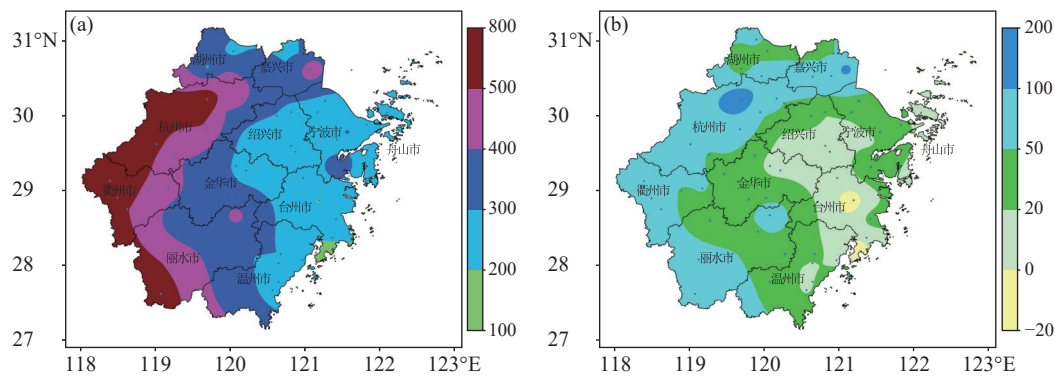


图 3 浙江省 2024 年梅雨期降水量 (a, 单位: mm) 及其距平百分率 (b, 单位: %) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of (a) total precipitation (unit: mm) and (b) anomaly percentage (unit: %) during the Meiyu period in Zhejiang Province in 2024

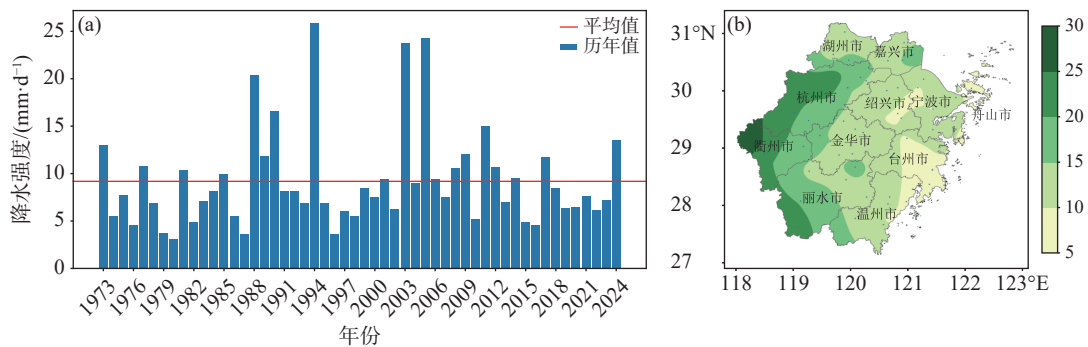


图 4 浙江省 1973—2024 年逐年梅雨期间全省平均降水强度时间序列 (a) 和 2024 年梅雨期间全省降水强度 (b, 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 空间分布

Fig. 4 The (a) time series of the province-averaged precipitation intensity during the Meiyu period in Zhejiang Province from 1973 to 2024, and (b) spatial distribution of precipitation intensity (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) in Zhejiang Province during the 2024 Meiyu period

布来看 (图 4b), 全省大部降水强度达到 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上、浙南地区的丽水西部和温州西南部达到 $15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上、部分地区甚至超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 就降水强度而言, 浙南地区并不明显弱于浙中北地区, 因此 2024 年的浙江梅雨不能简单归结为传统意义上的“浙中北梅雨”。

进一步分析梅雨期间不同等级降水日数 (图 5), 发现无论中雨以上 (图 5a)、大雨以上 (图 5b) 还是暴雨以上 (图 5c) 降水日数, 丽水大部降水日数均多于浙北的湖州和嘉兴地区、与杭州地区大致相当、少于浙中的金衢盆地, 温州大部降水日数则与湖州和嘉兴基本相当, 再次说明浙南地区的降水已有相当强

度, 是 2024 年浙江省梅雨期降水的重要组成部分。

以上分析表明, 2024 年浙江省梅雨期, 非梅雨区降水不可忽视。那么在历年浙江省梅雨期降水监测序列中, 非梅雨区降水居于什么地位呢? 为分析这一问题, 给出了非梅雨区平均降水量 (即非梅雨量) 及其与梅雨量比值的逐年序列 (图 6)。不难看出, 非梅雨量的年际变率较大, 既有超过 500 mm 的极端偏多年份 (1976 年、1995 年、1998 年、2010 年和 2019 年), 也有不足 100 mm 的极端偏少年份 (1981 年、1985 年、2003 年、2004 年、2005 年、2009 年和 2023 年), 但整体而言非梅雨量与梅雨量具有相当的量级: 1973—2024 年的 52 a 中, 有 31 a 非梅雨量达到

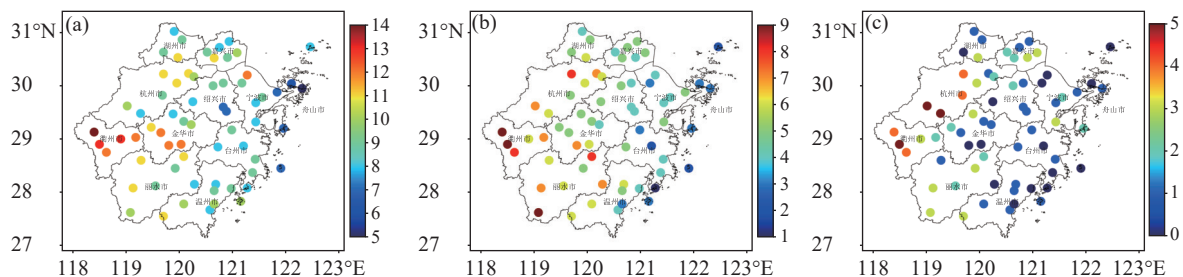


图 5 浙江省 2024 年梅雨期间全省中雨以上 (a)、大雨以上 (b)、暴雨以上 (c) 降水日数 (单位: d) 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the number of precipitation days (unit: d) with (a) moderate rain or above, (b) heavy rain or above, and (c) rainstorm or above during the 2024 Meiyu period in Zhejiang Province

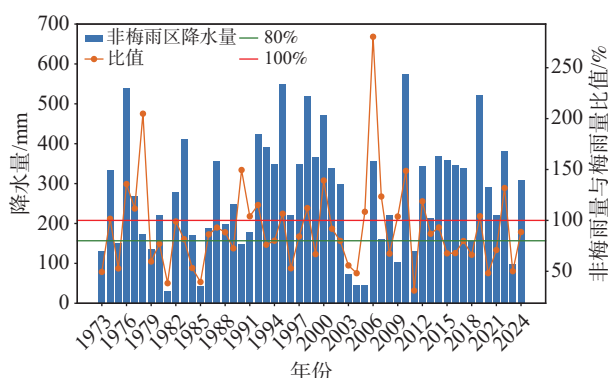


图6 浙江省 1973—2024 年逐年非梅雨量及其与梅雨量比值时间序列

Fig. 6 Time series of annual non-Meiyu precipitation and its ratio to Meiyu precipitation in Zhejiang Province from 1973 to 2024

梅雨量的 80% 以上, 其中有 18 a 非梅雨量超过梅雨量。可见非梅雨量并非无足轻重, 虽然梅雨国标从气候区划的角度划定了梅雨监测区, 但并不意味着监测区以外的区域不会发生强降水甚至是极端降水事件, 针对非梅雨量开展深入分析有助于更加全面地认识浙江省梅雨期降水的空间分布特征。

2.2 梅雨期降水阶段性特征及其环流与海温背景

2.2.1 降水阶段性特征

进一步分析 2024 年浙江省梅雨期降水的阶段性特征。从全省平均降水量的逐日演变 (图 7) 来看, 梅雨期降水存在明显的阶段性特征, 降水强弱交替变化, 持续性不突出。6 月 10 日、6 月 24—25 日出现 24 h 累积降水量超过 25 mm 的强降水过程, 6 月 13 日、6 月 21—22 日、6 月 29 日则表现为降水间歇阶段。

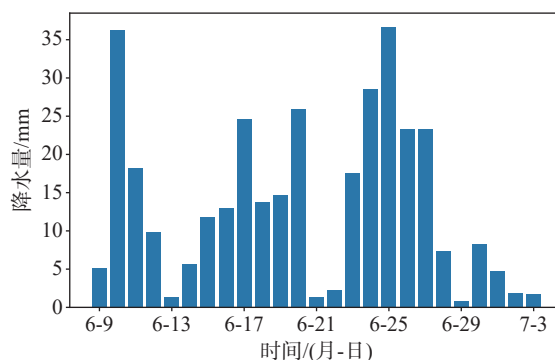


图7 浙江省 2024 年梅雨期逐日平均降水量时间序列
Fig. 7 Daily time series of average precipitation across Zhejiang Province during the Meiyu period in 2024

根据梅雨期降水的逐日空间演变特征, 将 2024 年浙江梅雨分为两个阶段: 第一阶段为 6 月 9—18 日, 第二阶段为 6 月 19 日—7 月 3 日。两个阶段的强降水落区存在显著差异: 第一阶段 200 mm 以上的大值区位于浙中南部地区, 主要分布在衢州中南部、金华南部、台州西南部、丽水地区和温州大部 (图 8a), 第二阶段大值区跃迁至浙中北部地区, 主要分布在湖州地区、嘉兴地区、杭州地区、绍兴北部、宁波北部、衢州大部和金华西北部 (图 8b)。强降水落区的迁移反映了梅雨带的北抬, 是东亚夏季风逐渐北推的结果 (张晓红等, 2009)。需要指出的是, 在近年来浙江省梅雨期降水业务监测中, 梅雨带多表现为频繁南北摆动, 清晰的阶段性北抬特征并不多见; 此外梅雨带长期滞留在浙南地区也较为少见, 这一过程使浙南地区累积了大量降水, 导致非梅雨量与梅雨量基本相当 (图 6)。

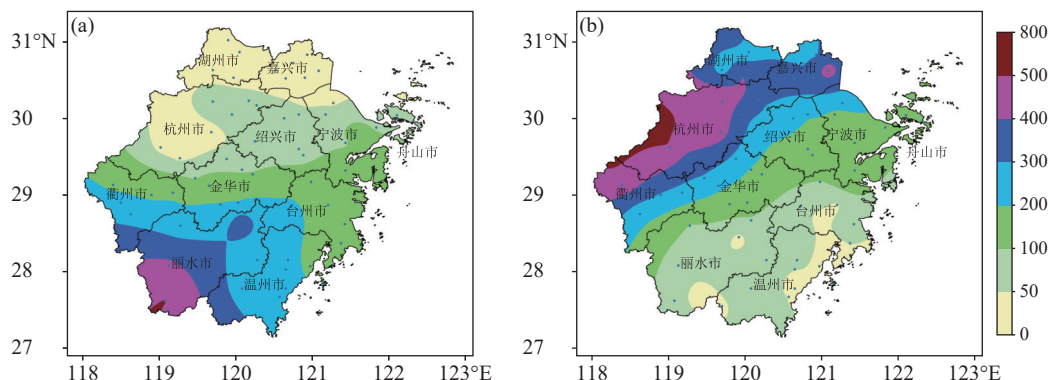


图8 浙江省 2024 年梅雨期 6 月 9—18 日 (第一阶段) (a) 和 6 月 19—7 月 3 日 (第二阶段) (b) 降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of total precipitation (unit: mm) of (a) 9-18 June (first stage) and (b) 19 June-3 July (second stage) during 2024 Meiyu period in Zhejiang Province

2.2.2 环流形势阶段性演变

梅雨期降水的时空分布与大气环流形势密切相关, 其阶段性变化通常对应着环流形势的阶段性调整。从 500 hPa 位势高度来看, 第一阶段副高西段脊

线在中国东部处于 25°N 附近且较其气候态位置明显西伸 (图 9a), 导致大量西南水汽输送至 30°N 以南的江南和华南地区, 在低层 850 hPa 南海和西北太平洋区域形成宽广的反气旋式环流 (图 9c), 使长江以

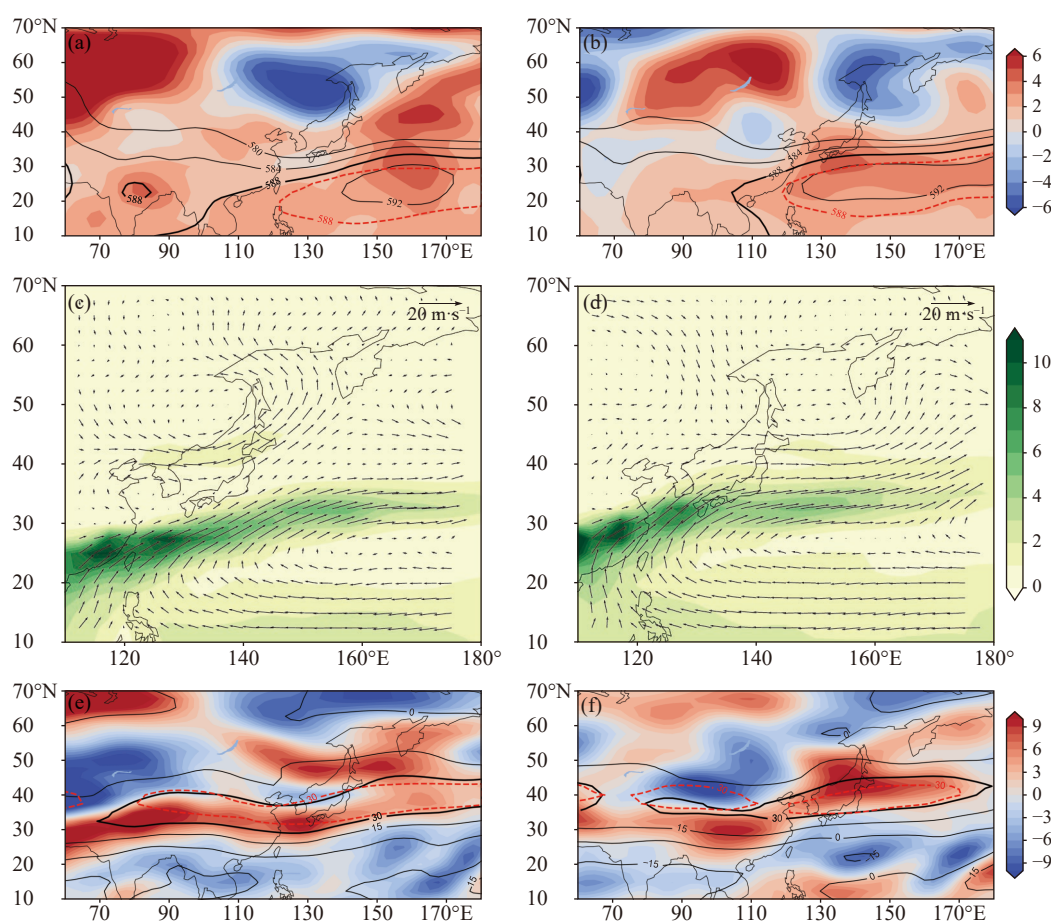


图 9 浙江省 2024 年梅雨第一阶段 (a, c, e) 和第二阶段 (b, d, f) 的 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 及其距平 (填色, 单位: dagpm) (a, b)、850 hPa 水汽通量距平 (填色, 单位: $\text{kg} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$) 和水平风场距平 (风矢, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (c, d)、200 hPa 纬向风速 (等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 及其距平 (填色, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (e, f) [黑色粗实线和红色粗虚线在 a 和 b 图中表示 2024 年和气候态 (1991—2020 年平均) 的 588 dagpm 等值线, 在 e 和 f 图表示 2024 年和气候态 (1991—2020 年平均) 的 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等风速线]

Fig. 9 Spatial distributions of (a, c, e) the first stage and (b, d, f) the second stage of the 2024 Meiyu period in Zhejiang Province, including (a, b) 500 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and its anomalies (shaded, unit: dagpm), (c, d) 850 hPa water vapor flux anomalies (shaded, unit: $\text{kg} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$) and horizontal wind field anomalies (vectors, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and (e, f) 200 hPa zonal wind speed (contours, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and its anomalies (shaded, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (The black thick solid and red thick dashed represent the 588 dagpm geopotential height contours in Fig. 9a, Fig. 9b and the $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zonal wind speed contours in

Fig. 9e, Fig. 9f in 2024 and the climatological mean from 1991 to 2020, respectively)

南成为梅雨期降水的主要落区;第二阶段 588 dagpm 线在中国东部北跳至 30°N 附近、同样较其气候态位置偏西 (图 9b), 西南水汽输送位置也北抬至长江中下游和江淮地区, 850 hPa 反气旋式环流北界扩展至 35°N 以北 (图 9d), 此时梅雨带北移到长江与淮河流域。此外, 第一阶段中高纬度乌拉尔山附近出现位势高度正异常而贝加尔湖以东出现位势高度负异常, 我国中西部地区冷空气加强 (图 9a); 第二阶段贝加尔湖附近出现位势高度正异常而鄂霍茨克海附近出现位势高度负异常, 我国东部地区冷空气加强 (图 9b), 冷暖气流辐合为梅雨期降水的增强提供了有利条件。需要指出的是, 副高的北跳与高空急流的位置变化存在密切的关联 (张庆云和陶诗言, 1998)。从 200 hPa 纬向风速来看, 风速大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西

急流轴在中国东部的位第一阶段偏南 (图 9e) 而第二阶段偏北 (图 9f), 有利于牵引副高在第一阶段位置偏南而第二阶段位置偏北, 副高的移动和伸缩受到包括东亚高空急流在内的多个大尺度环流系统的综合影响。

图 10 为 2024 年梅雨期主要环流系统的逐日演变特征。东亚夏季风指数 (图 10a) 自 6 月 15 日后逐渐增强, 19 日前后达到阶段性高值, 有利于加强低层水汽输送和降水发展。21 日略有减弱, 随后重新增强并维持偏强状态, 为 6 月下旬的强降水提供动力背景。6 月 29 日前后, 随着夏季风强度明显减弱, 水汽输送能力下降, 对应梅雨过程趋于结束。副热带高压自 6 月 19 日后迅速增强。其面积指数 (图 10b) 由前期偏小快速跃升至高位, 强度指数 (图 10c) 也呈

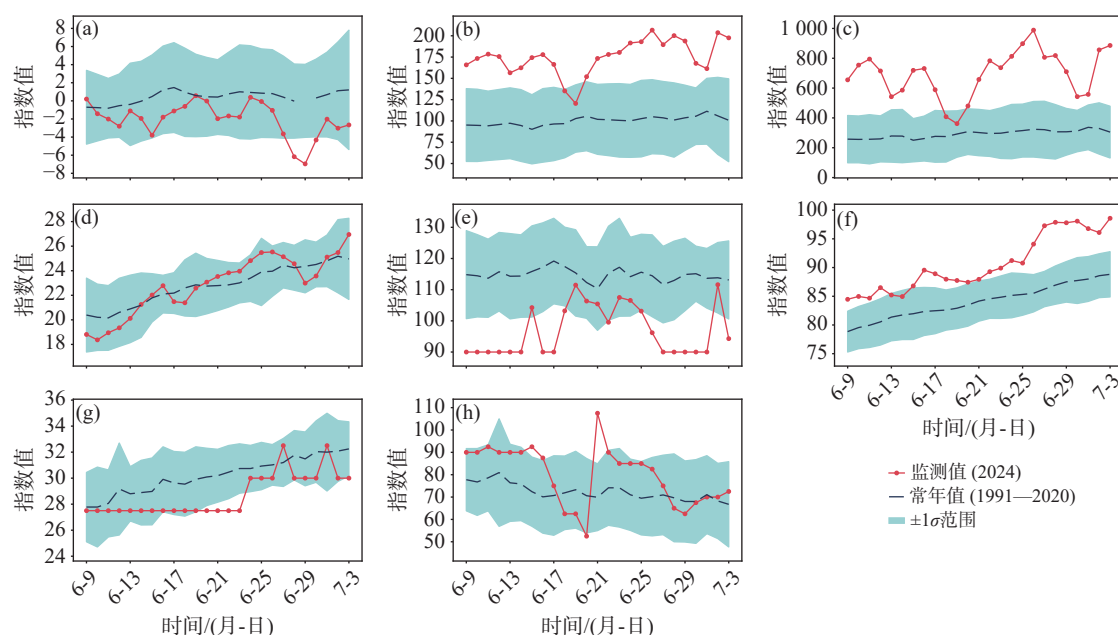


图 10 浙江省 2024 年梅雨期间东亚夏季风指数 (a), 副高面积指数 (b), 副高强度指数 (c), 副高脊线指数 (d), 副高西伸脊点指数 (e), 南亚高压强度指数 (f), 南亚高压中心纬度位置 (g) 和南亚高压中心经度位置 (h) 监测值、常年值及 $\pm 1\sigma$ 范围逐日演变

Fig. 10 Daily evolution of the monitored values, climatological means, and $\pm 1\sigma$ ranges of (a) the East Asian summer monsoon index, (b) subtropical high area index, (c) its intensity index, (d) its ridge position index, (e) its western extension index, (f) the South Asian high intensity index, (g) the latitudinal position of its center, and (h) the longitudinal position of its center during the 2024 Meiyu period in Zhejiang Province

明显上升趋势,并在 6 月 23 日后维持较强水平,显示副高的稳固发展,有助于引导低纬水汽向北输送。副高脊线纬度(图 10d)在梅雨期间逐渐北移,但移动相对缓慢,整体维持在 21° — 25° N 之间。西伸脊点(图 10e)整体偏西,但在 6 月 19 日前后表现出阶段性东退趋势,使副高控制范围更集中于我国东部沿海,有利于稳定在浙江一带的水汽辐合区与强降水带形成。南亚高压的强度指数(图 10f)整体偏强,中心纬度(图 10g)偏南,有利于中高层西南气流的输送。6 月 19 日前后,南亚高压中心经度(图 10h)西退至 70° E 以西,随后快速东伸,有助于加强对流层中上层的西南急流与高空辐散,与副高边缘的低层辐合共同构建强对流系统的垂直环流结构。总体来看,6 月 19 日前后是各主要环流系统协同调整的关键时间点:东亚夏季风增强、副高面积和强度迅速上升、脊线北移、西伸脊点东移,以及南亚高压的西退东伸等演变共同指向一个有利于浙江省强降水爆发的大尺度环流背景。这些系统的共同作用与浙江省降水量骤然增强(图 7)、降水中心北移(图 8)密切相

关。7 月初,随着副高脊线持续北移和西伸,夏季风减弱,南亚高压发展,雨带逐渐离开浙江省,标志浙江省梅雨期结束。

2.2.3 前期海温背景

赤道中东太平洋的厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 事件以及北太平洋、热带印度洋以及北大西洋等区域的海温异常,对东亚梅雨的形成与演变具有重要影响(陈丽娟等, 2013)。如图 11a 所示,2023 年冬季,赤道中东太平洋发生了一次典型的厄尔尼诺事件,此外西北太平洋黑潮延伸体区域海温异常增暖、对应太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 正位相,厄尔尼诺激发的“电容器效应”使热带印度洋出现海盆一致增暖 (Annamalai et al., 2005),此外北大西洋则呈现出结构清晰的三极子型海温正位相 (Positive North Atlantic Tripole, PNAT)。厄尔尼诺和热带印度洋增暖分别通过不同机制维持并加强西北太平洋上空的异常反气旋 (Xie et al., 2016; 黄刚等, 2016),使副高偏南偏强,增强初夏西南暖湿气流向长江中下游和江南地区的

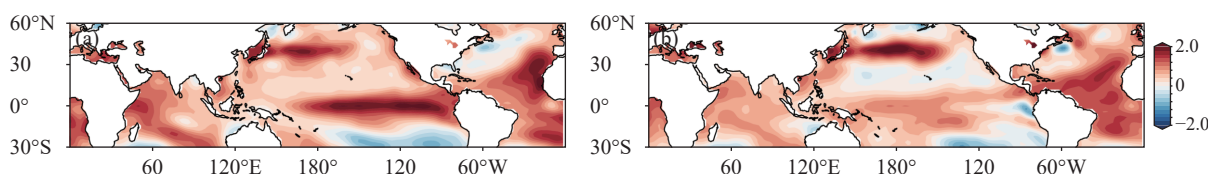


图 11 2023—2024 年冬季 (12 月—次年 2 月) (a) 和春季 (3—5 月) (b) 全球海表温度距平 (单位: $^{\circ}$ C)

Fig. 11 Global sea surface temperature anomalies (unit: $^{\circ}$ C) for (a) winter (December 2023–February 2024) and (b) spring (March–May 2024)

输送(任宏利等, 2024), 有利于浙江省梅雨降水量增多。北大西洋的增暖一方面通过水汽调整和引发沃克环流异常促使南亚高压增强(Ge et al., 2023), 进一步有助于增强西南气流, 支持梅雨的发展; 另一方面, PNAT 有利于激发东亚上空西风急流增强, 导致中高纬度环流经向度减小, 抑制冷空气南下(Gu et al., 2009), 对梅雨形成产生抑制作用。从冬季到春季, 尽管海温异常整体有所减弱, 但上述异常形态仍基本维持(图 11b), 对初夏大气环流持续产生影响。总体来看, 冬春季海温异常对初夏环流的调控表现出协同一致性: 一方面, 热带海温增暖有利于西北太平洋异常反气旋、副高和南亚高压的增强, 增强水汽输送与梅雨发展; 另一方面, 中高纬度的冷空气南下受 PNAT 影响被削弱, 不利于锋面系统发展(邱辉

等, 2024)。二者对梅雨发展的影响可能相互抑制, 使 2024 年浙江省梅雨强度接近常年水平。

2.3 梅雨正常年份的多样性和复杂性

就梅雨量而言, 2024 年是浙江省梅雨正常年份, 但该年梅雨期降水的空间分布并不典型、与传统的“浙中北梅雨”降水特征存在一定差异。这种不典型的分布形态究竟是在梅雨正常年份中普遍存在、还是仅在个别年份中出现? 为了探讨这一问题, 本文分析了自 1973 年以来的所有浙江省梅雨正常年份(1974 年、1989 年、1996 年、2001 年、2002 年、2011 年、2012 年、2022 年、2024 年) 的降水时空分布特征。

在 9 个正常年份中(图 12), 除 2011 年外, 其它各年均与“浙中北梅雨”存在一定差异: 其中 2001 年

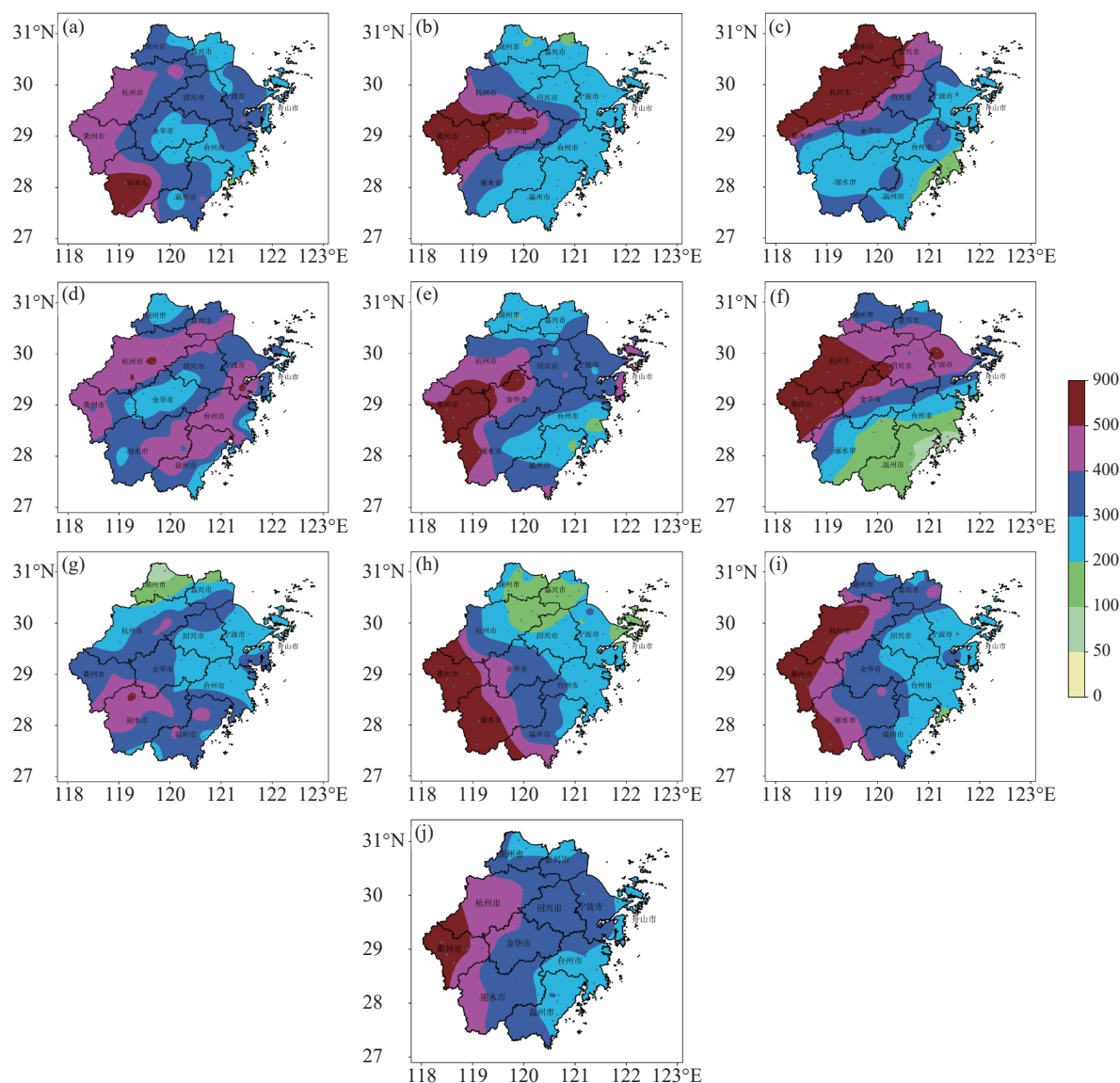


图 12 1973—2024 年浙江省梅雨正常年份 1974 年 (a)、1989 年 (b)、1996 年 (c)、2001 年 (d)、2002 年 (e)、2011 年 (f)、2012 年 (g)、2022 年 (h)、2024 年 (i), 以及上述 9 个正常年份平均合成结果 (j) 的降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of precipitation (unit: mm) over Zhejiang Province during the Meiyu period for the nine normal years selected from 1973 to 2024, including (a) 1974, (b) 1989, (c) 1996, (d) 2001, (e) 2002, (f) 2011, (g) 2012, (h) 2022, (i) 2024, and (j) the composite mean of these nine years

为全省多雨型(图12d)、1974年为全省大部多雨型(图12a)、2024年为浙西和浙北北部多雨型(图12i)、1996年为浙北多雨型(图12c)、2002年为浙北中南部和浙中南大部多雨型(图12e)、2012年为浙南和浙中北部分多雨型(图12g)、2022年为浙西南多雨型(图12h)、1989年为浙西南和浙北西南部多雨型(图12b),降水大值区能够较好覆盖浙中北梅雨主要落区的仅有4 a(1974年、1996年、2001年和2011年);从9个正常年合成平均结果(图12j)来看,除“浙中北梅雨”的典型特征得到体现外,浙西南地区同样出现了300 mm以上的降水大值区,说明在梅雨正常年份,非梅雨区特别是浙西南地区的降水对浙江全省梅雨期降水贡献同样具有重要意义。

进一步分析在9个梅雨正常年份中,梅雨区和非梅雨区的降水量和强度指数对比(图13)。从降水量来看(图13a),9 a中只有3 a梅雨量明显多于非梅雨量(1989年、1996年和2011年),其中2011年梅雨量是非梅雨量的3.2倍、二者之间的差距最大;有3 a梅雨量虽然多于非梅雨量,但二者较接近(2001年、2002年和2024年),其中2001年非梅雨量和梅雨量之间的差距约为30 mm;有3 a非梅雨量超过梅雨量(1974年、2012年和2022年),其中2022年非梅雨量比梅雨量偏多三成以上。从强度指数来看(图13b),9 a中仅有4 a梅雨强度强于非梅雨强度(1989年、1996年、2002年和2011年),其余5 a梅雨强度均弱于非梅雨强度(1974年、2001年、2012年、2022年和2024年),其中2012年和2022年还出现了非梅雨强度为正值而梅雨强度为负值的极端情形。以上结果表明,在梅雨正常年份中,非梅雨区降水不仅总量

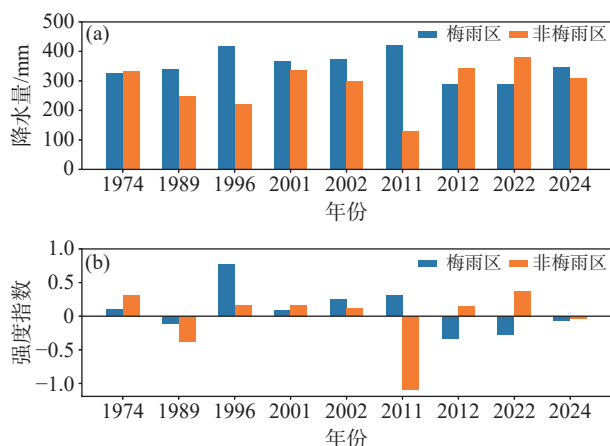


图13 1973—2024年浙江省梅雨正常年份梅雨区和非梅雨区降水量(a)和强度指数(b)对比

Fig. 13 Comparison of (a) precipitation and (b) intensity index between the Meiyu and non-Meiyu regions for normal Meiyu years from 1973 to 2024 in Zhejiang Province

可观,而且强度突出,非梅雨区降水量和降水强度甚至可能超过梅雨区。

由于2011年可视为典型的“浙中北梅雨”,为定量说明在梅雨正常年份中,其它各年降水空间分布与典型梅雨的差异,计算了其它各年梅雨期降水与2011年之间的空间相似系数(图14)。可以看出,通过0.05显著性检验的相似年份有5 a,分别为1974年、1989年、1996年、2002年和2024年,其中1989年和2002年相似系数超过0.6;其它3 a的相似系数均在0.2以下,其中2012年甚至表现为负相似;说明在9个梅雨正常年份中,有6 a(包括2011年在内)梅雨期降水的空间分布与典型梅雨存在一定相似性,其它3 a则与典型梅雨差异较大,因此“梅雨量正常”与“梅雨期降水空间分布正常”是存在区别的两个概念。

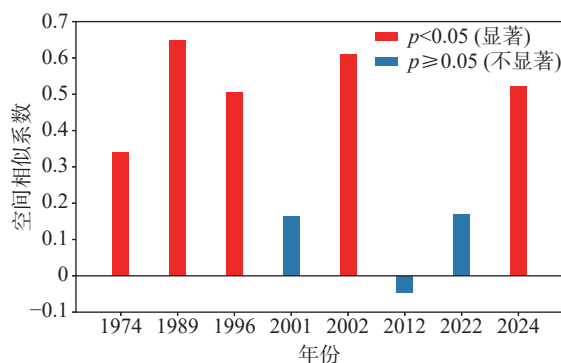


图14 1973—2024年浙江省梅雨正常年份中,2011年与其它各年梅雨期降水量的空间相似系数

Fig. 14 Spatial correlation coefficients of precipitation during the Meiyu period in 2011 versus other normal years from 1973 to 2024 in Zhejiang Province

3 结论与讨论

本文利用浙江省1973—2024年6—8月66个国家级气象观测站逐日降水量观测数据、NCEP/NCAR逐日再分析数据、CIPAS3.1提供的东亚夏季风、副高和南亚高压指数数据和ERSSTv5海温月数据,采用梅雨强度指数和非梅雨强度指数计算方法,细致分析了2024年浙江省梅雨期降水的典型和非典型时空分布特征及阶段性特征,大尺度环流和前期海温背景,初步探讨了历年梅雨正常年份的复杂性和多变性,得到主要结论如下:

(1) 2024年浙江省梅雨期呈现典型与非典型并存的特点。典型特点表现为梅雨期统计特征总体接近常年气候态平均值,梅雨期长度、梅雨量和梅雨强度指数均处于正常水平。非典型特点表现为降水空间分布与典型浙中北型梅雨存在差异,整体呈“西多

东少”格局,降水强度偏强、中雨以上降水日数明显偏多。同时部分非梅雨区出现异常降水,降水量普遍偏多且降水强度较大,非梅雨量接近梅雨量的 90%。

(2) 2024 年浙江省梅雨期降水过程表现出明显的阶段性特征。第一阶段发生在 6 月 9—18 日,强降水主要出现在浙西南地区;第二阶段发生在 6 月 19 日—7 月 3 日,强降水主要出现在浙西北地区。6 月 19 日前后是环流系统协同调整的关键时期,东亚夏季风增强、副高强度增强并向北移动,同时南亚高压发生调整,共同导致浙江省降水量增强并出现降水中心北移。海温背景上,前冬春季厄尔尼诺及多海域海温异常共同影响初夏环流演变,一方面增强水汽输送,另一方面抑制冷空气南下,二者相互制约可能导致 2024 年浙江梅雨强度总体接近常年。

(3) 浙江省 9 个梅雨正常年份并非都表现为典型的“浙中北梅雨”降水特征,不同年份的降水空间分布差异较大,非梅雨区可能出现强降水,“梅雨量正常”并不等同于降水空间分布特征接近气候平均态。

在梅雨研究中,往往侧重分析“异常梅雨”,尤其是极端梅雨事件(杨玮和程智,2015)。本文以 2024 年“正常梅雨”为个例分析,发现浙江省梅雨正常年份降水空间分布差异显著,非梅雨区也有可能出现强降水,可能引发局地极端降水或区域性干旱。同时基于环流与前期海温背景分析了 2024 年梅雨期降水空间分布异常的可能成因,但尚未对其他正常年份进行系统研究,不同正常年份的降水异常空间型态及其对应的环流和海温配置可能各不相同,隐含多样的成因机制。这种复杂性增加了对梅雨空间分布预测的不确定性,未来仍需进一步研究正常年梅雨降水的多样性及其形成机制,精准掌握梅雨期降水的大值区和集中降水区域,以提高梅雨预测能力和气象服务水平。

参考文献 (References):

- 陈丽娟,袁媛,杨明珠,等.2013.海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J].*应用气象学报*,24(5):521–532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTa impact on EASM [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 24(5):521–532 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7313.2013.05.002
- 陈旭,李栋梁.2016.新标准下江淮梅雨特征的分析[J].*气象科学*,36(2):165–175. Chen X, Li D L. 2016. The features of Meiyu under the new standard [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 36(2):165–175 (in Chinese). doi:10.3969/2015jms.0001
- 杜雪婷,刘汉华,马昊.2023. 2019 年浙江省梅雨异常特征及成因分析[J].*气象与环境科学*,46(1):7–15. Du X T, Liu H H, Ma H. 2023. Analysis of abnormal characteristics and causes of the 2019 Meiyu in Zhejiang Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 46(1): 7–15 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673–7148.2023.01.002
- 黄刚,胡开明,屈侠,等.2016.热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾[J].*大气科学*,40(1):121–130. Huang G, Hu K M, Qu X, et al. 2016. A review about Indian ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 40(1):121–130. doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1505.15143
- 黄娟,郭巧红,胡淳焱.2012. 2010 年浙江梅汛期强降水大气环流特征分析[J].*科技通报*,28(1):34–38+50. Huang J, Guo Q H, Hu C H. 2012. Analysis on circulation characteristic of Meiyu Rainstorm in Zhejiang Province during 2010 [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 28(1):34–38+50 (in Chinese). doi:10.13774/j.cnki.kjtb.2012.01.030
- 雷媛,柳苗,陈练.2016.国家标准与浙江传统标准梅雨的对比分析[J].*浙江气象*,37(1):11–14+23. Lei Y, Liu M, Chen L. 2016. Comparison of national standards and Zhejiang traditional standards for Meiyu [J]. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 37(1):11–14+23 (in Chinese). doi:10.16000/j.cnki.zjmx.2016.01.004
- 刘北,王舒,吴焕萍,等.2023.面向 CIPAS3.0 的气候数据环境设计与实现[J].*气象科技*,51(6):917–926. Liu B, Wang S, Wu H P, et al. 2023. Design and implementation of CIPAS 3.0 data environment [J]. *Meteorological Science and Technology*, 51(6):917–926 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20220305
- 刘芸芸,李维京,艾婉秀,等.2012.月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J].*应用气象学报*,23(4):414–423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al. 2012. Reconstruction and application of the monthly western pacific subtropical high indices [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 23(4):414–423 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7313.2012.04.004
- 马浩,于翥,葛敬文,等.2022. CFSv2 对 2018 年浙江梅雨降水多尺度预测的性能评估[J].*气象科学*,42(5):690–702. Ma H, Yu F, GE J W, et al. 2022. Assessment of multi-scale forecast skill of CFSv2 for Meiyu precipitation over Zhejiang in 2018 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 42(5):690–702 (in Chinese). doi:10.12306/2021jms.0036
- 马浩,陈伯民,樊高峰,等.2024. 2018 年浙江梅雨降水异常偏少的大尺度环流特征及前兆信号分析[J].*高原气象*,43(4):933–954. Ma H, Chen B M, Fan G F, et al. 2024. Analysis of large-scale atmospheric circulation and associated precursory climatic signals for exceedingly less Meiyu precipitation over Zhejiang in 2018 [J]. *Plateau Meteorology*, 43(4):933–954 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2023.00093
- 苗长明,郭品文,丁一汇,等.2014.江南南部初夏雨季的降水和环流气候特征[J].*大气科学*,38(2):285–296. Miao C M, Guo P W, Ding Y H, et al. 2014. Climatic characteristics of rainfall and atmospheric circulation during the early summer rainy season in the South Part of Jiangnan [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 38(2):285–296 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2013.13140
- 牛若芸,周兵.2021.2019 年江淮流域梅雨异常特征及成因分析[J].*气象*,47(11):1347–1358. Niu R Y, Zhou B. 2021. Analysis of abnormal characteristics and causes of Meiyu over the Yangtze-Huaihe River Basin in 2019 [J]. *Meteorological Monthly*, 47(11):1347–1358 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.11.004

- 邱辉,马艺铭,祁海霞.2024.2024年长江中下游梅雨集中期大气环流特征分析[J].*人民长江*,55(12):30-38. Qiu H, Ma Y M, Qi H X. 2024. Analysis of atmospheric circulation characteristics during Meiyu concentrated period in 2024 in middle and lower reaches of Changjiang River [J]. *Yangtze River*,55(12):30-38 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.12.005
- 任宏利,刘芊仪,刘明站,等.2024.基于时空综合分型的 El Niño 事件对中国东部降水的影响差异[J].*大气科学学报*,47(4):521-532. Ren H L, Liu Q Y, Liu M H, et al. 2024. Different impacts of two types of El Niño events on precipitation in eastern China based on spatiotemporal diversity [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,47(4):521-532 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240319001
- 陶诗言,赵煜佳,陈小敏.1958.东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J].*气象学报*,29(2):119-134. Tao S Y, Zhao Y J, Chen X M. 1958. The relationship between May-Yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,29(2):119-134 (in Chinese)
- 徐祥德,齐冬梅,李跃清,等.2024.多尺度地形背景下东亚夏季风推进过程与我国洪涝和滑坡泥石流灾害时空特征[J].*高原山地气象研究*,44(4):1-10. Xu X D, Qi D M, Li Y Q, et al. 2024. Advancement process of East Asian summer monsoon and the spatiotemporal characteristics of flood, landslide and debris flow disasters under multi-scale terrain in China [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(4):1-10 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.04.001
- 杨玮,程智.2015.近 53 年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J].*气象*,41(9):1126-1133. Yang W, Cheng Z. 2015. Variation characteristics of extreme precipitation during Meiyu flood period over Yangtze-Huaihe basin in recent 53 years [J]. *Meteorological Monthly*,41(9):1126-1133 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.010
- 俞燎霓,胡波,曹美兰,等.2010.浙江梅雨气候特征及其梅汛期暴雨的形势分析[J].*科技通报*,26(5):782-786+794. Yu L N, Hu B, Cao M L, et al. 2010. The characteristics of Heavy rain and its analysis of synoptic circumstances during Plum Flood Period in ZheJiang [J]. *Bulletin of Science and Technology*,26(5):782-786+794 (in Chinese). doi:10.13774/j.cnki.kjtb.2010.05.004
- 张春艳,王力,孙明明,等.2012.2011 年浙江梅汛期暴雨特征及影响天气系统分析[J].*暴雨灾害*,31(2):132-140. Zhang C Y, Wang L, Sun M M, et al. 2012. Analysis on the features and synoptic systems of the rainstorm during Plum Rains Season in 2011 in Zhejiang province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,31(2):132-140 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2012.02.005
- 张庆云,陶诗言.1998.亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J].*气象学报*,56(2):199-211. Zhang Q Y, Tao S Y. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,56(2):199-211 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1998.019
- 张小玲,陶诗言,卫捷.2006.20 世纪长江流域 3 次全流域灾害性洪水事件的气象成因分析[J].*气候与环境研究*,11(6):669-682. Zhang X L, Tao S Y, Wei J. 2006. An analysis on the Basin wide Catastrophic Floods in the Yangtze River during the 20th century [J]. *Climatic and Environmental Research*,11(6):669-682 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.06.01
- 张晓红,贾天山,胡雯.2009.2007 年淮河流域雨季暴雨多尺度环流分析[J].*大气科学学报*,32(2):321-326. Zhang X H, Jia T S, Hu W. 2009. Multiscale circulation features of heavy rain over Huaihe river basin in rainy season in 2007 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,32(2):321-326 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.02.020
- 中国气象局.2017. GB/T 33671-2017 梅雨监测指标[S].北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration. 2017. GB/T 33671-2017 Meiyu monitoring indices [S]. Beijing:Standards Press of China (in Chinese)
- 周天军,任俐文,张文霞.2021.2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J].*中国科学:地球科学*,51(10):1637-1649. Zhou T J, Ren L W, Zhang W X. 2021. Attribution analysis of extreme precipitation during the 2020 Meiyu season and future risk assessment [J]. *Scientia Sinica Terrae*,51(10):1637-1649 (in Chinese). doi:10.1360/SSTe-2020-0325
- 周胜男,王东勇,冯颖,等.2024.安徽省 2021 年梅雨期降水预报检验分析[J].*沙漠与绿洲气象*,18(1):165-173. Zhou S N, Wang D Y, Feng Y. 2024. Verification and analysis of precipitation forecast during Meiyu period of 2021 in Anhui Province [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,18(1):165-173 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.01.021
- Annamalai H, Xie S P, McCreary J P, et al. 2005. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño [J]. *Journal of Climate*,18:302-319. doi:10.1175/JCLI-3268.1
- Ding Y, Liang P, Liu Y J, et al. 2020. Multiscale variability of Meiyu and its prediction: a new review [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,125(7). doi:10.1029/2019JD031496
- Ge J, Geng X, Zhang Y. et al. 2023. Impact of the springtime tropical North Atlantic SST on the South Asian High [J]. *Climate Dynamic*,61:4159-4172. doi:10.1007/s00382-023-06793-9
- Gu W, Li C, Wang X. et al. 2009. Linkage between Mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal timescale [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,26:101-108. doi:10.1007/s00376-009-0101-5
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,77(3):437-470. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Wang B, Wu Z W, Li J P, et al. 2008. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*,21(17):4449-4463. doi:10.1175/2008JCLI2183.1
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y. et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,33:411-432. doi:10.1007/s00376-015-5192-6

(责任编辑 唐国瑛)