

湘赣浙闽地区汛期的降水划分及环流特征

周芳^{1,2}, 王东海^{1,3}, 卫俊宏¹

1 中山大学大气科学学院/南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室/热带大气海洋系统科学教育部重点实验室, 珠海 519082

2 江西省气象台, 南昌 330096

3 澳门海岸带生态环境国家野外科学观测研究站/澳门环境研究院/澳门科技大学创新工程学院, 澳门 999078

摘要 湘赣浙闽地区是中国降水开始最早的地区之一, 先后经历华南前汛期、江淮梅雨期和华南后汛期, 其降水集中性强, 但降水和环流特征与这几者不尽相同。为了研究湘赣浙闽地区汛期降水的基本特征, 本文利用地面气象观测站和 ERA5 再分析数据, 首先对比了不同季风雨期湘赣浙闽地区降水的特征, 然后又分析了其逐候演变特征, 并最终根据候雨日日降水量和强降水站数得出一种划分汛期的新的方式, 依照新的方式定义汛期和汛期的不同阶段, 并探索了入汛前后以及汛期不同阶段降水和环流的演变特征。研究表明: (1) 相较于其他分段方式, 新的定义方法能够更好地描述出湘赣浙闽地区汛期大雨带南北位移和多雨中心东西变化的演变特征。(2) 湘赣浙闽地区的汛期有其不同于其他华南前汛期和江淮梅雨期独特的降水特征, 平均开始于 22 候, 结束于 50 候, 可以分为春雨期、主汛期和后汛期三个阶段, 其中主汛期又可分为主汛期前期和主汛期盛期。春雨

收稿日期 2023-12-06; 网络预出版日期

作者简介 周芳, 女, 1987 年出生, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事极端降水特征及机理研究。

E-mail: 315980443@qq.com

*通讯作者 王东海, E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

资助项目 佛山市社会领域科技攻关专项项目 2120001008761, 广东省基础与应用基础研究重大项目 2020B0301030004, 澳门特别行政区科技发展基金项目(001/2022/NIF), 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室项目(2023B1212060019、2020B1212060025), 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311021001), 南昌国家气候观象台专项项目 JX2023M13

Funded by Foshan Special project of science and technology breakthrough in the social field (2120001008761), Basic and applied basic research project in Guangdong Province (2020B0301030004), The Science and technology Development Fund project of the Macao Special Administrative Region(001/2022/NIF), Key Laboratory of Climate Change and Natural Disaster Research project in Guangdong(2023B1212060019、2020B1212060025), Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (311021001), Nanchang National Climate Observation Platform Special project (JX2023M13)

期开始时间晚于华南前汛期，降水整体分布较为均匀，在南岭南部和江西、湖南北部有两条大雨带；主汛期早于江淮梅雨期开始和结束，降水全面增强，强降水中心位于鄱阳湖平原到武夷山区；后汛期开始时间晚于华南后汛期，降水主要位于福建东南部沿海地区。（3）湘赣浙闽地区在进入汛期以后，大气环流发生了明显的改变。与汛期开始相伴随的大气环流特征主要表现为：南亚高压北上高原，湘赣浙闽地区上空西风气流减弱，副热带高压北抬，脊线位于 18-21°N，低空西南气流和超低空偏南风均增强，水汽大幅增加，这些特征与华南前汛期及江淮梅雨期不同。汛期不同阶段环流的演变主要体现在低槽和副热带高压的位置、低空气流的强度和低层风速辐合区位置的位移等等。这些结果有助于我们更好地理解湘赣浙闽地区汛期降水的时空分布特征及其产生机制。

关键词 汛期；湘赣浙闽；降水特征；气候特征；环流特征

文章编号 2023159A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Precipitation classification and circulation characteristics during the flood season in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian regions

ZHOU Fang ^{1,2}, WANG Donghai ^{1,3}, WEI Junhong ¹

1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University/Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai)/Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies/Key Laboratory of Tropical Atmosphere-Ocean System, Zhuhai 519082

2 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

3 National Observation and Research Station of Coastal Ecological Environments in Macao, Macao Environmental Research Institute, Macao University of Science and Technology, Macao SAR 999078, China

Abstract The Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian regions (hereafter referred to as XGZM) correspond to one of the areas where precipitation begins earliest in China. They have experienced the pre-flood period in South China, the Meiyu period in the Yangtze and Huai River valley, and the post-flood period in South China. The precipitation is highly concentrated, but the precipitation and circulation characteristics are different from the other counterparts. In order to

study the basic characteristics of precipitation during the flood season in XGZM, this paper uses the ground meteorological observation stations and ERA5 reanalysis data to first compare the characteristics of precipitation over XGZM in different monsoon rain periods, and then analyze its evolution characteristics by each pentad. Finally, a new way of classifying the flood season based was proposed based on the daily precipitation and the number of heavy precipitation stations on rainy days. The flood season and the different stages of the flood season were defined according to the new method. The precipitation characteristics before and after the flood season and at different stages of the flood season, as well as the evolution characteristics of background circulation, were explored. The study shows that: (1) Compared with other segmentation methods, the new definition method can better describe the evolution characteristics of the north-south displacement of the heavy rain belt and the east-west change of the rainy center during the flood season in XGZM. (2) The flood season in XGZM has its own unique precipitation characteristics that are different from the pre-flood season in South China and the Meiyu period in Yangtze and Huai River Valley. On average, the flood season in XGZM starts at the 22nd pentad and ends at the 50th pentad. It can be divided into three stages: the spring rainy season, the main flood season, and the post-flood season, among which the main flood season can be divided into the early stage of the main flood season and the peak stage of the main flood season. The onset of the spring rainy season (i.e., the first stage) is latter than the pre-flood season in South China. The overall distribution of precipitation in the spring rainy season is relatively even, with two heavy rain bands in the southern part of Nanling Mountain area and northern part of Jiangxi and Hunan. The main flood season (i.e., the second stage) begins and ends earlier than the Meiyu period in Yangtze and Huai River valley. The precipitation in the main flood season is enhanced comprehensively, with the center of heavy precipitation located from the plain of Poyang Lake to Wuyi Mountain area. The post-flood season (i.e., the third stage) starts later than the post-flood season in South China. The precipitation in the post-flood season is mainly located in the coastal areas of southeastern Fujian. (3) After entering the flood season, the atmospheric circulation in XGZM has changed significantly. The atmospheric circulation characteristics associated with the beginning of the flood season are mainly as follows: (a) the South Asian high pressure moves northward over the plateau, (b) the westerly airflow over XGZM area weakens, (c) the subtropical high pressure rises northward, (d) the ridge is located at 18-21°N, (e) the low-altitude southwest jet stream and the ultra-low altitude southerly jet stream are both established and strengthened, and (f) the moisture transport is greatly increased. These characteristics are different from those of the pre-flood period in South China and the Meiyu period in Yangtze and Huai River valley. The evolution of the circulation at different stages of the flood season is mainly reflected in the positions of the trough and the subtropical high, the strength of the low-level wind speed and the displacement of the low-level wind speed convergence zone, etc. These results help us better understand the spatiotemporal distribution characteristics and generation mechanism of the flood season precipitation over XGZM.

Keywords: flood season; XGZM; precipitation characteristics; climatic characteristics; circulation characteristics

1 引言

湘赣浙闽地区（湖南、江西、浙江、福建四省）受到热带季风和副热带季风的共同影响，是气候意义上的暴雨和极端降水多发区，也是防汛抗旱的关键区（陈莫非等，2021；王志寰等，2019；吴绍洪等，2016）。已有研究表明，是中国东部雨季开始和结束最早的地区（陈绍东等，2003），也是中国东部的强降水中心之一（齐庆华，2019）。每年夏半年（4-9月）该地区先后经历江南春雨期、华南前汛期、江淮梅雨期、华南后汛期等多个大雨带的共同影响，降水的区域性和持续性强，极端降水常造成严重的城乡内涝、山洪泥石流和中小河流洪水，对经济发展和人民生命财产安全造成严重的威胁（Huang et al., 2007; Ding et al., 2005; Zhai et al., 2005; 黄荣辉等，2011; Luo et al., 2016; 陈晓红等，2020; 方浩等，2019; 付超等，2021; 姚蓉等，2020; 沈晓玲等，2022）。纵横交错的山脉、密布的河流湖泊以及大型湖泊（洞庭湖、鄱阳湖）的湖陆分布等复杂下垫面因素，导致该地区降水的分布与地形密切相关（张剑明等，2011; 马锋敏等，2013; 傅敏宁等，2013; 孙琦等，2015）。

湘赣浙闽地区降水的空间分布有着鲜明的一致性的特征（常宏等，2007; 黄志珍等，2022）。同时，四省由于地理位置的东西差异，其降水雨峰出现的时间有差异。湖南省降水量主要集中在4—8月（邝美娟等，2013），占全年的63.09%；江西省的暴雨集中在3—9月，以汛期4—7月为最多（单九生等，2001）；浙江省的降水受季风进退、台风活动的影响，年内分配很不均匀，主要集中在4—9月的梅汛期和台汛期，降水量占全年的65%（黄志珍等，2022）；福建省强降水集中在5—9月，西北太平洋夏季风的强弱影响着汛期总雨量的多寡（常宏等，2007）。因此，湘赣浙闽地区的强降水总体集中在4-9月。

由于地理纬度带相同，西风带和东风带的天气系统常常先后影响湘赣浙闽四省，充分认识其汛期降水的时空分布特征和规律是提高预报准确率的前提。然而目前还没有将湘赣浙闽四省作为统一的整体来进行降水特征研究的工作，该地区汛期如何客观定义、如何分段，每个阶段的降水和环流特征是什么，这些问题都还没有系统性的深入研究。开展这一地区汛期降水的特征的研究，能够为政府防

灾减灾科学决策提供重要的科学依据，对应对洪涝灾害、保护生态安全、保障粮食安全，具有非常重要的科学意义和社会价值。因此，本文将在探讨 1980-2020 年湘赣浙闽地区 314 个国家级自动站 4-9 月降水时空演变特征后，提出该地区汛期的客观识别方法，统计汛期、非汛期之间以及汛期不同阶段降水和环流特征的不同，并在此基础上，分析该地区 1980-2020 年汛期开始时间、结束时间、持续时间和汛期雨量的气候特征及变化趋势，以充实对湘赣浙闽地区降水时空演变特征的认识，为提高降水预报准确率提供有价值的技术参考。

2 数据和方法

2.1 数据

本文选取的日降水观测资料来源于中国气象局（CMA）国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）。该套数据集经过严格的质控，以确保数据的准确性。本文所使用的数据均为标识为数据正确的日降水资料。鉴于各地面气象站建站时间不一致，为了保证历史观测资料的长度相同，且尽可能充分，本文最终选用了湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月缺测率低于 1% 的共 314 个站点的逐日降水数据作为日降水观测资料（分布见图 1）。

本文还采用了来自欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasting，简称 ECMWF）的第五代再分析资料 ERA5（ECMWF Reanalysis 5th Generation），分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间间隔为 1 小时，用来研究汛期前后及汛期不同时段环流形势特征，以期理解汛期前后湘赣浙闽地区降水时空演变的可能原因。

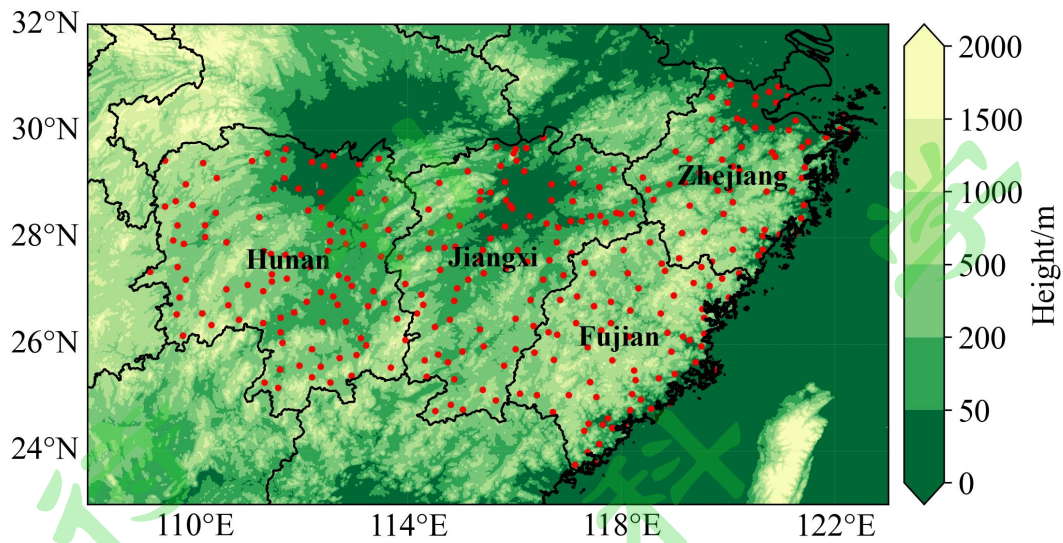


图 1 湘赣浙闽地区 314 个国家级气象观测站（红色实心圆点）分布与地形高度（阴影，单位：m），黑色实线表示省界

Fig.1 Spatial distribution of the 314 national-level automatic weather stations (AWSs) over the Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian regions (red solid dots). Topography is shown in shading (unit: m). The black solid lines represent provincial boundaries.

2.2 方法

本研究定义湖南、江西、浙江、福建四省为湘赣浙闽地区。

2.2.1 不同季风雨期湘赣浙闽地区降水的特征

由于湘赣浙闽地区在地理分区上横跨江南华南，为了更深入地分析这一带地区降水随季风雨带演变的特征，本文将分别分析在华南前汛期前后、江南梅雨期前后、南海夏季风爆发前后，这一地区的降水特征。本研究采用业务现行规定（气预函[2014]2 号文）来统计华南前汛期开始和结束日期，采用国家标准《梅雨监测指标》（GB/T 33671-2017）来统计江南梅雨期的开始时间、结束时间（大部分站点位于江南梅雨区，因此选择江南梅雨期），采用气象行业标准（QX/T 633-2021）统计南海季风爆发的日期，并分别统计了这些日期前后湘赣浙闽地区的降水特征。

据统计，1980—2020 年华南前汛期开始日期（图 2）平均为 4 月第 1 候，结

束日期平均为 7 月第 1 候，平均持续时间 91 天。江南入梅日平均在 32 候（6 月第 2 候），出梅日平均在 38 候（7 月第 2 候）；梅雨期长度平均为 29 天。南海夏季风爆发的日期（图 3c）平均在第 29 候（5 月第 5 候），最晚在 32 候（6 月第 2 候），其中 2013—2020 年南海夏季风爆发时间均偏早于平均候。从图 2 中我们可以看到华南前汛期与江南梅雨期部分时间有重叠，其中 1985、2011-2013、2016-2017、2020 年华南前汛期的时间跨度完全包含了江南梅雨期的时间跨度。

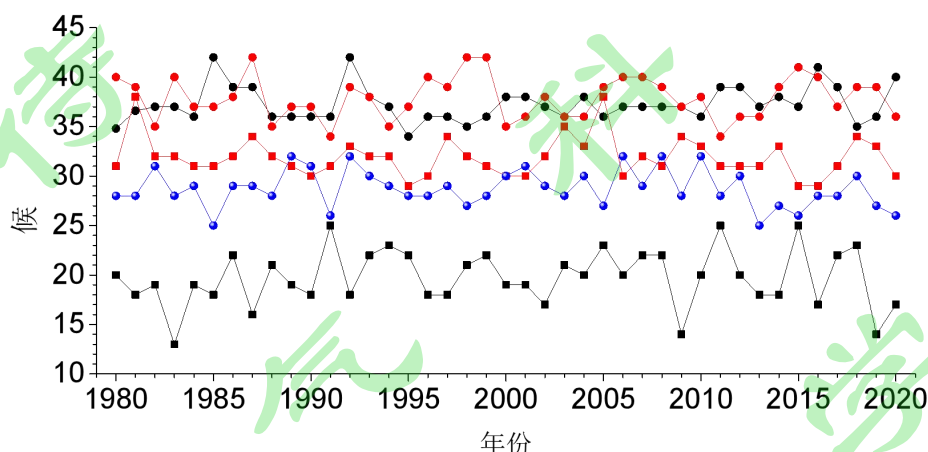


图 2 1980—2020 年季风爆发候（蓝色实线）、华南前汛期开始候（黑色方块）、华南前汛期结束候（黑色圆点）、江南梅雨期开始候（红色方块）、江淮梅雨期结束候（红色圆点）折线图

Fig.2 The onset of the monsoon (blue solid line with blue dots), the onset of the pre-flood season in South China (black solid line with black squares), the end of the pre-flood season in South China (black solid line with black dots), the onset of the Meiyu period in the south of the Yangtze River (red solid line with red squares), the end of the Meiyu period in the Yangtze and Huai River valley (red solid line with red dots) from 1980 to 2020. The x axis represents the time series in year, and the y axis represents the pentad in each corresponding year.

与大多数研究采取日平均雨量作为降水特征研究的指标不同，为了凸显汛期内的降水强度的变化，本文利用雨日日平均雨量这一指标来研究湘赣浙闽地区总体和不同季风雨期内的降水空间分布特征。雨日日平均雨量的定义是各个站点所有日降水 ($\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 的雨量总和除以雨日数（日降水量超过 0.1mm 的天数）。

2.2.2 汛期的定义

前人研究雨季的开始时间时主要有两种方法。一种是基于不同时间段内的降水量或降水量的比值，来定义的雨季开始日期。如陶诗言（1958）利用半个月降水量/5-8月总降水量的百分比来确定雨季的开始日期。郭其蕴等（1981）定义候雨量 $\geq 25\text{mm}$ 作为雨季开始的日期。还有利用旬雨量与年平均降水量（张家诚等，1992）、年总降水量（林之光等，1985）、多年平均旬雨量的比值作为雨季的开始日期指标。另一种是通过一些物理量的阈值，来定义雨季的开始和结束。

参考前人方法，本文研究了湘赣浙闽地区逐候的雨日日平均雨量和强降水站次数的特征。强降水的定义为日降水量（每日 08 时（北京时）到次日 08 时累积降水量 $R_{24} \geq 25\text{ mm}$ ）达到大雨以上，并根据 $25\text{ mm} \leq R_{24} < 50\text{ mm}$ 、 $\geq 50\text{ mm}$ 划分为大雨、大到暴雨和暴雨以上三种量级，分别统计了不同量级的强降水站次数年平均随候的分布。

然后，利用雨日日平均雨量和强降水日数逐候的变化，得出一种湘赣浙闽地区汛期定义和分段的方法。

2.2.3 汛期的变化趋势

本文对 1980—2020 年的 41 年时间序列使用 10 年滑动平均以提取年代际分量，利用最小二乘法计算时间序列的线性变趋势系数，并采用 t 检验确定其统计显著性。

2.2.3 汛期前后的形势特征

本文使用了 ERA5 再分析资料对湘赣浙闽地区汛期开始日前后的环流形势场进行对比分析，水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

3 湘赣浙闽地区 4-9 月降水特征

3.1 总体特征

图3显示了湘赣浙闽地区1980—2020年4—9月年平均总降水量的空间分布。湘赣浙闽地区夏半年平均有三个多雨中心，分别位于江西北部鄱阳湖平原、江西东北部-福建西北部的武夷山区、福建东南沿海地区和浙闽两省交界地区，汛期

平均降水量可以达到 $1278\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ — $1532\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ，而浙江北部浙北平原、湖南南部衡邵盆地降水较少，仅有 595 — $895\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。高山站的降水比周边站点的雨量大，如湖南南岳山、江西庐山、福建九华山的汛期年平均降水量都超过了 $1200\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体来看，降水的空间分布与地形分布相关，河谷地区、山区以及沿海地区更多。尚未见到四省4-9月基本降水特征的研究，因此无法对比基本降水特征与前人研究的异同。并且湘赣浙闽地区的降水的空间分布与极端降水、暴雨的空间分布相似（马锋敏等，2013；陈晓红等，2020；陈红专等，2021；唐传师等，2021）。

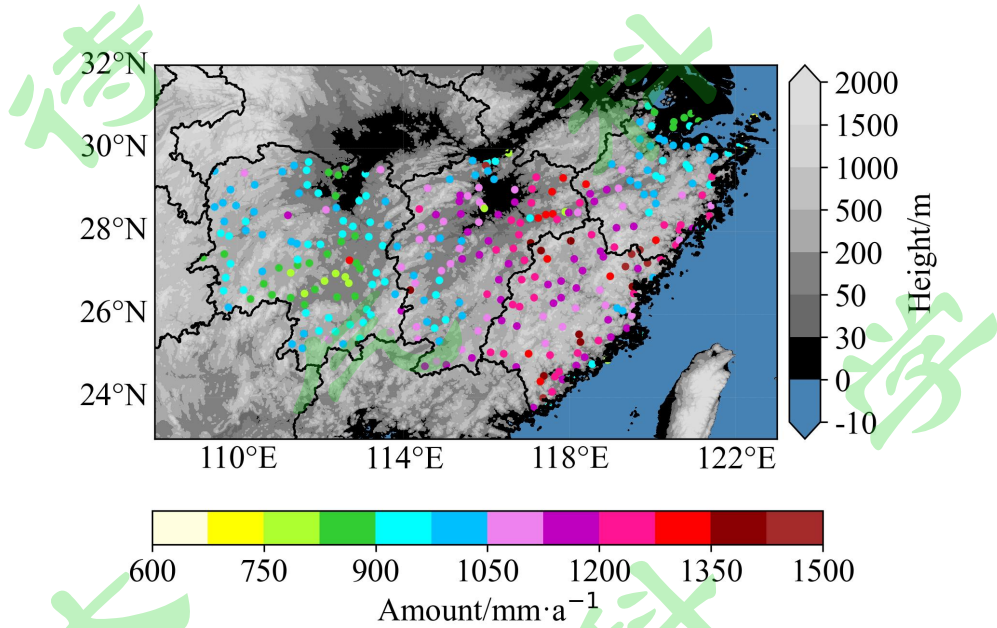


图 3 1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区年平均降水量（单位： $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ）的空间分布图（灰色填色为高度，单位为 m；不同颜色的点为雨量）

Fig. 3 Spatial distribution map of average annual precipitation (unit: $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) in XGZM from April to September during 1980-2020. Gray fill is height in m. Dots of different colors are rainfall.

3.2 夏半年不同阶段降水分布特征

进一步分析夏半年湘赣浙闽地区雨日日平均雨量的空间分布（图 4a）可以看出，其分布与年平均降水量分布相似，除了江西东北部-福建西北部、福建东南沿海地区降水较多外，湖南北部的雨日日平均降水量也较多。将湘赣浙闽地区夏半年的降水分为季风爆发前和季风爆发后两个时段，可以看出两段的降水空间分布有显著的差异。季风爆发前（图 4b），降水大值区位于鄱阳湖平原—信江河谷—武夷山区，浙北平原及浙东北沿海地区降水量最少。季风爆发后（图 4c），

湘赣浙闽地区 27°N 以北降水普遍增强，出现三个多雨中心，分别位于鄱阳湖平原—信江河谷、福建东部沿海地区和湖南西北部地区。

将夏半年分为华南前汛期前、华南前汛期期间和华南后汛期三个时段，得出降水分布为图 4d—f。华南前汛期前（图 4d）和华南前汛期期间（图 4e）的降水空间分布很相似，都是在江西北部鄱阳湖平原降水最强，只不过在前汛期期间强降水中心略向南向东扩展至武夷山区，华南后汛期（图 4f）降水分布发生了较大的变化，强降水分为两条带，一条位于 $28-30^{\circ}\text{N}$ 之间呈现东西带状，另一条位于福建沿海地区。由此可见，利用华南前汛期对汛期进行划分，能够凸显出华南前汛期和后汛期雨带的分布型的不同，可以将台风雨带和华南前汛期的雨带明显区分开；华南前汛期前和华南前汛期期间的降水强度分布差异不大，仅能大致看到湖南西部山区和江西南部山区的降水强度变化，而降雨量中心鄱阳湖平原至信江河谷地区在华南前汛期开始之前降水量已经增加。

将夏半年分为江南梅雨期之前、江南梅雨期期间和江南梅雨期之后三个时段，得出降水分布为图 4g-i。入梅前（图 4g），江西福建两省大部分地区的降水已经比较强了，入梅后（图 4h）湘赣浙闽地区降水全面增强，有两条大雨带分别位于 $27-30^{\circ}\text{N}$ 之间以及福建沿海地区，出梅后（图 4i）强降水主要位于福建东南部沿海地区。江南梅雨期对汛期的划分，更多突出的是东西向大雨带南北移动的平均特征，无法反映雨带中大雨量中心东西位置的分布细节，同时，江南梅雨期与江南出梅后，福建沿海的台风雨带始终存在，说明这种分段方式可能将台风降水与梅雨降水混在一起，仍不是最佳的汛期分段方式。

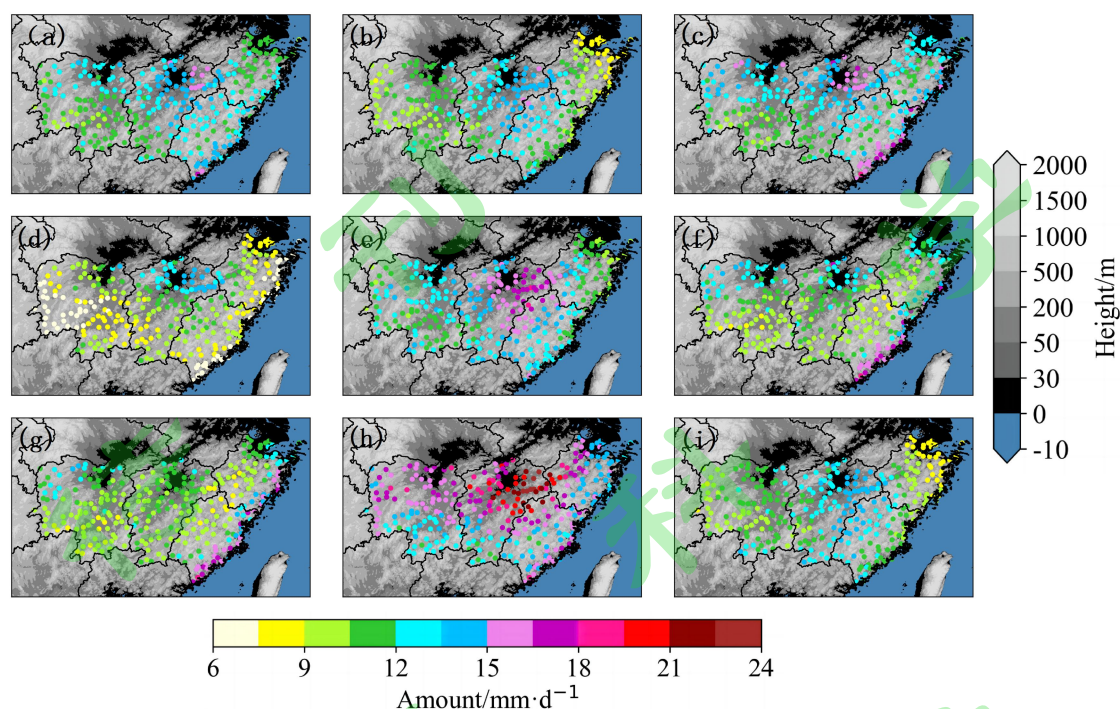


图 4 1980—2020 年湘赣浙闽地区汛期平均雨日日降水量（单位： $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ）：

(a) 4-9 月、(b) 季风爆发前、(c) 季风爆发后、(d) 华南前汛期前、(e) 华南前汛期期间、(f) 华南后汛期、(g) 江南入梅前、(h) 江南梅雨期期间、(i) 江南出梅后

Fig. 4 Mean daily precipitation (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) during the flood season in XGZM from 1980 to 2020: (a) April-September, (b) Pre-monsoon outbreak, (c) post-monsoon outbreak, (d) before the pre-flood season in South China, (e) during the pre-flood season in South China, (f) the post-flood season in South China, (g) before the Meiyu period in the south of the Yangtze River, (h) during the Meiyu period in the south of the Yangtze River, (i) after the Meiyu period in the south of the Yangtze River

综上所述，湘赣浙闽地区夏半年降水的空间分布整体表现为三个多雨中心，一个少雨中心。其中鄱阳湖平原—信江河谷地区在季风爆发前降水已较强，并且一直持续到江南梅雨期结束，武夷山区是在华南前汛期期间加强的，江南梅雨期期间也是一个多雨中心，福建东南沿海地区的强降水主要是出现在华南后汛期。雨带的变化既有南北大雨带的整体移动，也有大雨带上多雨中心的東西位置变化；但是不论用华南前、后汛期，梅雨期前后或是季风爆发前后对汛期进行分段，都不能同时体现上述两种特征，因此需要寻找一种新的汛期划分办法，能够更加突出这一带地区降水的特征。下面将详细分析 4—9 月湘赣地区逐候的降水演变

特征。

3.3 逐候降水特征

3.3.1 雨日日平均雨量逐候演变特征

从图 5 可以看到，湘赣浙闽地区的雨日日平均降水量呈现多峰结构。从中位数来看，主峰值位于 35 候，达到主峰值前的第 22 候、第 27 候分别有两个次峰值，这两者均发生在季风平均爆发候之前，主峰值以后，在 37 候再次达到峰值，这对应着江淮梅雨期，37 候以后由于副高逐渐西伸加强控制长江以南地区，因此降水迅速减少，一直到 41 候降水再次增加，而后降水进入多波期，一直到 50 候降水明显减少。从极大值来看，主峰值位于第 34 候，最大达到了 $35\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ，达到主峰值前在 22 候和 27 候也有两个次高峰值，这与中位数相同，主峰值之后，在 38 候再次达到峰值，与中位数一致，此候强降水也对应着江淮梅雨期，之后在 42 候达到第三个峰值，这之后的极大值也呈现多波动的情况，且波峰波谷对应的值差异不大。从 5 月第 3 候到 7 月第 3 候，旬内雨日日平均雨量超过汛期的雨日日平均雨量。

从上面结果分析表明，季风爆发前，降水有两次阶段性加强，再回落。季风爆发后，降水持续加强，且在 6 月中旬进入江南梅雨期候达到峰值；6 月下旬到 7 月上旬进入长江流域梅雨期，雨日平均日雨量持续较大；7 月上旬后，降水迅速减弱；进入华南后汛期后，受台风影响，降水再次略有增强，但总体上强度小于季风爆发后到长江流域梅雨期之间，且由于台风影响的时间差异较大，因此，其各候的降水分布较为均匀，没有明显的峰值或谷值，一直到 9 月上旬降水显著减少。湘赣浙闽地区降水集中发生在 5 月第 3 候到 7 月第 3 候。

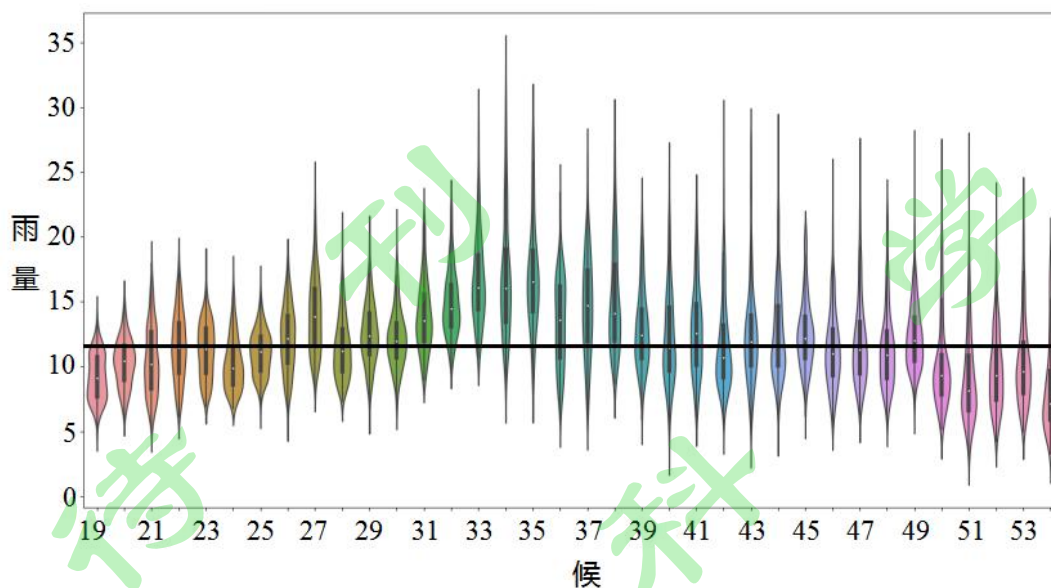


图5 1980—2020年4—9月逐候雨日日平均降水量（单位： $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ）

小提琴图（蓝色横实线为4-9月雨日日平均雨量线）

Fig. 5 Violin chart of mean daily precipitation (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) for the rainy days from April to September during 1980-2020. The blue horizontal solid line represents the daily mean rainfall for the rainy days from April to September.

3.3.2 强降水站（次）数逐候演变特征

图6为1980—2020年湘赣浙闽地区不同量级的强降水日逐候变化图，雨量标准采用前述给定的标准。从图中可以看到，在4—9月各个量级的强降水均有以下的特征：从20候开始，大雨的站次超过4—9月平均站次；24候之前站次减少，之后明显增加，25候开始，连续2候候内达到大雨和大到暴雨降水的站次超过4—9月平均站次；28候站次数下降，之后开始快速上升，候内暴雨站次32—34候达到最多，普遍在50站次以上；36候站次数再次下降；39候开始，连续两候达到大雨、暴雨的站次均低于汛期该量级降水的平均站次，39~50候候内站次在汛期平均站次附近上下波动，50候以后全部低于汛期平均站次又有快速下降。这种变化规律与候内雨日日平均降水量一致。

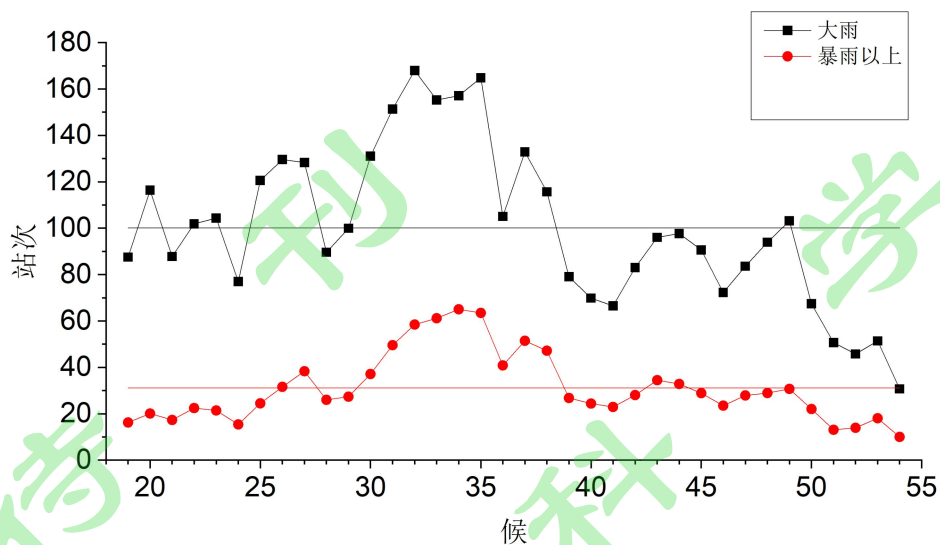


图 6 1980—2020 年湘赣浙闽地区不同量级降水站（次）随候的分布图（黑色实线为大雨平均站次，红色实线为暴雨以上平均站次）

Fig. 6 Distribution of precipitation stations (times) of different magnitudes in XGZM from 1980 to 2020. The black solid line is the average number of heavy rainfall stations. The red solid line is the average number of stations with more than stormy rainfall.

3.4 湘赣浙闽地区汛期的定义

根据上面的讨论，可以根据候内雨日日平均雨量和候内强降水站次数定义汛期及主汛期的开始和结束日。为描述简便，首先说明两个判定条件：（1）雨量条件：候内雨日日平均雨量超过当年 4-9 月平均候雨日日平均雨量；（2）强降水站数条件：候内强降水站（次）数超过 1980-2020 年 4-9 月平均候强降水站次数。再给出两个定义：（1）阶段雨季开始日：候内日雨量首次超过当年 4-9 月平均候雨日日平均雨量的日期；（2）阶段雨季结束日：候内最后一个强降水日（大雨及以上）。下面详细说明单站、单省和湘赣浙闽区域的汛期、主汛期开始日和结束日的定义。

对于单站而言，仅通过条件（1）定义：首次候内满足条件（1）时，定义该候的阶段雨季开始日为汛期开始日；连续两候满足条件（1）时，定义首候的阶段雨季开始日为主汛期开始日；当连续两候不满足条件（1）时，则定义阶段雨

季结束日为主汛期结束日；当连续三候不满足条件（1）时，则定义三候中最后一个阶段雨季结束日为汛期结束日。对于单省而言，与单站的区别在于需要同时判定条件（1）和条件（2），其他定义一样。对于湘赣浙闽地区而言，四省的最早的汛期（主汛期）开始日就是该区域的汛期（主汛期）开始日，四省最晚的汛期（主汛期）结束日，就是该区域的汛期（主汛期）结束日。

4 湘赣浙闽地区汛期降水的特征

以汛期开始日和结束日，统计出 1980-2020 年每年的汛期，并利用主汛期开始日和主汛期结束日，将每年的汛期分为三个阶段。具体方法如下：汛期开始日到主汛期开始日，为春雨期；主汛期开始日至主汛期结束日，为主汛期；主汛期结束日至汛期结束日为后汛期。不同阶段降水的特征分析如下。

平均 4 月 2 候（22 候）开始，候内日平均雨量开始超过多年 4-9 月平均，雨量增加，至 4 月 6 候（24 候）减少，这段时间内由于气温回暖、地面低压发展，但副热带西风急流仍位于江南上空，高空槽和地面冷空气活跃，因此以强对流天气为主，强冰雹和雷暴大风多发，短时强降水和局地暴雨开始产生，但整体降水分布均匀，有 2 条多雨带，一条位于南岭南部，另一条位于江西、湖南北部，可以称之为春雨期（图 7a）。由前分析，春雨期开始时间比华南前汛期开始时间要晚，且与其相连。需要注意的是，此春雨期与现有的“江南春雨”不同（万日金和吴国雄，2008；王黎娟和高龙龙，2017），前者开始的定义为“长江以南、南岭以北出现大范围降水日降水达到 4mm 以上”，这一标准显然低于本研究中对汛期第一阶段春雨期的标准。

平均 25 候（5 月第 1 候）至 38 候（7 月第 2 候），候内强降水站次和日平均降水量均超过 4-9 月平均，降水量和降水强度都较大，降水集中、暴雨频发且有一定的对流性，常造成山体滑坡、泥石流等地质灾害、城乡内涝以及区域性洪涝灾害，强降水中心位于鄱阳湖平原到信江河谷，是湘赣浙闽地区的主汛期（图 7b）。主汛期开始时间早于季风爆发前，结束时间也早于出梅日。

平均 39 候（7 月第 3 候）至 49 候（9 月第 1 候），候内雨日日平均降水量在 4-9 月雨日日平均降水量周围上下波动，强降水站次和日数也迅速减小，降水大值区主要位于福建、浙江沿海，主要与台风有关，这一阶段为后汛期（图 7c）。

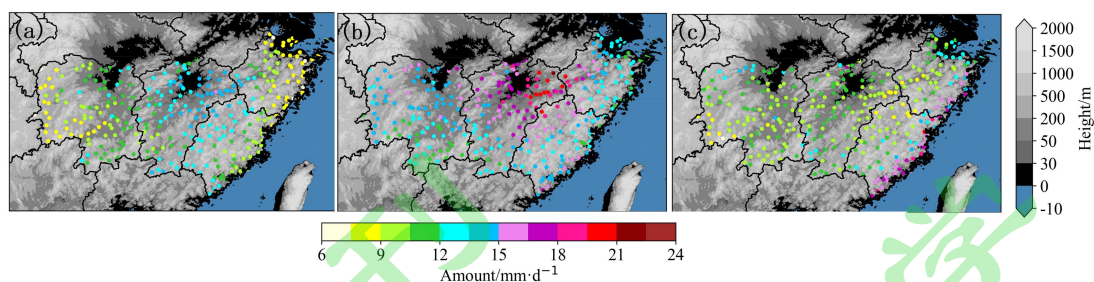


图 7 1980-2020 年湘赣浙闽地区汛期不同阶段雨日日平均降水量（单位： $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ）：

（a）春雨期、（b）主汛期、（c）后汛期

Fig. 7 Mean precipitation on rainy days at different stages of the flood season over XGZM during 1980-2020 (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$): (a) spring rainy season, (b) main flood season, (c) post-flood season

在主汛期期间，降水又可以分为两段。平均 25 候开始，连续 2 候候内强降水站次和日平均降水量增加，并超过汛期平均，气温进一步升高、西南气流开始加强，水汽变得更加充足，降水的对流性仍较强，但多以短时强降水为主，也会伴有区域性雷暴大风和小冰雹天气，同时累计降水增大，往往出现 6 小时至 12 小时内的短时极端暴雨天气，产生局地的山洪地质灾害或城乡内涝灾害。此时的强降水常是由于暖区内的中尺度系统导致的对流性降水所产生，与地形的影响密切相关，强降水带影响范围更为集中（图 8a），主要的降水中心位于江西北部鄱阳湖以东的信江河谷流域以及武夷山区，可能与西南气流在此处有强迫抬升以及风速辐合有密切关系，到了平均 28 候至 31 候，降水再次减弱，而这段时间正是华南前汛期降水最为集中最强的时间段。这一阶段可以称为主汛期前期（5 月第 1 候至 6 月第 1 候）。平均 32 候（6 月第 2 候）开始至 38 候（7 月第 2 候）结束，强降水带从华南北抬到湘赣浙闽地区，降水全面加强，天气尺度系统占主导，降水持续时间长、影响范围广，常形成绵延上千公里的暴雨带，洪涝灾害频繁发生，开始出现横跨多省的区域性暴雨过程，强降水主要发生在江西北部、福建西北部和浙江西部，为主汛期盛期，对应着江南和长江流域梅雨期（图 8b）。

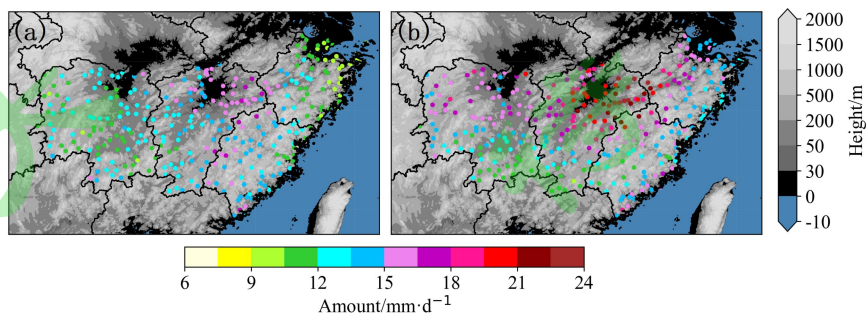


图 8 1980-2020 年湘赣浙闽地区主汛期不同阶段雨日日平均降水量（单位： $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ）：

(a) 主汛期前期、(b) 主汛期盛期

Fig. 8 Mean precipitation on rainy days at different stages of the main flood season over XGZM during 1980-2020 (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$): (a) the early stage of the main flood season, (b) the peak stage of the main flood season

湘赣浙闽地区降水逐候演变特征与多个研究一致。如詹丰兴等（2015）对江南地区（ 110°E 以东、 $25^{\circ}\text{—}28^{\circ}\text{N}$ ）的降水特征进行分析时发现，这带地区到 20 候左右出现第一个峰值，然后降水略有下降，在 24 候左右出现低值，随后降水再逐渐增强，到 34 候左右出现第二个峰值，36 候降水迅速减少。另外，此分段方法中的主汛期盛期与江志红等（2006）发现的降水集中期是一致的。而如前所述，湘赣浙闽地区的汛期还可以细分为三个阶段，其中主汛期也可以细分为三个阶段，这在以前的研究是未见到的。

5 湘赣浙闽地区汛期降水分布变化的可能原因

5.1 入汛前、汛期、出汛后的环流特征

我国的大范围降水及雨带的变化通常是在低位和中高纬环流共同影响下形成的主要影响系统来自西风带、副热带和热带，并分别以长波系统、阻塞系统、副高以及赤道辐合带（ITCZ）和台风为主，他们共同组成了我国大范围降水的基本环流（寿绍文等，2019）。除了上述系统外，季风环流系统也是影响我国雨带南北移动变化的重要天气尺度系统（王遵娅和丁一汇，2008）。低层急流大风带的形成和位置是江南南部初夏雨季发生发展的重要动力条件，降水集中区位于低层急流大风带左侧、高空急流入口区右侧（苗长明等，2014）。

根据汛期的开始和结束时间，将每年的 4-9 月分成 3 个时期，即入汛前、汛期、出汛后，并求每个阶段不同高度处的风场平均。图 9（a—f）显示了不同时期的大气环流特征。入汛前（图 9a），200h Pa 为副热带西风急流，南亚高压中心还位于菲律宾以东的洋面上；汛期期间（图 9b）大气环流发生明显调整，南亚高压向北跃上青藏高原，西风急流北抬减弱，中心最大平均风速减小至 28m/s ，湘赣浙闽地区上空处在西风和西北风的辐散区中；出汛后（图 9c），南亚高压和副热带西风急流进一步向北移动，湘赣浙闽地区上空为西北风的辐合。入汛前（图 9d），500 hPa 副热带高压平均脊线位于 15°N ，平均中心位于菲律宾以东

的洋面上，南支大槽平均位于 100°E ；入汛后（图 9e）， 500 hPa 副热带高压北抬，平均脊线位于 $20\text{--}21^{\circ}\text{N}$ ，西风带上有南北两支低槽；出汛后（图 9f）平均反气旋环流位于华南，湘赣浙闽地区受减弱的偏西风影响。低层变化最为明显， 850 hPa 高度上，入汛前（图 9g）为较强的西南风，湘赣浙闽地区上空湿度开始增加；入汛后（图 9h）平均有两支低空大风区，一支从 110°E 附近经北部湾海面、广西向北向西卷入西南气旋性环流中，另一支则从南海北部海面经过广东进入湘赣浙闽地区，大风速轴位于 116°E 附近；出汛后（图 9i）从西南季风转变为反气旋环流。 925 hPa 高度上，入汛前（图 9j） 925 hPa 南海到广东广西有东南风产生；入汛后（图 9k）偏南风大风速区进一步向北挺进，并在 $26\text{--}28^{\circ}\text{N}$ 附近产生辐合；出汛后（图 9l）偏南气流转变为东北气流。东亚夏季风环流的加强以及西风气流的减弱使得湘赣浙闽地区进入汛期，而高层西风加强及低层转变为东北风，汛期结束。

水汽是降水的主要来源。由图 9 可见， 850 hPa 高度上入汛前（图 9g），湘赣浙闽地区上空水汽主要来自孟加拉湾和南海北部，水汽随着西南急流向北输送到 25°N 以南的南岭区域，越往北越弱，比湿达到了 $6\text{--}10\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ；入汛后（图 9h），来自孟加拉湾的水汽输送显著加强，向北扩展到 30°N （长江流域附近），比湿也增加到 $10\text{--}14\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ；出汛后（图 9i），湘赣浙闽地区 850 hPa 受反气旋南部的东北风气流影响，东北风大风速区在福建沿海 120°E 处有辐合，比湿仍维持 $12\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以上。 925 hPa 高度上，入汛前（图 9j）水汽主要来自于西太平洋，水汽随着东南气流输送至了华南，在 24°N 产生辐合，在 115°E 附近有一只平均风速为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南风气流将水汽输送到 28°N 附近，湘赣浙闽地区比湿达到了 $6\text{--}12\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ；入汛后，西太平洋上的反气旋向东移动，孟加拉湾到南海海面上的西南风迅速加强，平均达到了 $6\text{--}8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，平均风速为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南风大风速区一条从 113°E 进入湖南，另一条从 $115\text{--}116^{\circ}\text{E}$ 进入江西，在 29°N 附近产生辐合，使得湘赣浙闽水汽含量大幅增加，比湿达到了 $12\text{--}16\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ；出汛后，从东海上三支相对明显的东北风（ 111°E 、 115°E 和 120°E ）进入湘赣浙闽地区，比湿减少为 $10\text{--}14\text{ g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 。可见，偏南风水汽输送和辐合的变化对于湘赣浙闽地区汛期的起始具有重要作用。

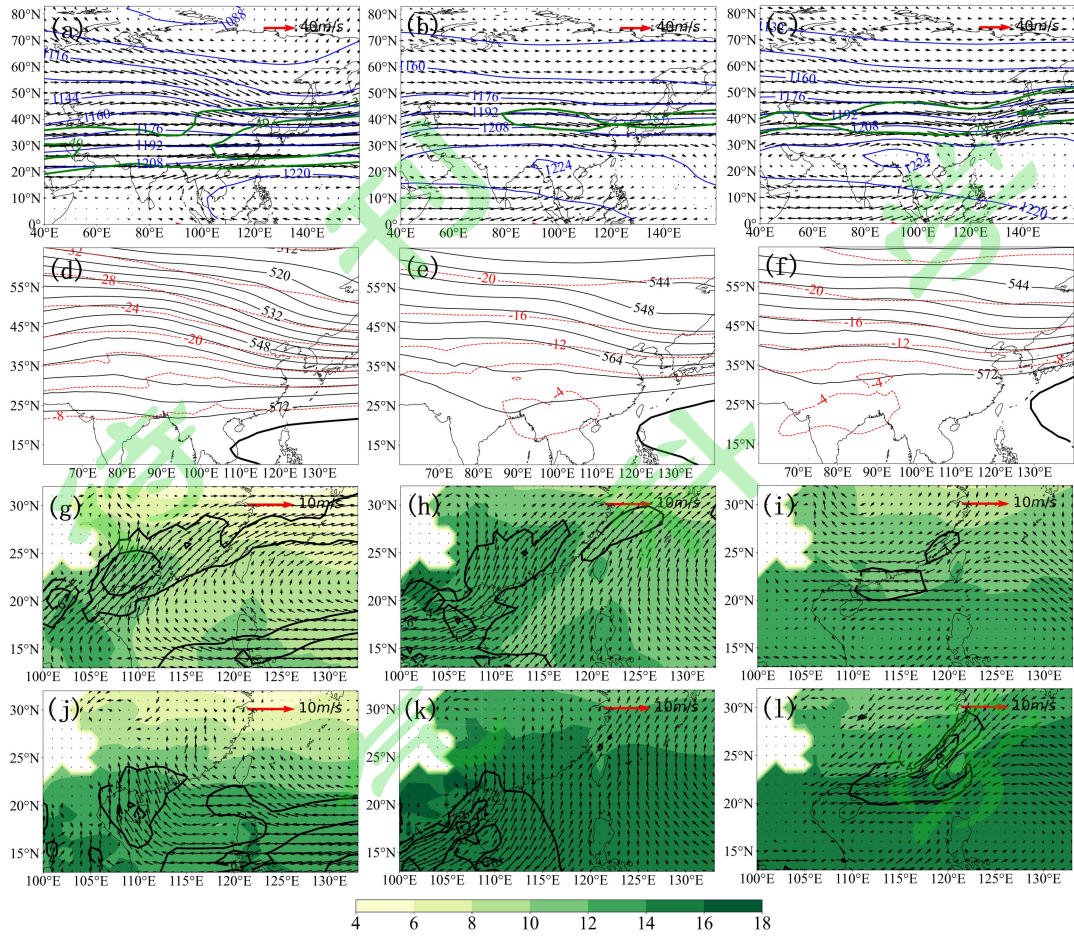


图 9 湘赣浙闽地区入汛前 (a, d, g, j), 汛期 (b, e, h, k)、出汛后 (c, f, i, l) 环流特征: 平均 200hPa 高度场 (a—c, 黑色实线, 单位: agpm)、风场 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 绿色实线为等风速线), 500hPa 高度场 (d—f, 黑色实线, 加粗线为副高标识, 单位: agpm)、温度场 (红色虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 850hPa 的风场 (g—i, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 绿色实线为等风速线)、比湿 (阴影区, 单位: $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$), 925hPa 的风场 (j—l, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 绿色实线为等风速线)、比湿 (阴影区, 单位: $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$)

Fig. 9 Circulation characteristics in XGZM before the flood season (a, d, g, j), during the flood season (b, e, h, k), and after the flood season (c, f, i, l): the average wind at 200 hPa (a-c, black solid line, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), wind field (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, green solid lines represent the wind speed contours), the geopotential height field at 500 hPa (d-f, black solid line, bold lines represent subtropical high, unit: agpm), wind field at 850 hPa (g-i, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, green solid lines represent wind speed contours) with specific humidity (shaded area, unit: $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$), wind field at 925 hPa (j-l, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, green solid lines represent wind speed contours) with specific humidity (shaded area, unit: $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$)

5.2 汛期不同阶段的环流特征

进一步根据主汛期的开始时间和结束时间,将汛期分为三个时期,即春雨期、主汛期和后汛期。图 10 显示了汛期不同时期的大气环流特征。可以看到,在春雨期,湘赣浙闽地区 200hPa 上空为西风环流(图 10a),主汛期和后汛期转为反气旋东部脊及其东北侧的辐散区中,在主汛期(图 10b),副热带西风大风速区位于 30-45°N 之间,其南侧的辐散区有利于加强上升运动的产生,后汛期(图 10c)西风大风速区显著北抬,湘赣浙闽地区为弱西风。前汛期 500hPa(图 10d)副热带高压位于中南半岛到菲律宾一带,进入主汛期后北抬(图 10e),平均脊线位于 18°N 附近,东亚和孟加拉湾以北—青藏高原以东有两支平均低槽,这使得槽后冷空气与副高西北侧的暖湿空气持续交汇在湘赣浙闽地区,有利于该地区强降水的维持;进入后汛期后(图 10f),中纬度锋区偏北,且平均槽减弱,位于东北——华北一带,副热带高压继续北抬西退,脊线位于 28°N,孟加拉湾到印度半岛有低压,湘赣浙闽主要受副高南侧的东风带系统影响。850hPa 高度上,春雨期(图 10g)和主汛期期间(图 10h)均有两支水汽输送通道,他们分别通过孟加拉湾槽前西南风和副热带高压西侧的南风将水汽输送到华南大陆,再分别分支转向东和西影响湘赣浙闽地区;后汛期(10i)西南风减弱,大风速区分别位于东海海面上和广西。925hPa 高度上,春雨期期间(图 10j),副热带高压西南侧的东南风气流向西越过南海海面到达江南华南,其中东南风大风速区(4-6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)北推至广西,,而平均风速为 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风大风速区位于 115°E,南风在 27°N 附近产生辐合;主汛期(图 10k),副热带高压反气旋向东移动,西南季风从中南半岛向华南延伸,25°N、115°E 附近的平均西南风达到了 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,副热带高压东部的西南风在台湾海峡达到最强,30°N 为弱东风,因此在 28-30°N 之间形成了平均切变线和低层辐合区,水汽在这里辐合有利于水汽的增加和降水增强,比湿普遍比春雨期增加 2-3 $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$;到了后汛期(图 10l),4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风大风速区再次南退到南海海面上,比湿仍有 14-16 $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$,在 125-130 °E, 20°N-25°N 的区域内东南风顺转为西南风,并与路上弱西南气流在浙江、福建沿海形成辐合,这可能是后汛期降水主要集中在这些地区的原因之一。

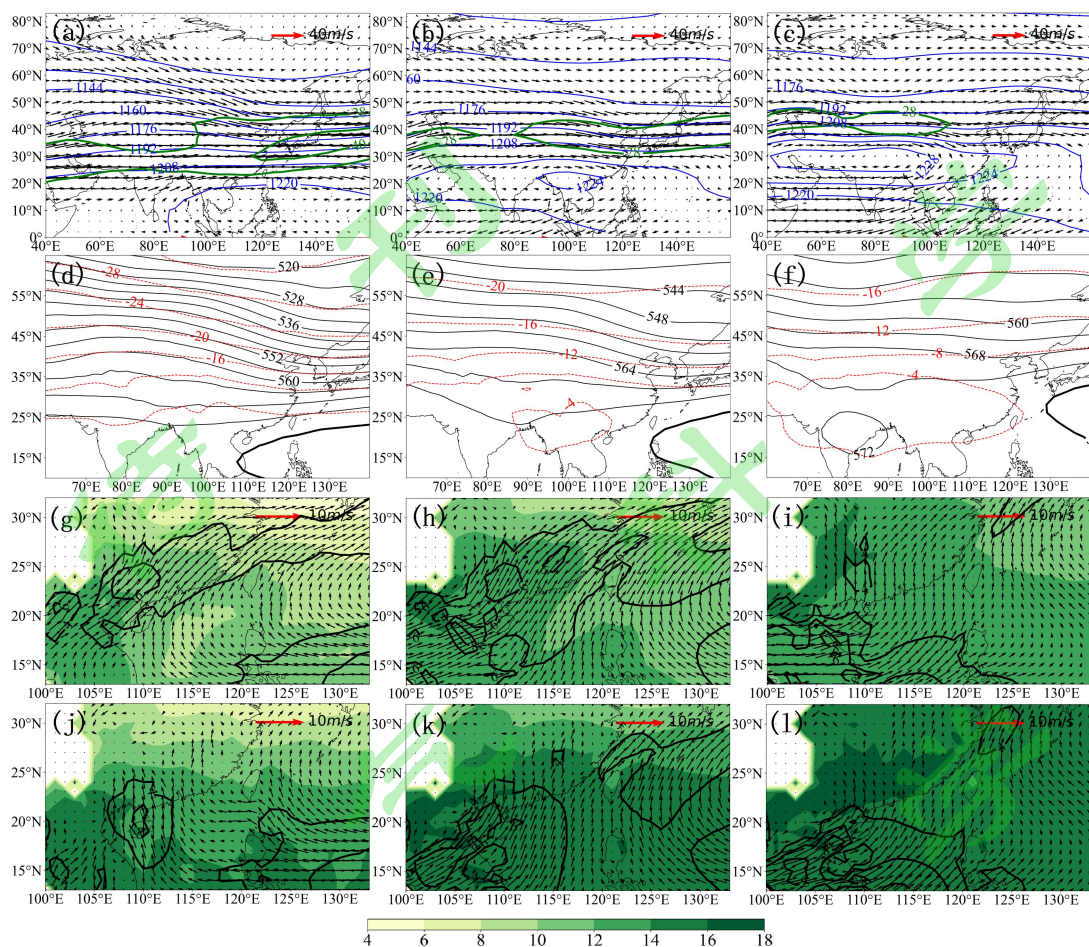


图 10 与图 9 一致，除了本图分别展示了春雨期（a, d, g, j），主汛期（b, e, h, k）、后汛期（c, f, i, l）。

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the spring rainy season (a, d, g, j), the main flood season (b, e, h, k), and the post-flood season (c, f, i, l).

6 结论与讨论

本文利用 1980-2020 年湘赣浙闽地区国家级自动站逐日降水观测资料和 ERA5 再分析资料，对比研究了夏半年不同时段降水的空间分布特征和演变特征，提出了一种依据候雨日日平均雨量和候内强降水站数的汛期的新的定义和分段方式，并研究了入汛前、汛期期间、出汛后以及汛期不同阶段内的环流特征。主要结论如下：

（1）湘赣浙闽地区夏半年平均总降水量的空间分布与地形密切相关，总体上平原河谷地区、山脉迎风坡和孤立高山站降水更多，主要有 3 个多雨中心，分别位于鄱阳湖—信江河谷地区、武夷山区和福建东南沿海地区。

(2) 湘赣浙闽地区汛期的降水既存在东西向大雨带的南北位移, 又有多雨中心的東西变化, 新的定义和汛期划分方式能够同时体现上述两个特征。

(3) 湘赣浙闽地区的汛期平均开始于 22 候, 结束于 50 候, 可以分为春雨期、主汛期和后汛期三个阶段, 其中主汛期又可分为主汛期前期和主汛期盛期。春雨期开始时间晚于华南前汛期开始时间, 结束时间也早于华南前汛期, 降水整体分布较为均匀, 在南岭南部和江西、湖南北部有两条大雨带; 主汛期开始时间早于季风爆发, 结束时间又早于江淮出梅日, 期间降水全面增强, 强降水中心位于鄱阳湖平原到武夷山区, 降水分布与地形密切相关, 这与江淮梅雨期强降水主要是天气尺度雨带造成有显著不同; 后汛期开始时间早于江淮出梅日, 降水主要位于福建东南部沿海地区。

(4) 湘赣浙闽地区在进入汛期以后, 大气环流发生了明显的改变, 其环流特征也与华南前汛期、江淮梅雨期不同。与汛期开始相伴随的大气环流特征主要表现为: 南亚高压北上高原, 湘赣浙闽地区上空西风气流减弱, 副热带高压北抬, 脊线位于 $18-21^{\circ}\text{N}$, 低空西南气流和超低空偏南风均增强, 水汽输送大幅增加。汛期不同阶段环流的演变主要体现在低槽和副热带高压的位置、低空急流的强度和低层风速辐合区位置的位移等等。

湘赣浙闽地区降水的空间演变特征不同于以往提出的任何一个季风雨带的特征, 是地形和多尺度系统共同作用的产物, 其成因复杂, 本研究主要从大尺度环流方面进行了研究。湘赣浙闽地区降水与地形分布密切相关, 那地形对于产生降水的天气系统有哪些影响, 中小尺度局地环流是如何与大尺度环境相互作用, 从而对湘赣浙闽地区降水演变产生影响的, 这些都有待今后做更深入的研究。

参考文献 (References)

- 常宏, 闵锦忠, 高建芸, 等. 2007. 亚洲夏季风与福建汛期降水的关系分析[J]. 台湾海峡, 26(2): 177-187. Chang Hong, Min Jinzhong, Gao Jianyun, et al. 2007. On the relation between Asian summer monsoon and rainfall in Fujian Province[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait (in Chinese), 26(2):177-187.
- 陈红专. 2021. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 47(10): 1219-1232. Chen Hongzhan. 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan province[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 47(10): 1219-1232.
- 陈莫非, 李安强, 马强. 2021. 2020 年洪水洞庭湖调蓄作用分析[J]. 水利水电快报, 42(1): 33-38. Chen Mofei, Li anqiang, Ma qiang. 2021. Analysis of regulation and storage of Dongting Lake in 2020 flood[J]. Express Water Resources and Hydropower Information (in

- Chinese), 42(1): 33-38.
- 陈绍东, 王谦谦, 钱永甫. 2003. 江南汛期降水基本气候特征及其与海温异常关系初探[J]. 热带气象学报, 19(3): 260-268. Chen Shaodong, Wang Qianqian, Qian Yongpu. 2003. Preliminary discussions of basic climatic characteristics of precipitation during raining seasons in regions south of Changjiang River and its relationship with SST anomalies[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19(3):260-268.
- 陈晓红, 张新主, 章新平, 等. 2020. 江南区域性极端降水长期变化及其可能原因. 长江流域资源与环境, 29(8): 1757-1767. Chen Xiaohong, Zhang Xinzu, Zhang Xinping, et al. 2020. Long-term variation of regional extreme precipitation in Jiangnan area and its possible cause[J]. 2020. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 29(8): 1757-1767.
- Ding Y H, Johnny C L C. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview[J]. Meteor. Atmos. Phys., 89 (1-4): 117-142.
- 方浩, 乔云亭. 2019. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景[J]. 热带气象学报, 35(4): 517-527. Fang Hao, Qiao Yunting. 2019. Temporal and spatial distribution of summer extreme precipitation and circulation background over eastern China[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 35(4): 517-527.
- 付超, 湛芸, 单九生, 等. 2021. 江西省暖季重大短时强降水敏感性参数分析及概念模型. 气象科学, 41(1): 39-49. Fu Chao, Chen Yun, Shan Jiusheng, et al. 2021. Aanalysis of conceptual models and sensitivity parameters of major flash heavy rain in Jiangxi warm season[J]. Journal of the Meteorological Sciences. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 41(1): 39-49.
- 傅敏宁, 郑有飞, 邹海波, 等. 2013. 夏季鄱阳湖上空对流系统减弱过程分析. 高原气象, 32(3): 865-873. Fu Minning, Zheng Youfei, Zou Haibo, et al. 2013. Analysis on weakening process of convective system passing over Poyang Lake in summer[J]. Plateau Meteorology (in Chinese). 32(3): 865-873.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35(4): 589-606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(4): 589-606.
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24(6): 993-1023.
- 黄志珍, 楼峰青, 丁伯良, 等. 2022. 浙江省降水特征及其参数空间变化分析[J]. 水资源保护, 38(4): 117-123+130. Huang Zhizhen, Lou Fengqing, Ding Boliang, et al. 2022. Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection (in Chinese). 38(4): 117-123+130.
- 邝美娟, 谢红霞, 隋兵等. 2013. 湖南省近 50 年降水特征分析[J]. 水土保持研究, 20(5):

- 145-149. Kuang Meijuan, Xie Hongxia, Sui Bing, et al. 2013. Analysis on spatiotemporal characteristics of precipitation in Hunan province from 1961 to 2010[J]. Research of Soil and Water Conservation (in Chinese), 20(5): 145-149.
- 郭其蕴, 王继琴. 1981. 近三十年我国夏季风盛行期降水的分析[J]. 地理学报, 36(2): 187-195.
- Guo Qiyun, Wang Jiqin. 1981. Interannual variations of rain spell during predominant summer monsoon over China for recent thirty years[J]. ACTA Geographica Sinica(in Chinese), 36(2): 187-195.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化[J]. 地理学报, 61(7): 675-686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian Summer Monsoon with its interdecadal variations[J]. ACTA Geographica Sinica (in Chinese), 61(7): 675-686.
- 林之光. 1985. 长江中下游水域气候及三峡水库可能的气候效应. 气象, 12: 24-28. Lin Zhiguang. 1985. Climate of the middle and lower reaches of the Yangtze River and the possible climate effects of the Three Gorges Reservoir[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 12: 24-28.
- LUO Y L, WU M W, Ren F, et al. 2016. Synoptic Situations of Extreme Hourly Precipitation over China. J. Climate, 29(24): 8703-8719.
- 马锋敏, 章毅之, 唐传师, 等. 2013. 近 52 年江西省汛期极端降水事件的时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 22(10): 1348-1355. Ma Fengmin, Zhang Yizhi, Tang Chuanshi, et al. 2013. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events in flood season of Jiangxi in recent 52 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 22(10): 1348-1355.
- 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 Changming, GUO Pinwen, DING Yihui, 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.
- 齐庆华. 2019. 中国东部降水的极端特性及其气候特征分析[J]. 热带气象学报, 35(6): 742-755. Qi Qinghua. The climatological features and peculiarities of precipitation over eastern China[J]. Journal of tropical meteorology (in Chinese), 35(6): 742-755.
- 单九生, 张瑛, 张延亭. 2001. 江西五河流域降水与重大降水过程天气系统特征分析[J]. 江西气象科技, 24(1): 14-18. Shan Jiusheng, Zhang Ying, Zhang Yanting. 2001. Features analysis about weather system to five river basins of Jiangxi province and important precipitation procedure[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 24(1): 14-18.
- 沈晓玲, 黄海迅, 章丽娜. 2022. 2010—2019 年浙江暖季短时强降水特征分析[J]. 气象科技, 50(1): 103-113. Shen Xiaoling, Huang Haixun, Zhang Lina. 2022. Characteristics of short-term heavy precipitation in warm season of Zhejiang province from 2010 to 2019[J].

- Meteorological science and technology (in Chinese), 50(1): 103-113.
- 寿绍文.2019.中国暴雨的天气学研究进展[J].暴雨灾害, 38(5): 450-463. Shou Shaowen. 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China. Torrential Rain and Disasters, 38(5): 450-463. 孙琦, 余明. 2015. 近 30 年闽西区域降水分布特征及突变研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 31(3): 98-105. Sun Yi, Yu Ming. 2015. Analysis on precipitation variations of characteristics of Minxi zone in the recent 30 years[J]. Journal of Fujian Normal University (Natrural Science Edition) (in Chinese), 31(3): 98-105.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 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. The Relationship between may-yu in far east and the behaviour of circulation over Asia[J]. ACTA Meteorological Sinica (in Chinese), 29(2): 119-134.
- 万日金, 王同美, 吴国雄, 2008. 江南春雨和南海副热带高压的时间演变及其与东亚夏季风环流和降水的关系[J]. 气象学报, 66(5):800-807. Wan Rijin, Wang Tongmei, Wu Guoxiong, 2008. Temporal variations of the spring persistent rains and SCS subtropical high and their correlations to the circulation and precipitation of the East Asian summer monsoon[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 66(5):800-807.
- 王黎娟, 高龙龙. 2017. 江南春雨的时空分布特征及其旱涝年环流差异[J]. 大气科学学报, 40(3): 310—320. Wang Lijuan, Gao Longlong. 2017. The spatial and temporal distribution of the spring persistent rains and circulation differences between its drought and flood years[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 40(3):304-312.
- 王志寰, 范红霞, 朱立俊, 等. 2019. 长江洪水对鄱阳湖倒灌影响及微模型研究进展综述[J]. 泥沙研究, 44(1):59-66. Wang Zhihuan, Fan Hongxia, Zhu Lijun, et al. Review on the influence to the Poyang Lake by flowing backward of the Yangtze River and the study processes of micro physical model[J]. Journal of Sediment Research (in Chinese), 44(1):59-66.
- 王遵娅, 丁一汇. 中国雨季的气候学特征[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 1-13. Wang Zunya, Ding Yihui. Climatic Characteristics of Rainy Seasons in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(1): 1-13.
- 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 2016. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. 科学通报, 61(10): 1042-1054. Wu Shaohong, Luo Yong, Wanghao, et al. 2016. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 61(10): 1042-1054.
- 姚蓉, 唐佳, 王晓雷, 等. 2020. 湖南短时强降水时空分布及相关环境参数统计分析[J]. 灾害学, 35(2): 116-121. Yao Rong, Tang Jia, Wang Xiaolei, et al. 2020. Temporal-spatial distribution of short-time heavy rainfall in Hunan and statistical analysis of related environmental parameters[J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 35(2): 116-121.
- ZHAI P M, ZHANG X B, HUI W, et al. 2005. Trends in Total Precipitation and Frequency of Daily Precipitation Extremes over China. J Climate, 18(7): 1096-1108.
- 詹丰兴, 何金海, 章毅之, 等. 2015. 江南雨季地理区域及起止时间的客观确定[J]. 海洋学报,

2015, 37(6): 1-11. Zhan Fengxing, He Jinhai, Zhang Yizhi, et al. 2015. The objective definition for the geographic region of Jiangnan rainy season and its onset and retreat date[J]. Haiyang Xuebao (in Chinese), 37(6):1-11.

张家诚. 1992. 降水与社会经济关系指标的初探[J]. 水科学进展, 3(1): 25-30. Zhang Jiacheng. 1992. Preliminary investigation on the precipitation-socioeconomy relationship[J]. Advances in Water Science, 3(1): 25-30.

张剑明, 廖玉芳, 段丽洁, 等. 2011. 1960—2009 年湖南省暴雨极端事件的气候特征[J]. 地理科学进展, 30(11): 1395-1402. Zhang Jianming, Liao Yufang, Duan Lijie, et al. 2011.

Climatic characteristics of extreme rainstorm events in Hunan province during 1960-2009[J]. Progress in Geography (in Chinese), 30(11): 1395-1402.