

# 江淮地区夏季极端降水分型及其环流异常配置分析

肖莺<sup>1,3</sup> 陈丽娟<sup>2</sup> 高雅琦<sup>1,3</sup> 杜良敏<sup>1,3</sup>

1.湖北省气候中心, 中国气象局流域强降水重点开放实验室, 湖北 武汉 430074

2.国家气候中心 气候系统预测与变化应对全国重点实验室/中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 北京, 100081

3.三峡国家气候观象台, 湖北 宜昌 443002

**摘要** 本文基于中国地面气象观测站降水数据、NCEP/NCAR 再分析资料, 采用百分位和 Kmeans 聚类方法以及大气动力-热力诊断技术, 分析了不同类型极端降水事件的环流配置与演变特征。研究表明, 根据降水中心落区的差异, 江淮极端降水可划分为四种类型, 中部型、北部型、南部型与东部型, 前三种发生的集中时段与雨带季节性北跳有关, 而第四种发生时段较为分散。四种类型极端降水发生期间, 降水主要落区位于偏强的南亚高压与西风急流之间的高空辐散区下方, 大气垂直速度增大, 对流层上中层温度水平梯度加大, 中高纬环流经向度较大, 副高强度加强, 导致来自海洋地区的水汽输送增强。前三种类型与第四种降水在东亚-太平洋遥相关型 (EAP)、低空急流及水汽输送存在差异。前三种类型对应 EAP 较显著, 存在低空急流, 水汽输送主要来自西太平洋和南海区域, 对流层上层气温梯度呈北冷南暖的偶极型异常结构; 东部型对应的 EAP 不典型, 无明显低空急流, 东亚沿海偏东水汽输送明显, 对流层上层只存在单极暖中心。对比分析显示低频强降水环流配置与南部型相似, 但南亚高压、高空西风急流、副高、低空急流、水汽输送等相关环流因子强度较弱, 地理位置也有偏差。四种极端降水热力-动力条件的低频演变差异表现为: 中部型降水发生在副高北抬东退、EAP 波列下传期间; 北部型近地面温度暖中心由长江-黄河之间南移至江南, 江淮上空温度上冷下暖; 南部型发生在副高南移西进过程中, 300hPa 温度由北冷南暖转为北暖南冷, 整层高度场以正值为主; 东部型发生在副高北抬东退至南移西进过程中, 对流旺盛区由低纬加强向中纬移动, 200hPa 及以下为温度暖区。进一步分析表明, 副高和热力作用的变化对极端降水的低频预测具有更好的指示意义。

**关键词:** 江淮地区; 极端降水; 分型; 环流异常配置; 热力-动力条件

**文章编号:** 2024115C

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2505.24115

**收稿日期** 2024-10-23; **网络预出版日期:**

**作者简介** 肖莺, 女, 1984 年出生, 高级工程师, 主要从事气候诊断和预测研究. Email: xiaoying15036@163.com

**通信作者** 陈丽娟, Email: chenlj@cma.gov.cn

**资助项目** 国家自然科学基金 (42275030, U2242206, 41730964), 湖北省自然科学基金 (2023AFD097, 2025AFD424), 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J002, CXFZ2025J025), 武汉市气象科技联合基金 (2024020901030459), 长江流域气象开放基金 (CJLY2022Y07)

29 **Analysis of Summer Extreme Precipitation Typology and Associated**  
30 **Circulation Anomalies in the Jianghuai Region**

31 XIAO Ying<sup>1,3</sup>, Chen Lijuan<sup>2</sup>, GAO Yaqi<sup>1,3</sup>, DU Liangmin<sup>1,3</sup>

32 1. Hubei Climate Center, Key laboratory of Basin Heavy Rainfall, Wuhan, Hubei, 430074

33 2. State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/China Meteorological

34 Administration Climate Studies Key Laboratory, National Climate Centre, China Meteorological

35 Administration, 北京, 100081

36 3. Three Gorges National Climatological Observatory, Yichang, Hubei, 443002

37

38 **Abstract** Based on gauged precipitation data by China Meteorological Administration and  
39 NCEP/NCAR reanalysis data, this study analyzes the circulation configuration and evolutionary  
40 characteristics during different types of extreme precipitation events through percentile and  
41 K-means clustering methods, atmospheric dynamic-thermodynamic diagnostics technique. The  
42 research indicates that extreme precipitation in the Jianghuai region can be categorized into four  
43 types according to the location of precipitation center: Central-Type, Northern-Type,  
44 Southern-Type, and Eastern-Type. The first three types concentrate during periods associated  
45 with the seasonal northward shift of the rain belt, while the fourth type is more scattered. During  
46 the occurrence of the four types of extreme precipitation, the main precipitation zones are  
47 located below the divergence area in the upper troposphere where is between the strong South  
48 Asian High and the westerly jet stream, with increased vertical velocity, enhanced temperature  
49 gradients in the upper and middle troposphere, greater meridional circulation in mid-high  
50 latitudes, intensified subtropical high, and enhanced water vapor transport from oceanic regions.  
51 The first three types of precipitation are different from the fourth type in East Asia-Pacific  
52 teleconnection type (EAP), low-level jet, and water vapor transport. During the first three types,  
53 EAP is more typical, and low-level jet is obvious. The water vapor transport mainly comes from  
54 the Western Pacific and South China Sea. The temperature gradient in the upper troposphere is a  
55 dipole anomaly structure with colder temperatures to the north and warmer temperatures to the  
56 south. When Eastern-type occurs, there is atypical EAP, no obvious low-level jet, obvious easterly  
57 water vapor transport along the East Asian coast, and only a unipolar warm center in the upper

58 troposphere. The circulation pattern of low-frequency heavy precipitation is similar to that of the  
59 Southern-Type. But the intensity and position of South Asian pressure, high-altitude westerly jet,  
60 subtropical high, low-level jet, and water vapor transport are different with that of the  
61 Southern-Type. The low-frequency evolution of thermal-dynamic conditions for the four extreme  
62 precipitation types differs as follows: Central-Type precipitation occurs during the northeastward  
63 movement of subtropical high and the downward propagation of the EAP wave train; in the  
64 Northern-type case, the warm center of the near-surface temperature moves southward from  
65 the Yangtze-Yellow River to the south of the Yangtze River, and the temperature over the  
66 Jianghuai region is cold up and warm down; Southern-Type occurs during the southwestward  
67 movement of subtropical high, with the temperature gradient at 300hPa transitioning from cold  
68 north and warm south to warm north and cold south, and positive height values dominating  
69 throughout the entire troposphere; Eastern-Type occurs during the northeastward movement  
70 followed by the southwestward movement of subtropical high, with convective activity  
71 strengthening from low to middle latitudes, and almost entirely warm areas at 200hPa and below.  
72 Further analysis demonstrates that changes of subtropical high and thermal effects have better  
73 indicative significance for low-frequency prediction of extreme precipitation events.

74 **Keywords** Jianghuai Region; Extreme precipitation; Pattern; Circulation anomaly pattern;  
75 Thermal-dynamic conditions

## 76 1 引言

77 江淮地区是指长江至淮河一带，因其特殊的地理位置及亚热带季风气候特征，成为我国  
78 暴雨频发的重要区域之一，素有“暴雨走廊”之称（[Guan et al., 2020](#)）。近年来，随着全球  
79 变暖，水分循环加速，造成大部分有观测资料区域的极端降水事件增加（[Semenov and](#)  
80 [Bengtsson, 2002](#)；[Zhang et al., 2007](#)；[周天军等, 2021](#)），江淮地区也不例外。例如 2020 年  
81 梅汛期极端暴雨洪涝（[刘芸芸和丁一汇, 2020](#)；[Wang et al., 2021](#)；[Ye and Qian, 2021](#)；[赵俊](#)  
82 [虎等, 2021](#)）、河南“21.7”特大暴雨（[Liang et al., 2022](#)；[Luo and Du, 2023](#)；[田利庆等, 2024](#)）  
83 以及湖北随州“8.12”强降水（[汪小康等, 2022](#)；[巢清尘等, 2023](#)）等一系列极端降水事件，  
84 屡次刷新历史记录，并给当地社会经济造成巨大损失，甚至导致人员伤亡。因此，研究江淮  
85 地区极端降水现象，深入探讨该区域的极端降水变化规律及其演变机理，不仅有助于提升对  
86 极端天气事件的理解，还能为地方政府制定有效的灾害预防和应对措施提供科学依据，从而  
87 减轻自然灾害给社会经济发展带来的不利影响。

88 观测资料分析表明,江淮地区极端降水量、极端降水日数以及极端降水量占总降水量百  
89 分比均呈显著性上升趋势(任国玉等, 2010; 杨玮和程智, 2015)。哈德莱中心 HadCM3  
90 模式预估资料订正结果显示,在 SRES A1B 排放情景下,江淮区域极端降水事件未来将持续  
91 增多,21 世纪末期增加幅度甚至更高(崔妍等, 2010)。极端降水变化是大气环流直接作  
92 用的结果。大尺度大气环流系统作为衔接局地天气和气候系统的重要环流,其中东亚副热带  
93 季风、西太平洋副热带高压(简称副高,下同)、南亚高压、西风急流、中纬度阻塞高压等  
94 都是影响江淮地区极端降水的关键环流系统(翟盘茂等, 2016; 韩翠等, 2018)。低纬度季  
95 风强度减弱、副高增强西伸、南亚高压相向东伸、东亚大槽增强等大尺度环流系统的气候变  
96 化,为极端降水发生提供了有利的背景条件。持续稳定的大尺度环流系统叠加亚洲季风区大  
97 气季节内振荡、二级地形和东部平原之间的热力环流、频繁活动的中尺度系统以及对流系统  
98 等多时空尺度相互作用,易产生持续性暴雨,造成极端降水事件(丁一汇, 1993; Lawrence  
99 and Webster, 2002; 曹鑫等, 2013; 王黎娟等, 2014; 孙建华等, 2018; 李健颖和毛江玉,  
100 2019)。

101 已有研究主要将江淮地区降水作为一个整体进行分析,而极端降水具有明显的区域差异  
102 (Wang et al., 2017; 李娟等, 2020; 江洁等, 2022; 张辛和张凌云, 2023),有必要从降  
103 水落区差异分型角度进行探讨(汪玲瑶等, 2018; 陈龙光等, 2024),提高对区域极端降水  
104 异常发生和影响的精细化认知。本文基于江淮地区夏季逐日降水资料,采用百分位阈值方法  
105 定义区域极端降水事件,使用 Kmeans 客观聚类方法对区域极端降水事件进行空间分型,分  
106 析不同落区极端降水事件的变化特征,探讨事件发生时的大尺度环流系统差异及其演变特征,  
107 以期揭示造成江淮地区不同极端降水落区的物理机制,为预报预警的精准靶向服务提供参考  
108 信息。

## 109 2 资料与方法

110 本文使用的站点资料有国家气象信息中心提供的 1981-2022 年夏季(6—8 月)逐日降  
111 水量资料(任芝花等, 2012)。参考曹琦萍等(2014)的工作,江淮地区范围取为(28°-34°N,  
112 110°-122°E)区域,共包括分布均匀的 311 个测站,空间分布见图 1。格点资料为美国国家  
113 海洋和大气管理局(NCEP/NCAR)提供的 1961-2022 年的逐日再分析资料(Kalnay et al., 1996),  
114 包括高度场、纬向风、经向风、比湿、温度,水平分辨率为 2.5°X2.5°。各要素的气候值均为  
115 1991-2020 年平均。

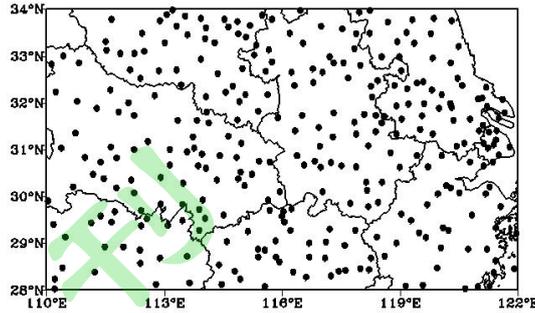


图 1 江淮地区气象站分布图

Fig.1 The distribution of weather stations over Yangtze-Huaihe River basin

因江淮地区跨度大，含七省一市，对极端降水的划分不能简单采用降水量的统一阈值，故采用百分位法定义极端降水事件。首先筛选单站极端降水日：采用 1981-2022 年夏季日降水量大于 0.1mm 的降水日按升序排列，取排序后降水序列的第 90 个百分位值定义为极端降水事件的阈值，当某日该站降水量超过该站阈值时记为极端降水日。进一步定义区域极端降水事件：统计 1981-2022 年夏季每天发生极端降水的站次，采用日极端降水站次  $\geq 1$  站次的子样本按升序排列，取排序后序列的第 90 个百分位值定义为区域极端降水事件阈值。当某日出现极端降水站次等于或超过站次阈值时，认为该日发生了区域极端降水事件。

区域极端降水事件之间强降水落区差异明显，因此基于站点降水资料，采用 Kmeans 方法进行聚类分型。为了确保聚类结果最优且客观，通过手肘法（吴广建等，2019）和 Davies-Bouldin 指数（陈龙光等，2024）来确定最优聚类数。

手肘法是一种利用误差平方和（the square sum of error，简称 SSE，下同）簇数的关系图确认最优类数的方式。其算法思想为：数据集在聚类时，随着簇数的不断增大，数据被分割的更加详细，聚类中心不断增多，SSE 逐渐减小。当簇数小于真实聚类数时，随着类数的增加，SSE 值的变化比较大，关系图显示两点之间的连线会比较陡峭，然后随着簇数的继续增大而趋于平缓。所以 SSE 和簇数关系图是一个“手肘型”的折线图，“肘部”为最优的 K 值。其中，SSE 公式如下：

$$SSE = \sum_{g=1}^K \sum_{i=1}^{n_g} (x_{ig} - \bar{x}_g)^T (x_{ig} - \bar{x}_g) \quad (1)$$

公式中，K 表示聚类簇数， $n_g$  表示第 g 簇的样本数， $\bar{x}_g$  表示第 g 簇的中心， $x_{ig}$  表示第 g 簇第 i 个样本。

Davies-Bouldin 指数（简称 DBI，下同）用于描述组内距离与不同组间距离的比率，公式

140 如下：

$$141 \quad DBI = \sum_{i=1}^K R_i / K \quad (2)$$

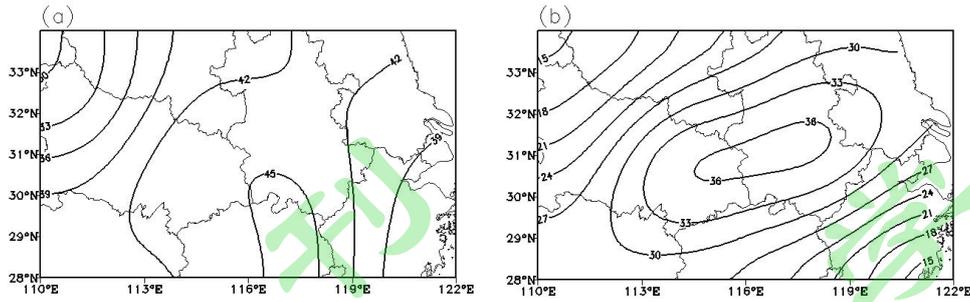
$$142 \quad R_i = \max((d(\bar{x}_i) + d(x_j)) / d(\bar{x}_i, \bar{x}_j)) \quad (i \neq j) \quad (3)$$

143 其中  $d(x_i)$  和  $d(x_j)$  分别是簇  $i$  和  $j$  的平均距离,  $d(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$  是两个不同簇的质心之间的距  
144 离。DBI 越小意味着簇内的相对距离越小, 不同簇之间的相对距离也越大, 这表明聚类结果  
145 的效果越好。

146 为了分析降水及相应环流的低频振荡特征, 采用傅里叶带通滤波提取低频信号。参考低  
147 频强降水过程的选取方法(肖莺等, 2017), 首先对江淮地区逐日降水量进行区域平均, 再  
148 减去其气候态, 滤去季节循环的影响, 然后进行 7d 的滑动平均, 滤去高频信号, 再对逐年  
149 夏季降水分别进行功率谱分析, 得到 42 年功率谱平均值, 获取通过红噪声检验的显著周期。  
150 进一步采用傅里叶带通滤波提取相应显著周期的降水、大气低频信号, 按照常规的余弦波九  
151 位相选取位相, 其中第 1 和第 5 位相分别对应波谷和波峰, 第 3 和第 7 位相为负位相和正位  
152 相转换阶段, 其他位相表示振幅达到该循环的波峰或波谷一半的时间。

### 153 3 区域极端降水事件的定义

154 利用百分位法, 选取 90%分位阈值, 得到江淮地区极端降水阈值的空间分布(图 2)。  
155 从 90%分位阈值分布上看, 空间分布不均, 呈现东西少、中间多的分布形态, 大值中心(降  
156 水量  $\geq 44\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 主要位于湖北东部、安徽西南部、江西东北部, 其他地区大部在  
157  $27\text{-}44\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$  之间, 其中阈值最小的地区位于湖北西北部, 不足  $34\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 2a)。基  
158 于 90%分位极端降水阈值, 统计历史上每天发生单站极端降水事件的站次, 根据区域极端降  
159 水事件阈值的定义, 计算得到站次的阈值为 42 站次。因此定义当某日出现极端降水站次等  
160 于或大于 42 站次时, 则该日发生了 1 次区域极端降水事件。通过计算得到 1981-2022 年夏  
161 季共发生了 297 次区域极端降水事件, 平均每年夏季出现 7 次。极端降水事件累积降水占夏  
162 季总降水量的 5.1%~31.1%, 贡献率极大值中心对应着降水阈值极大值中心的偏北区域, 主  
163 要位于湖北东部、安徽南部和江苏西南部(图 2b), 说明江淮中部区域降水的极端性比例  
164 最高。



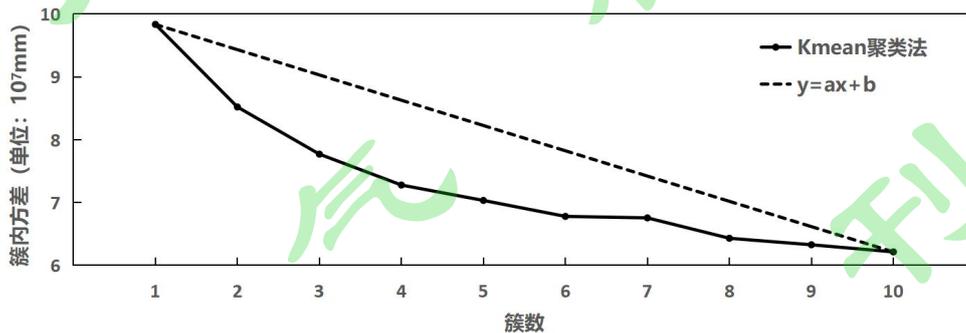
165

166 图2 江淮地区夏季 90%分位极端降水阈值 (a, 单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 及其占夏季总降水量的百  
167 分比 (b, 单位: %) 分布

168 Fig.2 The extreme precipitation of the 90<sup>th</sup> percentile threshold (a, units:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and its  
169 contribution to the total summer precipitation (b, units: %) over Yangtze-Huaihe River basin

170

171 基于江淮区域 297 次区域极端降水事件, 采用 Kmeans 聚类分析方法对江淮降水量进行  
172 分型。参照吴广建等 (2019) 的研究, 采用手肘法确定最优簇数。方法如下: 将 SSE 折线的  
173 第一个点和最后一个点连接, 形成一条直线  $y = ax + b$ , 利用折线图中 x 轴 K 值获取直线  
174 中对应的 y 值, 记为集合 Y。计算 Y 与 SSE 差值, 认为差值最大的 K 值为最优簇数。同时,  
175 最优簇数对应的 DBI 值也应为最小。图 3 给出 SSE 随簇数增加的演变情况, 随着簇数的增加,  
176 SSE 逐渐减小, 当簇数为 4 时, Y 与 SSE 差值最大。表 1 也给出了 DBI 的计算结果, 当簇数  
177 为 4 时, DBI 最小。结合两种检验方法, 确定江淮区域极端降水事件最优聚类簇数为 4。



178

179 图3 Kmeans 聚类法的 SSE 随簇数增加的演变情况 (黑虚线为  $y = ax + b$  值)

180 Fig.3 The evolution of SSE in Kmeans clustering method with the increasing number of clusters.

181 (The black dashed line represents the value of  $y = ax + b$ )

182

表 1 不同簇数对应的 DBI 指数

183

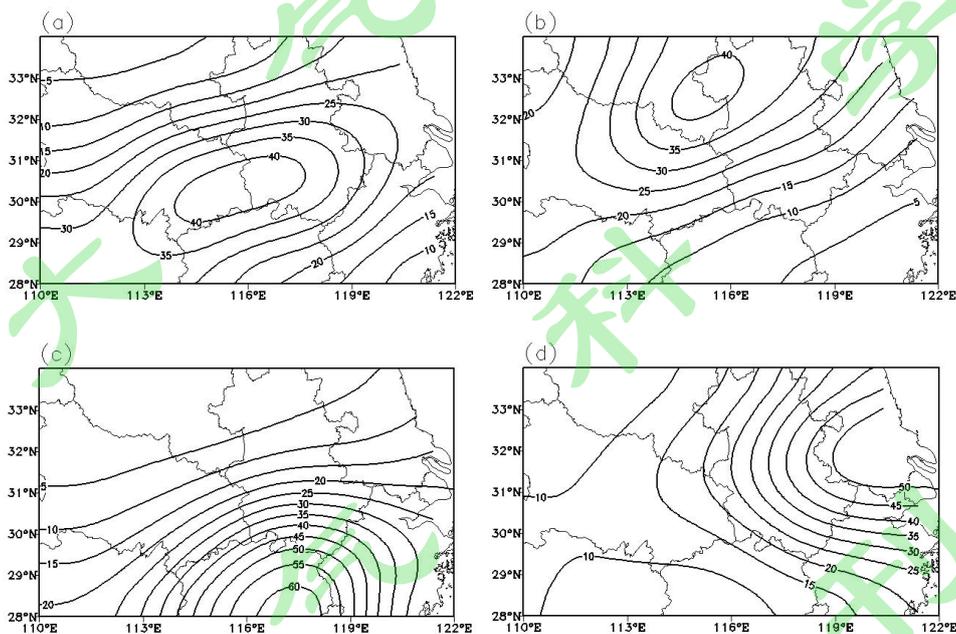
Table 1 DBI index corresponding to different cluster numbers

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DBI	3.23	3.03	2.70	3.68	3.38	2.79	2.88	2.71	2.93

184

185 在 297 组个例的 4 种聚类结果中，1 型最多，有 104 个；2 型和 3 型次之，分别有 91、  
 186 57 个；4 型最少，有 45 个。图 4 给出了江淮区域极端降水 4 种分型下的降水空间分布。4  
 187 种分型的降水量极大值中心有着明显的区域差异。1 型中心位于长江中下游干流附近，处于  
 188 湖北、安徽和江西的交界处，与极端降水阈值中心相近（图 4a，简称中部型，下同）；2  
 189 型中心偏北，位于干流以北，处于河南东南部和安徽北部，较极端降水阈值中心略偏北（图  
 190 4b，简称北部型，下同）；3 型中心偏南，主要位于江南（图 4c，简称南部型，下同）；4  
 191 型降水范围更为集中，中心偏东，主要位于江苏南部和上海，具有较强的局地性特征（图  
 192 4d，简称东部型，下同）。上述结果与王静等（2015）的研究成果较一致，极端降水在皖  
 193 赣鄂交界处发生概率最大。

194



195

196 图 4 4 种极端降水分型降水的空间分布（单位： $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ）

196

197 Fig.4 The spatial distribution of rainfall amount for the four extreme precipitation event categories (units:  
 198  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

198

199 从时间分布特征看，年代际尺度上，中部型在 20 世纪 90 年代和 21 世纪 10 年代出现频  
 200 次最高，夏季江淮区域极端降水事件超过了 3 个/年；极大值出现在 1999 年，为 7 个。北部  
 201 型在 20 世纪 90 年代至 21 世纪 20 年代，事件频次达到或超过 2 个/年，又以 21 世纪初最多；  
 202 极大值出现 2003 年，为 8 个。南部型在 20 世纪 90 年代最多，可达 2 个/年，而近 3 年最少，

202

203 仅 0.5 个/年；极大值出现在 1983、1994、1998 年，为 4 个。东部型在各年代际分布较为均  
 204 匀，为 0.8~1.4 个/年；极大值出现在 2015 年，为 5 个（表 2）。

205 季内时间分布上，中部型主要集中在 6 月第 1 候至 7 月第 3 候，以 6 月第 6 候至 7 月第  
 206 1 候最多，共发生了 38 个，占中部型事件总数的 36.5%，8 月第 1 候从未发生。北部型主要  
 207 集中在 6 月第 1 候至 7 月第 5 候，以 6 月第 6 候至 7 月第 2 候最多，共发生了 32 个，7 月  
 208 第 6 候从未发生，之后发生个数又有所增加。南部型主要集中在 6 月第 1 候至 7 月第 2 候，  
 209 7 月 3 候至 8 月发生少，42 年里只发生了 6 次。东部型最大发生时段为 8 月第 2 候，9 个，  
 210 而 8 月第 3 候从未发生，其他时间段分布较为均匀，为 1~3 个（表 3）。

211 对比 4 种极端降水类型发生的时间分布，前 3 种类型集中发生时段与东亚季风雨带季节  
 212 性北跳有关，主要发生在梅雨期间，南部型集中发生时段较早，中部型次之，北部型最晚，  
 213 而东部型则主要发生在江淮出梅之后，可能和后汛期热带气旋活动有关，其中有 15 次事件  
 214 发生在热带气旋登陆我国当日或之后。

215 表 2 江淮地区 4 种极端降水事件统计特征

216 Table 2 The Characteristics of four of extreme precipitation event categories over Yangtze-Huaihe River basin

	中部型		北部型		南部型		东部型	
	均值 (个/年)	极大值 (年份)	均值 (个/年)	极大值 (年份)	均值 (个/年)	极大值 (年份)	均值 (个/年)	极大值 (年份)
1980s'	2.7		1.4		0.9		0.8	
1990s'	3.1		2.5		2	4	1	
2000s'	1.1	7 (1999)	2.9	8 (2003)	1.1	(1983、 1994、 1998)	1.1	5 (2015)
2010s'	3.2		2		1.6		1.4	
2020s'	1.5		1.5		0.5		1	

217 表 3 4 种极端降水事件分型逐候分布

218 Table 3 The pentadly numbers of the four extreme precipitation event categories

219

分型 \ 候	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
中部型	4	6	7	9	9	19	19	5	9	2	3	2	0	1	3	2	1	3
北部型	7	5	4	4	5	9	11	12	5	6	8	0	2	1	1	3	3	5
南部型	4	7	6	9	11	4	4	6	1	0	1	0	0	2	1	0	0	1
东部型	2	2	3	2	5	3	5	2	2	1	1	3	1	9	0	2	0	2

220 **4 区域极端降水的同期大尺度环流特征**

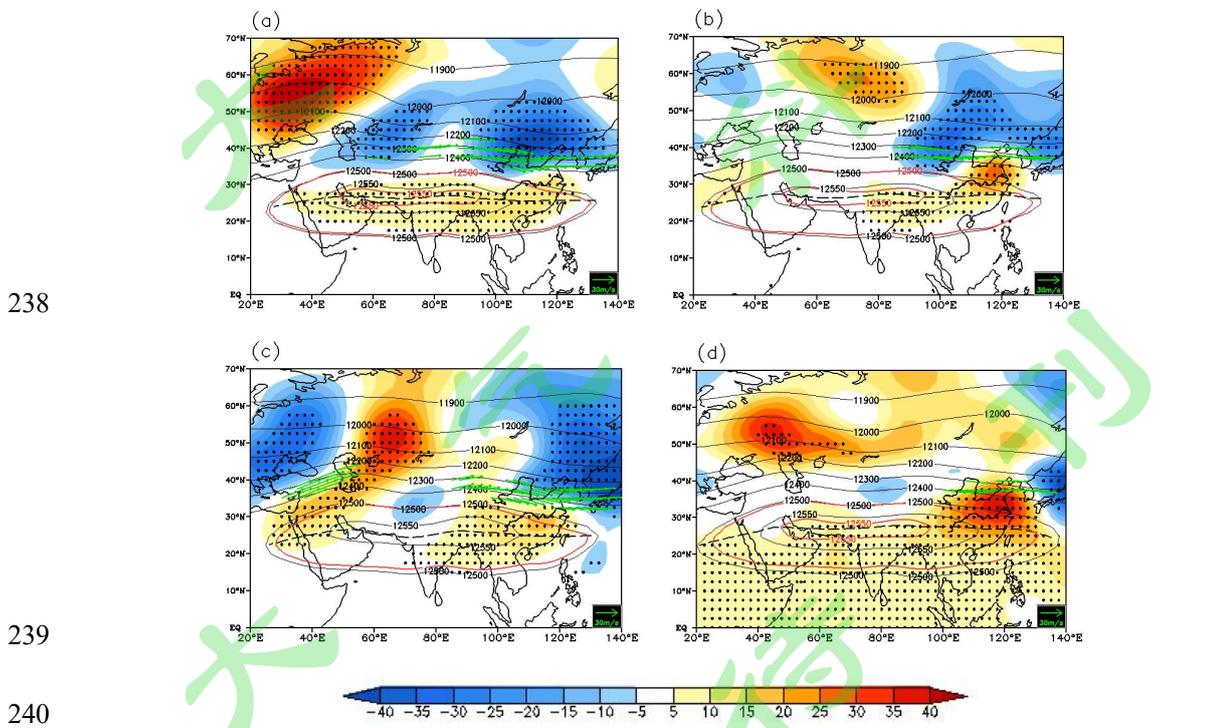
221 **4.1 南亚高压及高空西风急流**

222 图 5 给出了 4 种极端降水类型对应的 200hPa 位势高度及距平、高空西风急流的分布。

223 相似之处是 4 种极端降水型对应的南亚高压均较气候态偏强，东部偏强幅度大于西部，东部  
224 高度场正距平北侧 35°N-40°N 附近为东亚高空西风急流。区别主要在于南亚高压脊线东段  
225 (110-122.5°E 上空，下同) 南北位置以及江淮上空高度距平异常程度。

226 对于中部型 (图 5a)，南亚高压整体偏强，正距平呈东西带状分布，较气候值普遍偏  
227 高 5~15gpm，中心最大强度为 15gpm，相较于其他 3 型最弱，脊线东段位于 25.5°N 附近。  
228 对于北部型 (图 5b)，距平偏高 5gpm 以上的区域主要位于南亚高压的东部，正异常中心  
229 位于江淮上空，可达 30gpm，脊线东段位于 27.5°N 附近，较中部型偏北。对于南部型 (图  
230 5c)，高度场距平分布与北部型相似，江淮上空高度异常中心强度不及北部型，仅为 19gpm，  
231 脊线东段位于 24.5°N 附近，较中部型偏南。对于东部型 (图 5d)，在 30°N 及以南大范围偏  
232 高 5gpm 以上，正异常中心位于江淮上空，高度异常值可达 43gpm，是所有分型中偏高幅度  
233 最强的类型，脊线东段位于 27°N 附近，与北部型相近。

234 可以发现，极端降水落区正是位于高压脊线与高空西风急流之间，即脊线和高空西风急  
235 流偏南 (北) 时，降水落区也偏南 (北)。这是因为，在高空西风急流和南压高压的共同影  
236 响下，高空西风急流南侧至南亚高压脊线北侧之间为明显的高空辐散区，有利于中低层垂直  
237 上升运动的发展，为江淮强降水的形成提供了必要的动力条件 (刘芸芸和丁一汇, 2020)。



241 图 5 4 种分型降水 (中部型, 北部型, 南部型, 东部型分别对应 a-d, 以下同) 发生期间  
242 200hPa 位势高度 (黑色实线)、位势距平 (彩色阴影, 单位: gpm) 和急流 (绿色矢量,  
243 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )。黑色打点区域为位势距平通过了 0.1 显著性水平检验的区域; 黑色虚线为南

244 亚高压脊线；红色实线为 12500 和 12550gpm 气候态等值线；绿色矢量表示纬向风  $\geq 30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
245 且通过了 0.1 显著性水平检验。

246 Fig.5 The Composite horizontal geopotential height (black line), geopotential height anomalies  
247 (color shadow, units:gpm), jet stream (green vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) on 200hPa for the four extreme  
248 precipitation events categories (Central-type, Northern-Type, Southern-Type, Eastern-type  
249 correspond to a-d separately). The black dotted areas indicate the height anomalies exceeding  
250 the significance test at the 0.1 confidence level. The black dashed lines indicate ridge axis of the  
251 South Asia High. The red dashed lines indicate the climatic contours equal to 12500 and 12550  
252 gpm. The green vectors indicate U wind anomalies exceeding  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  with confidence level  
253 exceeding 0.1.

#### 254 4.2 对流层中层位势高度异常

255 图 6 给出了 4 种极端降水类型对应的 500hPa 位势高度及异常的分布，我国东部夏季降  
256 水分布与西太平洋副热带高压（简称西太副高）、东亚—太平洋遥相关型（East Asia-Pacific  
257 teleconnection type，简称 EAP）有很好的对应关系（黄荣辉，1990；张庆云等，2003；杨涵  
258 涓等，2021）。4 种极端降水型对应环流相似之处是西太副高均较气候态偏强偏西，东亚—  
259 太平洋遥相关型（EAP）较显著，欧亚中高纬度环流经向度较大。但是副高的强度和西伸位  
260 置，东亚经向环流特征以及欧亚槽脊分布型存在一定的差异。

261 中部型（图 6a），EAP 波列特征比较清晰，其中西太副高总体偏强，较气候态显著西  
262 伸，可达  $120^{\circ}\text{E}$  以西，高度场距平呈东西向分布，距平中心位于华南沿海，可达  $10\text{gpm}$  以  
263 上；长江及以北上空的低压槽很显著；欧亚中高纬经向环流发展，呈“两槽两脊”环流形势，  
264 其中乌拉尔山和鄂霍次克海为高压脊，巴尔喀什湖-贝加尔湖为宽广的低压槽区，环流经向  
265 度较大，为典型的“双阻型”结构，有利于中高纬冷空气由西北路径进入我国，并沿着长江  
266 上空低压槽影响江淮地区。

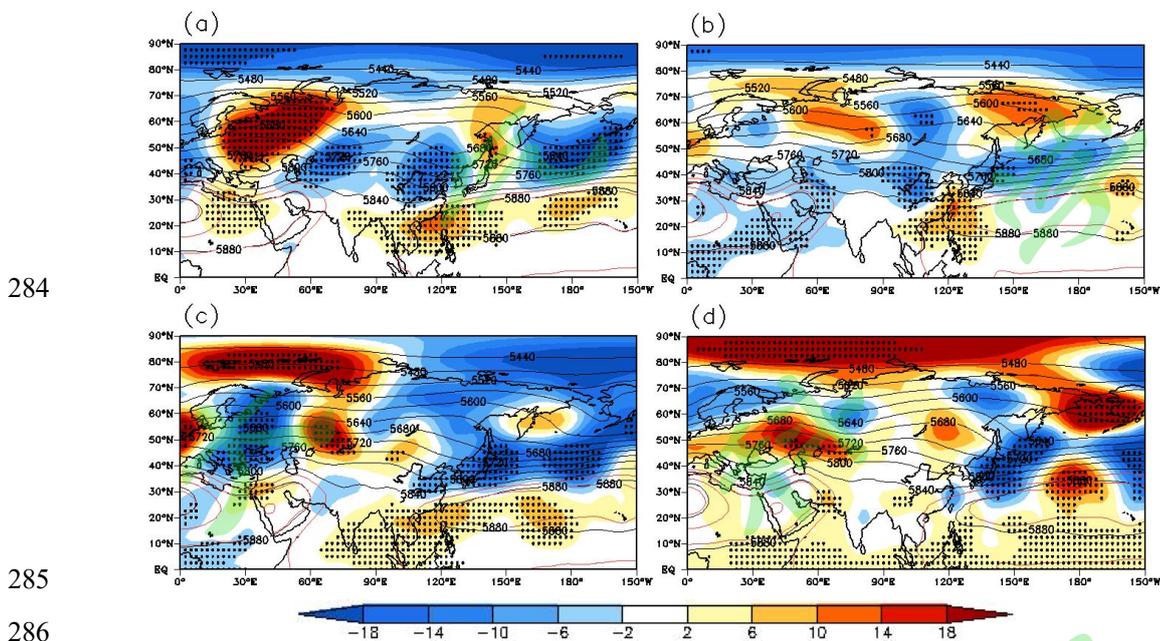
267 北部型（图 6b），EAP 波列特征也比较清晰，西太副高西段显著偏强，略偏北西伸，  
268 可达  $120^{\circ}\text{E}$  以西，高度场异常呈南北向分布，距平中心位于东南沿海，强度可达  $10\text{gpm}$  以  
269 上；乌拉尔山以东地区高度场偏强，贝加尔湖地区为槽区，鄂霍次克海为高压脊，“双阻型”  
270 结构相对于中部型东移，巴尔喀什湖至我国西北地区为低压槽，我国东部地区上空呈现“西  
271 低东高”型分布，相对于中部型，冷空气由偏北路径进入我国，南侵略弱。

272 南部型（图 6c），EAP 波列特征不显著，西太副高总体偏强西伸，距平异常呈东西向分  
273 布，与中部型相似，但异常程度较弱，距平中心位于南海北部，长江及其以北地区高度场大

274 范围偏低，呈现“北低南高”型；欧亚中高纬呈短波槽脊分布，乌拉尔山到贝加尔湖大部为  
275 脊区，贝加尔湖以东到东北亚地区为显著槽区，来自极地的冷空气通过偏东路径影响江淮地  
276 区。

277 东部型（图 6d）环流与前 3 种差异明显，EAP 波列特征不典型，西太副高略偏强，西  
278 脊点在 120°E 以东，南海上空高度场接近常年，西太副高主体偏东，高度场正距平中心在日  
279 界线附近；欧亚中高纬环流经向度较前 3 种减弱，乌拉尔山及以西地区高度场偏强，贝加尔  
280 湖及以东高度场偏强，江淮地区东部至沿岸附近高度场负异常，造成降水局地性特征更为显  
281 著。

282 可见欧亚中高纬度环流型和东亚-太平洋遥相关型的配置决定了四种不同类型的极端降  
283 水型。



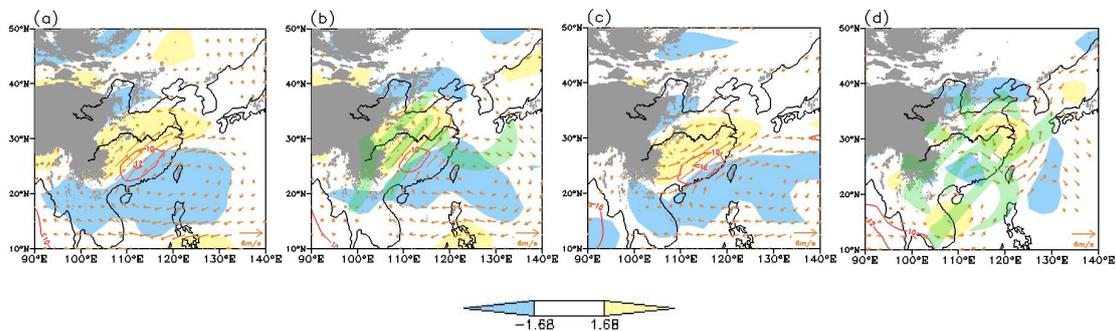
287 图 6 4 种分型降水发生期间 500hPa 位势高度（黑色实线，单位：gpm）和位势距平（彩色  
288 阴影，单位：gpm）分布。黑色打点区域为通过 0.1 显著性水平检验的区域，红色实线为  $\geq$   
289 5880gpm 气候态位置

290 Fig. 6 The composite 500hPa geopotential height (black solid line, unit: gpm) and anomalies  
291 (color shadow, unit: gpm) for the four extreme precipitation events categories separately. The  
292 black dotted areas indicate the anomalies with confidence level exceeding 0.1, The red line  
293 indicate the climatic state greater than or equal to 5880gpm

### 294 4.3 低空急流及涡度

295 在对流层低层，涡度及风场特征能够反映研究区域上空的动力条件。图 7 给出了 4 种极

296 端降水类型对应的 850hPa 涡度和矢量风距平场，可以看出江淮上空均为正涡度。在东亚沿  
 297 岸，前 3 种类型距平风场（图 7a-c）显示从东南沿海至华北上空经向为“反气旋—气旋—反  
 298 气旋”波列分布，在中低纬的反气旋和气旋异常之间为西南风异常，也是低空急流（ $\geq 10\text{m/s}$ ）  
 299 所在位置，加强的西南风异常，有利于将低纬海洋上暖湿空气输送到大陆。这种波列加强了  
 300 南北向涡度的“-+-”分布，副高外围为正涡度带，从云南省沿西南-东北向至江淮地区，不  
 301 同的是低空急流中心的南北位置略有差异。与前 3 种类型不同的是，东部型低空急流（图  
 302 7d）不明显，受江淮气旋异常的北部和华北反气旋异常的南部影响，江淮地区上空偏东风异  
 303 常加强，将海洋暖湿气流直接向江淮地区输送，正涡度区域主要位于江淮地区东部。可见低  
 304 空急流的特征和中心位置对前三种类型的极端降水型有显著影响，而东部型极端降水主要受  
 305 到局地气旋/反气旋环流的影响。



306  
 307  
 308 图 7 4 种分型降水发生期间 850hPa 风场距平（橙色矢量；单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、急流（红色等  
 309 值线，水平风速 $\geq 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和涡度距平（填色，单位： $\text{s}^{-1}$ ）。其中，橙色矢量为通过了 0.1  
 310 显著性水平检验的风场距平矢量；黄色（蓝色）填色分别为通过了 0.1 显著性水平检验的涡  
 311 度正（负）距平；阴影区为青藏高原。

312 Fig.7 The composite horizontal wind anomalies (orange vector, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), jet stream (red  
 313 contour, wind speed  $\geq 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and vorticity (shaded, unit:  $\text{s}^{-1}$ ) on 850hPa for the four extreme  
 314 precipitation events categories separately. Orange vectors indicate wind speed exceeding the  
 315 significance test at the 0.1 confidence level. The yellow and blue colors respectively indicate the  
 316 positive and negative anomalies of vorticity that have exceeded the significance test at the 0.1  
 317 confidence level. Shaded area is Tibetan Plateau.

#### 318 4.4 水汽输送异常

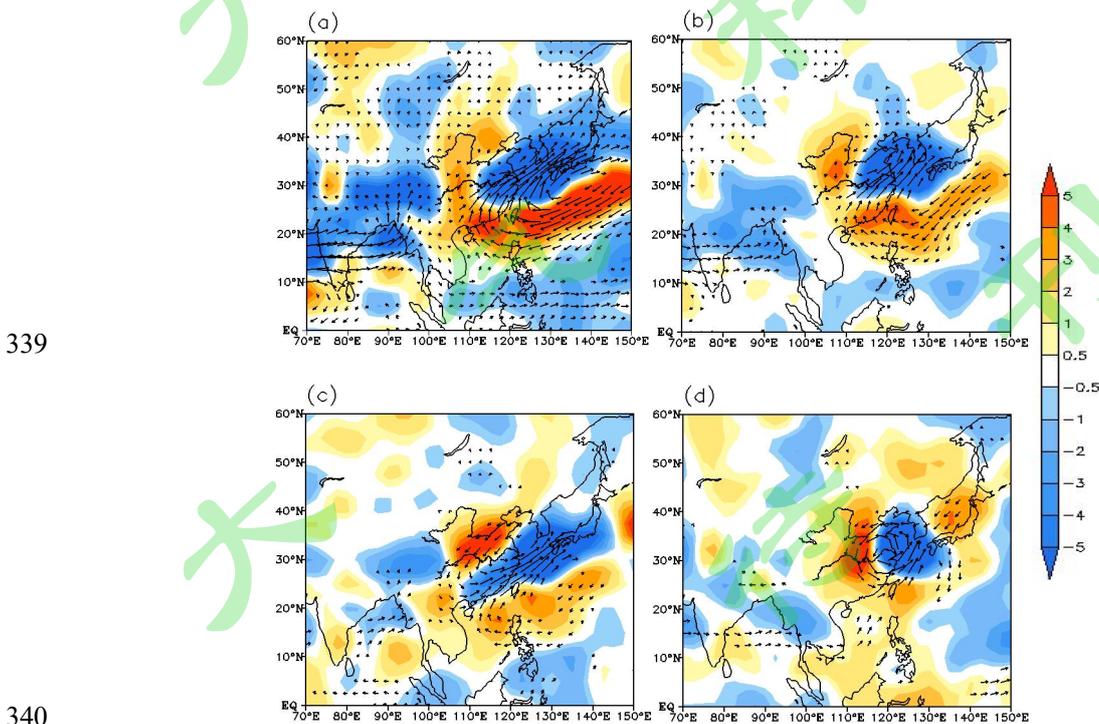
319 夏季影响我国中东部的水汽输送主要有三条通道：来自阿拉伯海经孟加拉湾的西南通道，  
 320 自南向北的南海通道以及西太副高外围引导的东南通道（王志毅等，2017）。

321 从水汽通量散度距平场（图 8）看，江淮地区 4 种类型对应的水汽通量散度均为负距平，

322 有利于极端降水过程的发生，但区域存在差异。与降水中心相对应，中部型在江淮区域整体  
323 有水汽聚集（图 8a），北部型水汽聚集在长江至黄河之间（图 8b），南部型水汽主要聚集  
324 在华南至江南一带（图 8c），东部型水汽则聚集在华东区域（图 8d）。

325 4 种类型极端降水的主要水汽来源不同。中部和北部型，西北太平洋为清楚的反气旋式  
326 水汽输送异常，来自南海—西太平洋的大范围水汽输送至江淮地区，对极端降水有明显贡献。  
327 两者差别主要有两点，一是南海—西太平洋水汽通量散度正值区，中部型在西太平洋散度距  
328 平绝对值更大，表明辐散更强，水汽输送更强；二是北部型发生时，黄河下游为气旋式水汽  
329 输送异常，其北侧的偏东气流可以将渤海和黄海的水汽向大陆输送，在一定程度上增强了江  
330 淮北部的的水汽条件。南部型与北部型的分布相似，但水汽辐合中心位置偏南，来自南海的反  
331 气旋式水汽输送异常与来自黄海的气旋式水汽输送异常在江淮南部的 25~30°N 之间汇合，  
332 输送至至江南-华南区域。可以看出，前 3 种类型中，西太平洋和南海的水汽输送贡献更大，  
333 与西太副高异常加强西伸有关，为江淮极端降水带来大量水汽，这与韩翠等（2018）的研究  
334 结果一致。而东部型事件发生时，在西太平洋以及南海并无明显的水汽通量散度异常区，而  
335 是在江淮及其以东沿海地区为气旋式水汽输送异常，其北侧的偏东气流将黄海水汽直接向江  
336 淮东部地区输送。

337 可见前三种极端降水型的水汽输送路径相似，主要水汽来源于西太平洋和南海，但是水  
338 汽辐合中心位置有差异，而东部型水汽主要来源于近海。



342 图 8 4 种分型降水发生期间对流层（1000hPa-300hPa）垂直积分的水汽输送通量距平（矢  
343 量场，单位： $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ）及水汽输送通量散度距平（阴影区，单位： $10^{-5}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ）空间分  
344 布。黑色矢量为通过了 0.01 显著性水平检验的风场距平矢量。

345 Fig.8 The Composite vertically integrated water vapor flux vector anomaly in the troposphere  
346 from 1000hPa to 300hPa (vector, unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), water vapor flux divergence anomaly (shadows,  
347 unit: $10^{-5}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) for the four extreme precipitation events categories separately. Black  
348 vectors indicate wind speed exceeding the significance test at the 0.01 confidence level.

349

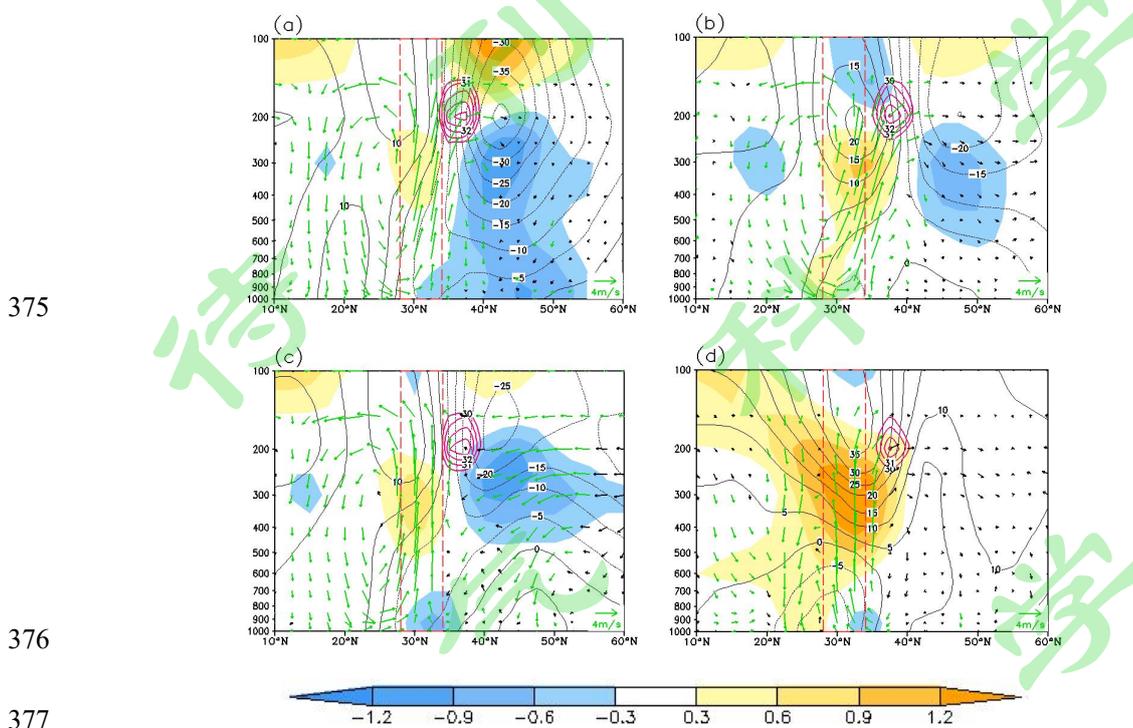
#### 350 4.5 热力-动力条件

351 图 9 给出了 4 种极端降水类型发生时  $110\sim 122.5^{\circ}\text{E}$  平均风场、大气温度异常垂直剖面  
352 图。共同点为：在强降水发生期间，江淮区域上空西风急流在 200hPa 最强，中心值均在 30m/s  
353 以上，急流区与水平温度梯度大值的锋区相对应，强降水落区位于急流右侧辐散区，高空辐  
354 散造成的抽吸利于垂直运动的发展，在中低纬存在一个逆时针的经向环流异常，江淮地区为  
355 异常上升支，其以南为异常下沉支；西风急流区下层的温度水平梯度大，与其右侧的直接热  
356 力环流相对应。但各类型对应环流特征仍存在差异：在对流层上层，300~400hPa 之间，前 3  
357 种类型（图 9a-c）的气温异常暖中心强度较弱，在暖中心以北有较强冷中心，形成北冷南暖  
358 的偶极型异常结构；第 4 种类型（图 9d）只存在单极暖中心，且中心距平可达  $1.8^{\circ}\text{C}$ ，但是  
359 暖中心之北的气温异常偏暖幅度不大。四种类型中，暖中心和冷中心的南北位置有明显差异，  
360 这种差异与西风急流中心的位置相配合，其中北部型和东部型的急流中心位置更偏东。因此  
361 无论在水平向是单极还是偶极的异常结构，都具有北低南高的温度梯度。

362 除了对流层高层水平的冷暖偶极结构，北部型（图 9b）在强降水发生区域（江淮北部）  
363 上空还存在“上冷下暖”的异常结构，200hPa 以上（下）表现为显著的温度负（正）异常，  
364 这在低层容易形成大气层结的不稳定，促进对流活动的发展，配合对流层高层暖中心位置，  
365 形成较强的向上和南风分量，而在高层对流层顶附近的冷异常抑制了垂直运动的向上发展，  
366 使得气流向周边扩散然后下沉，进而形成了局地垂直环流（陈龙光等，2024），对流层偏南  
367 风分量的增强也导致对流辐合区偏北，降水偏北。在中高纬上空，南部型（图 9c）对流层  
368 整层均体现为偏北风异常，配合冷暖偶极结构，在 300hPa 附近有显著的冷平流，伴随着下  
369 沉支由对流层中高层向低层输送，江淮地区 700hPa 以下气温偏低程度高于其他类型，主要  
370 的气流上升区域偏南，导致降水偏南。东部型（图 9d）在江淮地区上空为上暖下冷的异常  
371 结构，上升气流的强度和局地垂直环流的强度均弱于其他 3 种类型，因此降水极端性相对较

372 弱。

373 可见前三种类型对应对流层上层北冷南暖的偶极型异常结构，而东部型对流层上层只存  
374 在单极暖中心。



375

376

377

378 图9 4种分型降水发生期间110~122.5°E平均的风场距平(矢量,单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、大气温  
379 度距平(彩色阴影,单位:  $^{\circ}C$ )、位势高度距平(等值线,单位: gpm)纬向-高度剖面图。  
380 其中,矢量的两个分量为经向风距平和垂直速度距平(单位:  $m \cdot s^{-1}$ ),绿色矢量为通过了  
381 0.1显著性水平检验的风场距平矢量;红色(蓝色)阴影为通过了0.1显著性水平检验的大  
382 气温度正(负)距平;红色实线表示西风急流( $U \geq 30m \cdot s^{-1}$ );红色虚线表示江淮区域位置。

383 Fig.9 Latitude-altitude cross-section of wind anomalies (orange vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ),  
384 atmospheric temperature anomalies (shaded areas, unit:  $^{\circ}C$ ) and geopotential height anomalies  
385 (contours, unit: gpm) over the region 110~122.5°E for the four categories separately. The  
386 components of vectors are meridional wind anomalies and vertical velocity anomalies (units:  $m \cdot$   
387  $s^{-1}$ ). Green vectors indicate wind speed exceeding the significance test at the 0.1 confidence level.  
388 Red (blue) shadows indicate positive (negative) temperature anomalies exceeding the  
389 significance test at the 0.1 confidence level. Red lines represent the location of the westerly jet ( $U$   
390  $\geq 30m \cdot s^{-1}$ ). Red dotted lines indicate the location of Yangtze-Huaihe River basin.

#### 391 4.6 与低频强降水过程同期环流的对比分析

392 为了进一步认识极端降水事件的环流异常特征,对比分析区域极端降水事件和低频强降

393 水的同期环流特征，探讨关键影响因素的差异。

394 首先筛选江淮地区的低频强降水过程。按照低频强降水过程的选取方法，通过功率谱分  
395 析确定江淮夏季降水具有显著的 10~40d 周期（图略），初步得到了 226 次低频过程。低  
396 频过程与极端降水事件重合的过程共计 135 次，其中有 4 次过程波峰当日并未发生极端降水  
397 事件。为了区别于极端降水事件，选取低频过程波峰当日未发生极端降水事件作为低频强降  
398 水发生日，共计 95 天。

399 图 10 给出了低频强降水对应的对流层高中低环流配置以及整层水汽输送。与极端降水  
400 事件对比，低频强降水的环流配置均与南部型相似，但在南亚高压、高空西风急流、副高、  
401 低空急流、水汽输送的强度比南部型弱，且位置也有差异。具体表现在 200hPa 上，南亚高  
402 压接近气候态，江淮上空高度场略高，以北高空西风急流显著偏强的区域位置偏西，主要位  
403 于中国西北地区上空（图 10a）；500hPa 上，中高纬槽脊位置偏东，西太副高略强（图 10b）；  
404 850hPa 长江以南西南风异常，但低空急流不明显（图 10c）；水汽辐合中心位置偏北，位于  
405 江淮地区，与中部型接近，但强度及范围远不及中部型（图 10d）；江淮北侧西风急流异常  
406 不明显，未出现通过显著性水平检验的  $U \geq 30 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域，江淮地区上空为显著上升支，上  
407 升支北界可北伸至  $45^\circ \text{N}$ ，下沉支也随之北移减弱，气温偏低区域位于上升支与下沉支之间，  
408 近地面气温偏低程度减弱（图 10e）。可见本文通过聚类获得的四种极端降水型更能全面反  
409 映江淮地区极端降水出现的特征，低频强降水过程主要和南部型极端降水接近。

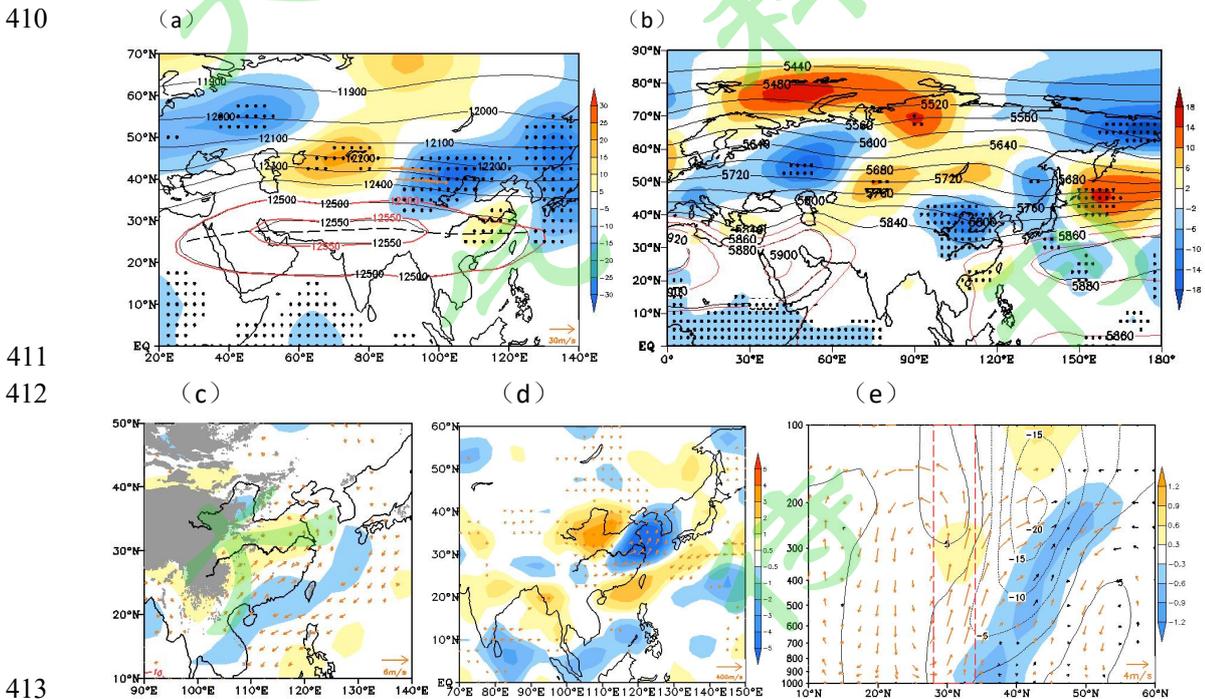


图 10 低频强降水对应的 200hPa (a, 同图 5)、500hPa (b, 同图 6)、850hPa (c, 同图

415 7) 环流、对流层整层水汽输送 (d, 同图 8)、纬向-高度剖面图 (e, 同图 9)

416 Fig.10 The circulation on 200hPa (a, as in Fig.5), 500hPa (b, as in Fig.6), 850hPa (c, as in Fig.7),

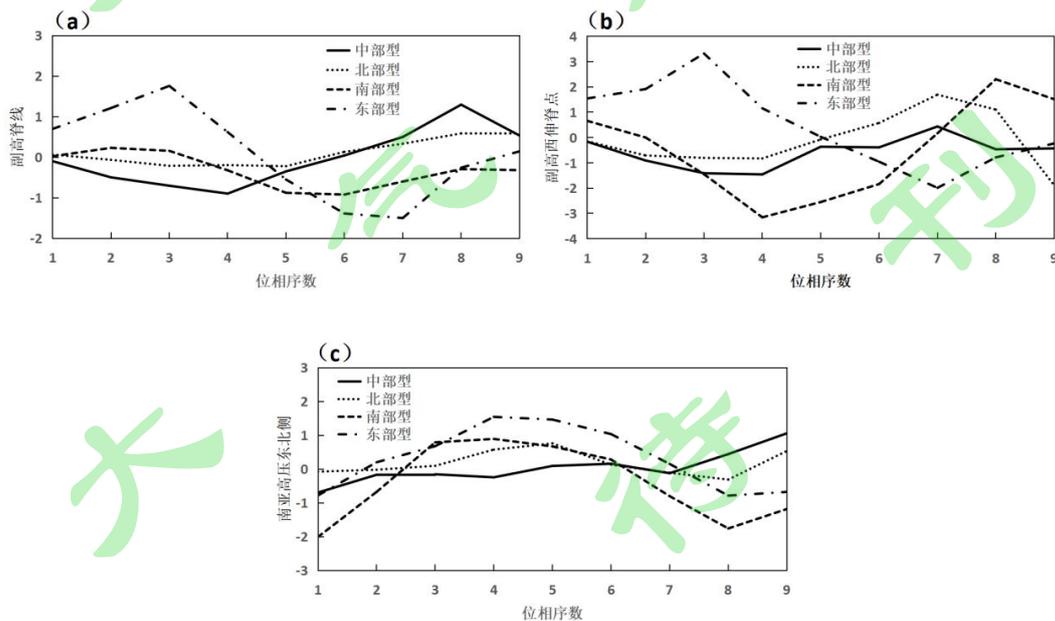
417 water vapor transport of the entire troposphere (d,as in Fig.8) and latitude-altitude

418 cross-section (e,as in Fig.9)

### 419 5 区域极端降水的前期环流低频演变特征

420 选取含有极端降水事件的低频过程作为研究对象,并以波峰当日的极端降水事件类型作  
421 为过程类型,由此去除了 4 次过程波峰当日并未发生极端降水事件的个例,剩余 131 次低频  
422 降水过程,可以分为:中部型 43 次,北部型 49 次、南部型 20 次,东部型 19 次。

423 上述分析表明,4 种类型在西太副高位置、南亚高压强度(尤其是其东北侧)上有明显  
424 差异。以这两个变量为代表,分别对逐日副高脊线、西伸脊点、南亚高压东北侧( $110\text{-}125^\circ$   
425 E,  $25\text{-}37.5^\circ$  N) 高度场进行 10~40d 周期滤波,再做位相合成图,比较 4 种类型极端降水  
426 发生前后的西太副高、南亚高压变化特征。图 11 给出了副高脊线、西伸脊点以及南亚高压  
427 东北侧高度场的位相合成结果。可见 4 种类型对应的副高位相演变、南亚高压特征均差异显  
428 著。其中中部型、北部型极端降水主要发生在副高北抬东退过程中,南部型极端降水发生在  
429 副高南移西进过程中,东部型极端降水对应副高特征量变化振幅最大,从 1-3 位相的副高北  
430 抬东退到第 4 位相的迅速南移西进,极端降水正是发生在该变化过程中(图 11a, b)。而  
431 在南亚高压东北侧,中部型变化幅度最小,其他 3 种类型均在极端降水发生前 1 位相或当天  
432 出现明显的增强,而在降水发生后南亚高压东北侧高度场迅速减弱(图 11c)。



433

434

435 图 11 低频尺度副高脊线、西伸脊点、南亚高压东北侧高度场位相演变图

436 Fig.11 Phase evolution of low-frequency subtropical high ridge line, westward ridge point and  
437 height field on the northeast side of the South Asian high pressure

438 为考察大气环流异常的演变特征,图 12 给出了四种类型强降水发生前后纬向-高度剖面  
439 随位相演变图。中部型对应的环流位相演变特征(图 12a1-a3)体现在 300hPa 温度三极子  
440 由南北向“+++”转为“--”的过程,EAP 波列由对流层顶向下传播,极端降水发生日 500hPa  
441 波列负距平中心位置位于 32.5° N。第 1 位相,200hPa 存在 EAP 波列正位相,300hPa 为温  
442 度三极子型,即江淮上空为负距平,南北两侧为正距平,江淮上空为异常下沉气流,两侧有  
443 着异常垂直环流,南侧顺时针旋转而北侧逆时针旋转。第 3 位相,中低纬上空转为逆时针旋  
444 转,热带上空为异常下沉气流,对流层中低层高度场正距平发展,以北异常垂直环流不明显,  
445 江淮近地面温度升高。第 5 位相,EAP 波列向下发展至对流层中下层,波列清晰,整个波列  
446 随着垂直高度升高向北倾斜,300hPa 温度三极子型重新建立,但位相相反,江淮上空为正  
447 值,其南北两侧为负值,江淮近地面温度降低至负距平,其上空为异常上升气流,南北两侧  
448 分别为逆时针、顺时针旋转。

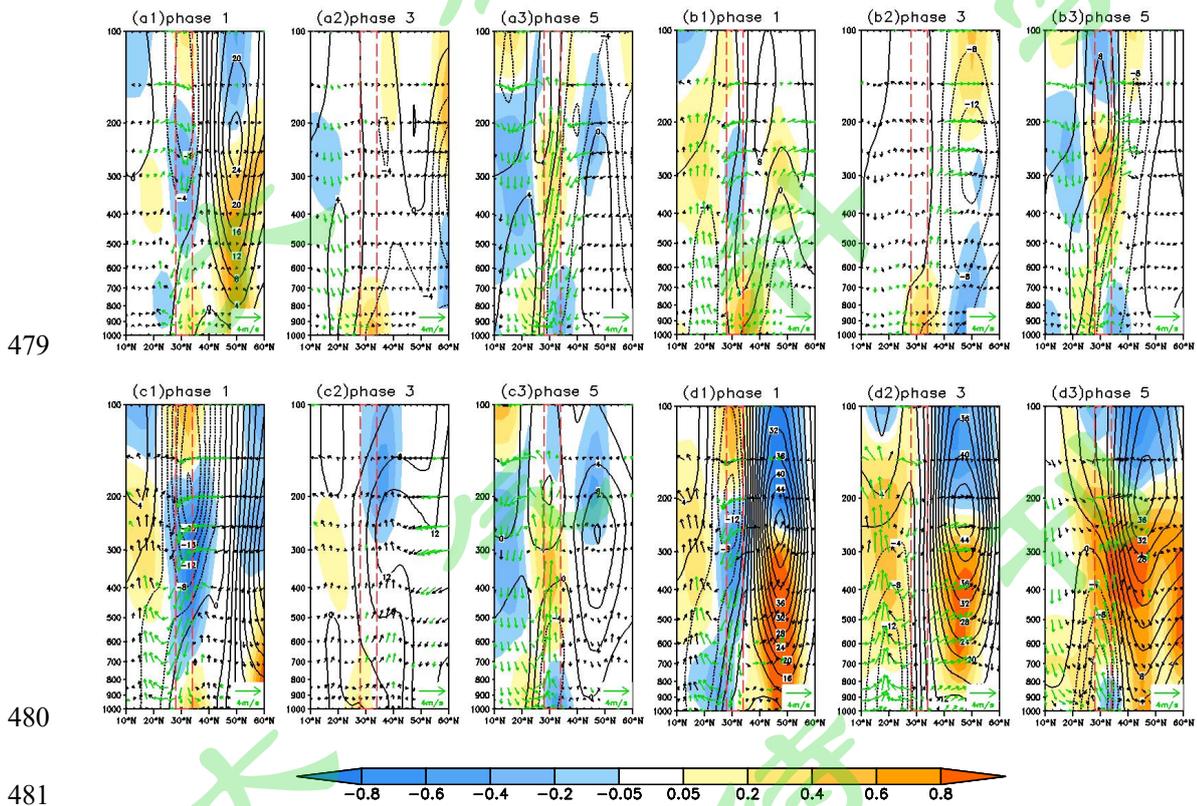
449 北部型对应的环流特点(图 12b1-b3)为近地面温度暖中心南移,垂直上升运动位于暖  
450 中心北侧并随之南移,极端降水发生日 500hPa 波列负距平中心位于 37° N、江淮上空温度  
451 上冷下暖。主要表现在:第 1 位相,对流层中下层为 EAP 负位相波列分布,长江-黄河之间  
452 近地面温度异常偏暖,40° N 附近为异常上升气流。第 3 位相,近地面温度暖中心减弱并向  
453 南移,异常上升气流也南移至 35° N 附近,南北两侧为逆时针、顺时针旋转,纬度跨度大,  
454 对应着整个对流层高度场南正北负。第 5 位相,近地面温度暖中心再次减弱并向南移,异常  
455 上升气流继续南移至江淮,江淮上空以 200hPa 为界,呈现上冷下暖分布,EAP 波列正位相  
456 建立。

457 南部型对应的环流特点(图 12c1-c3)是 300hPa 温度表现为偶极型,由北冷南暖转为北  
458 暖南冷,发生发展时垂直上升气流建立迅速,整层高度场以正值为主,尤其是江淮以北  
459 300hPa 附近中心强度可达 16gpm,极端降水发生日 500hPa 波列负距平中心位置位于 30° N、  
460 江淮近地面温度更低。第 1 位相,江淮上空 700~200hPa 为明显的温度负值,50° N 以北为  
461 高度场正值区。第 3 位相,江淮上升气流迅速发展,温度转暖,之前的温度负值区向高空收  
462 缩至 300hPa 以上,整层高度距平场为正值,40° N 附近上空上冷下暖温度结构已建立,冷  
463 暖区交界处高度距平中心区可达 16gpm。第 5 位相,上冷下暖温度结构向南、向北分裂,  
464 20° N 以北均呈现上冷下暖分布,EAP 波列建立,对流层中下层明显。

465 东部型对应的环流特点(图 12d1-d3)是 35° N 以上冷下暖温度结构稳定维持,冷暖

466 交界处高度为异常正值，对流旺盛区明显，由低纬加强向中纬移动。第 1 位相，垂直剖面与  
 467 中部型分布相似，但温度冷暖、高度场异常程度更大， $20^{\circ}\text{N}$  以南对流发展旺盛。第 3 位相，  
 468  $20^{\circ}\text{N}$  以南对流发展加强，上空温度暖中心发展， $35^{\circ}\text{N}$  以北上冷下暖结构稳定，冷暖交界  
 469 处高度场异常仍然维持，中心强度为  $45\text{gpm}$ 。第 5 位相，对流旺盛区北移至江淮，上空的  
 470 温度暖中心与北方暖中心合并，导致  $20^{\circ}\text{N}$  以北  $200\text{hPa}$  及以下几乎全为温度暖区，仅在  
 471  $800\text{hPa}$  以下江淮近地面有冷区，高度场异常依然维持，中心强度为  $40\text{gpm}$ 。

472 综上，不同类型极端降水发生前对应的低频大尺度环流演变存在显著差异。中部型极端  
 473 降水发生在副高北抬东退过程中，南亚高压无明显增强，EAP 波列由对流层顶向下传播，  
 474  $300\text{hPa}$  温度三极子由南北向“++”转为“-+”。北部型极端降水也发生在副高北抬东退过  
 475 程中，地面温度暖中心由长江-黄河之间南移至江南，江淮上空温度上冷下暖，EAP 负位相  
 476 波列转为正位相波列。南部型发生在副高南移西进过程中， $300\text{hPa}$  温度表现为偶极型，由  
 477 北冷南暖转为北暖南冷，整层高度场以正值为主。东部型发生在副高北抬东退至南移西进过  
 478 程中，对流旺盛区由低纬加强向中纬移动， $200\text{hPa}$  及以下几乎全为温度暖区。



479

480

481

482

483

484

图 12 同图 9，但为 4 种分型分别第 1、3、5 位相的合成。

Fig.12 The same as Figure 9, but for latitude-altitude cross-section in the 1<sup>st</sup> phase (left column), 3<sup>rd</sup> phase(middle) and 5<sup>th</sup> phase(right).

485 6 小结和讨论

486 本文以发生在江淮地区的极端降水事件为研究对象,采用聚类分析方法将极端降水事件  
487 划分为 4 种类型,分析了不同类型降水事件的环流异常特征。主要结论如下:

488 (1) 根据降水中心落区的差异,定义了中部型、北部型、南部型和东部型等 4 种类型。  
489 其中中部型发生频次最多,北部型、南部型次之,东部型最少。前 3 类集中发生时段与东亚  
490 季风雨带的季节性北跳有关,集中在梅雨期,而第 4 类较为分散,最多频次出现在 8 月第 2  
491 候,与热带气旋活动有关。

492 (2) 4 种类型极端降水发生期间,大气环流配置具有共同的异常特征,主要表现为:  
493 降水落区位于偏强南亚高压与西风急流之间的高空辐散下方,大气垂直速度增大,对流层上  
494 中层温度水平梯度加大,中高纬环流经向度较大,副高强度加强,海洋地区向陆地的水汽输  
495 送增强。

496 (3) 不同类型的极端降水,对应环流因子的位置和强度变化存在差异,这种差异在中  
497 部型、北部型、南部型与东部型之间尤为明显。前 3 型 EAP 较显著,以中部型波列最为清  
498 晰;副高外围为西南-东北向的正涡度带,存在低空急流,水汽输送主要来自西太平洋和南  
499 海地区;对流层上层气温梯度呈北冷南暖的偶极型异常结构,南部型在 300hPa 附近有明显  
500 冷平流,北部型还存在“上冷下暖”的异常结构。东部型对应的 EAP 不典型,无明显低空  
501 急流,东亚沿海偏东水汽输送明显,对流层上层只存在单极暖中心,气温偏暖异常。低频强  
502 降水发生的环流背景与南部型呈现相似特点,但在南亚高压、高空西风急流、副高、低空急  
503 流、水汽输送等关键环流因子的强度及具体位置上存在差异。

504 (4) 不同类型极端降水发生前对应的低频大尺度环流演变也存在显著差异。中部型降  
505 水发生在副高北抬东退时,南亚高压无明显增强,EAP 波列由对流层顶向下传播。北部型降  
506 水也发生在副高北抬东退时,地面温度暖中心由长江-黄河之间南移至江南,江淮上空温度  
507 上冷下暖。南部型发生在副高南移西进过程中,300hPa 温度表现为偶极型,由北冷南暖转  
508 为北暖南冷,整层高度场以正值为主。东部型发生在副高北抬东退至南移西进过程中,对流  
509 旺盛区由低纬加强向中纬移动,200hPa 及以下几乎全为温度暖区。

510 利本文仅从 4 种极端降水落区空间差异出发研究了其对应的不同环流配置,未来需加强  
511 不同量级极端降水的机理研究。例如本文选取的 297 次事件中,单次事件日均降水量最大可  
512 达 53mm,最小为 5mm,相差 10 倍。极端降水的落区和强度,对防灾减灾工作尤为重要。  
513 按照降水范围和雨强,可采取不同级别的防汛应急响应措施,提高精细化服务能力,既可以  
514 减轻洪涝灾害损失又避免过度防御。此外,本研究开展了极端降水动力-热力条件的低频演

515 变分析, 还需进一步分析同一低频过程中四种极端降水空间型间的转换特征及原因, 以及该  
516 低频过程与热带低频振荡、欧亚遥相关、东亚太平洋遥相关等重要低频信号之间的关系, 进  
517 一步探讨动力模式对不同类型极端降水的预测能力。

518

519

### 参考文献 (References)

- 520 曹琦萍, 王传辉, 周建平, 等. 2014. 江淮流域夏半年日照时数气候特征及趋势分析 [J]. 气  
521 象, 40(5): 548-553. Cao Qiping, Wang Chuanhui, Zhou Jianping, et al. 2014. Climate  
522 characteristics and trend analysis of sunshine hours in summer half year over the Yangtze  
523 Huaihe Basin [J]. Meteor Mon (in Chinese), 40(5):548-553.
- 524 曹鑫, 任雪娟, 孙旭光. 2013. 江淮流域夏季持续性强降水的低频特征分析 [J]. 气象科学,  
525 33(4): 362-370. Cao Xin, Ren Xuejuan, Sun Xuguang. 2013. Low-frequency oscillations of  
526 persistent heavy rainfall over Yangtze-Huaihe River Basin [J]. Journal of the Meteorological  
527 Sciences (in Chinese), 33(4): 362-370.
- 528 巢清尘, 王有民, 周星妍, 等. 2023. 中国气象灾害年鉴(2021)[M]. 北京: 气象出版社: 135-136.  
529 Chao Qingchen, Wang Youmin, Zhou Xingyan, et al. 2023. Yearbook of meteorological  
530 disasters in China (2021) [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese),: 135-136
- 531 陈龙光, 陈斌, 赵瑞瑜, 等. 2024. 基于天气分型的四川盆地西侧极端强降水事件环流异常  
532 配置与演变特征 [J]. 大气科学, 49(2): 491-506. Chen Longguang, Chen Bing, Zhao Ruiyu,  
533 et al. 2024. Configuration of large scale circulation anomalies and its evolution for extreme  
534 heavy precipitation events in the west of Sichuan Basin based on classified weather pattern  
535 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 49(2):491-506
- 536 崔妍, 江志红, 陈威霖. 2010. 典型相关分析方法对 21 世纪江淮流域极端降水的预估试验 [J].  
537 气候变化研究进展, 6(6): 405-410. Cui Yan, Jiang Zhihong, Chen Weilin. 2010. Projection of  
538 extreme precipitation events in the 21st century in the Changjiang-Huaihe River Valley based  
539 on canonical correlation analysis [J]. Climate Change Research (in Chinese), 6(6): 405-410.
- 540 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 254-255. Ding  
541 Yihui. 1993. Study on the persistent extreme rainfall in the Jianghuai region in 1991[M].  
542 Beijing: Meteorological Press (in Chinese), 254-255.
- 543 Guan P Y, Chen G X, Zeng W X, et al. 2020. Corridors of Mei-Yu-Season rainfall over Eastern China.  
544 Journal of Climate [J], 33(7):2603-2626.
- 545 韩翠, 尹义星, 黄伊涵, 等. 2018. 江淮梅雨区 1960-2014 年夏季极端降水变化特征及影响  
546 因素 [J]. 气候变化研究进展, 14(5): 445-455. Han Cui, Yin Yixing, Huang Yihan, et al. 2018.  
547 Variation characteristics and influencing factors of extreme precipitation in the Meiyu area  
548 of Yangtze-Huai River Basin during 1960-2014 [J]. Climate Change Research (in Chinese),  
549 14(5): 445-455.
- 550 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. 大气  
551 科学, 14(1): 108-117. Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general  
552 circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their  
553 physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14(1) :  
554 108-117.

555 江洁,周天军,张文霞. 2022. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征 [J]. 大气科学,46(3):  
556 707-724. Jiang Jie, Zhou Tianjun, Zhang Wenxia. 2022. Temporal and Spatial Variations of  
557 Extreme Precipitation in the Main River Basins of China in the Past 60 Years [J]. Chinese  
558 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 707-724.

559 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J].  
560 Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-472.

561 Lawrence D M, Webster P J. 2002. The boreal summer intraseasonal oscillation: Relationship  
562 between northward and eastward movement of convection [J]. J.Atmos.Sci., 59(9):  
563 1593-1606.

564 李健颖,毛江玉. 2019. 亚洲夏季风 30~60 天季节内振荡对中国东部地区持续性极端降水的  
565 影响 [J]. 大气科学, 43(4): 796-812. Li Jianying, Mao Jiangyu. 2019. Impact of the boreal  
566 summer 30-60-day intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region on  
567 persistent extreme rainfall over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences  
568 (in Chinese), 43(4): 796-812.

569 李娟, 闫会平, 朱志伟. 2020. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分  
570 析 [J]. 高原气象, 39(3): 532-542. Li Juan, Yan Huiping, Zhu Zhiwei. 2020. Quantitative  
571 Analysis of Changes of Summer Extremes Temperature and Precipitation Days over China  
572 with Respect to the Mean Temperature Increase [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39  
573 (3) : 532-542.

574 Liang X D, Xia R D, Bao X H, et al. 2022. Preliminary investigation on the extreme rainfall event  
575 during July 2021 in Henan Province and its multi-scale processes [J]. Chin Sci Bull,  
576 67(10):997-1011.

577 刘芸芸,丁一汇. 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析 [J]. 气象, 46(11): 1393-1404. Liu  
578 Yunyun, Ding Yihui. 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020  
579 [J]. Meteor Mon (in Chinese), 46(11): 1393-1404.

580 Luo Y H, Du Y. 2023. The roles of low-level jets in “21·7” Henan extremely persistent heavy  
581 rainfall event [J]. Adv. Atmos. Sci., 40(3): 350-373.

582 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. 气候与环境研  
583 究, 15(4): 337-353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in  
584 observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. Climatic and  
585 Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 337-353.

586 任芝花,余予,邹凤玲,等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J].应用气象学  
587 报,23(6): 739-747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012,Quality detection of surface  
588 historical basic meteorological data [J]. J Appl Meteor Sci, (in Chinese), 23(6): 739-747.

589 Semenov V A, Bengtsson L. 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse  
590 gas simulation with a coupled AOGCM[J]. Climate Dynamics, 19(2):123-140.

591 孙建华, 卫捷, 傅慎明, 等. 2018. 江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型[J]. 大气科  
592 学, 42(4): 741-754. Sun Jianhua, Wei Jie, Fu Shenming, et al. 2018. The multi-scale physical  
593 model for persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. Chinese  
594 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 741-754.

595 田利庆,李舒文,邱晓滨,等. 2024. 一次极端暴雨过程低空急流变化机制分析[J]. 大气科学,  
596 48(4): 1608-1626. Tian Liqing, Li Shuwen, Qiu Xiaobin, et al. 2024. Variation mechanism of  
597 low-level jets during an extreme rainstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in  
598 Chinese), 48(4): 1608-1626.

599 王静, 余锦华, 何俊琦. 2015. 江淮地区极端降水特征及其变化趋势的研究[J]. 气候与环境研  
600 究, 20(1): 80-88. Wang Jing, Yu Jinhua, He Junqi. 2015. Study on characteristics and change  
601 trend of extreme rainfall in the Jianghuai region [J]. Climatic and Environmental Research (in  
602 Chinese), 20 (1): 80-88.

603 Wang L C, Sun X G, Yang X Q, et al. 2021. Contribution of water vapor to the record-breaking  
604 extreme Meiyu rainfall along the Yangtze River Valley in 2020 [J]. J. Meteor. Res., 35(4),  
605 557-570.

606 王黎娟, 庞玥, 于波, 等. 2014. 江淮流域梅雨期持续性强降水及其 10~30d 低频环流特征.  
607 热带气象学报 [J], 30(5): 851-860. Wang Lijuan, Pang Yue, Yu Bo, et al. 2014. The  
608 characteristics of persistent heavy rain events and 10~30d day low-frequency circulation in  
609 Yangtze-Huaihe River basin during Meiyu period [J]. J.Trop. Meteor. (in Chinese), 30(5):  
610 851-860.

611 汪玲瑶, 谌芸, 肖天贵, 等. 2018. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 44(6): 771-780.  
612 Wang Lingyao, Chen Yun, Xiao Tiangui, et al. 2018. Statistical analysis of warm-sector  
613 rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River  
614 in summer [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(6): 771-780.

615 汪小康, 杨浩, 崔春光, 等. 2022. 2021 年中国降水异常气候特征及 4 次典型极端天气过程  
616 分析[J]. 暴雨灾害, 41(5):489-500. Wang Xiaokang, Yang Hao, Cui Chunguang, et al. 2022.  
617 Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather  
618 processes in China in 2021[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese),41(5): 489-500.

619 Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and  
620 precipitation over the arid region of north-western China: Observation and projection [J].  
621 Advances in Atmospheric Sciences, 34(3):289-305.

622 王志毅, 高庆九, 胡邦辉, 等. 2017. 近 50a 江淮地区梅雨期水汽输送特征研究[J]. 大气科学  
623 学报, 40(1):48-60. Wang Zhiyi, Gao Qingjiu, Hu Banghui, et al. 2017. Features of moisture  
624 transport in the Yangtze-Huaihe River Basin during the Meiyu season in the last 50 years [J].  
625 Trans Atmos Sci (in Chinese), 40(1):48-60.

626 吴广建, 章剑林, 袁丁. 2019. 基于 K-means 的手肘法自动获取 K 值方法研究[J]. 软件, 40(5):  
627 167-170. Wu Guangjian, Zhang Jianlin, Yuan Ding. 2019. Automatically obtaining K value  
628 based on K-means elbow method [J].Computer Engineering&Software (in Chinese),40(5):  
629 167-170

630 肖莺, 任永建, 杜良敏. 2017. 湖北省夏季不同阶段强降水及其大气低频特征[J]. 气象, 43(1):  
631 77-83. Xiao Ying, Ren Yongjian, Du Liangmin. 2017. Characteristics of heavy rain events over  
632 Hubei province at different stages of summer and corresponding low-frequency atmospheric  
633 features [J]. Meteor. Mon. (in Chinese),43(1): 77-83.

634 杨涵涓, 龚志强, 王晓娟, 等. 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J]. 大  
635 气科学, 45(3): 683-696. Yang Hanwei, Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, et al. 2021. Analysis  
636 of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme  
637 precipitation over Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),  
638 45(3): 683-696.

639 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.  
640 Yang Wei, Cheng Zhi. 2015. Variation characteristics of extreme precipitation during Meiyu  
641 flood period over Yangtze-Huaihe basin in recent 53 years [J]. Meteor. Mon. (in Chinese),41  
642 (9): 1126-1133.

643 Ye Y B, Qian C. 2021. Conditional attribution of climate change and atmospheric circulation  
644 contributing to the record-breaking precipitation and temperature event of summer 2020 in  
645 southern China[J]. Environ.Res.Lett,16(4). doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeeaf  
646 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气  
647 象学报, 27(5): 631-640. Zhai Panmao, Li Lei, Zhou Baiquan, et al. 2016. Progress on  
648 mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai  
649 River valley [J]. Journal of Applied meteorological Science (in Chinese),27(5): 631-640.  
650 张辛, 张凌云. 2023. 我国极端降水时空分布及大气环流背景研究进展[J]. 气象研究与应用,  
651 44(4): 70-77. Zhang Xin, Zhang Lingyun. 2023. Progress in the study of spatio-temporal  
652 distribution of extreme precipitation and its atmospheric circulation background in China [J].  
653 Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese),44(4):70-77.  
654 Zhang Z X, Zhang Q, Jiang T. 2007. Changing features of extreme precipitation in the Yangtze River  
655 basin during 1961-2002[J]. J Geo Sci, 17(1):33-42.  
656 赵俊虎, 张涵, 左金清, 等. 2021. 2020年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J]. 大  
657 气科学, 45(6): 1433-1450. Zhao Junhu, Zhang Han, Zuo Jinqing, et al. 2021. What drives the  
658 super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin in the Meiyu period of 2020?  
659 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1433-1450.  
660 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. 大气科学,  
661 27(6): 1018-1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy  
662 rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over the East  
663 Asian during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),27(6):  
664 1018-1030.  
665 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].  
666 中国科学: 地球科学, 51(10): 1637-1649. Zhou T J, Ren L W, Zhang W X. 2021.  
667 Anthropogenic influence on extreme Meiyu rainfall in 2020 and its future risk [J]. Science  
668 China Earth Sciences (in Chinese),64(10): 1633-1644.