1	2021年秋季我国北方极端降水的可能成因分析
2 3	谢爽1, 祁莉1*, 王子佳2
4 5 6 7 8	1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044 2 河海大学,水文水资源学院,江苏南京 210098
9	摘要 近年来极端降水频繁发生,给居民生活、城市内涝等造成了严重的影响,因此极端降
10	水的预报及前兆因子的分析十分重要。本文分析了 2021 年 9-10 月发生在我国北方地区极端
11	降水的时空特征,揭示了影响极端降水的环流背景及因子。结果表明,此次极端降水累计降
12	水量超过 220mm,为 1961 年以来最强的一次极端降水事件。我国秋季降水主要受 ENSO 影
13	响,发展中的La Niña 形成异常反气旋,增强了水汽输送。但 ENSO 的影响主要位于 39°N
14	以南, 39°N 以北地区主要与 MJO 异常活动相关。MJO 在 3-5 位相异常活跃,为历史气候
15	态的 2-3 倍,异常增加的季节内尺度上升运动造成水汽辐合,形成了本次极端降水。统计分
16	析也表明, MJO 在第4位相活跃时北部区域极端降水的发生概率将增加60%以上,这为北
17	方极端降水的预报提供了有效思路。
18	
19	关键词 极端降水,ENSO,MJO
20 21 22	文章编号 2024069B 中图分类号 文献标识码 Doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2410.24069
23	Analysis of the potential causes of extreme precipitation in
24	northern China during the autumn of 2021
25	
26	Xie Shuang ¹ , Qi Li ¹ *, Wang Zijia ²
27 28 29 30 31	 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Nanjing 210044 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098
32	Abstract In recent years, there has been an increase in extreme precipitation, leading to significant
33	impacts on residents' lives and causing urban flooding. Therefore, it is important to forecast
34	extreme precipitation and analyze the precursor factors that lead to it. In this paper, we analyze the
35	spatiotemporal characteristics of extreme precipitation that occurred in September-October 2021
36	in the northern region of China and reveal the circulation background and factors affecting
37	extreme precipitation. The results show that the extreme precipitation accumulated over 220 mm,
30 30	affected by ENSO, with the developing I a Niña forming an anomalous anticyclone that enhances
57	
	anceted by ENSO, with the developing La Tuna forming an anomatous anticyclone that enhances

作者简介 谢爽,女,2000 年出生,硕士研究生,主要从事季风和海一陆一气相互作用研究。Email: 1824361541@qq.com 通讯作者 祁莉,女,1981 年出生,教授,主要从事季风和海一陆一气相互作用研究。E-mail: qili@nuist.edu.cn 资助项目 国家重点研发计划项目 2022YFF0801602 Funded by National Key Research and Development Program on Monitoring (Grant 2022YFF0801602) 40 water vapor transport. However, the influence of ENSO is mainly located south of 39°N, and the 41 area north of 39°N is mainly associated with the anomalous activity of the MJO. The MJO was 42 anomalously active in phase 3-5, which was 2-3 times the historical climatological state, and the 43 anomalously increased intraseasonal-scale upward motion caused the water vapor convergence, 44 which resulted in the formation of the extreme precipitation. Statistical analyses also show that the 45 probability of extreme precipitation in the northern region will increase by more than 60% when 46 the MJO is active in phase 4, which provides an effective idea for forecasting extreme 47 precipitation in the north.

48 Keywords: Extreme precipitation, ENSO, MJO

49

50 1 引言

在全球变暖的背景下,世界各地极端降水事件频发(Alexander et al., 2006; Kunkel et al.,
2012; Dai et al., 2024),我国极端降水事件明显增加(朱坚等, 2009;孙军等, 2017; Gu et al., 2022)。以往对我国极端降水的研究多集中在夏季(Hsu et al., 2016; 符娇兰等, 2017;
Tang et al., 2021; He et al., 2021),然而秋季极端降水事件也时有发生,伴随已明显降低的气温,极端降水将对人民生命财产安全及农作物生产带来非常严重的影响(鲍媛媛等, 2003;柳艳菊等, 2012)。

57 2021年9-10月,黄河、长江、汉江流域等出现特强降雨,累计降雨量为1961年以来
58 历史同期最多,特别是9月16日至20日强降雨过程导致陕西、山西等9省(自治区、直辖
59 市)共58余县出现灾情;受暴雨过程影响,黄河部分支流打破历史记录(中国气象局)。山
60 西10月2日至7日的强降雨导致175.71万人受灾,农作物受灾面积357.69万亩,直接经济
61 损失 50.29 亿元,给农业生产、经济制造带来了严重影响
(https://news.sina.com.cn/c/2021-10-12/doc-iktzscyx9191907.shtml[2023-12-14])。因此这一大
63 范围的极端降水的成因值得深入研究,所得结果可为极端降水的预报预测提供思路。

64 以往研究表明,大气环流系统和外部强迫因子是决定秋季降雨位置和强度的主要因素。
65 高由禧(1958)早在1958年便提出我国秋季降水与亚洲南部的高空急流以及印度季风的进
66 退之间存在关联。随后不少研究指出西太平洋副热带高压、印缅槽和贝加尔湖低槽是影响秋
67 雨的核心系统。当贝加尔湖低槽和印缅槽加强,同时西太平洋副热带高压偏强并且位置偏西
68 偏北时,秋雨明显增多(白虎志等,2004; Niu and Li, 2008; 李传浩等, 2015; 齐冬梅等,
69 2020)。

除了上述大气环流系统对秋季降水的影响外,海洋作为一个稳定热源,可以通过海气相 70 互作用对降水产生影响。厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是年 71 际尺度上全球海洋大气耦合系统的主要模态(Bjerknes, 1969),可以通过大气遥相关调控全 72 球及区域的降水格局(Ropelewski et al., 1996; Yang et al., 2018)。大量研究表明, ENSO 73 对我国的降水具有重要影响,而西北太平洋反气旋(气旋)异常作为 ENSO 激发的太平洋-74 75 日本型(Pacific-Japan, P-J)遥相关的分支,是连接 ENSO 和我国气候异常的重要桥梁(Huang and Wu, 1989; Zhang et al., 1996, 1999; Wang et al., 2000)。在 El Niño 发展年夏季, 76 西北太平洋反气旋偏弱,我国南方沿海地区及江淮流域降水偏多,而北方地区降水偏少(符 77 78 淙斌和滕星林,1988)。El Niño发展年秋季,降水异常呈南北偶极型分布,长江中下游地 区降水偏少,南方地区降水偏多;La Niña 时,我国秋季北部降水偏多、南部降水偏少(龚 79 道溢和王绍武, 1999; 谌云和施能, 2003)。针对极端降水, 有研究指出在东部型 El Niño 80 事件发展期的秋季,华南地区极端降水增多,而华中地区极端降水则减少,La Niña 年我国 81

华西出现极端降水的频次更高(Li et al., 2011; 蒲于莉等, 2023)。但是 La Niña 对我国降
水的影响比较复杂,这与 ENSO 冷暖位相不对称引起的环流响应不对称有关(Burgers and
Stephenson, 1999)。也有研究认为印度洋偶极子(Indian Ocean dipole, IOD)、北大西洋和
北太平洋海温异常(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)等也可以影响我国秋季降水
(刘宣飞和袁慧珍, 2006; Li et al., 2017)。

除了大尺度海温以外, MJO 作为热带大气最强的季节内变率, 可以通过激发热带向热 87 带外传播的 Rossby 波进而调节大气环流影响全球天气气候(Madden and Julian, 1971, 1972; 88 Jones et al., 2004; Alvarez et al., 2016; Zhao et al., 2019; 郝立生等, 2020)。研究表明, 89 MJO 活动在一些极端气候事件中也起到了关键作用。例如,2020 年夏季发生在我国的超强 90 梅雨与 MJO 活动密切相关,其稳定维持在热带印度洋上空(1-3位相),在西北太平洋上空 91 激发的强大反气旋性环流为 2020 年超强梅雨提供了源源不断的水汽输送(Zhang et al., 92 2021)。当 MJO 对流主体位于中东印度洋(第2位相)时,华西地区秋季有降水最大正异常 93 (赵佳玉等, 2016)。 94

95 对于本文关注的 2021 年 9–10 月的极端降水事件,已有部分研究认为 2021 年 9 月的极端降水与西北太平洋副热带高压的偏西偏北及印度夏季风偏强有关,它们将海洋上的水汽源
97 源不断地输送到我国北方地区。而更直接影响因子为海气相互作用,Liu et al. (2022)认为
98 海洋性大陆上的对流异常以及较暖的热带大西洋调节了西太平洋副热带高压的强度和经向
99 位置从而影响我国北方降水;Gu et al. (2022)指出发展中的 La Niña 改变了沃克环流,引
100 起副热带高压向西北移动;而于群等 (2023)认为,2021 年极端降水与北太平洋中部显著
101 的正异常海温密切相关 (Sun et al., 2023)。

102 根据上述研究内容,可见引起 2021 年秋季极端降水的原因是复杂的,还未有定论。并
103 且,此次极端降水的范围不仅局限于传统意义上的华西秋雨的北部地区,还影响了京津冀及
104 其北部地区。因此,对这一长期、大范围的秋雨事件进行全面和深入的研究是非常必要的。
105 本文将着眼于年际及季节内角度探究 ENSO 及 MJO 在此次极端降水中的影响及可能物理机
106 制。

107

108 2 资料与方法

109 2.1 资料

使用的资料包括:1)美国国家海洋大气管理局(NOAA)第五版拓展重构的全球逐月 110 111 平均的海表温度资料(ERSSTv5),水平分辨率为2°×2°(Huang et al., 2017); 2)欧洲中心 天气预报中心(ERA5)提供的逐小时再分析资料,具体要素为:水平风场(U、V分量)、 112 垂直速度场、位势高度场、整层水汽通量及散度、比湿,水平分辨率为1°×1°(Hersbach et al., 113 114 2020); 3) CN05.1 格点化观测数据集提供的逐日降水资料, 空间分辨率为 0.25°×0.25°(吴 佳和高学杰, 2013); 4)澳大利亚气象局提供的实时多变量指数 (Real-Time Multivariate MJO 115 116 index, RMM 指数, http://www.bom.gov.au/climate/mjo/[2023-12-03]), 反映 MJO 的逐日振幅 和所在位相。通过提取热带地区(15°S-15°N)的OLR、200 hPa 和 850 hPa 纬向风场的季节 117 内信号,进行多变量经验正交函数分解(multivariate EOF, MV-EOF),并将实时资料投影 118 到 EOF1 和 EOF2 上得到时间序列 RMM1 和 RMM2, RMM 由 RMM1 和 RMM2 计算得到, 119 即 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ (Wheeler and Hendon, 2004)。当 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} \ge 1$ 时, 定义为 120 MJO 活跃日。由于资料时间范围的限制,与 MJO 相关分析的时间范围取为 1980-2021 年, 121

122 其余数据均取 1961-2021 年。选取 1961-2020 年作为气候态,为消除全球变暖的影响,均对123 要素场做了去趋势处理。

124 2.2 水汽收支方程

129

133

138

139 140

125 为了分析与 MJO 相关的降水的物理过程,本文在季节内(10-90 天)时间尺度上对水
126 汽收支方程进行诊断。式(1)表明,每个气压水平下季节内尺度比湿(q)的变化受水平水
127 汽平流、垂直水汽平流和大气视水汽汇(Q₂)的影响,Q₂的变化与凝结潜热和其他小尺度
128 次网格物理过程有关。

 $\frac{\partial q}{\partial t} = -\left\{V \cdot \nabla q\right\} - \left\{\omega \frac{\partial q}{\partial p}\right\} - \left\{\frac{Q_2}{L}\right\}$ (1)

130 t表示时间, ∇为水平梯度, p表示气压, L是凝结潜热。

131 为了确定与 MJO 活动相关的水汽变化,可以将变量分解为平均值和异常场,异常场包132 括 MJO 和非 MJO 分量。

 $X = \overline{X} + X' \quad X' = \{X\} + X^* \tag{2}$

134 上标表示季节平均,撇号表示相对于季节平均的偏差。由于关注 MJO 对极端降水的影
135 响,因此没有考虑季节平均分量的年际变化,使用 1980–2020 年 9–10 月的平均值。大括号
136 和星号分别表示 MJO 和非 MJO 分量。{*X*} 约等于{*X*},因为{*X*^{*}}接近于零且可以忽略不
137 计。因此,季节内时间尺度上的水汽收支可以进一步分解为以下九项:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\{V \cdot \nabla q\} - \left\{\omega \frac{\partial q}{\partial p}\right\} - \left\{\frac{Q_2}{L}\right\}$$

$$= -\{(\overline{V} + V') \cdot (\overline{q} + q')\} - \left\{(\overline{\omega} + \omega') \frac{\partial (\overline{q} + q')}{\partial p}\right\} - \left\{\frac{Q_2}{L}\right\}$$

$$= -\overline{V} \cdot \nabla \{q\} - \{V\} \cdot \nabla \overline{q} - \{V' \cdot \nabla q'\} - \overline{\omega} \frac{\partial \{q\}}{\partial p} - \{\omega\} \frac{\partial \overline{q}}{\partial p} - \left\{\omega' \frac{\partial q'}{\partial p}\right\} - \left\{\frac{Q_2}{L}\right\}$$

$$= -\partial \{q\} - \partial \{q\} - \langle \psi \rangle \partial \overline{q} -$$

 $= -u \frac{\partial \{q\}}{\partial x} - v \frac{\partial \{q\}}{\partial y} - \{u\} \frac{\partial \overline{q}}{\partial x} - \{v\} \frac{\partial \overline{q}}{\partial y} - \{V' \cdot \nabla q'\} - \omega \frac{\partial \{q\}}{\partial p} - \{\omega\} \frac{\partial \overline{q}}{\partial p} - \{\omega' \frac{\partial q'}{\partial p}\} - \{\frac{Q_2}{L}\}$ 式(3)中的 u 和 v 分别是纬向风和经向风,右侧的前 5 项是平均风对季节内水汽的平流,以及季节内风距平对平均水汽的纬向和经向平流,以及两个异常在季节内时间尺度上的非线性相互作用。随后的三项是垂直水汽平流,分别对应于季节内水汽距平与平均垂直速度

141 非线性相互作用。随后的三项是垂直水汽平流,分别对应于季节内水汽距平与平均垂直速度
142 的相互作用、平均水汽与季节内垂直速度异常之间的相互作用,以及两个异常在季节内时间
143 尺度上的非线性相互作用。最后一项表示凝结潜热的季节内分量。

144 2.3 极端降水事件定义

145 为了统计分析 MJO 对极端降水概率的影响,本文定义了中等强度降水日和极端降水日。
146 在 1980-2020 年 9 月 1 日-10 月 31 日共 2501 个样本中,当某一天的降水量超过总样本的第
147 75 百分位,则将该日定义为中等强度降水日;当某一天的降水量超过总样本第 95 百分位,
148 将该日定义为极端降水日。

149

150 3 2021 年 9-10 月降水及大气环流异常特征

151 2021年9-10月,我国长江以北部分区域发生了极端强降水,图1a给出了这一时期降
152 水异常的空间分布,可见在四川东部、陕西、河南、京津冀、辽宁南部等地区均出现了显著
153 的正降水异常,大部分地区异常达2mm/d以上,最大降水的强降水中心甚至达到6mm/d以

154 上。从降水关键区(图 1a 中平行四边形所示)日降水量的逐日演变来看(图 1b),降水气
155 候态(蓝色圆点)维持在 5mm/d 以下,而 2021年9–10月两个月中有 32天的日降水量(蓝
156 色柱状)都超过了历史气候平均值,最大的日降水量甚至超过气候态的 8–9倍。到 10月底,
157 关键区的累计降水量(红色曲线)超过 220mm,远远超过气候平均值及其 1 倍标准差(蓝
158 色曲线和阴影),是自 1961年有记录以来最多的一年,从年际变化上看(图 1c),2021年9–10
159 月的极端强降水超过 4 个标准差。

这一年秋季大气环流出现了明显异常。200hPa上,纬向风速在 40°N 以北为正距平,因
此与气候态相比,2021 年高空急流的范围明显扩大,并向东延伸,急流轴偏北,且最大风
速超过 40m/s (图 2a);在 500hPa上,东北亚沿岸与北太平洋中部有位势高度正距平中心;
西太平洋副热带高压加强并西伸至 110°E 以西,稳定维持在我国华南、印度半岛及中国南海
上空,同时 850hPa 风场呈反气旋性环流异常,反气旋西侧的西南风将水汽源源不断从海洋
上向降水区输送(图 2b),这在整层水汽通量场上亦有所体现,黄河中下游至华北为明显的
水汽异常辐合区(图 2c)。



168 图1 (a) 2021年9-10月降水量异常(阴影,单位:mm/d)。(b)图a所示降水关键区平均的日降水量在
169 2021年9月1日至10月31日的逐日演变(柱状图,单位:mm/d,左y轴)和累计日降水量(红线,单位:
170 mm,右y轴)。蓝色圆点表示气候态日降水量(单位:mm,左y轴),蓝线及阴影表示气候态累计日降水
171 量(单位:mm,右y轴)及一倍标准差。紫色三角表示其他年份(1961-2020年)累计日降水量(单位:
172 mm,右y轴)。(c) 9-10月关键区平均的降水量异常标准化的逐年演变。

Fig. 1 (a) Precipitation anomaly during September-October 2021 (shading, unit: mm/d). (b) Daily precipitation (bar, unit: mm/d, left y-axis) and daily accumulated precipitation (red line, unit: mm, right y-axis) in key precipitation areas shown in Figure a from September 1 to October 31, 2021. The blue dots indicate climatological daily precipitation (unit: mm, left y-axis), and the blue line and shading represent climatological daily accumulated precipitation (unit: mm, right y-axis) and one standard deviation. The purple triangles indicate accumulated daily precipitation (unit: mm, right y-axis) in all other years (1961–2020). (c) The annual evolution of anomaly standardization of average precipitation from September to October in key areas.



182 图 2 2021 年 9-10 月(a) 200 hPa 纬向风异常(阴影,单位: m/s)、(b) 500 hPa 位势高度异常(阴影,单 183 位:gpm)及850hPa风场异常(箭头,单位:m/s)和(c)整层水汽通量异常(箭头,单位:100kg/(m·s)) 184 及其散度异常(阴影,单位:10⁻⁵kg/m²s)。图 a 中红色和蓝色等值线分别为气候态和 2021 年纬向风速 35m/s、 185 40m/s 等值线,图 b 中红色和蓝色等值线分别为气候态和 2021 年 500 hPa 位势高度 5880gpm 等值线。 186 Fig. 2 (a) 200 hPa zonal wind anomaly (shading, unit:m/s), (b) 500 hPa geopotential height anomaly (shading, unit: 187 gpm) and 850 hPa wind anomaly (vectors, unit: m/s) and (c) integrated water vapor flux (vectors, unit: 188 100kg/(m·s)) and its divergence anomalies (shading, unit: 10⁻⁵kg/m²s). The red and blue contours in Figure a are 189 the climatological state and 2021 zonal wind speed 35m/s and 40m/s contours, respectively, and the red and blue 190 contours in Figure b are the climatological state and 2021 500 hPa potential height 5880 gpm contours, 191 respectively.

192

181

193 4 ENSO 对极端降水的可能影响

前人的工作已经指出,我国秋季的降水受到发展中 ENSO 的影响,它通过大气遥相关 194 影响西太平洋副热带高压进而影响我国的降水。图 3 给出了 9-10 月 Niño3.4 指数回归的同 195 期降水和 850 hPa 风场异常,这里 Niño3.4 指数乘了 (-1),表示同期热带太平洋 La Niña 196 对我国降水的影响。从回归的结果可以看出,当同期热带太平洋 SST 异常偏冷时,在我国 197 黄河南部及长江中下游地区出现显著的正降水异常,而我国南方地区则出现降水的负异常, 198 在风场上也有明显的反气旋性环流异常,表明 ENSO 相关的 SST 异常引起异常的反气旋性 199 200 环流,增强的西北太平洋反气旋将更多的热带暖湿水汽输送到我国。2021年为典型的发展 201 中 La Niña 年 (Liu et al., 2022),因此可以引起我国华西及长江中下游部分地区降水偏多。 这与前人的结论一致。 202

但是,从图 3 可以看到 La Niña 造成的降水异常仅仅位于 39°N 以南地区,并不能影响 203 北部的京津冀地区。与 2021 年 9-10 月的降水区域(图 1a) 相对比,可见 La Niña 可能是 204 39°N 以南地区极端降水形成的主要原因,而其北部地区的降水可能受到其他因子的影响。 205 因此,本文以 39°N 为界,将关键区分为南部区域和北部区域,图 4 给出了南部区域和北部 206 区域平均的降水异常回归的同期 SST 和 850 hPa 风场异常。当南部区域降水偏多时,热带太 207 平洋的确存在显著的冷海温异常,并伴随显著的东风异常(图 4a),南部区域的降水异常与 208 同期 Niño3.4 指数的相关系数高达-0.43, 通过了 95%的显著性检验(图 4c)。而北部区域的 209 降水异常则与热带太平洋的海温没有明显关系,相关系数仅为-0.22,没有通过显著性检验 210



-2

-2

-1

221 图 4 1961-2021 年 9-10 月南部区域(a)和北部区域(b)降水异常回归的同期海表温度(阴影,单位:℃) 222 和 850 hPa 风场(箭头,单位: m/s,仅显示风速通过 95%显著性检验的值)异常。(c) 9-10 月 Niño3.4 指 223 数与南部区域降水异常散点(红点: La Niña 年, 橙点: El Niño 年, 蓝点: Normal 年)。(d) 与(c) 相同,

3

2

0 1 Niño3.4

-2

-2

0

1 Niño3.4

7

2





243 图 5 1961-2021 年 9-10 月南部区域(a-c)和北部区域(d-f)降水异常回归的 500 hPa 位势高度(阴影,
244 单位: gpm,仅显示通过 95%显著性检验区域)和 850 hPa 风场(箭头,单位: m/s,仅显示通过 95%显著
245 性检验区域)异常(a, d)、200 hPa 纬向风(阴影,单位: m/s,斜线表示通过 95%显著性检验区域)异常

 246
 (b, e) 和整层水汽通量(箭头,单位: 50kg/(m·s)),仅显示通过95%显著性检验区域)及散度(阴影,

 247
 单位: 10⁻⁵kg/m²s,仅显示通过95%显著性检验区域)异常(c, f)。

248 Fig 5. Regressed 500 hPa geopotential height (shading, unit: gpm, only showing values that are statistically 249 significant at the 95% confidence level) and 850 hPa wind (vectors, unit: m/s, showing values that are statistically 250 significant at the 95% confidence level) anomalies (a, d), and 200 hPa zonal wind (shading, m/s, the diagonal lines 251 indicate the region significant at the 95% confidence level) anomaly (b, e), and integrated water vapor transport 252 flux (vectors, unit: 50kg/(m·s), only showing values that are statistically significant at the 95% confidence level) 253 and its divergence (shading, unit: 10⁻⁵kg/m²s, only showing values that are statistically significant at the 95% 254 confidence level) anomalies (c, f) onto the precipitation anomalies in the southern region (a-c) and the northern 255 region (d-f) in September-October from 1961 to 2021.

256

265

266

267

257 5 MJO 对北部区域极端降水的影响

258 上文分析中已指出与北部区域降水有关的大气环流在 9-10 月的平均场上没有明显的异
259 常,而极端降水的时间尺度为次季节到季节尺度,如图 6a 所示,北部区域 1980-2020 年秋
季的降水的确存在显著的次季节变化,在 10-20d 尺度有明显的谱峰,通过了 95%显著性检
261 验。在 2021 年 9-10 月极端降水发生期间,MJO 活动的确非常活跃,强度偏强,主要维持
262 在印度洋东部及海洋性大陆上空,即 3-5 位相(图 6b),在 9-10 月中有 12 天在第三位相活
263 跃,11 天在第四位相活跃,12 天在第五位相活跃(图 6c),维持天数均超过气候态平均值
264 及其 1 倍标准差,甚至达到了气候态的 2-3 倍。



MJO 位相演变。深蓝色和橙色分别代表 9 月和 10 月,数字代表相应的日期。(c) 2021 年 9–10 月期间 MJO
在 1–8 位相活动日数(橙色柱状,单位:天)和气候平均值(蓝色柱状,单位:天)。其中深蓝色误差折线
为各位相相应的 1 倍标准差。
Fig 6 (a) The average power spectrum of precipitation in the northern region in September-November from 1980 to

271 and both and a vertice power spectral density line; red line: Markov red noise line; blue line: Markov red noise line 95%
272 2020 (black line: power spectral density line; red line: Markov red noise line; blue line: Markov red noise line 95%
273 confidence test, blue shading: one standard deviation of power spectrum line). (b) The phase space diagram of
274 MJO from September 1 to October 31, 2021. Dark blue and orange represent September and October respectively,
275 and the numbers represent the corresponding dates. (c) MJO active days in Phases 1-8 during September-October
276 2021 (orange bar; unit: day) and the climatological mean (blue bar; unit: day) with corresponding one standard
277 deviation (blue error bars).

278

296

279 已有不少研究指出,MJO 是引起极端天气的重要因子,其相关的对流活动也可以影响
280 东亚地区的降水异常(Zhang et al., 2009;白旭旭等,2011;李文铠等,2014;赵佳玉等,
281 2016;Hsu et al., 2020)。那么,它对北方区域的极端降水将造成什么样的影响?图7给出
282 了1980–2020年9–10月在各个 MJO 活跃阶段相对于 MJO 不活跃阶段极端降水发生概率的
283 百分比变化分布。

从统计的结果可以看出, MJO 的不同位相均可以显著影响不同区域极端降水的发生概 284 285 率。总体来看,当 MJO 在第1、6和7位相活跃时,我国东部大部分地区极端降水均偏少, 而在第4位相活跃时东部大部分地区极端降水偏多(图7)。对于本文关注的区域, MJO 对 286 北部区域和南部区域的影响也截然不同。对南部区域(图 8a), MJO 对该区域极端降水的影 287 响以降低其发生概率为主,尤其在第6、7位相,极端降水的发生概率降低40%-60%以上; 288 仅在第4位相,其极端降水的发生概率提高了20%以上。而对北部区域(图8b), MJO对 289 极端降水发生概率的影响更为显著,在第3、4和5位相极端降水的发生概率明显升高,尤 290 291 其是在第4位相,当 MJO 活跃时极端降水的发生概率显著的增加了 60%以上,其影响范围 也覆盖了整个北部区域。上文的分析已提到在 2021 年 9-10 月, MJO 显著地在第 3-5 位相 292 293 活跃,活跃天数甚至达到气候态的 2-3 倍(图 6b、c),可见,正是 MJO 在第 3-5 位相的异 294 常活跃导致了 2021 年 9-10 月北部地区极端降水的发生,其中又以第 4 位相时的影响最为显 295 著。



297 图 7 (a) - (h) 1980-2020 年 9-10 月在各个 MJO 活跃阶段 (√*RMM*1² + *RMM*2² ≥1) 相对于 MJO 不活
 298 跃时 (√*RMM*1² + *RMM*2² <1) 极端降水发生概率的变化 (阴影,单位:%)。百分比变化计算方法为

- 299 [(P_x P_{non-MJO})/P_{non-MJO}*100%], P_x表示给定活跃的 MJO 位相下极端降水发生的概率, P_{non-MJO}表示不活
 300 跃的 MJO 位相下极端降水发生的概率。斜线部分表示通过 95% Z 检验的区域。
- Fig 7 (a)-(h) The percentage changes(shading, unit: %) in the probability of extreme precipitation in each MJO
- 302 active stage ($\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} \ge 1$) compared with when MJO is inactive ($\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} < 1$) in 303 September-October from 1980 to 2020. The percentage change is calculated as follows:
- 304 $[(P_x P_{non-MJO}) / P_{non-MJO} * 100\%]$. P_x represents the probability of extreme precipitation occurring in a given 305 active MJO phase, and $P_{non-MJO}$ represents the probability of extreme precipitation occurring in an inactive MJO 306 phase. The diagonal section indicates the area that passes the 95% Z test.
 - (b) (a) 80 80 60 60 40 40 20 20 0 0 -20 -20 -40 -40 -60-60 -80 -80 Phase? Phasel
- 308

 309
 图 8 区域平均的极端降水在活跃 MJO 位相相对于不活跃 MJO 位相发生概率变化(单位:%)。(a)南部区

 310
 域,(b)北部区域。

- 311
 - 312

Fig 8 The area-averaged probability change of extreme precipitation in the active MJO phase relative to the inactive MJO phase (unit: %). (a) The Southern area, (b) the northern area.

313

下文将通过季节内尺度的水汽收支方程诊断进一步分析 MJO 在第4位相活跃时如何影 314 响北部区域的极端降水。本文定义 MJO 在第4 位相活跃的当天为第0天,挑选出第0天降 315 水达到中等强度的降水事件,合成-10至10天10-90d 滤波的降水,并分析其形成原因。如 316 图 9a 所示,可以看到,MJO 尺度的降水在-10 天至-6 天时为负值,在-5 天由负转正,并逐 317 渐增加,在第4位相当天达到峰值,约1.6mm/d,然后降水逐渐减少,在第4天趋于0,随 318 后由正转负。由于在-3至2天低频降水始终维持在 0.7mm/d 以上,因此定义该时段平均为 319 第4位相,并开展季节内时间尺度上的水汽收支方程诊断,以量化分析引起水汽变化的热力 320 因子及动力因子的相对贡献,所得结果如图 9b 所示。可见,垂直水汽平流项($-\omega \partial q/\partial p$) 321 的贡献最大,起主要的调节作用,当水蒸气变成雨滴时,冷凝过程(-Q,/L)补偿了部分水 322 汽,而水平水汽平流项(-V·∇q)为较小的负值,引起水汽减少,在降水过程中起负贡献。 323 垂直水汽平流项($-\omega \partial q/\partial p$)又可以进一步分解为水平辐合辐散项($-q\nabla \cdot V$)及垂直 324 平流项 (-∂ωq/∂p), 其中以水平辐合辐散为主要作用, 垂直平流项几乎为零 (图 9b 内置 325 子图)。进一步进行尺度分解,可以发现极端降水发生的主要影响来自季节内尺度的异常上 326 升运动对季节平均水汽的垂直输送 $(-\{\omega\}\partial \overline{q}/\partial p)$,其次是季节内尺度异常上升运动和水汽 327 的非线性相互作用(-{ω' ∂q'/∂p}))以及季节内尺度经向风异常对季节平均水汽的经向输送 328

329 $(-\{v\}\partial \overline{q}/\partial y)$,季节内尺度异常水平平流 $(-\{V'\cdot \nabla q'\})$ 的贡献较小,其余项贡献为负值(图



332 图 9 (a) 1980-2020 年 9-10 月 MJO 在第 4 位相活跃且降水达到中等降水强度时,北部区域-10 天至 10 天
 333 平均的 10-90 天滤波的降水距平合成(柱状,单位: mm/d)。红色虚线为-3 天和 2 天参考线。(b) 北部区
 334 域整层积分(地面-300 hPa)的 10-90 天尺度的水汽收支诊断(-3 至 2 天,单位: 10⁻⁵ kg m⁻²s⁻¹)。(c)为(b)
 335 第 2 和第 3 项分解的结果(单位: 10⁻⁵ kg m⁻²s⁻¹)。

Fig. 9 (a) Averaged 10-90-day precipitation anomaly (units: mm) from day -10 to day 10 relative to phase 4 (bar, unit: mm/d) in the northern region in September-October from 1980 to 2020 when the MJO was active in phase 4 and precipitation reaches moderate precipitation intensity. The red dotted lines are the -3 day and 2 day reference lines. (b)The 10-90-day-filtered surface to 300 hPa moisture budget terms (from day -3 to day 2, in 10⁻⁵ kg m⁻²s⁻¹).
in the northern area. (c) is the result of the decomposition of (b) items 2 and 3 (unit: 10⁻⁵ kg m⁻²s⁻¹).

341

因此,季节内尺度的异常上升运动对季节平均水汽的垂直输送是引起极端降水的主要原 342 因。如图 10a 所示,水汽主要集中在 600 hPa 以下,当 9-10 月 MJO 在第 4 位相活跃时,北 343 部区域范围在整个对流层存在明显的季节内尺度的上升运动,造成水汽辐合、凝结,有利于 344 降水甚至极端降水的产生,2021年的环流与合成结果类似,但是垂直运动的强度明显更强, 345 同时 120℃ 以东 850 hPa 以上有明显的偏东风,可以将海洋上的水汽向北部区域输送(图 346 10b)。2021年9-10月北部区域偏强的上升运动并非来自热带中东太平洋 La Niña 的贡献, 347 348 如图 10c 所示,当热带太平洋地区发生 La Niña 时,在北部区域将引起下沉运动,而非上升 运动。因此,以上结果表明,2021年9-10月由于 MJO 在 3-5 位相的异常活跃和维持在北 349 350 部区域形成了季节内尺度的强烈的上升运动,这是导致极端降水发生的关键因子。





352 图 10 (a) 1980-2020 年 9-10 月 MJO 在第 4 位相活跃且降水达到中等降水强度时, -3 至 2 天 39°-45°N 区
353 域纬向平均的 10-90 天滤波的风场合成(箭头, ^{ω×}(-100), 绿线表示^{ω<0}, 单位: Pa/s)和季节平均的
354 比湿场(阴影,单位: g/kg)。(b)与(a)相同,但为 2021 年。(c) 1961-2021 年 9-10 月(-1) *Niño3.4
355 指数回归的垂直速度场(阴影,单位, Pa/s,打点表示通过 95%显著性检验的区域)。

- Fig 10 (a) The 10-90-day meridional averaged $(39^{\circ}-45^{\circ}N)$ wind anomalies $\omega \times (-100)$, the green line represents $\omega < 0$, unit: Pa/s) and the seasonal averaged specific humidity (shading, unit: g/kg) for day -3 to day 2 of phase 4 in September-October from 1980 to 2020 when the MJO was active in phase 4 and precipitation reaches moderate precipitation intensity. (b) the same as (a), but for 2021. (c) Regressed vertical velocity anomaly (shading, unit: Pa/s, the dots indicate the region significant at the 95% confidence level) onto (-1)*Nino3.4 index.
- 362 6 结论与讨论

361

363 在全球变暖的背景下,极端降水频繁发生,给居民生活生产、经济制造等造成了严重影
364 响。本文基于 CN05.1 的逐日降水观测资料分析了 2021 年 9–10 月我国极端降水的时空特征,
365 进一步利用再分析资料通过合成、线性回归、相关等方法及季节内尺度的水汽收支方程诊断,
366 揭示了影响极端降水的环流背景及因子。主要结论如下:

367 (1)此次极端降水发生在我国北方陕西、山西、京津冀等地区,大部分地区降水强度
368 在 2mm/d 以上,有 32 天超过气候平均值,最大降水强度达 17mm/d 以上,是气候态的 8–9
369 倍,累计降水量超过 220mm,为自 1961 年有记录以来最强的一次极端降水事件。

370 (2)我国秋季降水主要受 ENSO 影响,但其影响主要位于 39°N 以南。2021 年 9–10
371 月热带太平洋为典型的发展中 La Niña,相关的热带冷 SST 异常可以增强西北太平洋反气旋,
372 200 hPa 西风急流显著偏北,强度增强,500 hPa 上我国东部和朝鲜半岛地区存在明显的正位
373 势高度异常中心,对应 850 hPa 风场为反气旋性环流,造成热带地区的水汽输送偏强,使得
374 我国华西及长江中下游部分地区降水偏多。但是 ENSO 并不能影响北部京津冀地区的降水。

375 (3) 39°N 以北地区极端降水的发生几乎不受 ENSO 影响,其主要为 MJO 的贡献。2021
376 年 9–10 月 MJO 在 3–5 位相异常活跃,维持天数高达 35 天,超过气候态 2–3 倍。统计分析
377 表明,MJO 在第 4 位相活跃时北部区域极端降水的发生概率增加 60%以上,同时季节内水

378 汽收支方程诊断的结果表明,动力项为造成极端降水的主要贡献,异常增加的季节内尺度上
379 升运动造成水汽辐合、凝结,形成了本次极端降水。这为北方极端降水的预报提供了有效思
380 路。

综上所述,我国秋季极端降水的发生在 39°N 以南主要是 ENSO 的作用,而在 39°N 以 381 382 北,尤其是京津冀地区显著受 MJO 异常活动的影响。当 MJO 在 3-5 位相异常活跃时,该地 区发生极端降水的概率增加,尤其当 MJO 在第4位相活跃时,极端降水发生概率增加 60% 383 以上。因此,当 MJO 异常活跃时应警惕华北地区极端降水的发生。由于根据目前的研究方 384 385 法难以确定 ENSO 在某一年中准确的影响效果,本文使用了回归方法得出统计意义上的结 果来确定 ENSO 的影响范围,这也是本文的不足之处。同时图 3 和图 7 对比发现, ENSO 和 386 MJO 的影响可能存在重叠,它们的各自贡献为多少,需要进一步探明。并且,从图 4c 可以 387 看到 ENSO 对降水的影响存在显著的不对称性, El Niño 发展年秋季降水显著偏少, 而在 La 388 Niña 年一半偏多一般偏少,这可能的原因还需要进一步探究。因此,极端天气事件往往成 389 因复杂,受到多种外强迫因子及全球变暖的影响,物理机制及预测方法值得深入研究。 390

391

392 参考文献(References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate
 extremes of temperature and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research:
 Atmospheres, 111(D5): 2005JD006290.
- Alvarez M S, Vera C S, Kiladis G N, et al. 2016. Influence of the Madden Julian Oscillation on
 precipitation and surface air temperature in South America[J]. Climate Dynamics, 46(1):
 245–262.
- 399 白虎志, 董文杰. 2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 23(6): 884-889. Bai
 400 Huzhi, Dong Wenjie. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over
 401 Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 884-889.
- 402 白旭旭,李崇银,谭言科,等. 2011. MJO 对我国东部春季降水影响的分析[J]. 热带气象学报,
 403 27(6): 814-822. Bai Xuxu, Li Chong yin, Tan Yanke, et al. 2011. Analysis of the
 404 Madden-Julian Oscillation impacts on the spring rainfall in east China[J]. Journal of
 405 Tropical Meteorology (in Chinese), 27(6): 814-822.
- 406 鲍媛媛,阿布力米提,李峰,等. 2003. 2001 年华西秋雨时空分布特点及其成因分析[J]. 应用
 407 气象学报,14(2): 215–222. Bao Yuanyuan, Abulimiti, Li Feng, et al. 2003. Space-time
 408 distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001[J]. Journal
 409 of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14(2): 215–222.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. Monthly Weather
 Review, 97(3): 163–172.
- 412 Burgers G, Stephenson D B. 1999. The "normality" of El Niño[J]. Geophysical Research Letters,
 413 26(8): 1027–1030.
- 414 谌云,施能. 2003. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. 热带气象学报, 19(2):
 415 137-146. Chen Yun, Shi Neng. 2003. El Niño/ENSO and climatic anomaly in the autumn of China[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19(2): 137-146.
- 417 Dai P, Nie J, Yu Y, et al. 2024. Constraints on regional projections of mean and extreme
 418 precipitation under warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,
 419 121(11): e2312400121.
- 420 符淙斌, 滕星林. 1988. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系[J]. 大气科学,

421 12(s1): 133–141. Fu Congbin, Teng Xinglin. 1988. Climate anomalies in China associated 422 with E1 Niño/Southern Oscillation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in 423 Chinese), 12(s1): 133–141. 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. 2017. "16·7"华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象, 424 425 43(5): 528-539. Fu Jiaolan, Ma Xuekuan, Chen tao, et al. 2017. Characteristics and 426 Synoptic Mechanism of the July 2016 Extreme Precipitation Event in North China[J]. 427 Meteorological Monthly (in Chinese), 43(5): 528-539. 428 高由禧, 郭其蕴. 1958. 我国的秋雨现象[J]. 气象学报, 29(4): 264-273. Kao Yushie, Kuo 429 Chiyun. 1958. On the autumn raining area in China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in 430 Chinese), 29(4): 264–273. 431 龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响[J]. 科学通报, 44(3): 432 315-320. Gong Daoyi, Wang Shaowu, The impact of ENSO on global land precipitation 433 and in China in the past 100 years[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 44(3): 434 315-320. 435 Gu W, Chen L J, Wang Y G, et al. 2022. Extreme precipitation over Northern China in autumn 436 2021 and joint contributions of tropical and mid-latitude factors[J]. Advances in Climate 437 Change Research, 13(6): 835–842. 438 Gu X, Ye L, Xin Q, et al. 2022. Extreme precipitation in China: A review on statistical methods 439 and applications[J]. Advances in Water Resources, 163: 104144. 440 郝立生, LI Tim, 马宁, 等. 2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响[J]. 大气科学, 44(3): 441 639-656. HAO Lisheng, LI Tim, Ma Ning, et al. 2020. Influence of MJO on summer 442 precipitation in North China in 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in 443 Chinese), 44(3): 639–656. 444 He L, Hao X, Li H, et al. 2021. How do extreme summer precipitation events over eastern China 445 subregions change?[J]. Geophysical Research Letters, 48(5): e2020GL091849. 446 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of 447 the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049. 448 Hsu P C, Lee J Y, Ha K J. 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall 449 extremes in southern China[J]. International Journal of Climatology, 36(3): 1403–1412. 450 Hsu P C, Qian Y, Liu Y, et al. 2020. Role of abnormally enhanced MJO over the western Pacific in 451 the formation and subseasonal predictability of the record-breaking Northeast Asian 452 heatwave in the Summer of 2018[J]. Journal of Climate, 33(8): 3333-3349. 453 Huang B, Thorne P, Banzon V, et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, 454 version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons[J]. Journal of Climate, 455 30(20): 8179-8205. 456 Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its 457 mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6(1): 21–32. 458 Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. 2004. Global occurrences of extreme precipitation and the 459 Madden-Julian Oscillation: Observations and predictability[J]. Journal of Climate, 17(23): 460 4575-4589. 461 Kunkel K E, Easterling D R, Kristovich D A R, et al. 2012. Meteorological causes of the secular 462 variations in observed extreme precipitation events for the Conterminous United States[J]. 463 Journal of Hydrometeorology, 13(3): 1131–1141. 464 李传浩, 刘宣飞, 李智, 等. 2015. 华西秋雨区域性极端降水的环流特征[J]. 热带气象学报, 465 31(4): 526-535. Li Chuanhao, Liu Xuanfei, Li Zhi, et al. 2015. Circulation patterns of

regional mean daily precipitation extremes of persistent autumn rain over western 466 China[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31(4): 526-535. 467 468 Li H X, Chen H P, Wang H J. 2017. Influence of North Pacific SST on heavy precipitation events 469 in autumn over North China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10(1): 21-28. 470 李文铠, 何金海, 祁莉, 等. 2014. MJO 对华南前汛期降水的影响及其可能机制[J]. 热带气象 学报, 30(5): 983-989. Li Wenkai, He Jinhai, Qi Li, et al. 2014. The influence of the 471 472 Madden-Julian Oscillation on annually first rain season precipitation in south China and possible mechanism[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30(5): 983–989. 473 474 Li W, Zhai P, Cai J. 2011. Research on the relationship of ENSO and the frequency of extreme 475 precipitation events in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2(2): 101–107. 476 Liu B, Zhu C, Ma S, et al. 2022. Combined effects of tropical Indo-Pacific-Atlantic SST 477 anomalies on record-breaking floods over Central-North China in September 2021[J]. 478 Journal of Climate, 35(18): 6191-6205. 479 刘宣飞, 袁慧珍. 2006. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响[J]. 大气科学学报, 480 29(6): 762-768. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen. 2006. Effects of ENSO on the relationship 481 between IOD and autumn rainfall in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 762-768. 482 483 柳艳菊, 孙冷, 孙丞虎, 等. 2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象, 38(4): 484 456-463. Liu Yanju, Sun Leng, Sun Chenghu, et al. 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism[J]. Meteorological 485 486 Monthly (in Chinese), 38(4): 456–463. 487 Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the Tropical Pacific[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 28(5): 702-708. 488 489 Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 490 40-50 day period[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 29(6): 1109–1123. 491 Niu N, Li J. 2008. Interannual variability of autumn precipitation over South China and its relation 492 to atmospheric circulation and SST anomalies[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 493 25(1): 117-125. 蒲于莉, 冯娟, 李建平. 2023. 东部型 El Niño 事件发展期秋季对中国极端降水的影响[J]. 高 494 495 原气象, 42(6): 1457-1467. Pu Yuli, Feng Juan, Li Jianping. 2023. Influence of developing phase of Eastern Pacific El Niño events on the autumn extreme precipitation 496 497 in China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 42(6): 1457–1467. 498 齐冬梅,周长艳,李跃清,等. 2020. 2017 年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析[J]. 气象, 46(1): 37-49. Qi Dongmei, Zhou Changyan, Li Yueqing, et al. 2020. Analysis of autumn 499 500 rainy and sunless characteristics and its mechanism in Sichuan in 2017[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(1): 37–49. 501 502 Ropelewski C F, Halpert M S. 1996. Quantifying southern oscillation-precipitation relationships[J]. 503 Journal of Climate, 9(5): 1043-1059. 孙军, 张福青. 2017. 中国日极端降水和趋势[J]. 中国科学:地球科学, 47(12): 1469-1482. Sun 504 505 J, Zhang F Q. 2017. Daily extreme precipitation and trends over China[J]. Science China 506 Earth Sciences, 60: 2190–2203. 507 Sun Y, Li J, Wang H, et al. 2023. Extreme rainfall in Northern China in September 2021 tied to 508 air-sea multi-factors[J]. Climate Dynamics, 60(7-8): 1987–2001. 509 Tang Y, Huang A, Wu P, et al. 2021. Drivers of summer extreme precipitation events over East 510 China[J]. Geophysical Research Letters, 48(11): e2021GL093670.

- 511 Wang B, Wu R, Fu J X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East
 512 Asian climate?[J]. Journal of Climate, 13(9): 1517–1536.
- 513 Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development
 514 of an index for monitoring and prediction[J]. Monthly Weather Review, 132(8):
 515 1917–1932.
- 516 吴佳,高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物
 517 理学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset
 518 over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of
 519 Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102–1111.
- Yang S, Li Z, Yu J Y, et al. 2018. El Niño-Southern Oscillation and its impact in the changing
 climate[J]. National Science Review, 5(6): 840–857.
- 522 于群, 孙越, 李建平, 等. 2023. 秋季黄河中下游降水主模态及 2021 年极端降水的气候背景
 523 [J]. 气象学报, 81(4): 547-558. Yu Qun, Sun Yue, Li Jianping, et al. 2023. The leading
 524 mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river and the climate
 525 background of extreme autumn rainfall in 2021[J]. Acta Meteorologica Sinica (in
 526 Chinese), 81(4): 547-558.
- 527 Zhang L, Wang B, Zeng Q. 2009. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in
 528 Southeast China[J]. Journal of Climate, 22(2): 201–216.
- 529 Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon: A diagnostic
 530 study of the '86/87 and '91/92 events[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,
 531 74(1): 49–62.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the
 precipitation in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 16(2): 229–241.
- Zhang W, Huang Z, Jiang F, et al. 2021. Exceptionally persistent Madden-Julian Oscillation
 activity contributes to the extreme 2020 East Asian Summer Monsoon rainfall[J].
 Geophysical Research Letters, 48(5): e2020GL091588.
- 赵佳玉,马振峰,范广洲. 2016. 热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响[J]. 高原气象, 35(6):
 1487-1497. Zhao Jiayu, Ma Zhenfeng, Fan Guangzhou. 2016. Impact of the
 Madden-Julian Oscillation on autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteorology (in
 Chinese), 35(6): 1487-1497.
- 541 Zhao Z, Oliver E C J, Ballestero D, et al. 2019. Influence of the Madden-Julian Oscillation on
 542 Costa Rican mid-summer drought timing[J]. International Journal of Climatology, 39(1):
 543 292–301.
- 544 朱坚,张耀存,黄丹青. 2009. 全球变暖情景下中国东部地区不同等级降水变化特征分析[J].
 545 高原气象, 28(4): 889–896. Zhu jian, Zhang Yaocun, Huang Danqing. 2009. Analysis of
 546 changes in different-class precipitation over Eastern China under global warming[J].
 547 Plateau Meteorology (in Chinese). 28(4): 889–896.

