

# 1 欧亚中纬度波列对夏季准双周东亚-太平洋遥相关强度年际变率 2 的调制

3  
4 温之平<sup>1,2,3</sup>, 黄一峰<sup>1</sup>, 陈晓丹<sup>1,2</sup>

5 1 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438

6 2 极地海-冰-气系统与天气气候教育部重点实验室, 上海 200438

7 3 崇明生态研究院, 上海 200062

8  
9 **摘要:** 本文基于 1979-2020 年 ERA5 和 NOAA 再分析数据, 分析了夏季准双周  
10 东亚-太平洋遥相关 (EAP) 年际变化特征, 并揭示了欧亚中纬度波列在准双周  
11 EAP 事件强度年际变化中的调制作用。统计结果显示, 准双周 EAP 的年际差异  
12 主要体现在事件强度而非事件频率。强、弱年准双周 EAP 期间西北太平洋低层  
13 偶极型环流的强度差异显著, 且在强、弱年 EAP 发展阶段欧亚中纬度波列活动  
14 明显不同。欧亚中纬度波列第一模态呈单波列结构, 在弱年时有超前准双周 EAP  
15 遥相关 3 天的显著相关; 第二模态为双波列结构, 在强年时有超前准双周 EAP  
16 遥相关 4 天的显著相关。在强年准双周 EAP 事件的发展阶段, 欧亚高层的双波  
17 列结构向西北太平洋频散波通量, 与低层环流耦合, 在菲律宾和日本以东海域低  
18 层形成显著的偶极型环流异常, 为准双周 EAP 波列维持提供动力支持; 而在弱  
19 年准双周 EAP 事件的发展阶段, 欧亚高层为单波列模态, 低层响应微弱且在 EAP  
20 成熟阶段之前快速衰减, 对准双周 EAP 波列的影响较弱。进一步对比分析表明,  
21 相较于单波列结构, 中纬度双波列结构更有利于在急流出口处形成位涡南侵和波  
22 破碎事件, 从而触发西北太平洋对流, 促进准双周 EAP 的发展。由此可见, 强  
23 年欧亚中纬度双波列模态通过相位叠加和波破碎这两种机制, 能有效促进强准双  
24 周 EAP 事件的加强和维持。

25 **关键词:** 遥相关 东亚-太平洋遥相关 季节内变率 年际变化

26 **文章编号:** 2025047A

27 **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895504.25047

---

收稿日期: 2025-03-14 网络预出版日期:

作者简介: 温之平, 男, 1963 年 10 月出生, 教授, 主要从事气候动力学研究。Email:  
[zpwen@fudan.edu.cn](mailto:zpwen@fudan.edu.cn)

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42030601, 41875087)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42030601, 41875087)

28 **Modulation of the Interannual Variability of the Summer Quasi-**  
29 **Biweekly East Asia-Pacific Teleconnection Intensity by Eurasian**  
30 **Mid-Latitude Wave Trains**

31  
32 Zhiping Wen<sup>1,2,3</sup>, Yifeng Huang<sup>1</sup>, Xiaodan Chen<sup>1,2</sup>

33 *1 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan*  
34 *University, Shanghai 200438, China*

35 *2 Key Laboratory of Polar Atmosphere-ocean-ice System for Weather and Climate, Ministry of*  
36 *Education, Fudan University, Shanghai 200438, China*

37 *3 Institute of Eco-Chongming (IEC), Shanghai 200062, China*

38  
39 **Abstract:** Based on ERA5 and NOAA reanalysis data from 1979 to 2020, this study  
40 investigates the interannual variability of the summertime quasi-biweekly (QBW) East  
41 Asia-Pacific (EAP) teleconnection and the modulation effect of mid-latitude Eurasian  
42 wave trains. We found that the year-to-year variation in the activity of QBW EAP events  
43 primarily stems from differences in intensity rather than frequency. The QBW EAP  
44 events in strong and weak years exhibit different magnitudes of the western North  
45 Pacific (WNP) dipole anomaly and display distinct upstream patterns over the Eurasian  
46 mid-latitudes. We extracted the leading modes of the upper-level meridional winds over  
47 the Eurasian mid-latitudes using EOF analysis. The first mode shows a single wave  
48 train structure, which is significantly correlated with circulation anomalies during the  
49 development phase of QBW EAP events in weak years. In contrast, the second mode  
50 exhibits a dual wave train structure, significantly correlated with circulation anomalies  
51 during the development phase of QBW EAP events in strong years. In strong years,  
52 during the development and mature phases of QBW EAP events, the upstream dual  
53 wave train in upper troposphere disperses energy to the WNP and couples closely with  
54 the lower-level circulation, fueling the QBW EAP events. Conversely, in weak years,  
55 the upper-level single wave train has barely influence on the lower levels and decays  
56 before the maturation of QBW EAP events, thus playing a minor role. Moreover, the  
57 dual wave train in strong years promotes more WNP convection via wave-breaking  
58 processes than the single wave train in weak years. Thus, the dual wave train in strong  
59 years leads to stronger QBW EAP events through phase superposition and wave-  
60 breaking processes.

61 **Key words:** Teleconnections, East Asia-Pacific teleconnection, Subseasonal  
62 variability, Interannual variations

## 64 1 引言

65 大气遥相关是不同区域间大气环流异常变化的桥梁,这种跨区域的协同变化  
66 对天气和气候具有重要影响。作为北半球夏季最显著的遥相关型之一,东亚-太  
67 平洋遥相关 (East Asia-Pacific, EAP), 亦称太平洋-日本遥相关 (Pacific-Japan,  
68 PJ), 是夏季东亚大气环流变化的主导模态之一, 对东亚地区天气气候具有重要  
69 调控作用 (Lau and Kim, 2006; 黄荣辉等, 2016; Wu et al., 2020; Sun et al., 2024)。  
70 EAP 遥相关和 PJ 遥相关分别由 Huang and Li (1987) 和 Nitta (1987) 首次提出,  
71 其主要特征表现为菲律宾海与日本附近地区位势高度场的反向振荡。两者本质上  
72 表现为同一种波列, 即由菲律宾海向中高纬度传播的 Rossby 波列。

73 近年来的诸多研究指出, EAP 遥相关有多尺度特征, 在季节内尺度上表现为  
74 次季节 (30-60 天) 尺度和准双周 (10-20 天) 尺度两种低频振荡周期, 与我国夏  
75 季降水及东亚大气环流的演变有重要关联 (吴捷等, 2013; Li et al., 2016; Wang et  
76 al., 2016; Li et al., 2020)。其中, EAP 遥相关在准双周尺度上具有独特的空间结  
77 构, 呈从菲律宾海至北美的大圆路径, 其垂直结构则表现为热带斜压强迫与中纬  
78 度正压响应的“正-斜压耦合结构”(Zhu et al., 2020; Sun et al., 2021)。典型个例  
79 分析表明, 准双周 EAP 遥相关能调制水汽输送和环流异常, 直接影响东亚极端  
80 强降雨事件的发生, 如 2020 年长江中下游地区“暴力梅”事件和 2021 年河南  
81 “7·21”极端暴雨事件, 其中不乏准双周 EAP 遥相关的贡献。事实上, 准双周  
82 EAP 遥相关不仅能引发江淮流域的持续性强降雨 (Chen and Zhai, 2014; Li et al.,  
83 2016; Chen et al., 2017), 还可能引发日韩高温热浪和西北太平洋海洋热浪事件  
84 (Noh et al., 2021, 2023)。由此可见, EAP 遥相关是改善东亚夏季天气延伸期预  
85 报的重要因子之一。

86 Liu et al. (2024b) 的研究指出, 东亚降水的延伸期可预报性主要源于强烈的  
87 季节内振荡信号, 若能在预报前期准确识别和模拟类准双周 EAP 波列, 则有望  
88 提高东亚天气延伸期预测能力。然而, 准双周 EAP 遥相关的可预报性与其自身  
89 强度密切相关, 强 EAP 事件的可预报性显著优于弱事件 (Wu et al., 2020)。这表  
90 明在准双周 EAP 遥相关活跃且强烈的夏季, 其对东亚天气气候具有更高的指示  
91 价值。因此, 对夏季准双周 EAP 遥相关强度年际变化及其驱动因子开展研究,  
92 不仅能加深对夏季东亚大气环流异常变化机制的理解, 还可为进一步提高东亚夏  
93 季天气的延伸期预测能力提供科学参考。

94 准双周 EAP 遥相关的强度受到欧亚中纬度波列的影响。以往研究指出, 夏  
95 季欧亚大陆中纬度存在以正压效应为主要维持机制的副热带急流波导和以斜压  
96 效应为维持机制的极锋急流波导 (王林和徐需强, 2024)。沿副热带急流传播的

97 丝绸之路遥相关 (Silk Road Pattern, SRP), 或称为环球遥相关 (Enomoto and  
98 Hoskins, 2003; Ding and Wang, 2005; Zhou et al., 2019), 其维持主要依靠大气内部  
99 的线性动力过程和降水潜热释放等外强迫的共同作用 (Enomoto and Hoskins,  
100 2003; Ding and Wang, 2005; Yasui and Watanabe, 2010; Ding et al., 2011)。沿极锋急  
101 流传播的大气遥相关型主要有两支: 英国-贝加尔湖走廊遥相关和英国-鄂霍次克  
102 海走廊遥相关 (British-Okhotsk Corridor, BOC), 它们主要受大气内部非线性动  
103 力过程的调控, 其中 BOC 遥相关还常与 SRP 遥相关发生耦合 (Xu et al., 2022;  
104 王林和徐需强, 2024)。这些纬向传播的中纬度波列与经向传播的 EAP 之间存在  
105 密切联系, 并协同影响东亚夏季天气 (Wang and Wang, 2018; 郭紫薇和王黎娟,  
106 2023; Chen et al., 2024; Liu et al., 2024a)。欧亚中纬度波列的活动通常早于 EAP  
107 波列活动, 可显著影响 EAP 中纬度异常中心的强度 (布和朝鲁等, 2008; 施宁等,  
108 2008, 2009; Zhu et al., 2024)。

109 综上所述, 准双周 EAP 遥相关是东亚延伸期天气预报的重要因子, 探究准  
110 双周 EAP 遥相关强度年际变化的成因对进一步提高东亚夏季天气的预测能力有  
111 重要意义。以往研究除关注准双周 EAP 遥相关的演变机制外, 还深入研究了欧  
112 亚中纬度波列对其的作用。然而, 目前关注准双周 EAP 遥相关强度年际变化的  
113 研究较少, 欧亚中纬度波列在其中的作用尚不明确。因此, 本文将在详细分析准  
114 双周 EAP 遥相关年际强度特征的基础上, 系统探讨欧亚中纬度波列与准双周  
115 EAP 波列强弱年际变化的联系, 并探究欧亚中纬度波列通过能量传播、相位干  
116 涉、波破碎过程对准双周 EAP 波列强弱年际变化的影响。

## 117 2 资料与方法

### 118 2.1 资料介绍

119 本文使用的资料有: (1) 欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium-  
120 Range Weather Forecast, ECMWF) 的 ERA5 逐日与逐月再分析资料 (Hersbach et  
121 al., 2023), 包括位势高度、水平风场、温度场和位势涡度等物理量, 水平分辨率  
122 为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 垂直方向上从 1~1000 hPa, 共 37 层。(2) 美国国家大气海洋管理局  
123 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的向外长波辐射  
124 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 逐日资料 (Liebmann and Smith, 1996),  
125 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。以上资料研究时段为 1979~2020 年, 夏季定义为 6-8 月。  
126 逐日 (月) 气候态指变量当日 (月) 的多年平均值, 逐日 (月) 异常值指变量当  
127 日 (月) 的原始值减去当日 (月) 的气候态。对逐日异常值采用 10-20 天 Butterworth  
128 带通滤波提取准双周尺度信号。对逐月异常值采用 9 年高通快速傅里叶变换 (FFT)  
129 滤波提取年际尺度信号。

130 本文使用学生 t 检验作为线性相关、线性回归和合成分析的统计显著性检验  
131 方法。由于滤波会改变时间序列的自相关系数，进而对数据的自由度造成影响，  
132 为了保证检验的统计显著性阈值，本文采用 Bretherton et al. (1999) 定义的有效  
133 自由度  $N^*$ ，公示如下：

$$134 \quad N^* = N \frac{1-r_1r_2}{1+r_1r_2} \quad (2.1)$$

135 其中， $N$ 表示数据样本量， $r_1$ 和 $r_2$ 分别表示两个时间序列滞后为 1 的自相关。

## 136 2.2 方法介绍

137 (1) 准双周 EAP 指数定义：基于之前学者的研究 (Wakabayashi and  
138 Kawamura, 2004; Kawamura and Ogasawara, 2006; Zhu et al., 2020)，将准双周 EAP  
139 指数定义为日本以东海域与菲律宾东北部海域两区域平均逐日位势高度异常之  
140 差的准双周分量，并进行标准化处理：

$$141 \quad EAPI = \left[ Z_{850} \left( \begin{matrix} 30^\circ \sim 40^\circ \text{N} \\ 150^\circ \sim 160^\circ \text{E} \end{matrix} \right) - Z_{850} \left( \begin{matrix} 20^\circ \sim 25^\circ \text{N} \\ 120^\circ \sim 130^\circ \text{E} \end{matrix} \right) \right]_{QBW} \quad (2.2)$$

142 (2) 准双周 EAP 的年际强度指数定义：计算每年夏季逐日准双周 EAP 指  
143 数的标准差，得到 42 年的原始标准差序列。再对原始标准差序列进行 9 年高通  
144 滤波提取其年际分量，最后进行标准化处理，得到的序列为年际强度指数。年际  
145 强度指数越大，表明当年夏季的准双周 EAP 遥相关活动越强；年际强度指数越  
146 小，表明当年夏季的准双周 EAP 遥相关活动越弱。

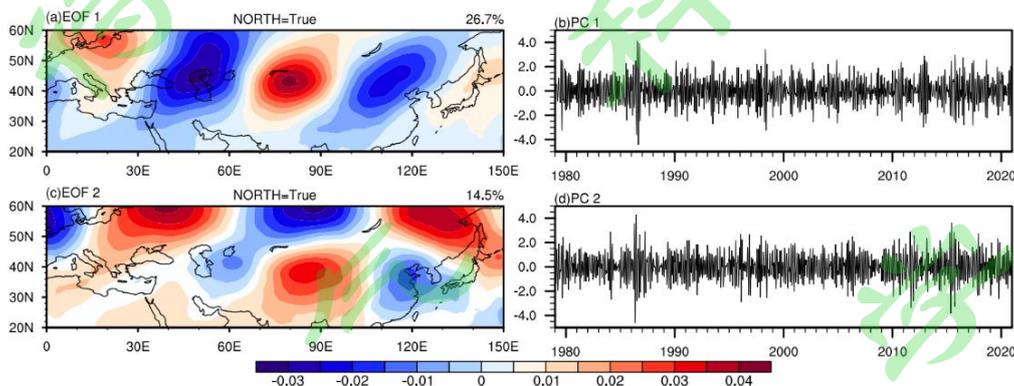
147 (3) 准双周 EAP 正（负）事件的识别：(a) 首先对准双周 EAP 指数进行筛  
148 选，选出所有绝对值大于 0.5 的峰值（谷值）作为准双周 EAP 正（负）事件。每  
149 个事件中指数绝对值最大的一天定义为峰值日；(b) 要求台湾以东海域和日本以  
150 东海域的异常值符号必须相反，以排除不具备遥相关物理意义的事件；(c) 为保  
151 持事件的独立性，相邻的正（负）事件之间需相隔至少 10 天，否则剔除峰值相  
152 对较弱的相邻事件。在研究时段内，共识别出 189 个正事件和 183 个负事件。正  
153 负事件的 e 折时间均为 2 至 3 天，体现了准双周的周期特性。事件筛选阈值的变  
154 化 (0.7 或 1.0) 不会对本文研究结果产生实质性影响，但会小幅改变事件的数量  
155 以及事件合成的强度。

156 (4) 准双周欧亚中纬度波列的识别：对夏季欧亚大陆 ( $20^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ ,  $0^\circ \sim 150^\circ \text{E}$ )  
157 高层 200 hPa 季节平均经向风异常场提取 EOF 前两个模态，其空间分布如图 1

158 (a) 和 1 (c) 所示。虽然前两个模态均呈现纬向波列型，但其波列结构不同。  
159 第一模态呈单波列型，第二模态呈双波列型，以往研究显示二者均对欧亚地区的  
160 天气气候有重要影响 (Ding and Wang, 2005; Hsu and Lin, 2007; Iwao and Takahashi,

161 2008; Deng et al., 2018; Xu et al., 2022; Na and Lu, 2023)。将相同区域的夏季逐日  
162 200 hPa 经向风准双周异常场分别投影到这两个模态空间场，标准化后的投影系  
163 数分别定义为 PC1 和 PC2。

164 (5) 波破碎指数：由于西北太平洋东亚急流出口区的波破碎事件对季节内  
165 EAP 遥相关的发生和发展有重要影响 (Takemura and Mukougawa, 2020a, 2020b,  
166 2023)。本文参考 Takemura and Mukougawa (2020b) 的工作，首先将等压面上的  
167 位势涡度插值到各等熵面层，随后定义 350 K 等熵面上(15~30°N, 150~170°E)与  
168 (30~45°N, 150~170°E)的区域平均位势涡度差为西北太平洋波破碎指数。波破碎  
169 指数为正表示发生了波破碎事件，即位涡向南侵入。



170

171 图 1 欧亚中纬度夏季季节平均 200 hPa 经向风异常经验正交函数分解：(a) 第一模态和 (c)  
172 第二模态的空间分布，及 10-20 天尺度 200 hPa 经向风异常对对应模态的投影系数 (b) PC1  
173 和 (d) PC2。

174 Fig.1 Spatial distributions of the (a) first and (c) second modes of the EOF of the summer-mean 200  
175 hPa meridional wind anomalies over the mid-latitudes of Eurasia, and the projected coefficients of  
176 the 10-20-day bass-pass filtered 200 hPa meridional wind anomalies onto (b) the first mode (PC1)  
177 and (d) the second mode (PC2).

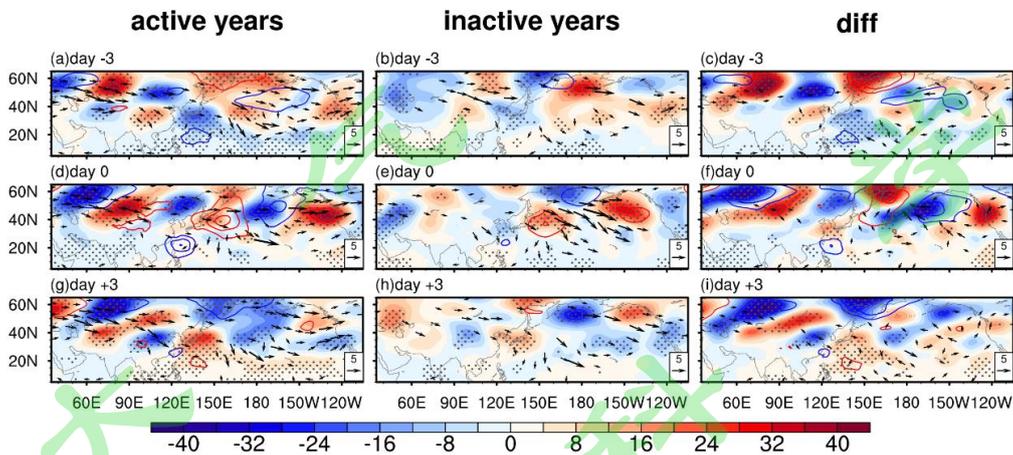
### 178 3 准双周 EAP 遥相关的年际变化特征

179 基于年际强度指数，选取指数大于 1.0 的年份 (1990、1996、1997、2012、  
180 2015) 为准双周 EAP 遥相关活动强年，指数小于-1.0 的年份 (1984、1989、1994、  
181 1995、1998、2010、2017) 为活动弱年。虽然强、弱年的准双周 EAP 正、负事件  
182 数量无显著差异 (强年：正事件 25 个、负事件 24 个；弱年：正负事件各 29 个)，  
183 但事件强度差异明显，并通过 95%水平的显著性检验。强年事件峰值强度的中位  
184 数为 1.75，不仅高于弱年的 1.26，甚至超越弱年最强事件的峰值强度 1.74。这些  
185 结果表明，准双周 EAP 遥相关在强、弱年的差异主要体现在事件强度而非事件  
186 频次。即使将所挑选典型年份的阈值改为 0.8 或 1.2，这一定性结论依然成立。

187 图 2 展示了强、弱年准双周 EAP 正事件发展-成熟-衰亡阶段的高低层异常  
188 环流和能量频散特征，负事件则呈现相反特征 (图略)。基于准双周 EAP 事件的

189 e 折时间尺度，选取事件峰值日（第 0 天）的前、后 3 天分别代表发展和衰亡阶  
 190 段。在成熟期，强、弱年准双周 EAP 事件的低层位势高度异常均呈现沿大圆路  
 191 径分布的北太平洋波列，但强年事件显著强于弱年（图 2d-e）。

192 特别值得注意的是，强、弱年准双周 EAP 正事件发生时，上游波列模态截  
 193 然不同。在强年的发展阶段（图 2a），欧亚大陆高层有源自西欧的双波列结构，  
 194 在亚洲上空呈四极子状分布，与双波列模态在东亚上空的四极子分布类似（图 1c）。  
 195 该双波列结构的能量向下游频散，在西北太平洋形成的低压异常位于菲律宾海低  
 196 层低压的北侧。成熟阶段，双波列结构退化为一支纬向波列，其能量频散致使日  
 197 本以东海域产生高压异常，与低层中纬度高压中心重合，波通量的一部分继续向  
 198 北美频散（图 2d）。衰减阶段与发展阶段特征相似但符号相反（图 2g），预示新  
 199 一次负位相事件发生。



200  
 201 图 2 准双周 EAP 正事件在强年（左）、弱年（中）及二者差异场（右）的 10-20 天尺度 850  
 202 hPa 和 200 hPa 位势高度异常以及 200 hPa 波活动通量合成场，分别对应（a-c）峰值前 3 天  
 203 （day -3）和（d-f）峰值日（day 0）以及（g-i）峰值后 3 天（day +3）。其中阴影表示 200 hPa  
 204 位势高度异常（单位：gpm）、等值线表示 850 hPa 位势高度异常（间隔为 8 gpm，从±8 gpm  
 205 开始绘制；蓝色和红色分别表示正、负异常，零值线省略）、矢量箭头表示 200 hPa 波活动  
 206 通量（单位： $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ）。打点、等值线和矢量表示达到 90%的置信度水平的区域。

207 Fig.2 Composite maps of the 10-20-day bass-pass filtered geopotential height anomalies at 850 hPa  
 208 and 200 hPa and wave activity fluxes at 200 hPa for QBW EAP positive events during active years  
 209 (left), inactive years (middle), and their differences (right), corresponding to (a-c) 3 days before the  
 210 peak day (day -3), (d-f) the peak day (day 0), and (g-i) 3 days after the peak day (day +3). The  
 211 shaded represents 200 hPa geopotential height anomalies (unit: gpm), the contour represents 850  
 212 hPa geopotential height anomalies (with an interval of 8 gpm, starting from  $\pm 8$  gpm; blue and red  
 213 lines indicate positive and negative anomalies, respectively, with zero contour omitted), and the  
 214 vectors represent 200 hPa wave activity fluxes (unit:  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ). The stippling, contour and vectors  
 215 indicate anomalies that are significant at the 90% confidence level.

216 与强年相比，弱年准双周 EAP 事件的上游波列则明显偏弱。在发展阶段，  
 217 有一支沿副热带急流传播且强度较弱的波列（图 2b），其结构和位置类似于单波  
 218 列模态（图 1a）。此外，在西伯利亚地区也有一支纬度更高的波列，但离准双周

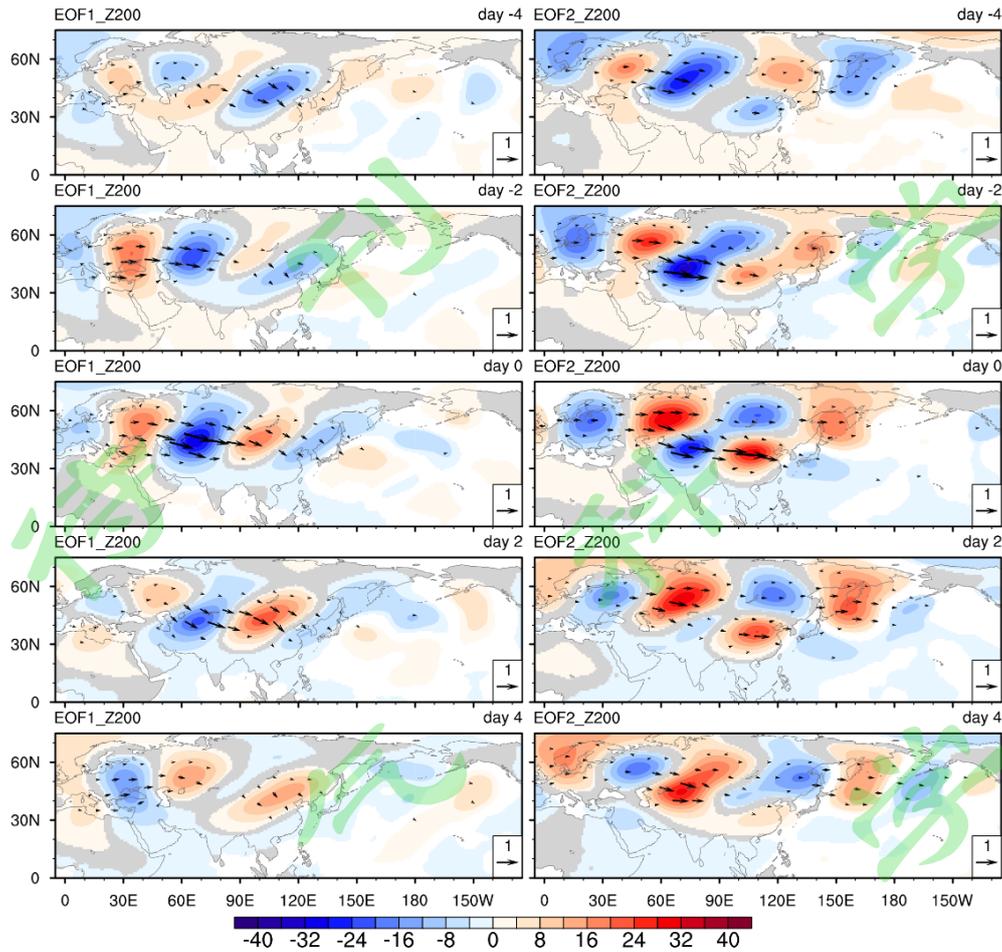
219 EAP 波列的东亚沿岸活动中心较远,可认为其对准双周 EAP 遥相关的发展影响  
220 较小(图 2b)。至成熟阶段,波列能量频散至东亚沿岸和北太平洋区域,致使日  
221 本以东高压异常与低层高压中心重合(图 2e)。

222 强、弱年准双周 EAP 事件发展阶段,其上游波列形态与欧亚中纬度波列的  
223 前两模态具有较高的空间相似性。在 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 区域内,强年准双周  
224 EAP 事件发展阶段上游波列形态与欧亚中纬度波列第二模态双波列型的空间相  
225 关系数达到 0.49,弱年准双周 EAP 事件发展阶段上游波列形态与欧亚中纬度波  
226 列第一模态单波列型的空间相关系数达到 0.45,均达到 95%的置信度水平。相比之  
227 下,强年准双周 EAP 事件与上游波列形态与欧亚中纬度波列第一模态单波列  
228 型的空间相关系数则为-0.35,弱年准双周 EAP 事件发展阶段上游波列形态与欧  
229 亚中纬度波列第二模态双波列型的空间相关系数仅为-0.2,进一步证实强年 EAP  
230 事件与第二模态双波列结构的耦合,而弱年事件与第一模态单波列结构的耦合。

#### 231 4 欧亚中纬度波列与强、弱年准双周 EAP 事件的联系

232 上一节分析了准双周 EAP 遥相关的年际变化特征,本节将系统分析欧亚地  
233 区中纬度准双周波列的时空演变特征,并探讨其与准双周 EAP 事件在强、弱年  
234 的关联。由 PC1 和 PC2 超前滞后回归得到的经过 10-20 天带通滤波的位势高度  
235 异常及波活动通量的时空演变可知,对于单波列模态(图 3 左列),在发展位相  
236 时,乌拉尔山区域正异常和中亚区域负异常显著增强,并伴有强的纬向传播波通  
237 量,欧亚大陆逐渐形成沿副热带急流分布的纬向波列。在成熟阶段(第 0 天),  
238 波列各异常中心呈西南-东北向拉伸结构,类似于 SRP 波列。进入衰减阶段后,  
239 波列能量逐渐向太平洋频散,北大西洋出现“正-负-正”型反位相三极子,标志  
240 着正位相的结束。

241 在双波列模态中(图 3 右列),-4 天各异常中心较单波列模态明显东移,欧  
242 亚大陆北部沿 $60^{\circ}\text{N}$ 存在纬向波列结构。至-2 天,里海以东的正异常增强,波通量  
243 出现分化,一部分向南沿副热带急流传播,另一部分则维持高纬度传播,高纬形  
244 成“负-正-负-正”的四波结构一直延伸至鄂霍次克海。成熟阶段,双波列在东亚  
245 形成四极子结构,南支波列强度达到峰值。这一耦合特征与 Xu et al. (2022) 提  
246 出的 BOC-SRP 耦合机制具有动力学上的相似性,并与季节内尺度波列特征相符  
247 (Iwao and Takahashi, 2008)。衰减阶段,各异常中心逐渐减弱,波通量向太平洋  
248 进一步传播,欧亚大陆出现反位相异常。

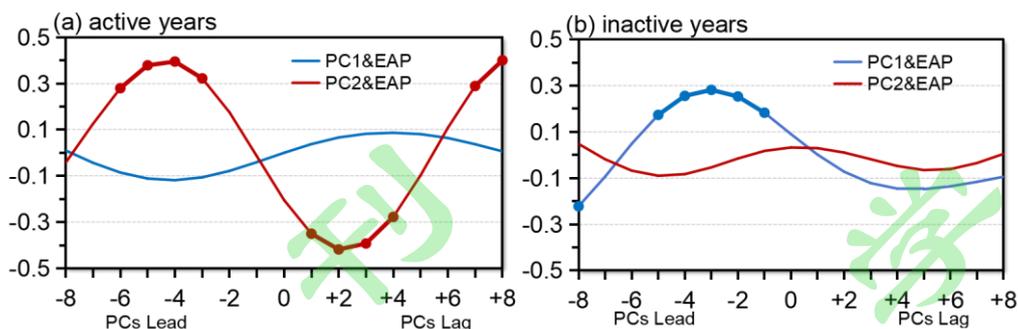


249

250 图3 分别基于PC1 (左) 和PC2 (右) 超前滞后回归的10-20天尺度200 hPa位势高度异常  
 251 (阴影, 单位: gpm) 和波活动通量 (矢量, 单位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ), 仅绘制通过90%置信度检验的  
 252 区域。其中, day 0 表示与PC1 和PC2 同时变化的变量异常。

253 Fig.3 Lead-lag regression analysis based on the PC1 (left) and PC2 (right), showing regressed 10-  
 254 20-day bass-pass filtered 200 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and wave  
 255 activity flux (vectors, unit:  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ). Only anomalies significant at the 90% confidence level are  
 256 plotted. Here, day 0 represents the variable anomalies that change simultaneously with PC1 and  
 257 PC2.

258 超前滞后相关可以进一步揭示强、弱年事件与双波列模态之间的联系。在强  
 259 年 (图 4a), 当PC2 领先准双周EAP 指数4天时, 两者相关性达到峰值, 峰值  
 260 相关系数为0.41, 达到95%的置信度水平。随后相关系数迅速衰减, 并在峰值日  
 261 转为负相关。相比之下, 单波列模态与准双周EAP 在强年并没有显著联系。弱  
 262 年则有所不同 (图 4b), 在PC1 领先准双周EAP 指数3天时两者相关最强, 尽  
 263 管低于强年PC2 与EAP 的相关, 但仍通达到95%的置信度水平。随后相关性减  
 264 弱, 并在第0天前后转为负相关。弱年准双周EAP 与PC2 的相关系数则始终不  
 265 显著。以上结果表明在两种模态波列对强、弱年准双周EAP 事件可能起到不同的  
 266 调制作用, 下一节将讨论可能的物理过程和机制。



267

268 图4 准双周 EAP 指数与 PC1 和 PC2 在 (a) 强年与 (b) 弱年的超前滞后相关系数演变。其  
 269 中，粗线圆点处表示达到 95%的置信度水平的相关系数，day -2 表示 PCs 超前准双周 EAP  
 270 指数 2 天，day +2 则表示准双周 EAP 指数超前 PCs 2 天。

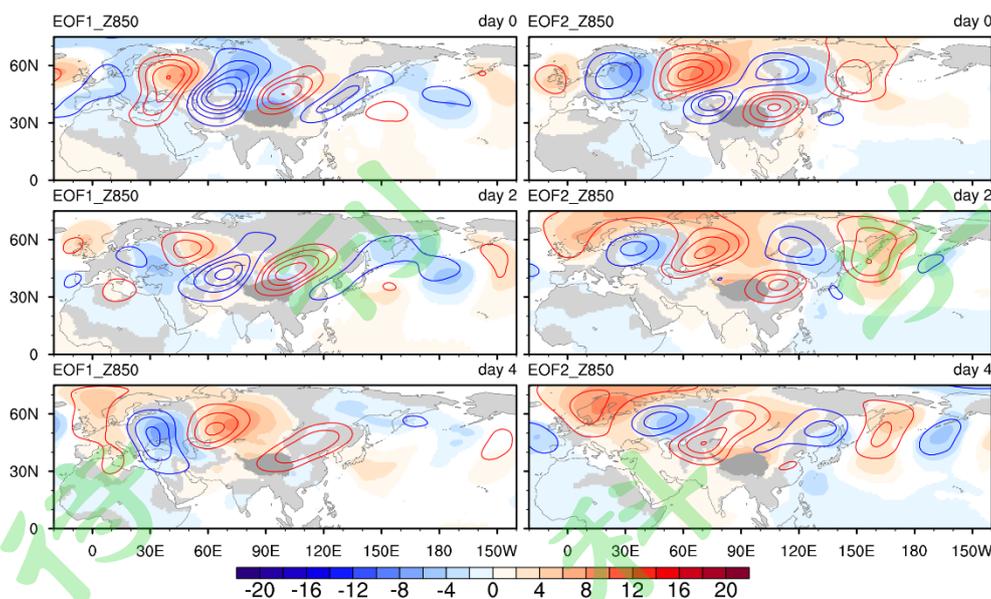
271 Fig.4 The lead-lag correlation evolution between the QBW EAP index and the PCs in (a) active and  
 272 (b) inactive years. Bold marklines indicate correlations significant at the 95% confidence level. A  
 273 lag of day -2 denotes that PCs precede the QBW EAP index by 2 days, while a lag of day +2 denotes  
 274 that the QBW EAP index precedes PCs by 2 days.

## 275 5 欧亚中纬度波列调制准双周 EAP 事件的可能机制

### 276 5.1 波列相位叠加的作用

277 欧亚中纬度波列通过向下游能量频散产生波列相位叠加，能调制 EAP 遥相  
 278 关（布和朝鲁等, 2008; 施宁等, 2008, 2009; Sun et al., 2021; Zhu et al., 2024）。图  
 279 5 为滞后于两类欧亚中纬度波列的高层位势高度异常场（等值线）及其对低层位  
 280 势高度的影响（阴影）。可以看到，在30°N以北的中高纬度地区，单支和双支波  
 281 列的高低层位势高度异常符号基本一致，呈准正压特征。就 PC2 双波列模态（图  
 282 5 右列）而言，在成熟阶段（0 天），日本附近北太平洋的低层位势高度场呈“北  
 283 正南负”的偶极型准正压分布，恰与准双周 EAP 波列的低层中心一致。随后鄂  
 284 霍次克海到日本以东的位势高度正异常逐渐增强，菲律宾海附近也出现高度负异  
 285 常，太平洋上出现类似准双周 EAP 波列的“负-正-负-正”结构，高层维持显著的  
 286 正压纬向波列。这表明双波列模态通过相位叠加有效加强了准双周 EAP 事件的  
 287 西北太平洋偶极子活动中心。

288 反观 PC1 单波列结构，虽然在波列成熟阶段，日本以东准正压的位势高度正  
 289 异常也与 EAP 波列低层正中心相对应，但随着波列衰减，准正压的高度正异常  
 290 缓慢加强南移，不利于菲律宾海对流和低层低压中心的形成。虽然单波列模态也  
 291 能通过相位叠加促进准双周 EAP 事件的日本附近活动中心的发展，但作用较弱，  
 292 而且会抑制菲律宾以东海域活动中心的发展。因此，双波列模态比单波列模态更  
 293 有利于准双周 EAP 遥相关的发展，这是强年准双周 EAP 事件更强的原因之一。



294

295 图5 同图3, 但为 10-20 天尺度 850 hPa (阴影, 单位: gpm) 及 200 hPa (等值线, 单位:  
296 gpm) 位势高度异常。阴影仅绘制通过 90%置信度检验的异常区域。

297 Fig.5 As in Fig.3, but for 10-20-day bass-pass filtered 850 hPa (shaded, unit: gpm) and 200 hPa  
298 (contour, unit: gpm) geopotential height anomalies, with anomalies at the 90% confidence level  
299 being plotted.

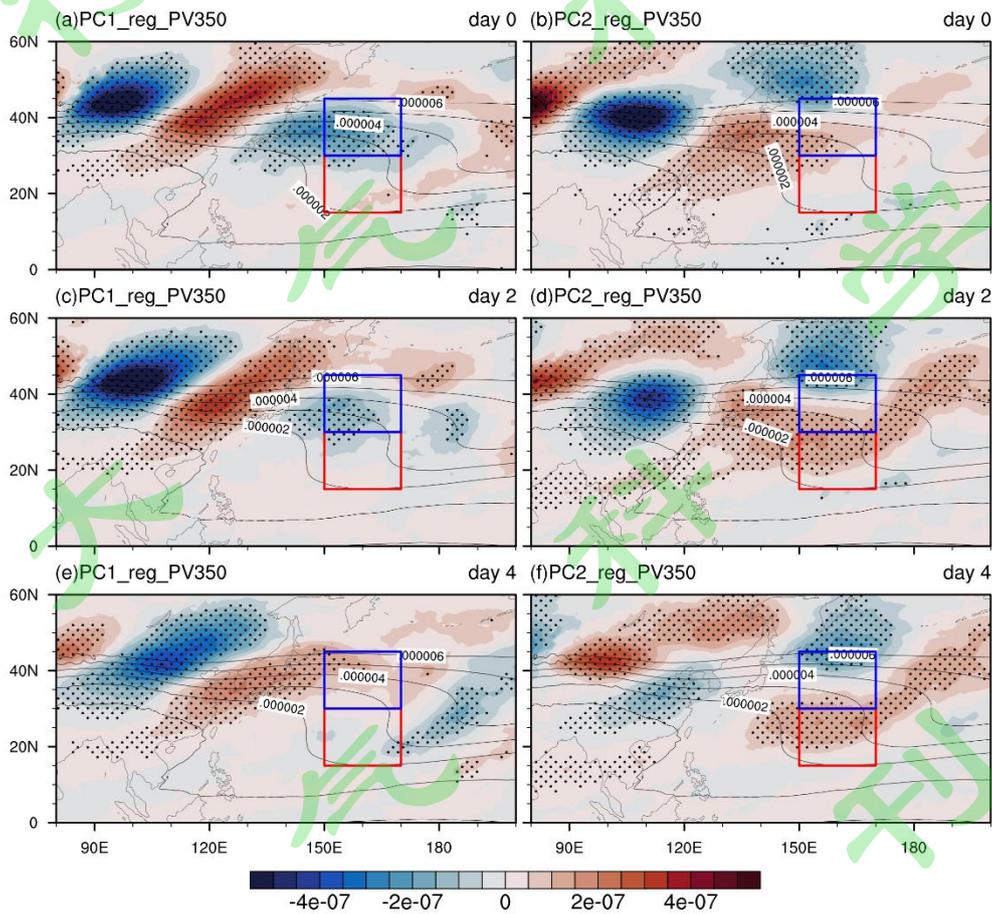
300 为进一步探讨强、弱年欧亚中纬度波列对准双周 EAP 事件的作用, 计算  
301 了使用偏相关滤除欧亚中纬度波列影响后的准双周 EAP 事件的峰值强度。在强  
302 年, EAP 正事件的西北太平洋偶极子位势高度差为 39.79 gpm, 滤除双波列模态  
303 影响后的差值减至 33.41 gpm, 6.38 gpm 的差值占原始值的 16%, 达到 99%显著  
304 性水平。而在弱年, 原始位势高度差为 21.26 gpm, 滤除单波列模态影响后减至  
305 18.88 gpm, 2.38 gpm 的差值占原始值的 11%, 同样达到 95%显著性水平。值得  
306 一提的是, 使用偏相关滤除欧亚中纬度波列的影响后, 强、弱年准双周 EAP 波  
307 列仍沿大圆路径分布, 表明欧亚波列并非准双周 EAP 遥相关产生的决定性因素,  
308 只是在一定程度上影响了准双周 EAP 波列的发展。

## 309 5.2 波破碎过程

310 两种模态波列本质上是沿急流波导传播的准静止 Rossby 波。在急流出口区,  
311 由于纬向风减弱, 经向位涡梯度较小, 容易发生 Rossby 波破碎事件。波破碎是  
312 指对流层高层等熵面上等位涡线的不可逆形变, 它不仅对气温、降水等极端天气  
313 有重要影响 (Chyi et al., 2020; Song and Wu, 2021), 还在热带大气季节内振荡和  
314 太平洋-北美遥相关等低频系统中起关键作用 (Song et al., 2009; Macritchie and  
315 Roundy, 2016)。所以, 除了波列相位叠加效应, 欧亚中纬度波列也可能通过波破  
316 碎过程增强西北太平洋对流活动, 促进准双周 EAP 事件发展。

317 对强、弱年准双周 EAP 事件发生之前 (-5~0 天) 波破碎事件的统计表明,

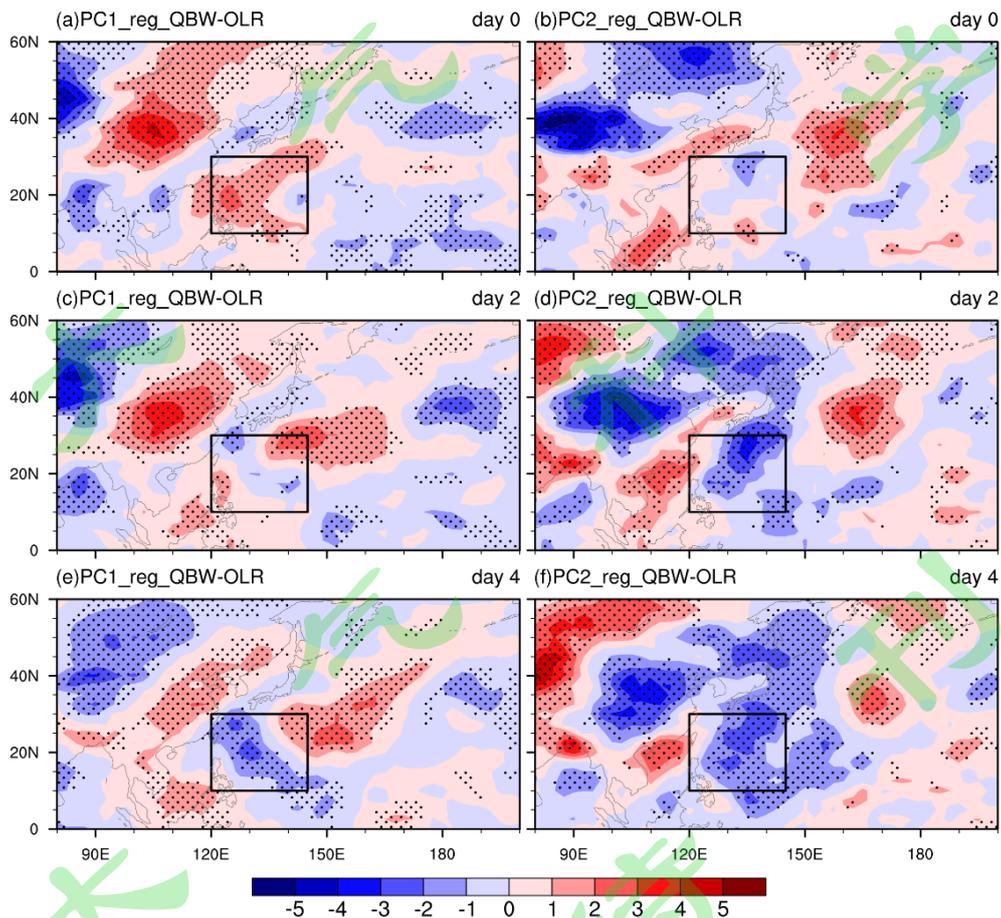
318 强年约 72%的准双周 EAP 事件之前伴有波破碎事件，而弱年仅 38%的准双周  
 319 EAP 事件之前伴有波破碎事件，这一差异通过 99%显著性水平检验。为进一步  
 320 分析欧亚中纬度波列与西北太平洋波破碎事件的联系，分别对 PC1 与 PC2 回归  
 321 得到了 350 K 等熵面位涡分布（图 6）。由图 6 等值线分布可知，在夏季气候态  
 322 场上，日本以东海域位于副热带急流出口区，等位涡线呈西北-东南向弯折，经向  
 323 位涡梯度骤减，易引发波破碎事件。对于双波列模态（图 6 右列），波破碎关键  
 324 区内“南正北负”的偶极型特征逐渐增强，叠加在气候态涡度场上易形成倒“S”型  
 325 位涡翻转，促进位涡南侵，有助于触发波破碎事件。相比之下，单波列模态波破  
 326 碎关键区内位涡负异常偏北（图 6 左列），对波破碎事件的促进作用有限。由此  
 327 可见，双波列模态更有利于波破碎事件的发生，有利于准双周 EAP 事件发展。



328  
 329 图 6 分别对中纬度波列指数 PC1 (左) 和 PC2 (右) 滞后 0~4 天回归的 350 K 等熵面位势  
 330 涡度异常场 (阴影, 单位:  $\text{K m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ )。等值线为夏季气候态的 350 K 等熵面位势涡度场。  
 331 黑点表示通过 90%置信度检验的异常区域。蓝色和红色矩形表示定义波破碎指数的两个区  
 332 域。

333 Fig.6 Regression of potential vorticity anomalies on the 350 K isentropic surface based on mid-  
 334 latitude wave train indices PC1 (left) and PC2 (right) lagged by 0~4 days (shaded, unit:  $\text{K m}^2 \text{kg}^{-1}$   
 335  $\text{s}^{-1}$ ). The contour represents the summer climatological potential vorticity on the 350 K isentropic  
 336 surface. The stippling indicates anomalies that are significant at the 90% confidence level. The blue  
 337 and red rectangles indicate the two regions defined in the wave-breaking index.

338 两类波列模态又是如何通过波破碎过程促进准双周 EAP 事件发展呢？以往  
 339 研究表明，波破碎事件发生时，位涡南侵有利于改善其西南侧的大尺度环流背景，  
 340 使菲律宾东北部的高层辐散和高层上升运动加强（Takemura and Mukougawa,  
 341 2020b），从而为对流发展创造条件。由于西北太平洋关键区  
 342 ( $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ )的准双周对流活动是触发准双周 EAP 的关键因素（Zhu  
 343 et al. 2020），为此比较了回归到 PC1 与 PC2 的准双周对流异常（图 7）。由图可  
 344 见，就单波列模态而言（图 7 左列），第 0 天西北太平洋关键区处于对流抑制状态，  
 345 活跃对流位于热带中太平洋，直到+2 天关键区才出现有组织的对流，逐步  
 346 形成西北-东南向条状对流。在双波列模态中（图 7 右列），第 0 天西北太平洋关  
 347 键区有弱对流，+2 天起对流迅速增强，至+4 天强对流的范围明显大于单波列模  
 348 态。这表明欧亚中纬度波列会通过波破碎过程，有效促进西北太平洋关键区准双  
 349 周对流发展，从而有利于触发准双周 EAP 事件的形成，且双波列模态的作用显  
 350 著强于单波列模态。



351  
 352 图 7 同图 6，但为准双周 OLR 异常（单位： $\text{W m}^{-2}$ ）。矩形表示西北太平洋对流关键区  
 353 ( $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ )。

354 Fig.7 As in Fig.6, but for QBW OLR anomalies (unit:  $\text{W m}^{-2}$ ). The rectangles indicate the key  
 355 regions ( $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ ) of convection.

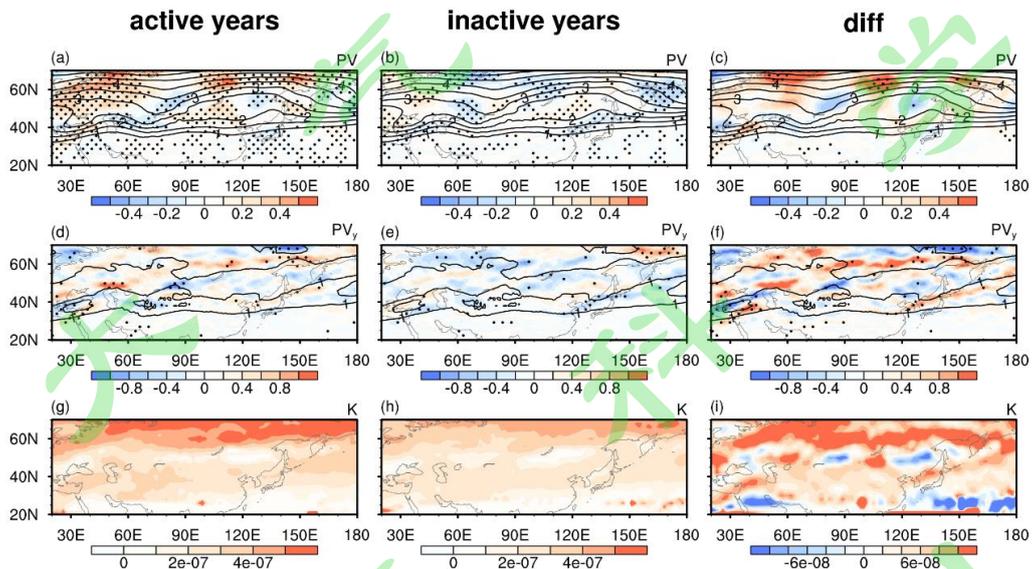
## 356 6 总结与讨论

357 本文利用 1979~2020 年的 ERA5 和 NOAA 再分析数据, 揭示了夏季准双周  
358 东亚-太平洋 (EAP) 遥相关的年际变化特征, 重点探究了欧亚中纬度波列对其强  
359 度变化的调制作用。首先基于强度指数筛选出典型的准双周 EAP 强、弱年份,  
360 合成分析发现准双周 EAP 的强度年际变化主要由准双周 EAP 事件的强度差异导  
361 致, 而非事件数量的多少。尽管强、弱年准双周 EAP 事件发生时的低层位势高  
362 度场偶极子形态都与北太平洋大圆路径分布相似, 但强年事件的强度更强。分析  
363 发现, 在强、弱年准双周 EAP 事件发生之前, 上游欧亚大陆波列有显著差异。  
364 在强年准双周 EAP 事件的发展阶段, 欧亚大陆双波列会在东亚上空形成四极子  
365 结构, 并与低层波列有显著的垂直耦合, 在菲律宾海和日本以东海域低层有显著  
366 的偶极子发展; 在强年的成熟阶段, 高层波列的波能量向西北太平洋的频散, 为  
367 强准双周 EAP 事件的维持提供了动力支持。与强年相比, 在弱年准双周 EAP 事  
368 件发展阶段, 高层有一支波列沿副热带急流传播, 其结构和位置类似于单波列模  
369 态, 但低层响应微弱; 至成熟期, 高层波列结构不完整, 低层波列强度也偏弱且  
370 衰减迅速。

371 通过分析上游波列与准双周 EAP 波列的联系发现, 欧亚大陆中纬度第一模  
372 态单波列模态类似 SRP 波列, 与弱年准双周 EAP 事件发展阶段高层特征相一致;  
373 而欧亚大陆中纬度第二模态双波列模态则类似于 BOC 和 SRP 遥相关耦合型, 与  
374 强年的准双周 EAP 事件发展阶段的高层特征相类似。进一步研究表明, 欧亚中  
375 纬度波列会通过 EAP 波列的相位叠加和波破碎过程增强西北太平洋对流等两  
376 种机制, 促进准双周 EAP 事件的激发和维持。双波列模态通过高低空动、热力  
377 协同, 能显著增强准双周 EAP 事件强度; 尽管单波列模态也对准双周 EAP 事  
378 件的发展有作用, 但其调制作用有限。

379 统计结果显示, 准双周 EAP 活动强年, 约 70% 准双周 EAP 事件发展阶段出  
380 现了超过一倍标准差的强双波列模态; 而弱年的这一比例仅为 14%。可见, 强年  
381 双波列模态在准双周 EAP 事件前期的异常活跃, 可能是准双周 EAP 事件偏强的  
382 重要原因。欧亚大陆中纬度波列活动的年际差异可能与背景波导的变化有关。夏  
383 季欧亚大陆准静止 Rossby 波的波数  $K$  与位势涡度的经向梯度  $q_y$  和准地转纬向风  
384  $u_g$  有关, 即  $K^2 \approx \bar{q}_y / \bar{u}_g$ , 波数  $K$  的局地极大值代表强的波导效应 (Andrews et al, 1987;  
385 Hoskins and Ambrizzi, 1993; Nishii and Nakamura, 2004)。强年与弱年夏季的背景  
386 波导存在显著的差异 (图 8)。气候态场上 (图 8 等值线), 位涡随纬度由赤道向  
387 极地递增, 并在副热带急流 (约  $40^\circ\text{N}$ ) 和极锋急流区域 (约  $60^\circ\text{N}$ ) 快速增大 (图

388 8a、b), 对应于显著的位涡经向梯度极大值 (图 8d、e)。在强年, 极锋急流以北  
 389 区域出现最大的位涡正异常 (图 8a), 而弱年为显著的负异常 (图 8b), 且二者  
 390 的差异在 90%置信度下显著 (图 8c)。与之对应, 强年夏季 60°N 附近的位涡经  
 391 向梯度显著增强 (图 8d), 而弱年则显著减小 (图 8e), 二者的差异也在气候态  
 392 位涡梯度的极大值区内尤为明显 (图 8f)。通过分析波数分布特征发现 (图 8g-  
 393 i), 副热带急流区域的波导效应在强年夏季略强。然而, 在极锋急流区域, 强年  
 394 的波数明显高于弱年, 表明在强年, 极锋急流有更强的波导效应。这有利于纬向  
 395 准静止 Rossby 波在中高纬度地区传播。因此, 欧亚大陆更易于出现双波列模态,  
 396 促进其与准双周 EAP 事件的耦合。相反, 弱年中极锋急流区域的波导效应较弱,  
 397 波列传播受限, 导致准双周 EAP 事件更多与单波列模态耦合。夏季背景场波导  
 398 效应的年际差异受到大气外强迫和大气内部动力过程的共同影响 (Li et al., 2024;  
 399 Wang and Ting, 2022; Xu et al., 2022), 其来源值得进一步探究。

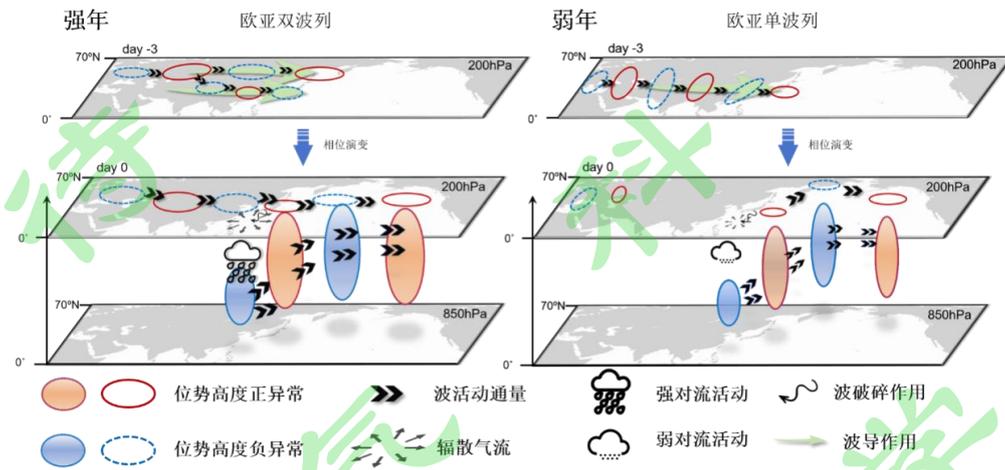


400  
 401 图 8 强年 (左)、弱年 (中) 及二者差异场 (右) 的夏季平均 (a-c) 200 hPa 位势涡度异常场  
 402 (阴影, 单位: PVU, 即  $10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) 和气候态分布 (等值线, 单位: PVU, 间隔 1  
 403 PVU)、(d-f) 200 hPa 位势涡度经向梯度异常场 (阴影, 单位:  $10^{-6}$  PVU) 和气候态分布 (等值线,  
 404 单位:  $10^{-6}$  PVU, 间隔  $0.5 \times 10^{-6}$  PVU) 和 (g-i) 200 hPa 波数  $K$  (阴影, 单位:  $\text{m}^{-1}$ )。 (a-f)  
 405 中打点表示通过 90%置信度检验的区域。

406 Fig. 8 Summer mean composite maps of (a-c) 200 hPa potential vorticity (PV) anomalies (shaded;  
 407 unit: PVU, where 1 PVU =  $10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) and climatology (contour; unit: PVU, interval of 1  
 408 PVU), (d-f) 200 hPa meridional gradient of PV anomalies (shaded; unit:  $10^{-6}$  PVU) and climatology  
 409 (contour; unit:  $10^{-6}$  PVU, interval of  $0.5 \times 10^{-6}$  PVU), and (g-i) 200 hPa wave number  $K$  (shaded;  
 410 unit:  $\text{m}^{-1}$ ) for active years (left), inactive years (middle), and their differences (right). In (a-f), the  
 411 stippling indicates regions where anomalies are significant at the 90% confidence level.

412 本研究揭示了夏季准双周 EAP 遥相关的年际变化受到欧亚中纬度波列模态

413 差异的调控（图9）。在强年，双波列模态与准双周EAP波列的相位叠加，以及  
 414 波破碎过程的增强，显著促进了西北太平洋的对流活动，并通过高空动力与热力  
 415 力的协同作用，显著强化了准双周EAP事件。相比之下，弱年则主要由单波列  
 416 模态主导，其作用相对有限。背景场波导效应差异可能是导致两类波列模态和准  
 417 双周EAP遥相关出现选择性耦合的关键。而背景场波导效应的年际变化可能源  
 418 于大气外强迫与内部动力过程的共同作用，这为未来进一步研究提供了重要方向。



419  
 420 图9 欧亚中纬度波列双波列模态（左）与单波列模态（右）调制夏季准双周东亚-太平洋遥  
 421 相关强度年际变率的机制示意图。

422 Fig.9 Schematic diagram illustrating the mechanisms of Eurasian mid-latitude wave train dual-  
 423 wave-train mode (left) and single-wave-train mode (right) modulating interannual variability of the  
 424 intensity of QBW EAP teleconnections during summer.

425

## 参考文献 (References)

- 426
- 427 Andrews D, Holton J, Leovy C. 1987. Middle atmosphere dynamics [M]. Washington, USA: Academic  
428 Press.
- 429 Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P, et al. 1999. The effective number of spatial degrees of  
430 freedom of a time-varying field [J]. *Journal of Climate*, 12(7): 1990-2009.
- 431 布和朝鲁, 施宁, 纪立人, 等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与中高纬 Rossby 波活动 [J].  
432 科学通报, (01): 111-121. Bueh C, Shi N, Ji L, et al. 2008. Features of the EAP events on the  
433 medium-range evolution process and the mid- and high-latitude Rossby wave activities during the  
434 Meiyu period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 610-623.
- 435 Chen J, Wen Z, Chen X, et al. 2024. Amplified East China precipitation related to East Asia – Pacific  
436 teleconnection due to preceding Circumglobal Teleconnection on quasi-biweekly timescale [J].  
437 *Climate Dynamics*, 63(1): 68.
- 438 Chen Y, Zhai P. 2014. Synoptic - scale precursors of the East Asia/Pacific teleconnection pattern  
439 responsible for persistent extreme precipitation in the Yangtze River Valley [J]. *Quarterly Journal of*  
440 *the Royal Meteorological Society*, 141(689): 1389-1403.
- 441 Chen Y, Zhai P, Li L. 2017. Low-frequency oscillations of East Asia/Pacific teleconnection and  
442 simultaneous weather anomalies/extremes over eastern Asia [J]. *International Journal of Climatology*,  
443 37(1): 276-295.
- 444 Chyi D, Xie Z, Shi N, et al. 2020. Wave-breaking features of blocking over Central Siberia and its impacts  
445 on the precipitation trend over Southeastern Lake Baikal [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,  
446 37(1): 75-89.
- 447 Deng K, Yang S, Ting M, et al. 2018. An intensified mode of variability modulating the summer heat waves  
448 in Eastern Europe and Northern China [J]. *Geophysical Research Letters*, 45(20): 11,361-11,369.
- 449 Ding Q, Wang B. 2005. Circumglobal Teleconnection in the northern hemisphere summer [J]. *Journal of*  
450 *Climate*, 18(17): 3483-3505.
- 451 Ding Q, Wang B, Wallace J M, et al. 2011. Tropical – extratropical teleconnections in boreal summer:  
452 Observed interannual variability\* [J]. *Journal of Climate*, 24(7): 1878-1896.
- 453 Enomoto T, Hoskins B J. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quarterly Journal of*  
454 *the Royal Meteorological Society*, 2003, 129(587): 157-178.
- 455 郭紫薇, 王黎娟. 2023. SR 型与 EAP 型遥相关 “结合模态” 对 2020 年江准入梅初期强降水的影响 [J].  
456 大气科学, 47(04): 1171-1182. Guo Z W, Wang L J. 2023. Impact of the “ Combined  
457 modality ” of Silk-Road and East Asia – Pacific teleconnection patterns on the heavy precipitation in  
458 the early stage of meiyu in the Yangtze – Huaihe River region in 2020 [J]. *Chinese Journal of*  
459 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(4): 1171–1182.
- 460 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present  
461 [J].: Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)。
- 462 Hoskins B, Ambrizzi T. 1993. Rossby Wave Propagation on a Realistic Longitudinally Varying Flow[J].  
463 *Journal of Atmospheric Sciences*, 50(12): 1661-1671.
- 464 Hsu H-H, Lin S-M. 2007. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the East Asian summer [J].  
465 *Journal of Climate*, 20(17): 4443-4458.
- 466 黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其

467 机理的最近研究进展 [J]. 大气科学, 40(05): 877-896. Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al. 2016.  
468 Progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the  
469 western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the western  
470 North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 877 – 896.

471 Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the  
472 subtropical high over East Asia [J].

473 Iwao K, Takahashi M. 2008. A precipitation seesaw mode between Northeast Asia and Siberia in summer  
474 caused by rossby waves over the Eurasian continent [J]. Journal of Climate, 21(11): 2401-2419.

475 Kawamura R, Ogasawara T. 2006. On the role of typhoons in generating PJ teleconnection patterns over  
476 the western North Pacific in late summer [J]. SOLA, 2: 37-40.

477 Lau K M, Kim K M. 2006. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and  
478 circulation [J]. Geophysical Research Letters, 33(21): L21810.

479 Li L, Zhai P, Chen Y, et al. 2016. Low-frequency oscillations of the East Asia – Pacific teleconnection  
480 pattern and their impacts on persistent heavy precipitation in the Yangtze – Huai River valley [J].  
481 Journal of Meteorological Research, 30(4): 459-471.

482 Li X, Wen Z, Zhou W. 2024. Different configurations of the Eurasian pattern and South Asian jet wave  
483 train and their impacts on the winter climate over East Asia [J]. Climate Dynamics, 62(7): 5787-5806.

484 Li Y, Liu F, Hsu P-C. 2020. Modulation of the Intraseasonal Variability of Pacific-Japan Pattern by ENSO  
485 [J]. Journal of Meteorological Research, 34(3): 546-558.

486 Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation  
487 dataset [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(6): 1275-1277.

488 Liu D, Wang L, Guan Z, et al. 2024a. Maintenance mechanism for the summertime+EAP/-SR  
489 combination pattern [J]. Climate Dynamics.

490 Liu F, Zhou J, Wang B, et al. 2024b. Opportunities and barriers for skillful sub-seasonal prediction of East  
491 Asian summer precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society.

492 Macritchie K, Roundy P E. 2016. The two-way relationship between the Madden – Julian oscillation and  
493 anticyclonic wave breaking [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142(698): 2159-  
494 2167.

495 Na Y, Lu R. 2023. The concurrent record-breaking rainfall over Northwest India and North China in  
496 September 2021 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 40(4): 653-662.

497 Nishii K, Nakamura H. 2004. Lower-stratospheric Rossby wave trains in the southern hemisphere: A case-  
498 study for late winter of 1997 [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130(596): 325-  
499 345.

500 Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical Western Pacific and their impact on the north  
501 hemisphere summer circulation [J]. Journal of Meteorological Society of Japan, 65(3): 373-390.

502 Noh E, Kim J, Jun S Y, et al. 2021. The role of the Pacific - Japan pattern in extreme heatwaves over  
503 Korea and Japan [J]. Geophysical Research Letters, 48(18).

504 Noh E, Kim J, Jun S Y, et al. 2023. Atmospheric pathway of marine heatwaves over the Northwestern  
505 Pacific [J]. Sci Rep, 13(1): 22821.

506 施宁, 布和朝鲁, 纪立人. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中后期演变过程的影  
507 响 [J]. 大气科学, 33(5): 1087-1100. Shi N, Bueh C, Ji L R, et al. 2009. Impacts of mid- and high-

- 508 latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/ Pacific events during the  
509 mid- and late summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 1087-1100.
- 510 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 中高纬度 Rossby 波活动对华南前汛期 EAP 事件中期演变过  
511 程的影响 [J]. *气象学报*, 66(06): 1020-1031. Shi N, Bueh C, Ji L R, et al. 2008. The impact of mid-  
512 and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of EAP event in the pre-  
513 rainy period of South China. *Acta Meteorologica Sinica* 66(6): 1020–1031.
- 514 Song J, Li C, Zhou W, et al. 2009. The linkage between the Pacific-North American teleconnection pattern  
515 and the North Atlantic Oscillation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(2): 229-239.
- 516 Song L, Wu R. 2021. Two types of Rossby wave breaking events and their influences on East Asian winter  
517 temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11): e2020JD033917.
- 518 Sun Y, Chen G, Tan B. 2021. Formation and maintenance mechanisms of the Pacific-Japan pattern as an  
519 intraseasonal variability mode [J]. *Climate Dynamics*, 57(11-12): 2971-2994.
- 520 Sun Y, Zhu Z, Yang Y, et al. 2024. Decadal change in the connection between the Pacific – Japan pattern  
521 and the Indian Ocean SST basin mode [J]. *Climate Dynamics*, 62(5): 4281-4296.
- 522 Takemura K, Mukougawa H. 2020a. Dynamical relationship between quasi-stationary Rossby wave  
523 propagation along the Asian Jet and Pacific-Japan pattern in boreal summer [J]. *Journal of the*  
524 *Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 98(1): 169-187.
- 525 Takemura K, Mukougawa H. 2020b. Maintenance mechanism of Rossby wave breaking and Pacific-Japan  
526 pattern in boreal summer [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 98(6): 1183-1206.
- 527 Takemura K, Mukougawa H. 2023. What percentage of Silk-Road Pattern triggers Pacific – Japan pattern  
528 through Rossby wave breaking? [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 101(1): 5-  
529 19.
- 530 Wakabayashi S, Kawamura R. 2004. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with  
531 the anomalous summer climate in Japan [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*,  
532 82(6): 1577-1588.
- 533 Wang C, Wang L. 2018. Combined effects of synoptic-scale teleconnection patterns on summer  
534 precipitation in Southern China [J]. *Atmosphere*, 9(4).
- 535 Wang J, Wen Z, Wu R, et al. 2016. The mechanism of growth of the low-frequency East Asia – Pacific  
536 teleconnection and the triggering role of tropical intraseasonal oscillation [J]. *Climate Dynamics*,  
537 46(11-12): 3965-3977.
- 538 Wang L, Ting M. 2022. Stratosphere-troposphere coupling leading to extended seasonal predictability of  
539 summer North Atlantic Oscillation and boreal climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 49(2).
- 540 王林, 徐霏强. 北半球夏季急流遥相关: 进展与展望 [J]. *大气科学*, 2024, 48: 287-304. Wang L, Xu  
541 P Q. 2024. Waveguide teleconnections in the boreal summer: Progress and perspectives [J]. *Chinese*  
542 *Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48(1): 287–304.
- 543 吴捷, 许小峰, 金飞飞. 2013. 东亚-太平洋型季节内演变和维持机理研究 [J]. *气象学报*, 71: 476-  
544 491.
- 545 Wu J, Zhang P, Li L, et al. 2020. Representation and predictability of the East Asia-Pacific teleconnection  
546 in the Beijing Climate Center and UK Met Office subseasonal prediction systems [J]. *Journal of*  
547 *Meteorological Research*, 34(5): 941-964.
- 548 Xu P, Wang L, Dong Z, et al. 2022. The British – Okhotsk Corridor pattern and its linkage to the Silk  
549 Road Pattern [J]. *Journal of Climate*, 35(17): 5787-5804.

550 Yasui S, Watanabe M. 2010. Forcing Processes of the summertime Circumglobal Teleconnection pattern in  
551 a dry AGCM [J]. Journal of Climate, 23(8): 2093-2114.

552 Zhou F, Zhang R, Han J. 2019. Relationship between the Circumglobal Teleconnection and Silk Road  
553 Pattern over Eurasian continent [J]. Science Bulletin, 64(6): 374-376.

554 Zhu Y, Chen R, Song Q, et al. 2024. An investigation of the maintenance mechanisms of the quasi-  
555 biweekly Pacific-Japan teleconnection [J]. Climate Dynamics, 62(1): 357-381.

556 Zhu Y, Wen Z, Guo Y, et al. 2020. The characteristics and possible growth mechanisms of the quasi-  
557 biweekly Pacific – Japan teleconnection in Boreal Summer [J]. Climate Dynamics, 55(11-12): 3363-  
558 3380.

气

科

风

学

气

科

风

刊

气

学