

1 东亚副热带急流东西位置与我国夏季降水的关系
2 及其对热带中东太平洋海温的响应

3 王梦遥^{1,2}, 王黎娟^{1,2*}

4 1.南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报
5 预警与评估协同创新中心, 南京 210044

6 2.南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

7 **摘要:** 利用 1980-2020 年 ERA5 再分析资料、中国气象局提供的台站降水资料以
8 及 NOAA (美国国家海洋和大气管理局) 月平均海表温度以及向外长波辐射通
9 量 (OLR) 资料, 分析了东亚副热带西风急流东西位置与我国夏季降水的关系及
10 其对热带中东太平洋海温异常的响应。结果表明: 东亚副热带急流异常偏西年,
11 长江流域高层辐合, 低层辐散, 偏东偏弱的副高不利于水汽输送到长江流域, 降
12 水异常减少; 河套地区高层辐散, 伴随上升运动和水汽辐合, 降水增多。急流异
13 常偏东年, 副高偏强、偏西, 上述 2 个地区高低层辐合辐散形势、水汽条件及垂
14 直运动与急流偏西年相反, 因此降水异常也呈反位相分布。急流的東西位置与夏
15 季热带中东太平洋海温关系密切。热带中东太平洋海温负 (正) 异常可以直接冷
16 却 (加热) 大气, 导致该处的对流活动减弱 (增强), 作用于 Walker 环流使得热
17 带西太平洋地区出现异常的上升 (下沉) 运动, 再经由经圈环流影响东亚中纬度
18 地区, 30°N 附近对流活动减弱 (增强), 通过改变非绝热加热减小 (增大) 原气候
19 态急流区东部的南北温度梯度, 对流层西风减弱 (增强), 有利于急流偏西 (东)。

20 **关键词:** 急流东西位置; 我国夏季降水; 热带中东太平洋海温

21 **文章编号:** 2025016A

22 **Doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2506.25016

23

收稿日期 2025-06-11 网络预出版日期

作者简介 王梦遥, 女, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事季风动力学研究, Email:
wangmengyao1223@163.com

通讯作者 王黎娟, 教授, 主要从事季风动力学研究, Email: wljfw@163.com

资助项目 国家自然科学基金重点项目 (42430609), 国家自然科学基金气象联合基金
(U2442209)

Funded by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant 42430609),
the National Natural Science Foundation of China (Grant U2442209)

Impact of the East Asian Subtropical Jet's Zonal Position on Summer

Precipitation in China and its Response to SST in the Tropical

Central-Eastern Pacific

Abstract: ERA5 reanalysis data, station precipitation data from the China Meteorological Administration, NOAA monthly average sea surface temperature (SST) and outgoing longwave radiation (OLR) data from 1980 to 2020 are used in this study to analyze the impact of the zonal position of the East Asian subtropical jet (EASJ) on summer precipitation in China, as well as its response to SST in the tropical central-eastern Pacific. The results indicate that in EASJ westward-shift years (WYs), upper-level convergence and lower-level divergence dominate over the Yangtze River Valley (YRV). The eastward displacement and weakening of the western Pacific subtropical high (WPSH) at 500 hPa is unfavorable for moisture transport to the YRV, leading to reduced precipitation. Meanwhile, upper-level divergence over the Hexi Corridor (HC) promotes rising motion, accompanied by lower-level moisture convergence, increasing precipitation in HC. In EASJ eastward-shift years (EYs), the WPSH strengthens and shifts westward. The convergence and divergence patterns in both upper and lower troposphere, along with moisture conditions and vertical motion in these two regions, exhibit reversed characteristics compared to those in WYs. As a result, precipitation anomalies display an opposite phase distribution relative to WYs. The zonal position of the EASJ is closely related to the summer SST in the tropical central-eastern Pacific. Negative (positive) SST anomalies in this region directly cool (warm) the atmosphere, suppressing (enhancing) local convective activity. These alterations modulate the Walker circulation and lead to anomalous ascending (descending) motion in the tropical western Pacific. The vertical motion anomalies further affect the mid-latitude region of East Asia through the meridional circulation, reducing (intensifying) convective activity near 30°N. Consequently, the meridional temperature gradient in the eastern part of the climatological jet region decreases (increases) due to the diabatic heating, which weakens (strengthens) the tropospheric westerlies and results in an anomalous westward (eastward) EASJ.

Keywords: Zonal position of the EASJ; Summer precipitation in China; SST in the Tropical Central-Eastern Pacific

1 引言

东亚副热带西风急流是位于东亚副热带地区对流层上部 200 hPa 附近的强西风带。作为大气环流的重要组成部分,其位置变化可以通过影响季风环流进而作用于整个东亚地区的天气气候,因此对我国多地降水均存在显著影响。

大量研究表明南移的西风急流可以引发横跨东亚北部和北太平洋的气旋环流,导致华南西部出现反气旋,进而减少夏季华南地区的降水 (Lin et al., 2023; Tang et al., 2024)。而当西风急流向北延伸时,华南上空辐散,夏季华南降水则高于正常水平 (Hao et al., 2024)。急流的南北位置对夏季江淮流域的降水也存在显联系,当东亚高空西风急流的位置相较于其气候态偏南(北)时,易造成 7 月长江流域降水偏多(少) (宣守丽等, 2013)。Jiang et al. (2023) 利用观测和数值模拟研究了急流南北位置与青藏高原雨季东西向迁移之间的异相关系。当西风急流在 7 月之前向北移动时,青藏高原西风的减弱导致低层暖空气中心西移和湿空气辐合向西延伸,高原雨带向西推进。由于急流南北位置的变化是急流变化最突出的特征,因此以往的研究大多集中于急流南北位置与我国夏季降水关系的探讨上。但 Lin et al. (2019) 基于多个 CMIP5 模型研究了东亚副热带西风急流的東西位置对东亚夏季降水的影响发现,发现当东亚副热带西风急流核位置异常偏西时,东亚大陆降水偏多,而副热带西北太平洋降水偏少。西风急流核的向西移动伴随着南亚高压的减弱东移以及西太平洋副热带高压的北移,导致我国雨带向北移动 (Dong et al., 2011)。此外,魏林波等 (2012) 指出若某年 1 月急流中心异常偏西,4-5 月急流轴又异常偏南,则当年可能为丰梅年,江淮地区易出现暴雨洪涝灾。以上研究均表明东亚副热带西风急流的東西位置对我国降水的影响也不容忽视,但前人对急流東西位置变化造成的降水异常区域的选取较为单一,且作用机制不够明确,因此本文着重分析急流東西位置对我国夏季全区域降水的影响及机制。

为了更好地掌握东亚副热带急流的位置变化特征,许多学者探讨了海温在其变化变异中所起的作用。大西洋海温异常可以通过欧亚大陆中高纬度东传的 Rossby 波列位相变化影响急流的南北分布 (张庆云等, 2018)。太平洋海温对急流的南北位置也存在显著影响 (Yang et al., 2002; Kosaka et al., 2011)。正的热带中东太平洋海温可以诱发热带弱的正地表潜热通量和降水距平,加热热带对流

层, 根据热成风原理, 此时副热带急流向赤道移动 (Wang et al., 2024)。此外, Xiao et al. (2023) 指出独立于 ENSO 的印度洋海温也能使得副热带西风急流相对于气候态位置偏南或者偏北。当海温高于正常水平时, 对流层大气通过调制热带对流活动而变暖, 异常对流迫使开尔文波向东扩展到赤道西太平洋, 诱发太平洋-日本遥相关使得急流南北侧西风异场, 急流向南移动; 相反, 当热带印度洋海温低于正常水平时, 急流会向北移动 (Qu and Huang, 2012)。以往的研究详细地探讨了各区域海温对急流南北位置的影响。然而, 由于前人对急流东西位置的讨论较为有限, 关于急流东西位置与海温之间关系的探讨就更为稀少。因此, 进一步分析东亚副热带西风急流东西位置对全球海温响应的关键区域及其物理机制, 仍是一个亟待关注的重要课题。

2 资料与方法

2.1 资料

(1) 欧洲中期预报中心 (ECMWF) 提供的逐月 ERA5 再分析资料 (Hersbach et al., 2020), 包括位势高度、水平风速、垂直速度、比湿, 时间选取 1980-2020 年夏季 (6-8 月), 水平空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 垂直方向为 13 层。

(2) 降水数据来自中国气象局气象信息中心气象资料室提供的格点化数据集 CN05.1 (吴佳和高学杰, 2013), 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。时间选取 1980-2020 年夏季 (6-8 月)。

(3) 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的月平均海表温度 (Hirahara et al., 2014) 以及 OLR 资料 (Liebmann and Smith, 1996)。海表温度的空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, OLR 的空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间均选取 1980-2020 年夏季 (6-8 月)。

2.2 东亚副热带急流东西位置指数定义

参照况雪源和张耀存 (2006) 的方法, 依据图 1a 中急流的气候态分布, 定义东亚副热带急流东西位置指数 (ZPI): 区域内 (35° - 45° N, 70° - 120° E) 各纬度上最大纬向风所在经度的平均值, 计算公式如下:

$$ZPI = \text{mean} \left\{ \text{longitude} \left(\left(U_{200}(j, 70^{\circ}-120^{\circ}E) \right)_{\max} \right), j \in [35^{\circ}N, 45^{\circ}N] \right\} \quad (1)$$

对于 35° - 45° N 范围内的每一个纬度 j , 首先确定其在 70° - 120° E 范围内出现

最大西风所对应的经度值，然后对所有经度值取平均。

3 东亚副热带急流东西位置变化特征

由多年平均（1980-2020）的夏季 200 hPa 纬向风可知（图 1a），夏季东亚副热带气候态急流轴位于 40°N 附近，西风大值区位于我国青藏高原北侧，急流主体纬向风速超过 30 m/s 的区域从 80°E 向东延伸至 105°E。依据图 1a 中气候态急流区的范围，对夏季 200 hPa 纬向风风速进行了纬度（35°-45°N）平均（图 1b），纬向风大值区主要分布在 80°-120°E 之间，大值带和最大值中心随年份均有先向西移再向东偏移的趋势。伴随着急流的西移，急流区的范围减小，急流的强度减弱。2000 前后急流强度较弱，纬向风最大值只有 26 m/s。之后随着急流的东移，急流的强度增强，急流区的范围也逐渐扩大，在 2016 年左右，急流再次减弱至 26 m/s。

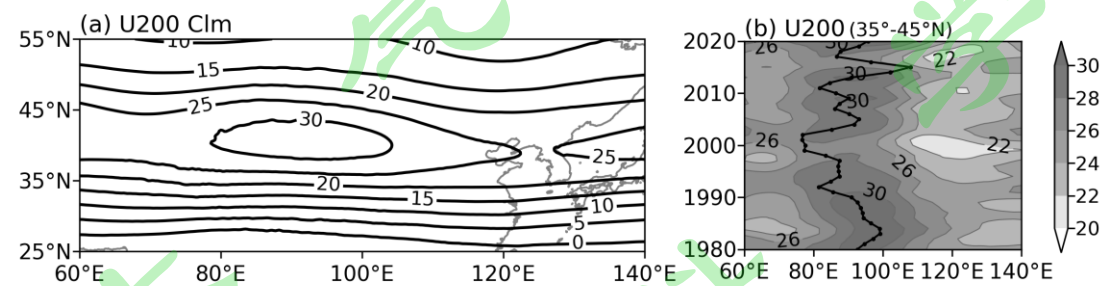


图 1 (a) 1980-2020 年夏季 200 hPa 平均纬向风（等值线，单位：m/s），(b) 35°-45°N 夏季 200 hPa 平均纬向风（阴影，单位：m/s）及其最大值（点实线，单位：m/s）

Figure. 1 (a) Climatology of the 200 hPa zonal wind in summer (June-August) from 1980 to 2020 (contours, units: m/s). (b) The 200 hPa zonal wind (shading, units: m/s) and its maximum values (dotted solid line, units: m/s) in summer averaged over 35°-45°N.

4 东亚副热带急流东西位置对我国夏季降水的影响

4.1 急流东西位置与我国夏季降水的关系

为了研究东亚副热带急流的東西位置与我国降水之间的关系，我们定义了东亚副热带急流东西位置指数，并对其进行标准化。当标准化数值大于 1 的年份，我们将其定义为急流异常偏东年，反之，标准化数值小于 1 的年份定义为急流异常偏西年。如图 2a 所示，急流异常偏东年为：1982，1987，1991，1993，1996，2005，2014，2015，2019；急流异常偏西年份为：1981，1994，2007，2010，2013，

2018。2007 年之前，急流异常偏东年较多，而急流异常偏西年在 2007 年之后较多。整体而言，东亚副热带急流的東西位置随年份有向西偏移的趋势。

由夏季东亚副热带急流东西位置指数与我国全区域降水距平百分率的相关图（图 2b）可知，东亚副热带急流的東西位置与长江流域的降水存在显著的正相关，而与河套地区的降水为显著的负相关。当东亚副热带急流异常偏东时，长江流域降水增多，河套地区降水减少；反之，当急流异常偏西时，长江流域降水少，而河套地区降水多。根据图 2b 中相关性通过 95%显著性检验的区域，计算长江流域（25°-33°N，92°-122°E）和河套地区（33°-43°N，102°-122°E）区域平均的降水距平百分率并进行标准化。由图 2c、2d 可知，急流东西位置指数与长江流域的降水距平百分率之间的相关系数为 0.35，而与河套地区的相关系数达到了-0.38，均通过了 95%的显著性检验。由此进一步验证了急流东西位置与我国长江流域以及河套地区降水之间显著的联系。

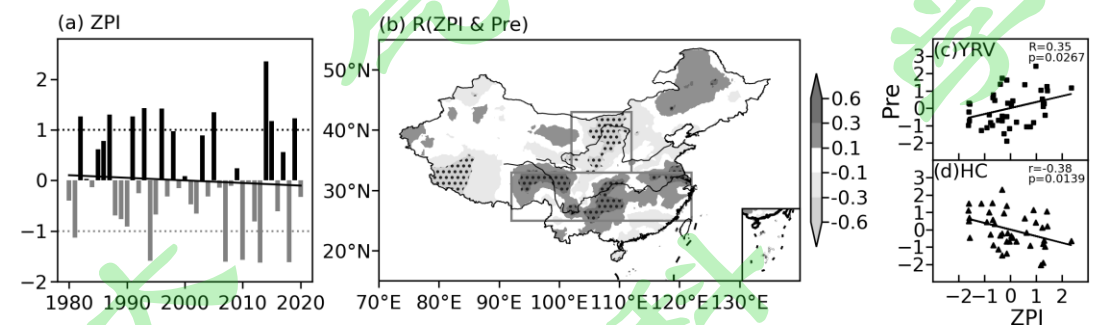


图 2 东亚副热带急流东西位置指数及其趋势 (a)，东亚副热带急流东西位置指数与我国夏季降水距平百分率的同期相关图 (b，打点区域表示通过了 0.05 显著性水平检验)，东亚副热带急流东西位置指数与长江流域 (c，(25°-33°N，92°-122°E))、河套地区 (d，(33°-43°N，102°-122°E)) 区域平均的夏季降水距平百分率的散点图（均为标准化数值）

Figure. 2 (a) Evolution of standardized East Asian Subtropical Jet Zonal Position Index and its trend from 1980 to 2020. (b) Simultaneous correlation between ZPI and the summer precipitation departure percentages in China. Dots indicate correlation coefficients significant at the 0.05 level. Scatters of standardized ZPI and the summer precipitation departure percentages in YRV (c, (25°-33°N, 92°-122°E)) and HC (d, (33°-43°N, 102°-122°E)).

4.2 急流东西位置异常年大气环流特征

接下来从高低层环流场上进一步探讨东亚副热带急流东西位置对我国降水造成影响的可能原因。东亚副热带急流异常偏西年（图 3a），200 hPa 上急流区分布在 70°-100°E 之间，急流轴较平直，呈纬向型，其位置相较于气候态向北偏移。气候态急流轴（40°N）以北西风加强，表现为异常西风，40°N 以南西风减

弱，为异常东风，综合作用使得东亚中纬度地区出现异常的反气旋性环流。而在急流异常偏东年（图 3b），急流区向东偏移至 80° - 110° E 之间，同时急流轴向南偏移，在我国北方地区上空表现为“V”字形，该处西风增强。由于急流的南移，气候态急流轴以北西风减弱，表现为异常东风，东北亚由此出现异常的气旋性环流。异常风场进一步影响高层辐合辐散场的分布。河套地区在急流偏西年受气旋性环流影响，对流层高层辐散，有利于上升运动，降水增强。而急流偏东年为气旋性环流控制，高层辐合，不利于降水。此外，急流东西位置异常年份对应的南亚高压位置也存在显著差异。急流异常偏西（东）年，气候态急流区南侧的异常东（西）风减弱（增强）东亚上空的反气旋强度，南亚高压位置偏西（东）。长江流域对流层高层出现辐合（辐散）异常，上升运动减弱（增强），不利于（有利于）该地区的降水。

图 3c、d 给出了东亚副热带急流东西位置异常年 500 hPa 高度场和 850 hPa 距平风场。急流异常偏西年（图 3c），500 hPa 中纬度等高线呈纬向分布，西太副高强度偏弱，位置偏东。850 hPa 距平风场上，异常东风在长江流域向南北两侧辐散，低层辐散不利于上升运动，长江流域降水减少。向北的偏南气流为河套地输送水汽，导致其降水增强。而在急流异常偏东年（图 3d），500 hPa 中纬度等高线经向度加大， $(45^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E})$ 附近有槽出现，引导冷空气南下。此时偏西偏强的西太副高边缘引导西南暖湿气流进入长江流域，与南下的冷空气交绥，产生大量降水。850 hPa 上低层辐合带主要位于长江流域，气流辐合上升也有利于降水增强。而河套地区低层为偏北气流，水汽供应较少，降水减弱。

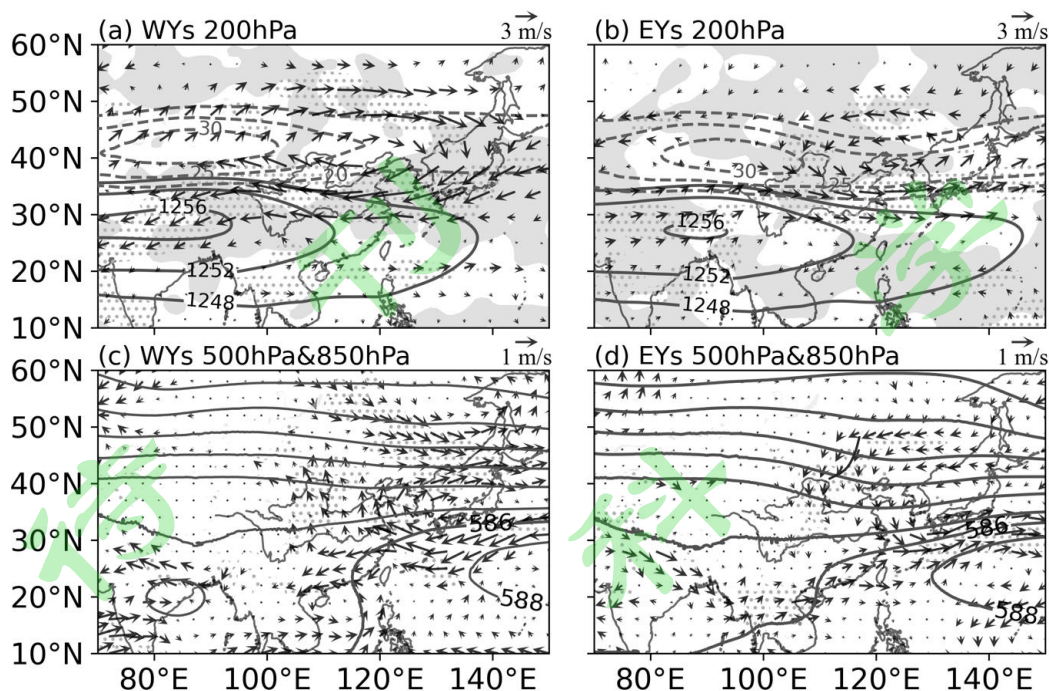


图3 急流异常偏西 (a、c)、东 (b、d) 年 200 hPa 纬向风 (虚线, 单位: m/s)、南亚高压 (等值线, 单位: dagpm)、距平风场 (箭头, 单位: m/s) 以及异常辐合区 (阴影) (a、b), 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和 850 hPa 距平风场 (箭头, 单位: m/s) (c、d), 打点区域表示距平风场通过了 0.05 显著性水平检验

Figure. 3 Zonal winds (dashed lines), South Asian High (solid lines, units: dagpm), wind anomalies (arrows, units: m/s), and convergence anomalies (shading) at 200 hPa in westward-shift years (WYs, a) and eastward-shift years (EYs, b). Geopotential height anomalies at 500 hPa (contours, units: dagpm) and wind anomalies at 850 hPa (arrows, units: m/s) in WYs (c) and EYs (d). Dots indicate regions where the wind anomalies are significant at the 0.05 level.

充足的水汽是降水形成的必要条件, 因此有必要对急流东西位置异常年份的水汽条件进行诊断分析。图 4 给出了急流异常偏西、偏东年整层水汽通量及其散度距平。在急流异常偏西年 (图 4a), 长江流域的水汽分别向南北两侧输出, 导致长江流域整层水汽通量散度为正异常, 水汽辐散, 而河套地区整层水汽通量散度为负异常, 水汽辐合; 在急流异常偏东年 (图 4b), 水汽辐合带分布在长江流域, 河套地区为水汽辐散。这与图 2b 中急流东西位置指数与长江流域降水正相关而与河套地区降水呈现负相关关系相吻合。

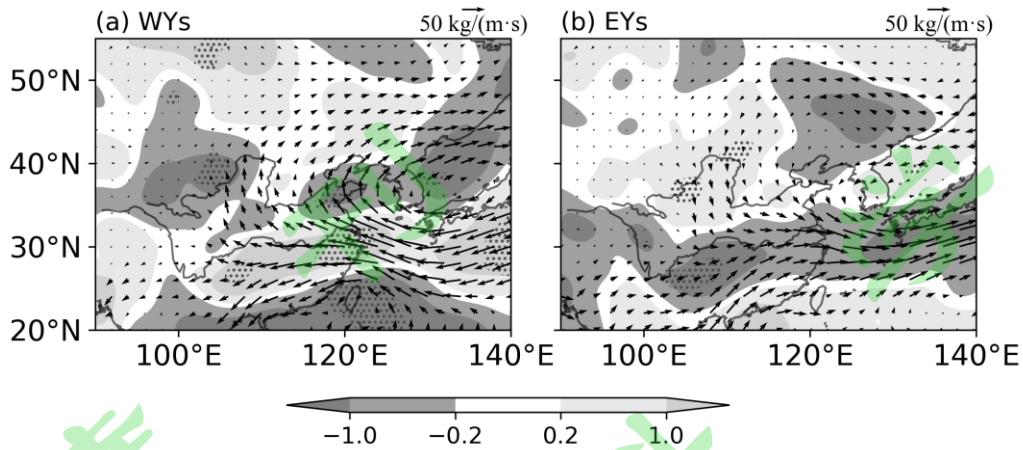


图 4 急流异常偏西 (a)、东 (b) 年整层水汽通量距平 (箭头, 单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 和整层水汽通量散度距平 (阴影, 单位: $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 打点区域表示通过了 0.05 显著性水平检验)

Figure. 4 Total column water vapour flux (arrows, units: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) and its divergence (shading, units: $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) anomalies in WYs (a) and EYs (b). Dots indicate regions where the total column water vapour flux divergence anomalies are significant at the 0.05 level.

4.3 急流东西位置异常年经向垂直环流特征

图 5 展示了东亚副热带西风急流东西位置异常年份上述两区域的垂直运动以及散度的垂直分布情况。急流异常偏西年, 长江流域对流层高层的异常辐合以及中低层的异常辐散使得该地低层到高层均表现为异常的下沉运动 (图 5a), 抑制对流不利于降水; 而河套地区高层辐散, 中低层辐合, 对应上升运动 (图 5c), 对流活动加强, 降水异常偏多。急流异常偏东年两地的高低层辐合辐散形势与急流偏西年相反, 长江流域 (图 5b) 主要为异常的上升运动, 有利于长江流域降水的增多; 河套地区 (图 5d) 则被下沉气流控制, 降水异常减少。

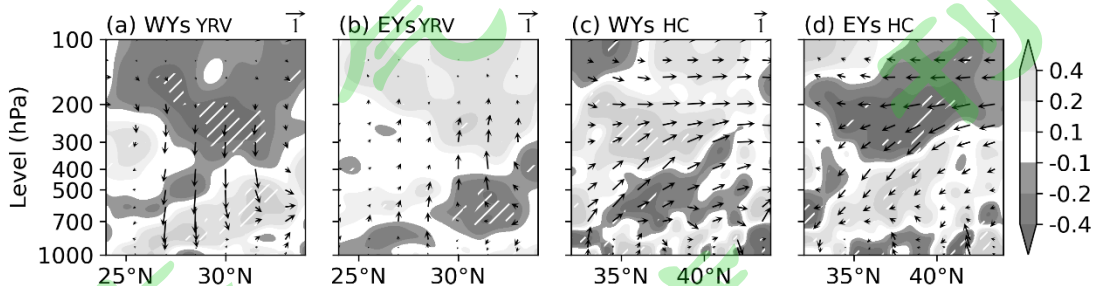
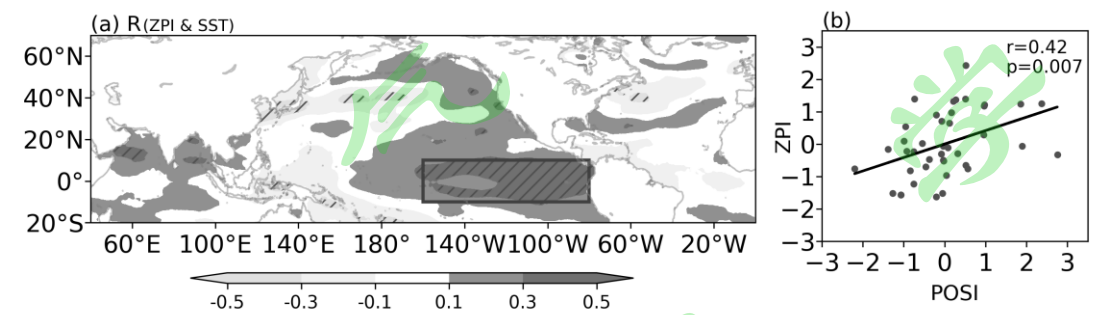


图 5 急流异常偏西 (a、c)、东 (b、d) 年长江流域 (a、b, $92^{\circ}\text{-}122^{\circ}\text{E}$) 以及河套地区 (c、d, $102^{\circ}\text{-}122^{\circ}\text{E}$) 平均经向垂直环流距平 (箭头, 垂直速度扩大 100 倍) 和散度距平 (阴影, 单位: 10^{-6} s^{-1} , 划线区域表示通过了 0.05 显著性水平检验)

Figure. 5 Meridional vertical circulation anomalies (arrows, vertical velocity magnified 100 times) and divergence anomalies (shading, units: 10^{-6} s^{-1}) over YRV (a, b, $92^{\circ}\text{-}122^{\circ}\text{E}$) and HC (c, d, $102^{\circ}\text{-}122^{\circ}\text{E}$) in WYs (a, c) and EYs (b, d). Hatches indicate the regions where divergence anomalies are significant at the 0.05 level.

222 5 东亚副热带急流对热带中东太平洋海温异常的响应

223 大量的研究表明海温对东亚副热带急流的位置存在显著的影响,为了进一步
224 探讨急流东西位置对海温的响应区域,将急流东西位置指数与夏季全球的海温求
225 相关。如图 6a 所示,两者显著正相关区位于热带中东太平洋,当热带中东太平
226 洋海温异常增暖时,急流位置异常偏东。反之,当热带中东太平洋海温异常偏冷
227 时,急流位置偏西。选取图 6a 中通过 95%显著性检验的热带中东太平洋区域
228 (10°S-0°N, 80°-160°W)海温进行平均,得到热带中东太平洋海温指数(POSI)。
229 图 6b 为热带中东太平洋海温指数与东亚副热带急流位置指数的散点图,两者的
230 相关系数达到了 0.42,通过了 95%的显著性检验。但相比于“海温偏高,急流偏
231 东”事件,“海温偏低,急流偏西”事件出现的频率更高。



232
233 图 6 东亚副热带急流东西位置指数与夏季海温的同期相关图 (a, 划线区域表示通过了 0.05 显著性水
234 平检验)、去完趋势的东亚副热带急流东西位置指数与赤道中东太平洋海温指数的散点图 (b, 均为标准化
235 数值)

236 Figure. 6 (a) Simultaneous correlation between ZPI and the summer (June-August) sea surface
237 temperature (SST). Hatches indicate the correlation coefficient significant at the 0.05 level. (b)
238 Scatter of standardized detrended ZPI and POSI.
239

240 图 7 对东亚副热带急流东西位置异常年份的 OLR 距平以及 200-500 hPa 平均
241 南北温度梯度距平进行合成,以研究急流东西位置对热带中东太平洋海温的响应
242 机制。当东亚副热带急流异常偏西时(图 7a),热带中东太平洋和东亚中纬度地
243 区的 OLR 为正值,对流上升运动减弱,热带西太平洋为负的 OLR,对流活动加
244 强。而当东亚副热带急流异常偏东时(图 7b),热带中东太平洋以及东亚中纬度
245 地区的 OLR 变为显著的负值,对流上升运动显著增强,而正的 OLR 主要分布
246 在热带西太平洋地区,这表明该处的对流活动减弱。出现该现象的原因可能是当
247 东亚副热带急流异常偏西(东)时,热带中东太平洋海温负(正)异常可以直接

冷却（加热）大气，导致该处的对流活动减弱（增强），通过 Walker 环流使得热带西太平洋地区出现异常的上升（下沉）运动，再经由经圈环流影响东亚中纬度地区，使得 30°N 附近对流活动减弱（增强），非绝热加热大气作用减弱（增强），大气异常偏冷（暖），异常冷（暖）中心北侧的南北温度梯度减小（增大），梯度异常小（大）值中心位于原气候态急流区的东部，根据热成风原理，该处对流层西风减弱（增强），有利于急流偏西（东）。

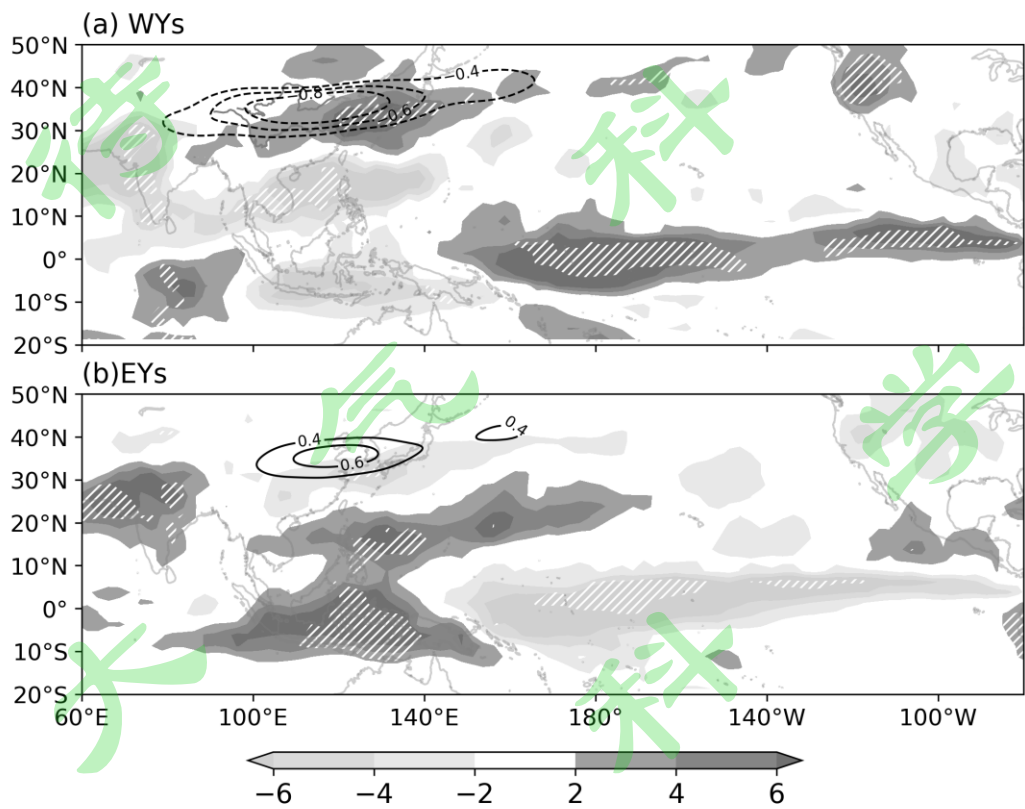
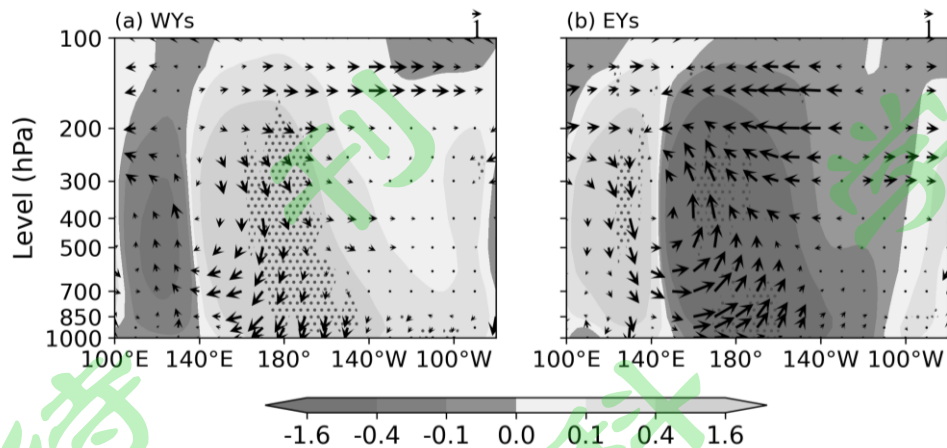


图 7 急流异常偏西 (a)、东 (b) 年向外长波辐射通量距平 (阴影, 单位: W/m^2 , 划线区域表示通过了 0.05 显著性水平检验) 和 200-500 hPa 平均的南北温度梯度距平 (等值线, 单位: 10^{-5} K/m)
Figure. 7 Outgoing Longwave Radiation (OLR) flux anomalies (shading, units: W/m^2) and meridional temperature gradient anomalies averaged over 200-500 hPa ((contours, units: 10^{-5} K/lat) in WY (a) and EYs (b). Hatches indicate the regions where OLR flux anomalies are significant at the 0.05 level.

为了进一步验证热带中东太平洋海温影响东亚副热带急流的路径, 图 8 分析了急流东西位置异常年份赤道太平洋地区的纬向垂直环流异常。急流异常偏西年 (图 8a), 100°W-140°E 之间均表现为异常的下沉运动, 下层气流到达低层向西输送, 在 100°-140°E 之间上升。而急流异常偏东年 (图 8b), 赤道中东太平洋地区为异常的上升运动, 上升气流到达高空 100-200 hPa 高度向东西两侧辐散, 西传的气流在赤道西太平洋下沉。这表明热带中东太平洋地区的海温异常可以使得

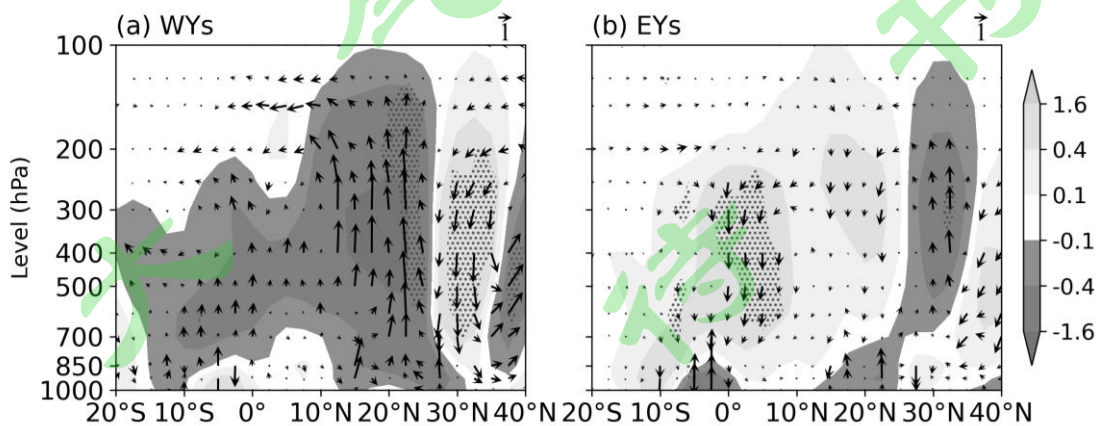
267 该处对流活动异常，进而通过 Walker 环流影响到热带西太平洋地区的对流活动。



268
269 图 8 急流异常偏西 (a)、东 (b) 年 0° 纬向垂直环流距平 (箭头, 垂直速度扩大 100 倍) 和垂直速度距平
270 (阴影, 垂直速度, 单位: 10^{-2} Pa/s, 打点区域表示通过了 0.05 显著性水平检验)

271 Figure. 8 Zonal vertical circulation anomalies (arrows, vertical velocity magnified 100 times) and vertical velocity
272 anomalies (shading, vertical velocity, units: 10^{-2} hPa/s) at 0° in WYs (a) and EYs (b). Dots indicate the regions
273 where the vertical velocity anomalies are significant at the 0.05 level.

274
275 从东亚副热带急流东西位置异常年 120°E 上的经向垂直环流距平来看, 急流
276 异常偏西时 (图 9a), 热带副热带地区主要为异常的上升运动, 上升运动大值中
277 心在 10°-25°N 之间, 30°N 近为异常的下沉运动, 对流活动减弱。急流异常偏东
278 时 (图 9b), 热带副热带地区主要为异常的下沉运动, 此时垂直速度负的大值中
279 心相较于急流偏西年上升运动大值中心位置偏南, 位于 0°-10°N 之间, 异常的上升
280 运动则分布在 30°-35°N 之间。急流南侧的垂直运动异常通过影响潜热释放作
281 用于大气, 进一步改变大气温度和南北温度梯度分布, 西风的强度因此产生差异,
282 从而使得急流的東西位置分布不同。



283
284 图 9 急流异常偏西 (a)、东 (b) 年 120°E 经向垂直环流距平 (箭头, 垂直速度扩大 100 倍) 和垂直速度

距平（阴影，垂直速度，单位： 10^{-2} Pa/s，打点区域表示通过了 0.05 显著性水平检验）

Figure. 9 Meridional vertical circulation anomalies (arrows, vertical velocity magnified 100 times) and vertical velocity anomalies (shading, vertical velocity, units: 10^{-2} hPa/s) at 120° in WYs (a) and EYs (b). Dots indicate the regions where the vertical velocity anomalies are significant at the 0.05 level.

6 结论与讨论

本文重点探讨了东亚副热带西风急流东西位置与我国夏季降水的关系及其对热带中东太平洋海温异常的响应，主要结论如下：

（1）夏季东亚副热带西风急流区位于我国青藏高原北部，气候态急流轴位于 40°N 附近。夏季 200 hPa 纬向风大值带和最大值中心随年份均有先向西移再向东偏移的趋势。东亚副热带急流异常偏西（东）年，长江流域降水较常年偏少（多），河套地区降水偏多（少）。

（2）东亚副热带急流异常偏西年，200 hPa 上长江流域为辐合区，河套地区为辐散区。500 hPa 上中纬度等高线呈纬向分布，西太副高强度偏弱，位置偏东，不利于水汽输送到长江流域。850 hPa 长江流域辐散下沉，降水减少，河套地区水汽辐合上升，有利于降水增多。急流异常偏东年，西太副高偏强、偏西，引导西南暖湿气流到达长江流域，上述 2 个地区高低层辐合辐散形势、水汽条件及垂直运动与急流偏北年相反，因此降水异常也与急流偏西年呈反位相分布。

（3）东亚副热带急流的東西位置与夏季热带中东太平洋的海温呈现显著的正相关。热带中东太平洋海温负（正）异常可以直接冷却（加热）大气，导致该处的对流活动减弱（增强），通过 Walker 环流使得热带西太平洋地区出现异常的上升（下沉）运动，再经由经圈环流影响东亚中纬度地区，使得 30°N 附近对流活动减弱（增强），非绝热加热大气作用减弱（增强），大气异常偏冷（暖），异常冷（暖）中心北侧的南北温度梯度减小（增大），梯度异常小（大）值中心位于原气候态急流区的东部，根据热成风原理，该处对流层高层西风减弱（增强），有利于急流偏西（东）（如图 10 所示）。

由前文可知，2007 年之前东亚副热带急流异常偏东年较多，而急流异常偏西年主要出现在 2007 年之后，这使得急流东西位置整体上随年份有向西偏移的趋势。这种变化的物理机制是一个值得思考的科学问题，有待于进一步探讨。此外，我们发现急流位置偏东时其整体位置也偏南，而 2022 年急流偏东，急流轴

却异常偏北。南亚高压异常东伸，副高脊线也异常西伸北抬，二者同时控制长江流域，导致异常的下沉运动，降水异常减少。以上分析说明东亚副热带西风急流作为东亚夏季风的成员之一，其对我国降水的影响除了考虑急流本身的位置外，还需结合其他成员系统进行综合分析。

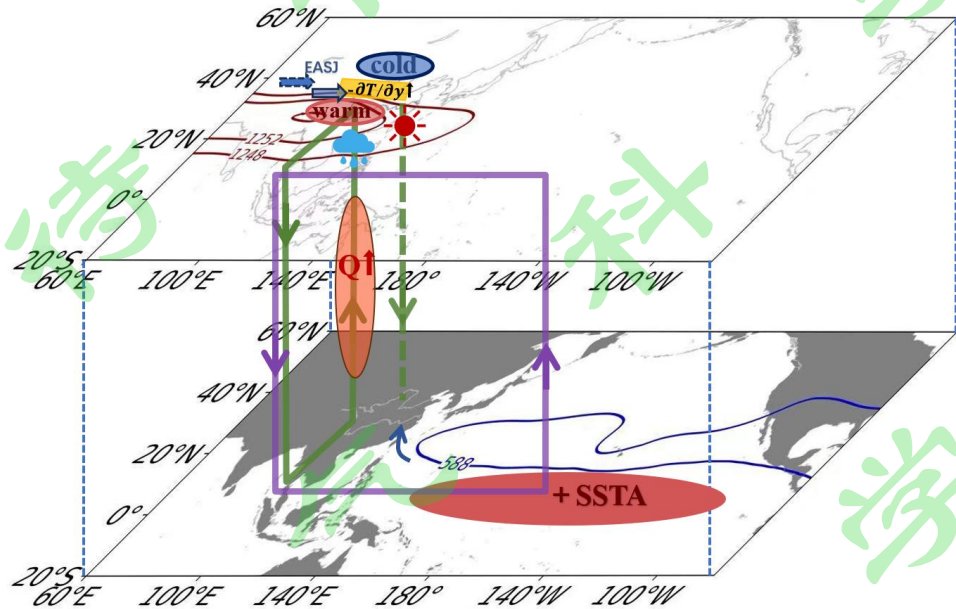


图 10 急流东西位置异常偏东年示意图，588 dagpm 线代表副高，Q 表示非绝热加热作用，高层红色等值线代表南亚高压，蓝、红阴影分别表示大气冷、暖中心， $-\partial T/\partial y$ 为南北温度梯度

Figure. 10 Schematic diagram of circulation anomalies in EYs. The 588 dagpm contour delineates the western Pacific subtropical high, Q signifies diabatic heating, and the red contours in the upper level mark the South Asian High (SAH). Blue and red shading indicates atmospheric cold and warm centers, respectively, while $-\partial T/\partial y$ represents the meridional temperature gradient.

参考文献

Dong L, Guo P, Wang P, et al. 2011. Impact of the variation of westerly jets over East Asia on precipitation of eastern China in July[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 3(05): 408-418. doi:10.3724/SP.J.1226.2011.00408.

Hao S, Li J, Mao J, et al. 2024. Interannual variability of spring rainfall over South China in association with the North Pacific Oscillation and North Atlantic Oscillation as revealed by reanalysis data and CMIP6 simulations[J]. Climate Dyn., 62: 7535-7557. doi:10.1007/s00382-024-07293-0.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J].

336 Quarterly journal of the royal meteorological society, 146(730): 1999-2049.
 337 doi:10.1002/qj.3803.

338 Hirahara S, Ishii M, Fukuda Y. 2014. Centennial-scale sea surface temperature
 339 analysis and its uncertainty[J]. J. Climate, 27(1): 57-75.
 340 doi:10.1175/JCLI-D-12-00837.1.

341 Jiang X, Cai F, Li Z, et al. 2023. The westerly winds control the zonal migration of
 342 rainy season over the Tibetan Plateau[J]. Communications Earth & Environment,
 343 4(1): 1-8. doi:10.1038/s43247-023-01035-6.

344 Kosaka Y, Xie S-P, Nakamura H. 2011. Dynamics of Interannual Variability in
 345 Summer Precipitation over East Asia[J]. J. Climate, 24(20): 5435-5453. doi:
 346 10.1175/2011JCLI4099.1.

347 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的
 348 影响[J]. 高原气象, (3): 382-389. Kuang X., Zhang Y. 2006. Impact of East Asian
 349 Subtropical Westerly Jet Position Anomalies on Summer Precipitation in the
 350 Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Plateau Meteorology (in
 351 Chinese), (3): 382-389. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004.

352 Liebmann B, Smith C A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave
 353 radiation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(6):
 354 1275-1277. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<1255:EA>2.0.CO;2.

355 Lin X, Lu B, Li G, et al. 2023. Asymmetric impacts of El Niño-Southern Oscillation
 356 on the winter precipitation over South China: the role of the India - Burma
 357 Trough[J]. Climate Dyn., 61(5): 2211-2227. doi:10.1007/s00382-023-06675-0.

358 Lin Z, Fu Y, Lu R. 2019. Intermodel Diversity in the Zonal Location of the
 359 Climatological East Asian Westerly Jet Core in Summer and Association with
 360 Rainfall over East Asia in CMIP5 Models[J]. Advances in Atmospheric Sciences,
 361 36(6): 614-622. doi:10.1007/s00376-019-8221-z.

362 Qu X, Huang G. 2012. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional

displacement of East Asian jet in boreal summer[J]. International Journal of
Climatology, 32(13): 2073-2080. doi:10.1002/joc.2378.

Tang S, Zhang Z, Luo J-J. 2024. Interdecadal change in the relationship between the
South China late rainy season rainfall and equatorial Pacific SSTs[J].
Environmental Research Letters, 19(9): 094031. doi:10.1088/1748-9326/ad69a7.

Wang T, Gou X, Wang X, et al. 2024. Equatorward shift of ENSO-related subtropical
jet anomalies in recent decades[J]. Atmospheric Research, 297: 107109.
doi:10.1016/j.atmosres.2023.107109.

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]. 地球物理学报, 56(4): 1102-1111. Wu J, Gao X. 2013. A gridded daily
observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J].
Chinese Journal of Geophysics Chinese Edition (in Chinese), 56(4): 1102-1111.
doi:10.6038/cjg20130406.

魏林波, 周甘霖, 王式功, 等. 2012. 亚洲副热带高空西风急流活动的气候特征及
其与我国部分地区夏季降水的关系[J]. 高原气象, 31(1): 87-93. Wei L., Zhou G.,
Wang S., et al. 2012. Climatic Characteristics of the East Asian Subtropical
Westerly Jet and Its Relationship with Summer Precipitation in Parts of China[J].
Plateau Meteorology (in Chinese), 31(1): 87-93.

Xiao F, Lyu Y, Wu Q, et al. 2023. Enhanced impact of ENSO-independent Indian
Ocean SST on summer precipitation over arid Northwest China[J]. Global and
Planetary Change, 229: 104250. doi:10.1016/j.gloplacha.2023.104250.

宣守丽, 张庆云, 孙淑清, 等. 2013. 夏季逐月东亚高空急流异常对我国降水的影响[J]. 气候与环境研究, 18(6): 781-792. Xuan S., Zhang Qingyun, Sun S., et al.
2013. Impact of Monthly Abnormalities in the East Asian Subtropical Westerly Jet
on Precipitation in China during Summer[J]. Climatic and Environmental Research
(in Chinese), 18(6): 781-792. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.12.

Yang S, Lau K-M, Kim K-M. 2002. Variations of the East Asian Jet Stream and

390 Asian-Pacific-American Winter Climate Anomalies[J]. J. Climate, 15(3): 306-325.
391 doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0306:VOTEAJ>2.0.CO;2.

392 张庆云, 宣守丽, 孙淑清. 2018. 夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环
393 流特征及前兆信号[J]. 大气科学, 42(4): 935-950. Zhang Qingyun, Xuan S., Sun
394 S. 2018. Circulation Characteristics and Precursory Signals of Intraseasonal
395 Variability in the East Asian Subtropical Westerly Jet during Summer[J]. Chinese
396 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 935-950.
397 doi:CNKI:SUN:DQXK.0.2018-04-017.