

夏季亚洲副热带西风急流气候特征

杨莲梅^{1,2,3} 张庆云¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002
3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用 1958~2003 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料以及中国 160 站月降水资料, 较全面、细致地分析了夏季亚洲西风急流气候特征。结果表明, 亚洲急流存在其南北位置、强度和沿急流 Rossby 波活动的变化, 定义的风急流扰动指数能较好地综合反映急流的这 3 种变化。沿西亚急流和东亚急流的 Rossby 波活动具有不同的年际和年代际变化, 并受不同波列活动的影响。西亚急流 Rossby 波活动 (WAJRA) 受北大西洋涛动影响, 而东亚急流 Rossby 波活动 (EAJRA) 与南极涛动有联系。西亚急流 Rossby 波活动影响新疆夏季降水, 东亚急流 Rossby 波活动影响 100°E 以东地区降水。

关键词 西亚西风急流 东亚西风急流 Rossby 波活动

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0010-11 **中图分类号** P465 **文献标识码** A

Climate Features of Summer Asia Subtropical Westerly Jet Stream

YANG Lian-Mei^{1,2,3} and ZHANG Qing-Yun¹

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*
2 *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002*
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Climate features of summer Asia subtropical westerly jet (SASWJ) are examined from the NCEP/NCAR reanalysis dataset and China 160 stations monthly precipitation from 1958 to 2003. SASWJ exhibits changes of jet axis, intension and Rossby wave activity along SASWJ, and perturbation kinetic energy index along SASWJ can indicate Asia jet variability. There are different interannual and interdecadal variability between Rossby wave activities along west jet and east jet stream which are impacted by different wave trains. North Atlantic Oscillation (NAO) influences Rossby wave activities along west Asia westerly jet (RWAWAJ), and RWAWAJ has intimately related to Xinjiang precipitation. There are relationships between Rossby wave activities along East Asia westerly jet (RWAWAEJ) and Antarctic Oscillation (AAO), and RWAWAEJ is closely related to East Asia precipitation.

Key words west Asia westerly jet, East Asia westerly jet, Rossby wave activity

1 引言

北半球副热带西风急流是位于对流层高层的

具有行星尺度的重要大气环流系统, 是影响天气、气候异常的重要系统之一。从 20 世纪 50 年代以来, 对位于东亚—太平洋上空急流的结构、维持

收稿日期 2006-10-23 收到, 2007-11-02 收到修定稿
资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775056、新疆气象局科学基金 200609 和科技部社会公益类研究项目 2005DIB6J113
作者简介 杨莲梅, 女, 1969 年出生, 博士研究生, 副研究员, 主要从事中高纬气候异常机理研究。E-mail: yanglm@idm.cn

及其变化对亚洲—太平洋地区天气的影响进行了大量的研究^[1~10], 这些研究表明西风急流与许多天气尺度系统如气旋、锋面、季风、阻塞和风暴活动路径有密切关系, 因此研究西风急流的变化在实际天气预报和分析中一直是一个非常重要的内容。

对季节和更长时间的尺度, 以前的研究主要着重于东亚急流南北位置变化与气候的关系, 如其位置的南北移动与东亚大气环流的季节转换^[11]和南海季风、东亚梅雨的开始和结束的关系^[12~14]。Lu^[15]和 Lin 等^[16]则揭示了夏季及季节内东亚急流位置的南北变化与南亚高压、西太平洋副热带高压和西太平洋对流的关系。廖清海等^[17]探讨了夏季东亚地区副热带西风急流南北位置的年际变化特征、影响及其可能机制。上述研究均表明, 东亚西风急流位置的南北变化与亚洲季风系统成员之间有密切关系。急流除了其位置的南北变化外, 作为一个波导其上 Rossby 波活动控制北半球夏季中纬地区季节变化的模态^[18~21]。廖清海等^[22]最近研究指出, 东亚夏季中后期大气环流的季节演变进程与沿急流的 Rossby 波活动密切联系, 从而影响江淮流域梅雨的提前结束或延迟。Naoki 等^[23]研究了 8 月沿亚洲急流的 Rossby 波活动特征及其对日本气候异常的影响。吴伟杰等^[24]指出在气候平均意义和年际变化上, 夏季东亚高空急流和天气尺度波动之间有着密切的联系。过去针对副热带西风急流的形成机理做了大量的工作, 一般认为, 地形和海陆差异是副热带西风急流形成的基本因素。董敏等^[25]进一步研究了东亚西风急流变化与热带对流加热的关系, 指出西风急流强度的年际变化与热带对流密切相关, 东亚地区的西风急流强度变化与热带加热场前期冬季 (1~2 月) 及春末夏初 (5~6 月) 的热带对流活动显著相关, 而在春季 (3~4 月), 这种相关并不明显。

上述研究着重于东亚西风急流与东亚季风系统及其上波动活动的关系, 而亚洲急流作为尺度达数万公里的中高纬行星尺度系统, 主要与大气内部动力过程有关, 其气候特征相当复杂, 目前认识有限。本研究利用长时间序列资料, 细致地研究夏季亚洲急流气候特征、沿急流 Rossby 波活动特征及其异常对气候的影响, 这对中高纬环流的年际和年代际变化、中国东、西部气候差异的

认识非常重要, 进而对东亚气候变化和预测的进一步认识也更有意义。

2 资料和方法

本文分析资料为美国 NCEP/NCAR 再分析月平均资料 (1958~2003 年), 中国气象局提供的中国 160 个台站 1958~2003 年月降水资料。夏季为 6~8 月平均, 因此已滤去了瞬变扰动, 这里的 Rossby 波扰动为定常扰动, Rossby 波活动用扰动动能度量。纬向波数 $K < 3$ 代表基本流场, 纬向波数 $K \geq 3$ 被认为对基本气流的扰动。随着纬向变化基本流场和扰动的分离, 基本气流变化被剔除。对夏季 200 hPa 风速进行傅里叶 (Fourier) 变换, 波数 $K < 3$ 为基本场 (u_b, v_b), 则扰动风速 (u', v') = (u, v) - (u_b, v_b), 扰动动能 $E_k = (u'^2 + v'^2)/2$ 。急流风速最大值的纬度作为急流轴, 西亚急流 (急流入口) 和东亚急流 (急流出口区) 的 Rossby 波活动分别取 $15 \sim 60^\circ\text{E}$ (以后的分析中将给出说明) 和 $100 \sim 150^\circ\text{E}$ 急流轴 $\pm 5^\circ$ 的区域平均扰动动能作为度量, 并对它们进行标准化作为西亚急流和东亚急流 Rossby 波活动指数。

静止 Rossby 波数

$$K_s = \sqrt{\frac{\beta_{\text{eff}}}{U}}, \quad \beta_{\text{eff}} = \beta - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2},$$

其中 β (单位: $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 是科里奥利参数经向梯度, 即 $\beta = \partial f / \partial y$, U 为纬向风速。

E-P 通量是研究波流相互作用、波动传播和地转位涡输送的有效方法, 是行星波活动和异常的重要诊断工具, Takaya 等^[26]根据 Plumb 等的工作给出了沿变化基本气流静止波的波活动通量公式, 表述为

$$W = \frac{p}{2|U|} \left\{ \begin{aligned} &U(\Psi'^2_{xx} - \Psi'\Psi'_{xx}) + V(\Psi'_x\Psi'_y - \Psi'\Psi'_{xy}) \\ &U(\Psi'_x\Psi'_y - \Psi'\Psi'_{xy}) + V(\Psi'^2_{yy} - \Psi'\Psi'_{yy}) \\ &\frac{f_0^2}{S^2} [U(\Psi'_x\Psi'_p - \Psi'\Psi'_{xp}) + V(\Psi'_y\Psi'_p - \Psi'\Psi'_{yp})] \end{aligned} \right\}.$$

为了研究准静止 Rossby 波活动, 对 200 hPa 流函数进行傅里叶 (Fourier) 谐波分析, 上式中 ϕ' 为谐波分析滤去了波数小于 3 后的扰动流函数, $|U|$ 为水平风速, p 为气压, u, v 为基本气流

的纬向和经向分量， S^2 为静力稳定度参数。本研究应用上式讨论 Rossby 波传播特征。

3 夏季亚洲副热带西风急流气候特征

3.1 亚洲西风急流纬向风气候特征和变化模式

图 1a 为夏季（6~8 月）北半球气候平均（1958~2003 年）200 hPa 纬向风分布，北半球沿 40°N 附近为西风急流带，东北太平洋上空风速减弱把急流分为西亚—西北太平洋急流（0°~210°E，这里简称亚洲急流）和北美—北大西洋急流（240°E~0°，简称北美急流），纬向风速大于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。亚洲急流有 3 个中心，分别位于里海上空（50°E 附近）、80~100°E 的中国西部地区（最大风速超过 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和 140°E 以东的日本及其洋面上（最大风速为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）。北美急流强度弱于亚洲急流，最大风速仅为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，且急流中心比亚洲急流偏北约 5°。图 1b 为纬向风标准差分布，可见，沿亚洲急流入口和出口区风速变化明显， $|\Delta u|$ 可达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上，甚至达 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

夏季 200 hPa 标准化纬向风经验正交函数（EOF）分析见图 2，第一模态占总方差的 19.7%，

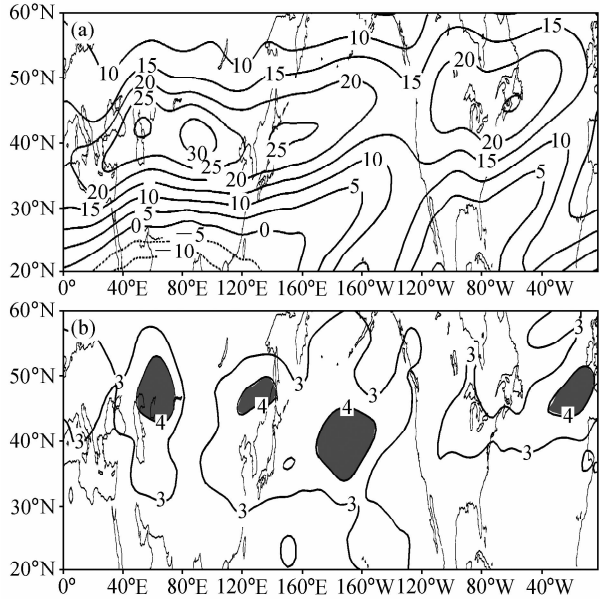


图 1 6~8 月 200 hPa 气候平均（1958~2003 年）：(a) 纬向风；(b) 纬向风标准差。单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig. 1 Climatology from Jun to Aug at 200 hPa (1958—2003): (a) zonal wind; (b) zonal wind standard deviation. units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

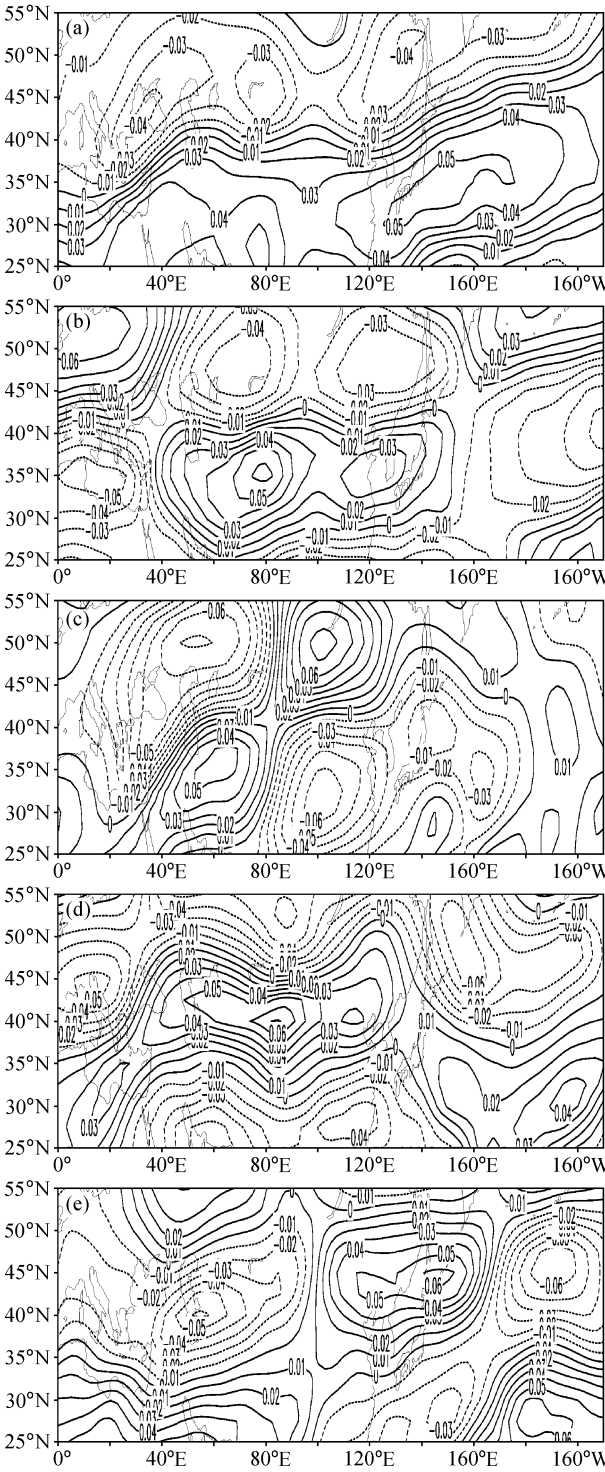


图 2 夏季 200 hPa 纬向风 EOF 分解前 5 个方差最大的特征模态：(a) 第一模态；(b) 第二模态；(c) 第三模态；(d) 第四模态；(e) 第五模态
Fig. 2 The patterns of the eigenvector modes of zonal wind at 200 hPa with the first five greatest variation in summer: (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3; (d) EOF4; (e) EOF5

空间分布为 40°N 南侧的西风异常和北侧的东风异常, 表征了急流的南北偏移变化, 对应的时间序列表明急流轴具有年代际变化, 1969~1978 年位置偏北, 1979~1994 年位置偏南, 1994~2003 年偏北。急流第二模态占总方差的 12.0%, 表征了 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 急流的南北偏移变化, 即基本表征了大于 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流的变化, 且与南亚高压的范围基本一致, 同时, 该范围急流 1964~1977 年急流位置偏北, 1978~2003 年位置偏南。第三模态占总方差的 9.6%, 表示亚洲急流 80°E 以西 (西亚急流) 和以东 (东亚急流) 南北偏移的相反变化。第四模态占总方差的 7.8%, 表示 $30^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 急流的强度变化, 对应的时间序列表明亚洲急流主体 1960~1969 年强度偏强, 而 1970~2000 年强度偏弱。前 4 个模态占总方差的 49.1%, 表明亚洲急流主要以 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 急流轴的南北位移、强度强弱变化为主。而第五模态占总方差的 6.5%, 表征了急流 100°E 东、西部分强度的相反变化, 表明亚洲急流入口和出口之间变化存在不一致性。

3.2 亚洲西风急流经向风气候特征和变化模态

图 3a 为气候平均经向风分布, 急流上间隔 $2\ 000\sim 3\ 000\text{ km}$ 南北风交替出现, 表明静止 Rossby 波的存在, 其中亚洲急流入口区 (地中海

东部—里海) 南风最强超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 恰好处于南亚高压最西端的北侧, 以东则南北风减弱, 即静止波列在急流入口处被激发并沿急流传播。在北美地区随着急流的再次增强西岸出现 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风, 随之南北风交替出现。经向风标准差分布 (图 3b) 表明, 亚洲急流入口区以北斯堪的纳维亚半岛和出口区日本附近经向风存在明显变化, $|\Delta v|$ 可达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 而这些区域经向风平均仅为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 沿北美急流的经向风变化明显。以上分析表明, 亚洲急流入口和出口区纬向和经向风存在明显变化, 而急流主体变化相对较弱。

图 4 给出了夏季标准化经向风 EOF 分析方差最大的前 4 个特征模。第一模态占总方差的 14.4%, 反映的是斯堪的纳维亚半岛—欧亚大陆—太平洋地区的波状遥相关型, 其中心位置分别位于 $(55^{\circ}\text{N}, 20^{\circ}\text{E})$, $(42.5^{\circ}\text{N}, 45^{\circ}\text{E})$, $(42.5^{\circ}\text{N}, 75^{\circ}\text{E})$, $(42.5^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E})$, $(42.5^{\circ}\text{N}, 142.5^{\circ}\text{E})$ 和 $(42.5^{\circ}\text{N}, 175^{\circ}\text{E})$, 波列从斯堪的纳维亚半岛向东南方向传播, 在亚洲急流入口处进入急流, 然后沿急流主体传播, 波列及其中心主要位于急流区和中高纬西风区中。廖清海等^[22] 指出 7 月经向风的第二模态遥相关型与此模态非常一致; 第二模态占总方差的 11.7%, 沿急流轴南北两侧分别存在一个遥相关波列, 急流南侧表征了北非—

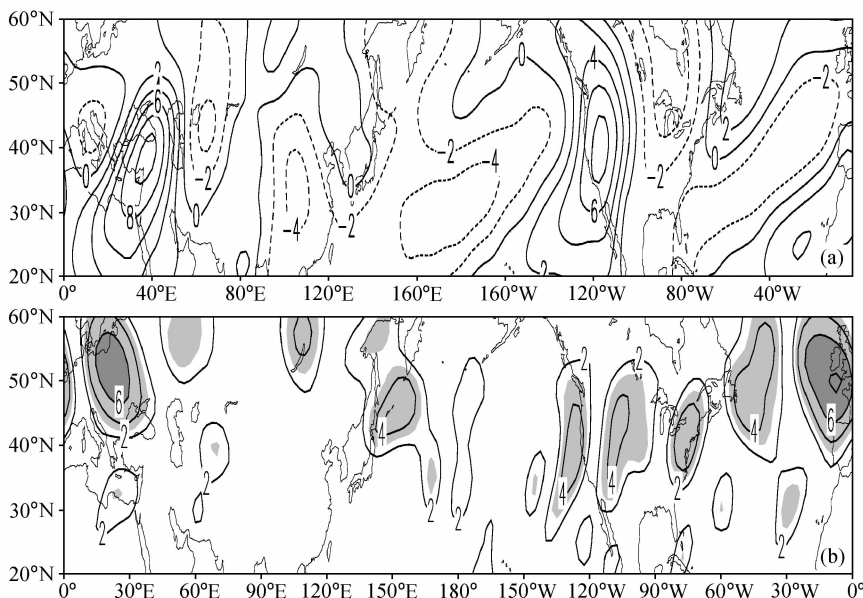


图 3 夏季 200 hPa 气候平均 (1958~2003 年): (a) 经向风; (b) 经向风标准差。单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 3 Climatology from Jun to Aug on 200 hPa (1958–2003): (a) meridional wind; (b) meridional wind standard deviation. units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

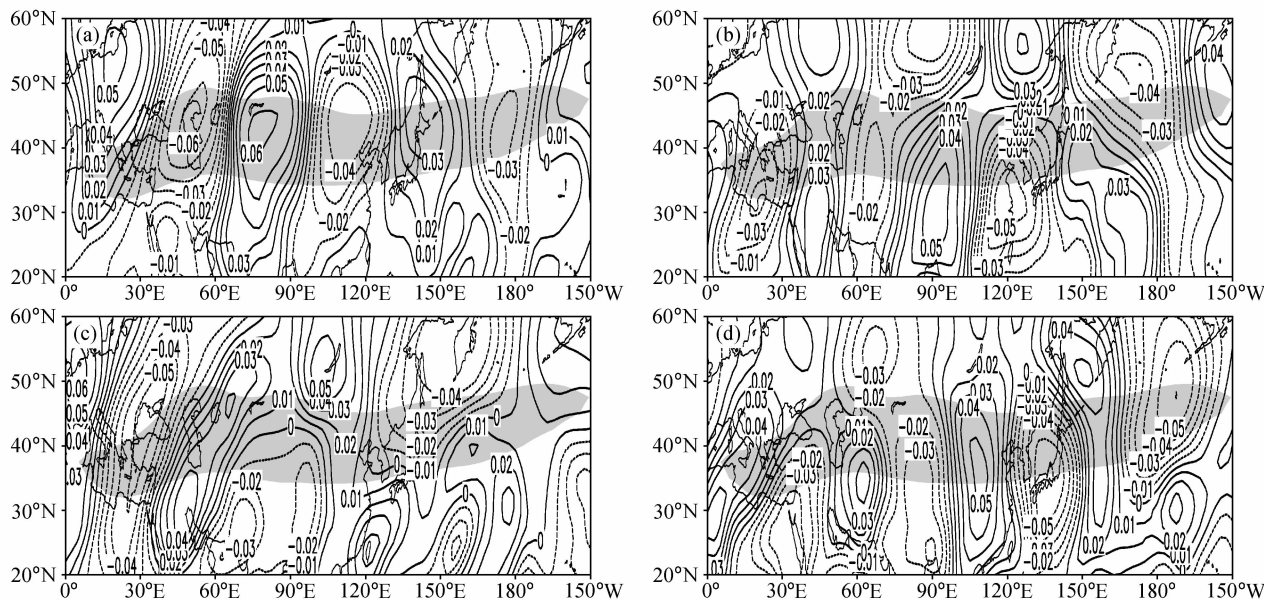


图4 夏季 200 hPa 经向风标准差 EOF 分解前 4 个方差最大的特征模态 (阴影表示纬向风大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域): (a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态; (d) 第四模态

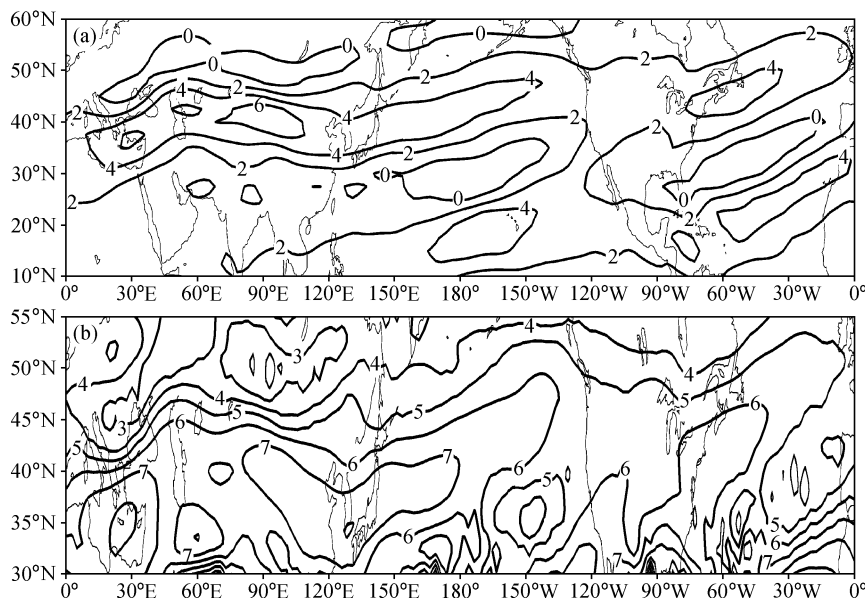
Fig. 4 The patterns of the eigenvector modes of meridional wind at 200 hPa with the first four greatest in summer (shadings indicate zonal wind larger than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3; (d) EOF4

中低纬欧亚大陆—太平洋地区遥相关波列, 其中心位置分别位于 $(32.5^{\circ}\text{N}, 20^{\circ}\text{E})$, $(30^{\circ}\text{N}, 42.5^{\circ}\text{E})$, $(35^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{E})$, $(30^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{E})$, $(32.5^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E})$ 和 $(175^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N})$, 该波列主要位于西风急流区, 类似于廖清海等^[22]指出的 7 月经向风的第一模态遥相关型, 表明 7 月和 6~8 月平均沿亚洲急流遥相关型之间存在异同, 沿亚洲急流 Rossby 波季节内活动变化较大。而急流北侧 45°N 以北中高纬地区存在东欧—西伯利亚—鄂霍次克海的波列, 其中心位置分别位于 $(55^{\circ}\text{N}, 45^{\circ}\text{E})$, $(57.5^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{E})$, $(55^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\text{E})$ 和 $(50^{\circ}\text{N}, 175^{\circ}\text{E})$, 可见沿西风急流南北两侧存在副热带和中高纬 2 支独立的波列; 第三模态占总方差的 8.7%, 沿急流遥相关波列在 60°E 分为南北两支, 急流北侧为地中海—中亚—鄂霍次克海的西南—东北向遥相关波列, 中心位置分别位于 $(45^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{E})$, $(45^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{E})$, $(50^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E})$ 和 $(55^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E})$, 遥相关波列在急流入口区激发, 在中亚急流轴北侧向东北方向传播, 位于急流轴南侧为地中海—青藏高原南侧—西太平洋西北—东南向遥相关波列, 中心位置分别位于 $(45^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{E})$, $(30^{\circ}\text{N}, 45^{\circ}\text{E})$, $(25^{\circ}\text{N}, 75^{\circ}\text{E})$, $(25^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E})$ 和 $(25^{\circ}\text{N}, 155^{\circ}\text{E})$; 第四模态占总方差的 8.4%, 表现为北非—中低纬欧亚

大陆—北太平洋地区西南—东北向遥相关波列, 中心位置分别位于 $(30^{\circ}\text{N}, 5^{\circ}\text{E})$, $(25^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{E})$, $(35^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\text{E})$, $(35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{E})$, $(35^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E})$, $(35^{\circ}\text{N}, 135^{\circ}\text{E})$, $(50^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{E})$ 和 $(45^{\circ}\text{N}, 180^{\circ}\text{E})$, 以上分析表明沿亚洲西风急流及其两侧存在多种遥相关波列, 波列在急流入口处激发沿不同路径向东传播到东亚高、中、低纬。

图 5a 为局地笛卡儿坐标系中 200 hPa 夏季气候平均 β_{eff} , Hoskins 等^[27]曾指出 β_{eff} 大值意味急流是一个波导, 可以看到沿急流为 β_{eff} 大值区, 急流中心 β_{eff} 最大, 其北侧负值区阻止静止波的向北传播, 而急流南侧南亚高压范围的正值区意味静止波可以向南传播, 与上述图 4c 存在急流入口波列向急流南侧的副热带地区传播一致, 表明图 4b 和 4c 中急流北侧的波列与急流南侧波列相互独立。图 5b 为对应的静止波数, 沿亚洲急流及其南侧为 6~7 个波 (沿北美急流轴为 5~6 波), 入口区和出口区波数较大, 分别为 8 波和 7 波 (6 波), 其北侧则波数迅速减小, 表明急流上及其南侧波活动强。

图 6a 为气候平均 500 hPa 垂直速度分布, 在地中海东部和咸海分别为强下沉区, 与沙漠地形相对应, 沙漠辐射冷却进一步增强下沉运动, 与

图 5 1958~2003 年 200 hPa 夏季气候平均: (a) β_{eff} ; (b) 静止 Rossby 波数Fig. 5 1958—2003 mean (a) β_{eff} and (b) stationary Rossby wave number at 200 hPa in summer

此相对应高层出现强辐合, 该辐合则是涡源 fD , D 为散度, f 为科里奥利参数, f 随纬度增大的变化使得低纬的辐合作为涡源强迫弱于中纬。涡源强迫位于亚洲急流入口区, 其异常很容易沿急流波导通过 Rossby 波向东传播, 这里 fD 作为涡源强迫忽略了风的平流作用, Sardeshmukh 等^[27]的研究认为在这种情况下风的平流可以忽略不计。中国西北干旱区为辐合下沉区, 为亚洲急流主体, 东亚—西太平洋为辐散上升区, 即出口区。东太平洋为强辐合下沉区, 是北美急流的涡源强迫, 北美急流弱则 Rossby 波活动和传播相对弱, 与前述波列分布一致。图 6c 为 200 hPa 夏季气候平均水平波活动矢量和散度, 北大西洋—斯堪的纳维亚半岛为强水平波活动矢量强辐散中心, 该中心水平波通量向东和东南传播, 向东传播的波部分在乌拉尔山附近转向东南方向传播, 在里海、咸海和中亚上空进入副热带西风急流并继续向东传播; 直接向东南方向传播的波在地中海东部和黑海附近进入副热带西风急流并沿急流向东传播, 表明高纬北大西洋—斯堪的纳维亚半岛水平波活动通过两条路径影响沿西风急流波活动, 里海—咸海和新疆存在强 E-P 通量辐散—辐合中心, 表明沿西亚西风急流存在强 Rossby 波活动。由此结合纬向风、经向风、涡源强迫以及水平波活动矢

量和散度, 把 15~60°E 作为入口区 (西亚急流), 100~140°E 作为出口区 (东亚急流)。

4 夏季沿亚洲急流 Rossby 波活动及与急流南北位置、强度和波列的关系

入口区 Rossby 波扰动动能 E_k 与夏季 200 hPa 纬向风 EOF 分析第二、三和四模态的相关系数分别为 -0.46、-0.37 和 0.33, 并分别通过 0.01、0.02 和 0.05 的 t 检验统计信度。表明入口区 E_k 与 30~150°E 急流的南北偏移变化, 亚洲急流 80°E 西、东两侧急流南北偏移的变化, 以及 30~140°E 急流的强度变化呈现显著关系。即 30~150°E 急流偏南、强度偏弱则入口区扰动偏弱, 反之相反。入口区 Rossby 波扰动动能 E_k 与夏季 200 hPa 经向风 EOF 分析第一模态的相关系数为 -0.69, 通过 0.001 的 t 检验统计信度, 表明入口区 E_k 与斯堪的纳维亚半岛—欧亚大陆—太平洋地区的遥相关波列活动显著相关, 而与沿急流及其两侧的其他波列活动 (其他模态) 关系很弱。

出口区 Rossby 波扰动动能 E_k 与夏季 200 hPa 纬向风 EOF 分析第二和第三模态的相关系数分别为 0.38 和 -0.30, 并分别通过 0.01 和 0.05 的 t

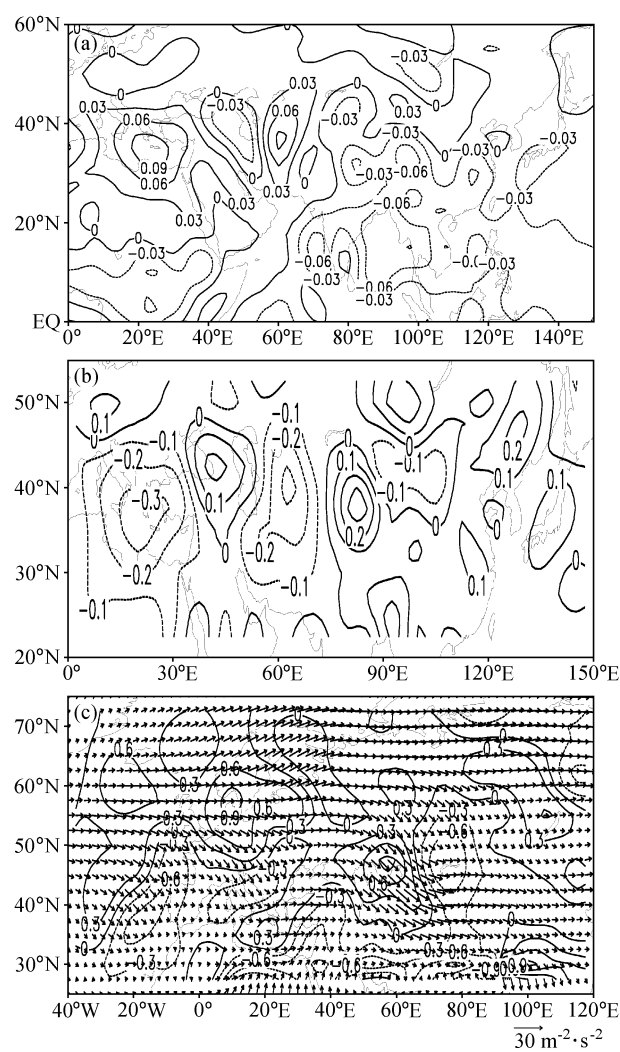


图 6 1958—2003 年气候平均: (a) 500 hPa 垂直速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 200 hPa 入口强迫 fD (单位: $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) 200 hPa 水平波活动通量 (箭头) 和散度 (等值线, 单位: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

Fig. 6 1958—2003 mean: (a) 500 hPa vertical velocity (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) entrance forcing fD at 200 hPa (units: $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) horizontal wave activity flux (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and its divergence (units: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) at 200 hPa in summer

检验统计信度, 即东亚急流位置偏南则出口区扰动偏强。出口区 Rossby 波扰动动能 E_k 与夏季 200 hPa 经向风 EOF 分析第三和第四模态的相关系数分别为 -0.46 和 -0.35 , 并分别通过 0.01 和 0.02 的 t 检验统计信度, 表明出口区 E_k 大小与 60°E 以东急流两侧的波列、北非—中低纬欧亚大陆—北太平洋地区西南—东北向遥相关波列有密切联系。

为了进一步了解与急流入口区和出口区所联系的波列, 给出急流入口区和出口区扰动动能与夏季 200 hPa 经向风相关分布 (图略), 与急流入口区扰动动能关联的波列与夏季经向风的 EOF 分析第一模态非常一致, 表明急流入口区扰动动能变化与斯堪的纳维亚半岛—沿急流主体的欧亚大陆—北太平洋地区遥相关波列密切联系, 而与沿急流南北侧的其他模态波列关系较弱。与急流出口区扰动动能关联的波列与夏季经向风的 EOF 分析第四模态非常相似, 此外, 还与沿南半球西风急流的波列有显著相关。

入口和出口区 E_k 与 200 hPa 纬向风速的相关分布 (图略) 表明, 入口区扰动与急流入口处急流强度呈显著正相关, 与其南北侧的风速呈显著负相关, 与格陵兰地区上空风速呈显著正相关, 与北美急流—北大西洋上空风速呈显著负相关, 即上游格陵兰地区上空风速偏强、北美急流—北大西洋上空风速减弱则亚洲急流入口急流偏强, 可见欧亚西风急流入口处扰动仅与其上游格陵兰、北美—北大西洋上空风速、本身急流强度有密切关系。出口区扰动与急流出口处急流强度呈显著正相关, 与其南北侧风速呈显著负相关, 同时与南半球中高纬—赤道—急流出口纬向风形成了南北向的“+ - + - + -”显著相关波列, 另外还与赤道东太平洋上空的纬向风呈显著负相关。由此可知, 亚洲西风急流出口区扰动与南半球急流、赤道东风、赤道东太平洋及本身纬向风速有密切关系, 反而与急流入口处风速关系不密切。

这里采用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 气候预测中心发布的 NAO 指数, 图 7 为 NAO 指数与西亚急流扰动指数年际变化, 两者线性相关系数为 0.60 , 通过 0.001 显著性检验, 表明两者之间关系显著, NAO 强则西亚急流扰动强, 反之则相反。以上表明, 西亚急流扰动与 NAO 活动密切联系, NAO 是地面气压系统的变化, 而西亚急流扰动是对流层高层系统的变化, 两者之间是如何联系的呢? NAO 指数与海平面气压、500 hPa 高度场和 200 hPa 高度场相关分布 (图略) 表明, 北大西洋涛动在夏季表现为格陵兰到极地的气压与北美地区—北大西洋—北欧地区气压反向变化, 500 和 200 hPa 高度场也表现为格陵兰到极地与北美地区—

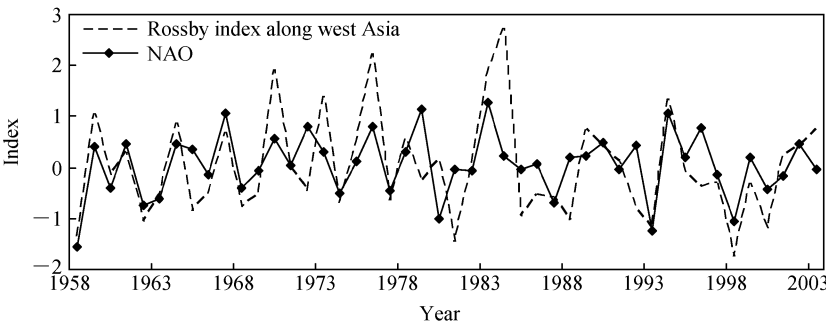


图7 NAO指数与西亚急流扰动指数的年际变化
Fig. 7 NAO index and perturbation index along West Asia jet stream

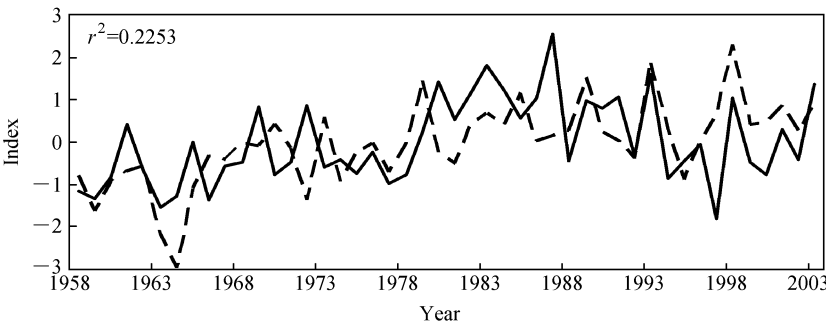


图8 AAO指数(虚线)与东亚急流扰动指数(实线)的年际变化
Fig. 8 AAO index (dashed line) and perturbation index along East Asia jet stream (solid line)

北大西洋—北欧地区位势高度的反向变化,可见NAO变化在对流层具有相当正压结构,表明NAO变化一直影响到对流层高层,并可能通过对流层高层格陵兰和北大西洋—北欧上空系统的变化来影响西亚急流的变化,以后将进一步分析其影响途径。

上述分析表明东亚急流扰动与南半球系统也有联系,因此初步分析南极涛动(AAO)与其关系。AAO指数是由华盛顿大学 David Thompson 博士提供,是对 20°S 以南的 NCEP/ NCAR 再分析月平均海平面气压(SLP)资料进行 EOF 分解得到的第一特征向量的时间系数。图 8 为夏季 AAO 指数与东亚急流扰动指数年际变化,两者线性相关系数为 0.475,通过 0.001 显著性检验,表明两者之间关系显著,AAO 强则东亚急流扰动强,反之则相反。AAO 是地面气压系统的变化,夏季表现为 60°S 和 30°S 左右海平面气压相反变化,研究表明^[28] AAO 具有相当正压结构,其影响在对流层均有所表现,通过何途径影响东亚急流的变化将在以后研究中进行分析。

以上表明影响夏季西亚急流和东亚急流扰动变化的环流因子有很大不同,因此导致不同的变化特征,本文仅揭示了一些现象和关系,影响的途径如何将在以后的研究中给出。

5 夏季沿亚洲急流 Rossby 波活动的年际和年代际变化

图 9 为入口和出口区扰动动能 E_k 标准化序列,均具有明显的年际和年代际变化。入口区 E_k 平均为 $44.6 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$,标准差为 $18.3 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$,46 年来没有明显的线性变化趋势。小波分析表明具有 10 年左右的显著周期,同时 1980 年以前还具有 3 年左右的周期。1962~1968 和 1986~1999 年为 E_k 偏弱年代,1969~1985 年为 E_k 偏强年代。

出口区 E_k 为 $21.5 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$,比入口区小的多,标准差为 $10.2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ 。同时, E_k 40 多年有显著的增强趋势,通过 0.02 的信度检验,具有 2~3 年和 15~20 年的显著周期。1962~1978 和 1993~1999 年为 E_k 偏弱年代,1979~1994 年为

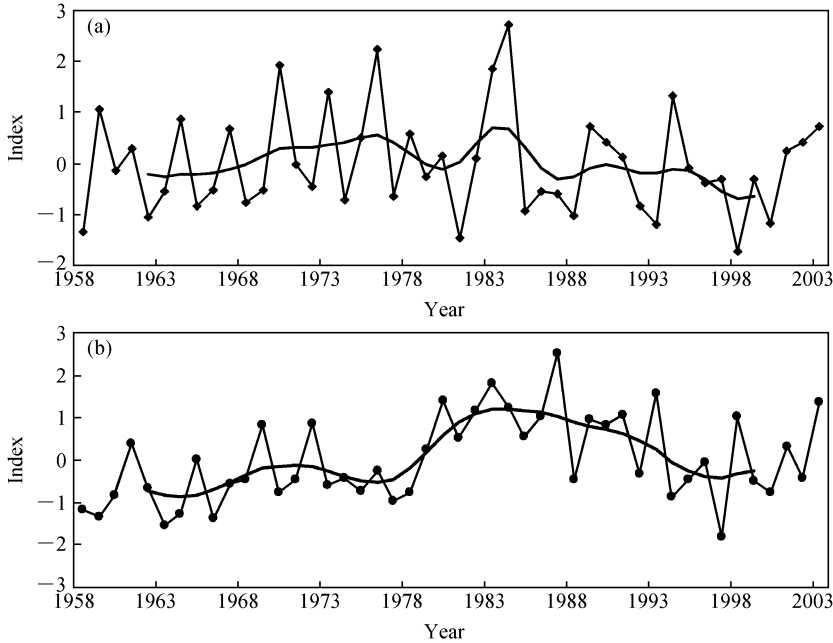


图9 (a) 入口和 (b) 出口区 Rossby 波活动指数标准化序列。实线为 9 点高斯低通滤波

Fig. 9 (a) Entrance and (b) exit Rossby wave activity index standard serial. Solid line is 9-point gauss lowpass filter

偏强年代。

入口和出口区 E_k 的相关系数仅为 0.02, 可见两者之间关系很弱。入口区 E_k 与南亚高压强度 (200 hPa 大于 12 500 gpm 的位势高度之和) 的相关未通过信度检验, 表明入口区 Rossby 波活动与南亚高压强弱关系不密切, 而出口区 E_k 与南亚高压强度和东伸脊点 (200 hPa 12 500 gpm 东伸脊点) 的相关均为 0.58, 通过 0.001 的信度检验, 表明出口区 Rossby 波活动与南亚高压强弱和东伸存在密切关系。

以上分析表明虽然入口强迫产生 Rossby 波活动向东传播, 但入口区扰动异常与出口区扰动异常没有必然联系, 这与各自的影响波列不同有关, 以 100°E 为界急流东西变化有很大差异, 与 100°E 东西两侧自然天气区分布不一致对应。

6 夏季亚洲西风急流扰动异常对气候的影响

图 10 为西亚和东亚 E_k 指数与中国 160 个气象站夏季降水的相关分布, 由图 10a 可见, 西亚 E_k 与新疆大部地区降水呈显著反相关, 以南疆西部相关最高, 与北疆北部为显著正相关, 与西北其

他区域降水关系较弱, 表明西亚急流影响范围仅局限于新疆地区。新疆夏季降水量第一模态时间序列 (占总方差的 22.5%, 空间分布为全疆降水变化的一致性) 与西亚 E_k 指数之间相关系数为 -0.38, 通过 0.01 显著性检验, 表明它们为显著反相关关系, 与图 10a 结果一致, 这种关系具有统计学意义。Rossby 波活动强弱年合成的新疆降水距平百分率 (图略) 显示, Rossby 波活动强年, 新疆除北疆北部外夏季降水明显偏少, 尤其南疆地区偏少可达 80%, 而 Rossby 波活动弱年则相反, 新疆降水偏多可达 80%, 强弱年之间中国其他区域降水差别不明显, 表明新疆恰好位于西亚急流的出口区, 因此受其影响显著。

由图 10b 可知, 东亚 E_k 与长江流域及西北东部、东北北部都出现显著正相关区; 华南、华北、河套及内蒙中东部为显著的负相关区。正、负相关系数的分布表明, E_k 偏强, 夏季中国降水呈中间多; 南北少, 即雨带位于江淮流域; E_k 偏弱夏季中国降水呈南北多, 中间少, 即雨带位于华南、华北。 E_k 偏强年中国夏季降水距平百分率的分布 (图略) 表明, 江淮流域、西北东部和东北北部降水偏多 20%~40%, 而河套地区、华北和华南降水偏少 20%~30%, E_k 偏弱年降水分布则相反。

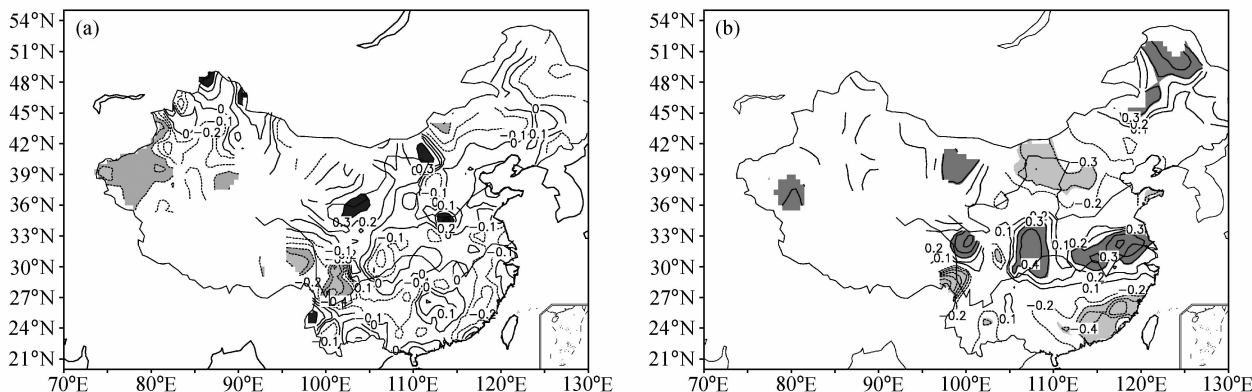


图 10 夏季 (a) 西亚急流和 (b) 东亚西风急流扰动指数与中国 160 站夏季降水相关分布。阴影区为超过 0.05 信度检验

Fig. 10 Linear correlation between (a) E_k along west Asian westerly jet and (b) E_k along East Asian westerly jet and the 160 stations summer rainfall of China. Shadings indicate statistical significance larger than 0.05

关于东亚 E_k 和急流位置综合配置与东亚夏季逐年降水雨型关系另文给出。

常的波源和能量传播，在以后的研究中给出。

参考文献 (References)

7 小结

沿亚洲西风急流存在多种遥相关波列，西亚急流 Rossby 波活动变化主要受斯堪的纳维亚半岛—亚洲西风急流区—北太平洋地区的波状遥相关波列活动和西亚急流及其南北侧风速强弱的影响，西亚急流 Rossby 波活动偏强对应西亚急流位置偏北、强度偏强，反之相反；此外，西亚急流 Rossby 波活动与南亚高压的强度和南北位置无明显联系，而与 NAO 呈显著正相关关系。东亚急流 Rossby 波活动变化主要受北非—中低纬欧亚大陆—北太平洋的西南—东北向遥相关波列和东亚急流及其南北侧风速强弱影响，与南亚高压强度和东伸范围、AAO 有显著正相关，可见，亚洲西风急流这样一个行星尺度的系统虽然为一波导，其入口和出口区扰动受不同波列的影响，年际和年代际变化明显不同，由此导致中西亚和东亚地区气候截然不同，西亚急流 Rossby 波活动与新疆降水呈显著反相关关系，东亚急流 Rossby 波活动与华南—江淮流域—华北—内蒙古东部和东北中北部降水呈“—+—+”相关，扰动偏强（弱）则东亚夏季降水为中间多（少），南北少（多）分布型。

关于东亚急流和西亚急流 Rossby 波活动异常影响的大气环流和气候变化以及 Rossby 波活动异

- [1] Hsieh Y P. On the wind and temperature fields over western Pacific and eastern Asia in winter. *J. Geophys. Res.*, 1951, **2**: 279~297
- [2] Ramage C S. Relationship of general circulation to normal weather over southern Asia and the western Pacific during the cool season. *J. Meteor.*, 1952, **9**: 403~408
- [3] Mohri K. Jet streams and upper fronts in the general circulation and their characteristics over the Far East (Part II). *Geophys. Mag.*, 1959, **29**: 333~412
- [4] Reiter E R. *Jet-Stream Meteorology*. Chicago: University of Chicago Press, 1963. 515 pp
- [5] Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. An observation study of the Northern Hemisphere wintertime circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1040~1053
- [6] Cressman G P. Energy transformations in the East Asia - West Pacific jet stream. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 563~574
- [7] Kang I S. Influence of zonal mean flow change on stationary wave fluctuations. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 141~147
- [8] Kung E C, Chan P H. Energetics characteristics of the Asian winter monsoon in the source region. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 854~870
- [9] Dole R M, Black R X. Life cycles of persistent anomalies. Part I: The development of persistent negative height anomalies over the North Pacific Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 824~846
- [10] Gao S, Tao S. Acceleration of upper-tropospheric jet stream and lower-tropospheric frontogenesis. *Chinese. J. Atmos.*, 1991, **15**: 11~21

- [11] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, **29** (4): 249~263
Ye Duzheng, Tao Shiyen, Li Maicun. The abrupt changes of the atmospheric circulation in June and October. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29** (4): 249~263
- [12] 陶诗言, 赵煜佳, 陈小敏. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系. 气象学报, 1958, **29** (2): 119~134
Tao Shiyen, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. Meiyu in East Asia and the seasonal variation of the atmospheric circulation upon Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29** (2): 119~134
- [13] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research of the east summer monsoon in China. In: *Monsoon Meteorology*. Chang C P, Krishnamurti T N, Eds., Cambridge: Oxford University Press, 1987. 60~90
- [14] 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究. 大气科学, 2004, **28** (5): 641~658
Li Chongyin, Wang Jough-Tai, Lin Shi-Zhei, et al. The Relationship between East Asian Summer monsoon activity and Northward jump of the upper westerly jet location. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 641~658
- [15] Lu Riyu. Associations among the components of the East Asian Summer Monsoon System in the meridional direction. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 155~165
- [16] Lin Zhongda, Lu Riyu. Interannual meridional displacement of the East Asian Upper-tropospheric jet stream in summer. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22**: 199~211
- [17] 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响. 地球物理学报, 2004, **47** (1): 10~18
Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. Anomalies of the extratropical westerly jet in the north hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (1): 10~18
- [18] Terao T. Barotropic disturbances on intraseasonal time scales observed in the midlatitudes over the Eurasian continent during the northern summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1998, **76**: 419~436
- [19] Terao T. The zonal wavelength of the quasi-stationary Rossby waves trapped in the westerly jet. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1999, **77**: 687~699
- [20] Hoskins B J, Ambrizzi T. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 1661~1671
- [21] Takeshi Enomoto, Hoskins B J, Yoshihisa Matsuda. The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2003, **587**: 157~178
- [22] 廖清海, 陶诗言, 王会军. 东亚地区夏季 7~8 月大气环流季节演变异常的内部动力学过程. 地球物理学报, 2006, **49** (1): 28~36
Lao Qinghai, Tao Shiyen, Wang Huijun. Internal dynamics related to anomalies of seasonal evolution of summer circulations in East Asia during July-August. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, **49** (1): 28~36
- [23] Naoki Sato, Masaaki Takahashi. Dynamical processes related to the appearance of quasi-stationary waves on the subtropical jet in the midsummer northern hemisphere. *J. Climate*, 2006, **19**: 1531~1544
- [24] 吴伟杰, 何金海, Hyo-Sang CHUNG, 等. 夏季东亚高空急流与天气尺度波动的气候特征之间的联系. 气候与环境研究, 2006, **11** (4): 525~534
Wu Weijie, He Jinhai, Chung Hyo-Sang, et al. The Relationship between the East Asian Up-tropospheric jet stream in Summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (4): 525~534
- [25] 董敏, 余健锐, 高守亭. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究. 大气科学, 1999, **23** (1): 62~70
Dong Min, Yu Jianrui, Gao Shouting. A study of the variation of East Asian westerly jet and its relation with the tropical convection heating. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (1): 62~70
- [26] Takaya Koutarou, Nakamura Hisashi. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 2985~2988
- [27] Sardeshmukh P D, Hoskins B J. Vorticity balances in the tropics during the 1982-83 El Nino-Southern Oscillation event. *Quart. J. Meteor. Soc.*, 1985, **111**: 261~278
- [28] 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 北极涛动和南极涛动的年变化特征. 大气科学, 2003, **27** (3): 419~424
Fan Lijun, Li Jianping, Wei Zhigang, et al. Annual variations of the Arctic Oscillation and the Antarctic Oscillation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 419~424