

夏季沿西亚急流 Rossby 波活动异常的波源和能量传播及转换特征^{* 1}

杨莲梅¹ 张庆云²

YANG Lianmei¹ ZHANG Qingyun²

1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐, 830002

2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

1. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China*

2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2007-07-12 收稿, 2008-01-11 改回.

Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Wave sources, energy propagation and conversion for anomalous Rossby wave activities along West Asian jet stream. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4):555–565

Abstract Characteristics of the wave sources, energy propagation and conversion for anomalous Rossby wave activities(RWA) along West Asian jet stream (WAJS) in summer are examined based on the NCEP/NCAR reanalysis dataset from 1958 to 2003 by using vorticity source equation, Eliassen-Palm (EP) flux, and wave energy equation with diabatic heating. As a result, the causes of RWA anomalies along WAJS are further comprehended from the atmospheric dynamic mechanism to improve understanding of mid-high latitude circulation anomalies. The results show that the negative vorticity source and the strong EP flux divergence over the Mediterranean Sea and the North Atlantic-Scandinavian Peninsula area act as the wave sources of RWA anomalies along WAJS. When the intensity and position of the wave sources are anomalous, the excited eastward-propagation RWA along WAJS also behaviors anomalously. In strong (weak) years of RWA along WAJS, Rossby waves excited by the strong divergence of EP fluxes over the Iceland-Scandinavian Peninsula area (east to Scandinavian Peninsula) propagate eastward and southeastward. The eastward propagating waves strengthen (weaken) after turning southeastwards near the Ural Mountain and then entering into the Asian subtropical westerly jet stream (ASWJS) over the Caspian Sea-Aral Sea-Xinjiang, and the southeastward propagating waves strengthen (weaken) after directly entering into the ASWJS over the eastern Mediterranean-the Black Sea. Furthermore, the divergence of EP flux over the Mediterranean also strengthens (weakens) in the strong (weak) years, so they jointly bring about strong (weak) RWA along WAJS. Besides the perturbation available potential energy (PAPE) along WAJS (15°–60°E) produced by diabatic heating is far greater than the conversion from the kinetic energy of basic flow into perturbation kinetic energy and from the available potential energy of basic flow into PAPE. The RWA along WAJS looks stronger (weaker) than normal, when the PAPEs produced by diabatic heating over the Iran Plateau and west Asia obviously strengthen (weaken), therefore they are also the energy sources of RWA anomalies.

Key words West Asia subtropical westerly jet stream, Quasi-stationary wave propagation, Energy conversion, Diabatic heating

摘 要 用 1958—2003 年 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用涡度源方程、Eliassen-Palm 通量(EP 通量)和非绝热效应的波能方程, 分析了夏季沿西亚急流 Rossby 波活动(WAJRA)异常的波源、能量传播和转换特征, 从大气动力学内部机制上进一步认识 WAJRA 异常的成因, 提高对中高纬大气环流异常机理的理解。研究表明, 对流层高层位于地中海和北大西洋—斯堪的那维亚半岛的负涡度源区和 EP 通量强辐散区为夏季 WAJRA 异常的波源区。当波源区位置和强度出现异常时, 波源所激发东传的 Rossby 波活动也出现异常, 从而导致 WAJRA 强弱变化。WAJRA 强(弱)年冰岛—斯堪的那维亚半岛(斯堪的那维亚半

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金项目(40775056)和科技部社会公益研究专项(2005DIB6J113)。

作者简介: 杨莲梅, 主要从事长期天气过程和短期气候诊断与预测研究。E-mail: yanglm@idm.cn

岛以东)EP 通量强辐散区激发 Rossby 波并沿 2 条路径向东传播,一支向东传播在乌拉尔山附近转向东南并在里海、咸海—新疆上空进入亚洲副热带西风急流传播增强(减弱),另一支直接向东南方向传播在地中海东部—黑海附近进入亚洲西风急流增强(减弱),此外,地中海上空 EP 通量辐散也增强(减弱),它们共同作用使得 WAJRA 增强(减弱)。沿西亚地区副热带西风急流(简称西亚急流,指亚洲副热带西风急流的 15° — 60° E 部分)非绝热加热产生扰动有效位能远大于基本气流动能向扰动动能的转换和基本气流有效位能向扰动有效位能的转换。西亚急流 Rossby 波活动强年(弱年)伊朗高原及其北侧的西亚地区非绝热加热产生的有效位能增强(减弱)显著,是 WAJRA 增强(减弱)的能量源。

关键词 西亚副热带西风急流,准静止波传播,能量转换,非绝热加热

中图法分类号 P403

1 引言

夏季亚洲副热带西风急流是位于对流层高层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。急流是波流相互作用的一个重要载体,Ambrizzi 等(1995)认为亚洲西风急流是北半球夏季的一个波导,Terao(1998,1999a,1999b)指出沿亚洲急流 Rossby 波活动控制北半球夏季中纬度地区季节变化的模态。陶诗言等(2006)指出梅雨锋、西太平洋副热带高压以及青藏高原的活动都与沿亚洲西风急流 Rossby 波有关,欧亚上空沿副热带急流 Rossby 波是东亚夏季风系统中非常重要的成员,其年际变异与东亚夏季气候年际变化有很大关系。陆日宇等(2002)研究了 7 月沿亚洲急流静止 Rossby 波的年际变化,指出亚洲西风急流可能是联系东亚季风和印度季风的机制,并且急流上 Rossby 波活动和 ENSO 是两个相互独立的影响东亚气候的因子。Enomoto 等(2003,2004)研究认为,亚洲急流上 Rossby 波异常传播是 8 月日本上空对流层相当正压结构 Bonin 高压的形成机制,造成日本持续高温干旱气候异常。Ding 等(2005)认为夏季北半球沿西风急流存在环半球波列是中纬地区气候变化的一个重要影响源,而 Tokyo-Chicago 快车、印度季风—东亚季风遥相关、西亚—中亚—日本波列均是环半球波列的局地表现,可见,夏季沿亚洲西风急流 Rossby 波活动是非常重要的。

1939 年 Rossby 首先从理论上研究了大气长波(Rossby 波)的性质,指出大气长波是由于地转参数随纬度变化(即 β 效应)造成的,与大尺度天气过程密切相关。随后,气象学家对 Rossby 波进行了广泛而深入的研究,使得 Rossby 波理论逐渐充实丰富起来。Yeh(1949)首先提出了 Rossby 波频散理论,很好地解释了大气环流演变中所谓的“上游效应”。Hoskins 和 Karoly(简称 HK)(1981)研究

了球面大气对热力强迫和地形强迫的响应,他们利用缓变波列理论讨论了球面上定常 Rossby 波的能量频散问题,提出定常 Rossby 波能量频散的大圆理论。徐祥德等(1999)将 Hoskins 和 Karoly 的大圆理论应用到具有实际西风廓线和地形强迫的数学模型中,得到变形“大圆路径”波射线,并通过数值模拟试验证实低频 Rossby 波变形波射线可以表现为正弦波列路径。冉令坤等(2005)用波射线理论研究了辐散风作用下低频 Rossby 波能量的传播特征,通过在正压涡度方程中考虑水平扰动散度和辐散风的作用,间接地讨论了非绝热加热对低频 Rossby 波的影响。段安民等(2005)在传统的波与流相互作用理论的基础上,推导了准地转框架下包含非绝热效应的 E-P 通量,证明了 Eliassen 和 Plam 导得的波动能量关系与由 Lorenz 导得的大气能量循环关系的一致性,大尺度定常波的波动能量传播过程实质上是大气能量循环过程的一部分。

夏季亚洲副热带西风急流位于 40° N 附近,以往对亚洲急流的研究多针对东亚急流(100° — 150° E 急流)的活动,如况雪源等(2006)、任雪娟等(2007)对东亚急流的季节变化和影响机制进行了探讨。而新疆也处于夏季副热带西风急流的控制下,位于新疆上游的西亚急流南北位置和其上 Rossby 波活动与新疆夏季气候异常密切联系(张家宝等,1986;杨莲梅等,2007,2008),西亚急流偏北(南)、其上 Rossby 波活动偏强(弱)则新疆降水偏少(偏多),但目前对西亚急流南北位置的变化和其上 Rossby 波活动的动力学机制不很清楚,使得我们对新疆夏季气候异常机理的认识受到限制。本文目的是研究西亚急流 Rossby 扰动异常时波源异常和 Rossby 波动能量传播特征,进一步考虑非绝热作用讨论西亚急流 Rossby 扰动异常时的能量转换特征,更深入地了解其内部大气动力学过程。

2 资料和方法

本文所用资料为美国国家环境预测中心和大气研究中心 NCEP/NCAR 提供的 1958—2003 年月平均再分析资料($2.5^\circ \times 2.5^\circ$), 空间层次为 1000—30 hPa, 共 15 层。文中气候平均为 1971—2000 年平均, 夏季为 6—8 月平均。

北半球夏季 200 hPa 沿 40°N 附近为西风急流带, 由亚洲急流($0^\circ\text{—}210^\circ\text{E}$)和北美急流组成, 亚洲急流这样一个行星尺度的系统其西部和东部变化存在显著差异(杨莲梅, 2007), 可以分为西亚急流($15^\circ\text{—}60^\circ\text{E}$)和东亚急流($100^\circ\text{—}140^\circ\text{E}$), 诸多研究中东亚急流范围不尽相同(廖青海等, 2004; 李崇银等, 2004; 陶诗言等, 2006), 但都取 100°E 以东为东亚急流, 且东亚急流变化与东亚地区环流系统和天气、气候密切联系, 而西亚急流位于新疆上游, 其活动与新疆天气、气候密切联系, 为更深入地认识西亚—中亚地区大气环流异常的大气动力学过程, 本文讨论西亚急流 Rossby 波活动异常的波源、波动

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

夏季沿亚洲副热带西风急流准静止 Rossby 波数为 3—7 波(杨莲梅, 2007), 参考 Enomoto 等(2003)研究, 我们滤去波数较显著的低频波影响。对 200 hPa 流函数进行傅里叶谐波分析, 滤去波数小于 3 的基本气流影响, 因此, 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。这里, 我们讨论未滤波情况下静止定常波活动和滤波情况下尺度较小的静止波的能量传播特征和异同。

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 风速进行傅里叶变换, 波数 $K < 3$ 为基本场(u_{basic} , v_{basic}), 则扰动风速(u' , v') = (u , v) - (u_{basic} , v_{basic}), 扰动动能(E_k) = ($u' \cdot u' + v' \cdot v'$)/2。急流风速最大值的纬度作为急流轴, 西亚急流的 Rossby 波扰动动能取 $15^\circ\text{—}60^\circ\text{E}$ 急流轴 $\pm 5^\circ\text{N}$

能量传播和转换特征。

根据 Sardeshmukh 等(1988)的研究, 对流层上层定常辐散场所产生的涡度源可以表示为

$$S' = -\bar{\mathbf{V}}_x \cdot \nabla \xi - \mathbf{V}'_x \cdot \nabla (\bar{\xi} + f) - (\bar{\xi} + f)D' - \xi'\bar{D} \quad (1)$$

其中 $\bar{\mathbf{V}}_x$ 和 $\mathbf{V}'_x$ 分别为夏季气候平均和异常的辐散风, $\bar{\xi}$ 和 ξ' 分别为夏季气候平均和异常的相对涡度, $\bar{D}$ 和 D' 分别为夏季气候平均和异常的散度。这里我们只讨论定常辐散场对定常波的强迫作用。由于大气中的大尺度辐散风场主要与非绝热加热不均及大地形有关, 所以 S' 基本上代表了定常的外部强迫源对大气定常行星波的强迫。因而分析 S' 的分布可以了解大气定常行星波产生的源地和机制。

Takaya 等(1997)根据 Plumb(1985)等前人的工作给出了沿变化基本气流的 Eliassen-Palm 通量(EP 通量)公式, 表述为式(2), EP 通量是波动能量传播的一种度量, 其水平分量(水平波活动通量)表示静止波波动能量的水平传播方向和强弱, 本文用其讨论静止波波动能量的水平传播特征。

的区域平均扰动动能作为度量, 并对其进行标准化作为西亚急流 Rossby 波扰动动能指数(WAJRI), 该指数较好地反应了西亚急流强度、位置和 Rossby 波扰动综合活动(杨莲梅, 2007)。本文用 WAJRI 标准化序列指数大于 1 (小于 -1) 表示西亚急流 Rossby 波扰动正(负)异常, 正异常年有 1964、1970、1973、1976、1983、1984、1989 和 1994 年, 负异常年有 1974、1981、1985、1988、1993 和 1998 年, 以下合成分析均为这些异常年。

采用段安民等(2005)推导的考虑非绝热效应的波能方程, 研究波动能量转换特征, 表达式为

$$\begin{cases} S_A = -\bar{u}_y u' v' \\ S_B = -\frac{Rf\bar{u}_p}{P\sigma} v' T' \\ S_C = -\frac{R}{P\sigma} Q' \varphi'_p = \frac{R^2}{\sigma P^2} Q' T' \end{cases} \quad (3)$$

$S_A > 0$ 代表基本气流的动能向扰动动能的转换。 $S_B > 0$ 表示基本气流有效位能向扰动有效位能的转

换。 $S_c > 0$ 表示非绝热加热产生的扰动有效位能。

3 沿西亚急流 Rossby 波扰动异常的涡度源和 Rossby 波能量传播特征

从西亚急流 Rossby 扰动强年 200 hPa 定常辐射场强迫出的涡度源 S' (图 1a)、水平波活动通量矢量和散度(图 1b)和滤去小于 3 波数情况下水平波活动通量矢量和散度(图 1c)可见,夏季 200 hPa 正涡度源主要在地中海东部—黑海、北大西洋—中欧和北欧地区和巴尔喀什湖以南,强负涡度源位于冰岛及以南的大西洋、地中海西部及黑海—咸海。辐散风异常(图略)表明,辐散风异常辐合对应正涡度源,辐散异常则对应负涡度源,根据式(1)辐散风异常就形成了图 1a 的涡度源异常。地中海东部—黑海为 EP 通量强辐散区, Rossby 波在此激发沿急流向东传播,向东传播水平波活动通量逐渐减弱(图 1b),其距平(图略)表明地中海东部—黑海的波动通量辐散增强,其下游沿西亚急流 EP 通量辐合、辐散也增强,同时,斯堪的纳维亚半岛波动通量辐散也增强,向东南向进入亚洲急流入口区波传播的增强。滤去

小于 3 波的情况下(图 1c),北大西洋—斯堪的纳维亚半岛为 EP 通量强辐散区,辐散中心位于 57.5°N , 15°E ,静止波从负涡度源区传播出来,水平波向东和东南传播,向东传播波在乌拉尔山附近部分转向东南传播在里海、咸海上空进入西风急流继续向东传播,直接向东南传播波在地中海东部—黑海进入亚洲西风急流。水平波活动通量矢量和散度距平(图略)表明北大西洋—斯堪的纳维亚半岛、地中海东部—黑海和里海、咸海 EP 通量辐散增强,北大西洋—斯堪的纳维亚半岛向东南和向东在乌拉尔以西转向东南进入西风急流波传播增强,沿西亚急流自西向东波传播增强,表明西亚急流 Rossby 波扰动增强与北大西洋—斯堪的纳维亚半岛向东传播波活动联系。上述分析表明,沿亚洲急流波流相互作用中小于 3 波的分量很大,波源位于地中海上空,滤去小于 3 波情况下,可以更清晰看出波数更大的静止波的另一波源位于北大西洋—斯堪的纳维亚半岛。西亚急流扰动增强除了与急流入口处辐散增强联系外,还与北大西洋—斯堪的纳维亚半岛向东和东南传播进入急流的波动通量传播增强密切联系。

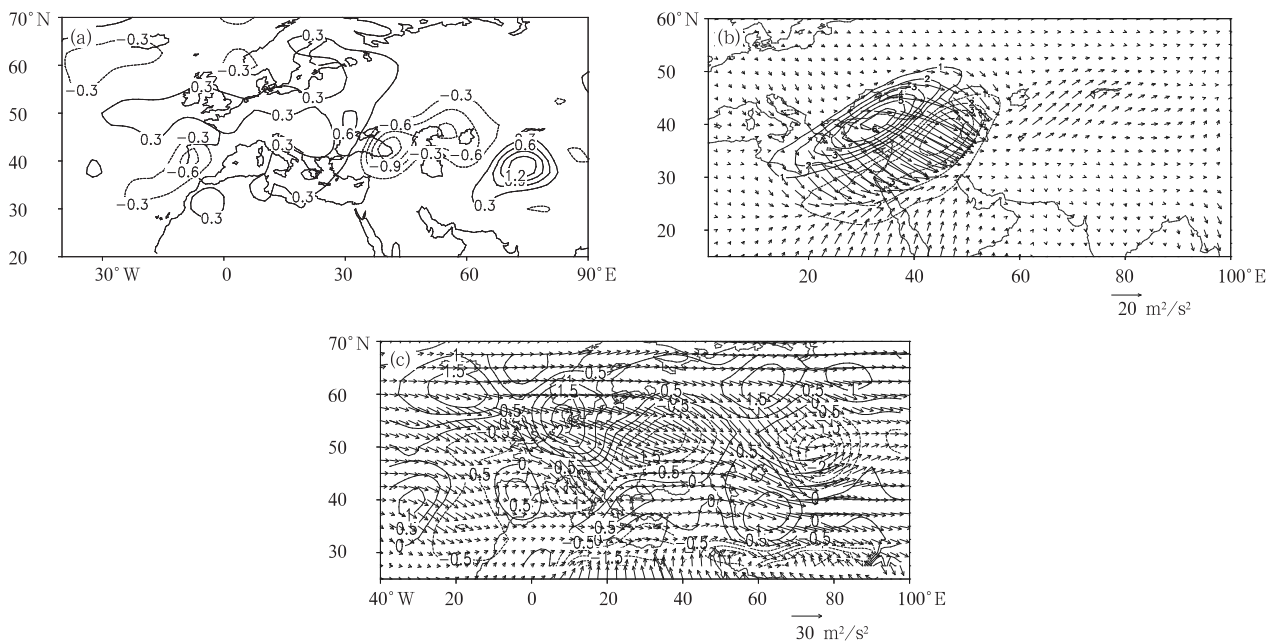


图 1 西亚急流 Rossby 波扰动强年 200 hPa 涡度源(a. 单位: 10^{-11} s^{-2})、水平波活动通量(m^2/s^2)和散度(10^{-5} m/s^2)(b)、滤去小于 3 波数情况下水平波活动通量 (m^2/s^2)和散度(10^{-5} m/s^2)(c)
(箭头表示波活动通量矢量,等值线表示散度)

Fig. 1 (a) Vorticity source (10^{-11} s^{-2}), (b) horizontal wave activity flux (m^2/s^2) and its divergence (10^{-5} m/s^2), (c) horizontal wave activity flux (m^2/s^2) and its divergence (10^{-5} m/s^2) after filtering the waves of less than 3 wave-number at 200 hPa in summer for strong years of the Rossby wave activities along West Asian Jet Stream
(Vectors represent wave activity fluxes and contours represent divergences)

由西亚急流 Rossby 波活动弱年 200 hPa 涡度源(图 2a)、不均匀基本气流水平波活动通量矢量和散度(图 2b)和不均匀基本气流且滤去小于 3 波情况下水平波活动通量矢量和散度(图 2c)可见, Rossby 扰动弱年涡度源分布与强年基本相反, 冰岛及以南大西洋、副热带大西洋—地中海和黑海—咸海为正涡度源区, 而北大西洋—斯堪的那维亚半岛—中欧和北欧为负涡度源区, 辐散风辐合异常对应正涡度源(图略), 辐散风辐散异常对应负涡度源, 辐散风异常造成涡度源异常(图 2a)。地中海—黑海为 EP 通量强辐散区, 激发 Rossby 沿急流东传(图 2b), 距平分布(图略)表明地中海—黑海 EP 通量辐散减弱, 由此下游辐合、辐散也减弱, 西亚急流向东传播波减弱, 100°E 以西沿急流波传播减弱, 同时, 高纬斯堪的那维亚半岛 EP 通量辐散和向急流

入口区波传播减弱。滤去小于 3 波情况下, 水平波活动通量自大的斯堪的那维亚半岛负涡度源和 EP 通量强辐散区传播出来, 辐散中心位于 $57.5^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{E}$, 强辐散区明显比强年偏东, 水平波作用量矢量向东南方向地中海传播水平波作用量矢量很弱, 向东在乌拉尔山附近转向东南在里、咸海进入亚洲急流波比较弱, 地中海—黑海附近激发 Rossby 波向东传播(图 2c)。水平波活动通量距平(图略)表明, 北大西洋—斯堪的那维亚半岛 EP 通量辐散减弱, 斯堪的那维亚半岛以东有所增强, 高纬 2 条路径进入亚洲西风急流的波活动通量均比气候平均减弱, 西亚急流自西向东传播波减弱。可见, 西亚急流 Rossby 扰动偏弱除了与急流入口处激发波偏弱联系外, 还与北大西洋—斯堪的那维亚半岛 EP 通量辐散和波传播波进入急流减弱密切联系。

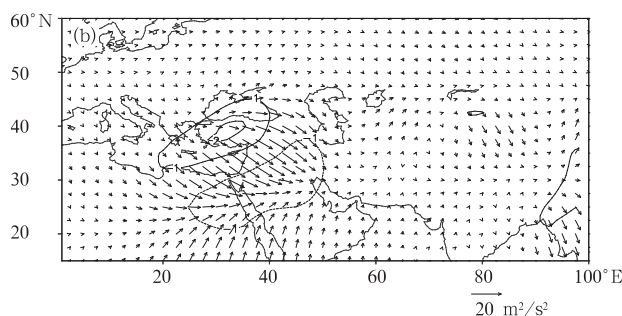
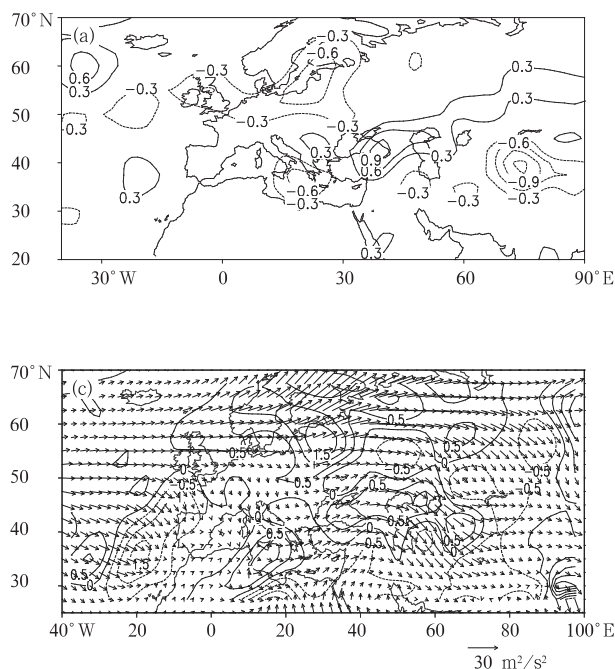


图 2 同图 1, 但为西亚急流 Rossby 波扰动弱年

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for weak years

4 沿西亚急流 Rossby 波扰动异常的能量转换特征

4.1 基本气流动能与扰动动能的转换特征

从夏季气候平均 S_A 沿亚洲西风急流轴南侧 35°N 、急流轴 40°N 和急流轴北侧 45°N 气压-纬向剖面(图 3)可见, 亚洲西风急流附近基本气流的动能与扰动动能之间的转换主要发生在 400 hPa 以上的高度, 最大在 200 hPa 附近。亚洲急流轴南侧入

口区里海以西为很强的波汇区($S_A < 0$), 存在急流入口区扰动动能向基本气流动能的转换, 基本西风急流要增强, 波源位于伊朗高原上空, 另外, 青藏高原西部(80°E)为弱波汇区, 而高原东部(105°E)则为强波源区($S_A > 0$)(图 3a)。夏季沿 35°N 高层大气位于急流轴南侧, $\overline{u_y} > 0$, 因此平均动能向波能转换的区域($S_A > 0$)经向扰动风速 v 和纬向扰动风速 u 负相关, 在大气能量循环过程中对应基本气流动能向扰动动能转换, 反之, 在波能向动能转换的区域

($S_A < 0$) 水平风速的经向扰动分量和纬向扰动分量正相关, 在大气能量循环过程中对应有扰动动能向基本气流动能转换。40°N 波源和波汇分布与 35°N 基本一致(图 3b), 只是 S_A 值比 35°N 小一些。而在急流轴北侧的 45°N 则有很大差别, 在里海上空为

波源区, 可见, 沿亚洲急流轴及其南侧入口区发生扰动动能向基本气流平均动能的转换, 伊朗高原上则为平均动能向扰动动能转换, 急流轴北侧平均动能向扰动动能转换, 伊朗高原和青藏高原东部是重要波源区。

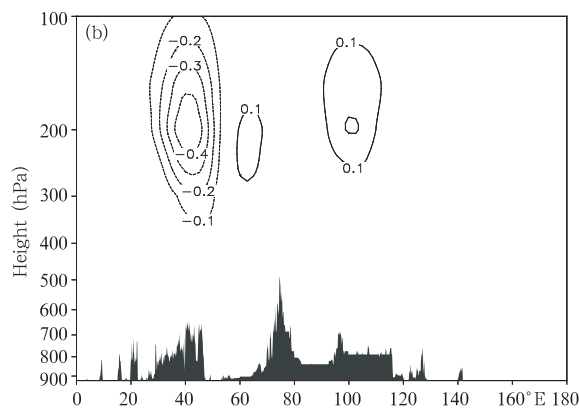
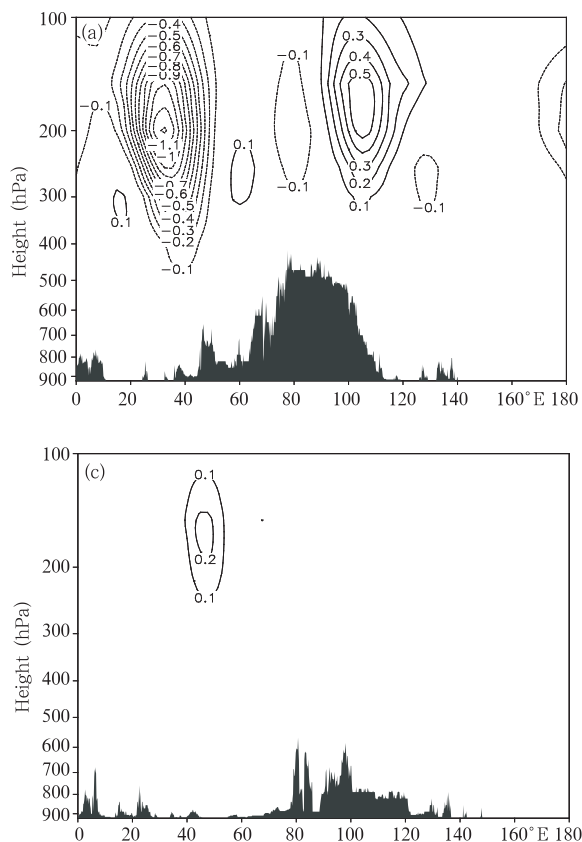


图 3 夏季气候平均沿 35°N(a)、40°N(b)、45°N

(c) S_A 气压-纬向剖面

(单位: $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$, 阴影为地形高度)

Fig. 3 Height-latitude cross sections of climatological

summer S_A ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$) along (a) 35°N,

(b) 40°N and (c) 45°N

(Shading areas indicate topography)

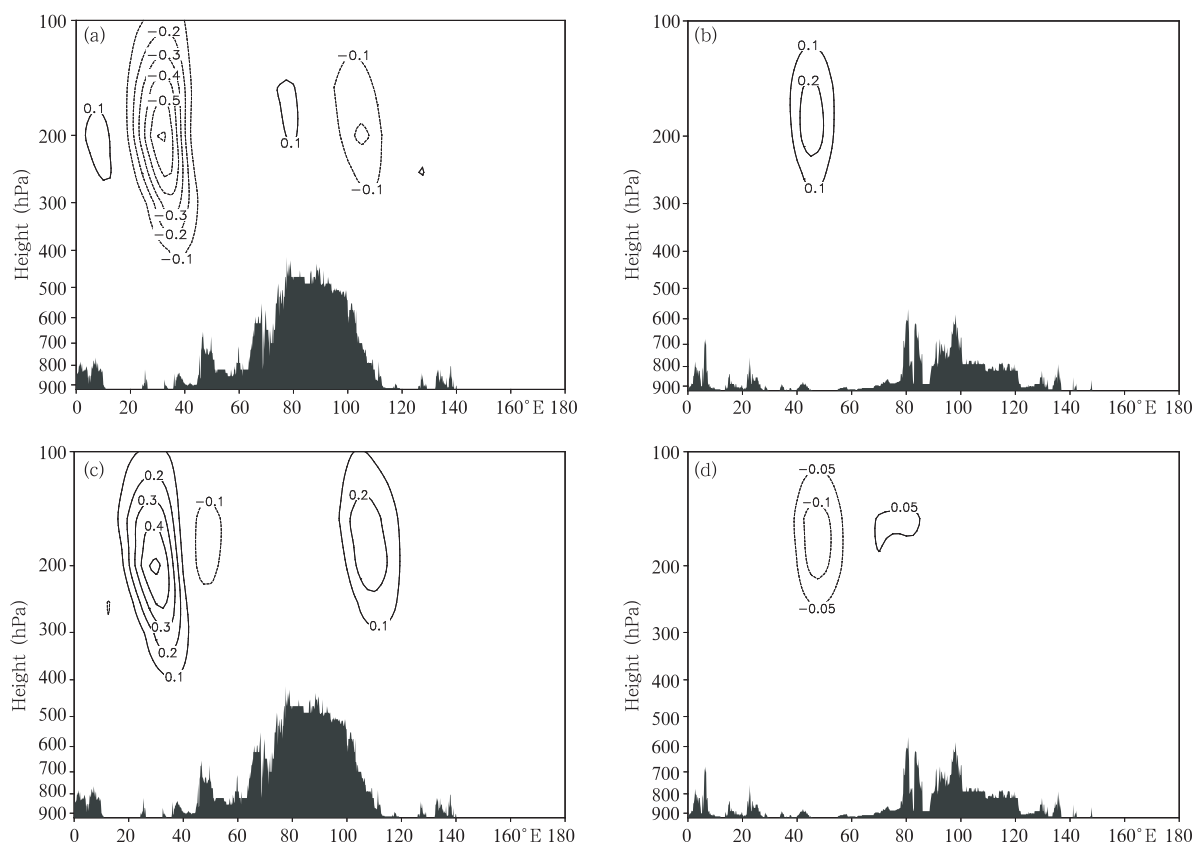
西亚急流扰动强、弱年距平分布(图 4)显示, 扰动强年 35°N 亚洲急流入口区里海以西波汇区($S_A < 0$)为负距平, 表明急流入口区扰动动能向基本气流动能的转换增强, 西风基本急流趋向于增强, 而青藏高原西部波汇区略有减弱, 东部波源区略有减弱, 40°N 情况与 35°N 一致(图略), 而 45°N 里海上空波源增强, 上述表明, 西亚急流扰动强年急流轴及其南侧入口区扰动动能向基本气流动能的转换增强, 而急流轴北侧平均动能向波能转换增强。

扰动弱年与强年恰好相反, 急流轴及其南侧入口区扰动动能向基本气流动能的转换减弱, 而急流轴北侧平均动能向扰动动能转换也减弱, 急流轴北侧基本气流动能向扰动动能转换减弱对 Rossby 扰动减弱有贡献, 南侧基本西风急流减弱, 而对沿急流

Rossby 扰动减弱却无贡献。

4.2 基本气流有效位能与扰动有效位能转换特征

图 5 为夏季气候平均 S_B 沿亚洲急流轴南侧 35°N、急流轴 40°N 和急流轴北侧 45°N 气压-纬向剖面图, 扰动有效位能与基本气流的有效位能转换主要发生在 200 hPa 以下对流层, 最大在 400—300 hPa。沿 35°N 亚洲急流入口区(里海以西)200 hPa 以下为波源区($S_B > 0$), 强波源位于地中海东侧—里海, 存在基本气流的有效位能向扰动有效位能的转换, 而伊朗高原上空却为波汇区($S_B < 0$), 青藏高原西部(80°E)为波源区, 而高原东部(105°E)则为波汇区。沿 40°N 与 35°N S_B 分布在 80°E 以西一致, 但是西亚急流入口区基本气流的有效位能向波能的转换却进一步增强, 表明沿急流轴基本气流的有效

图4 夏季 S_A 距平气压-纬向剖面(西亚急流扰动强年沿 35°N (a)、 45°N (b), 扰动弱年沿 35°N (c)、 45°N (d); 单位: $10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^3$, 阴影为地形高度)Fig. 4 Height-latitude cross sections of summer anomalies ($10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^3$) for strong/weak years of the Rossby wave activities along West Asian Jet Stream along(a/c) 35°N and(b/d) 45°N

(Shading areas indicate topography)

位能向扰动有效位能的转换比其南侧强。沿 45°N 西亚急流入口区仍为波源区, 中亚地区对流层底层却为波汇区, 这是由于该纬带西风基本流随高度增强 ($\overline{u_p} < 0$) 和强烈的表面加热需要冷平流平衡 ($\overline{v'T'} < 0$) 所致。由此可见, 西亚急流及其南北侧在 200 hPa 以下均存在基本气流的有效位能向波能的转换, 为强波源区, 伊朗高原及其北侧中亚地区上空却为波汇区。

图 6 为沿西亚急流 Rossby 波扰动强、弱年 S_B 距平分布, 如图 6a 所示, 沿 35°N 亚洲急流入口区 (60°E 以西) 200 hPa 以下为正距平, 尤其黑海东侧—咸海增强显著, 表明西亚急流南侧基本气流的有效位能向扰动有效位能的转换比气候平均增强, $60^\circ\text{—}100^\circ\text{E}$ 则为 S_B 负距平, 表明伊朗高原上空波

汇增强, 扰动有效位能向基本气流的有效位能转换增强, 而青藏高原西侧上空波源减弱, 高原东侧波汇减弱。沿急流轴 40°N (图略) 与 35°N S_B 距平分布一致, 但波源、波汇比急流南侧增强显著。沿 45°N S_B 距平分布与 35°N 和 40°N 也一致, 但变化程度却比急流轴及其南侧弱, 说明西亚西风急流扰动强年急流及其南北侧基本气流的有效位能向波能的转换有一致的增强, 伊朗高原及其北侧扰动有效位能向基本气流的有效位能转换增强。扰动弱年 S_B 距平分布 (图 6c, d) 与强年基本相反, 西亚急流及其南北侧基本气流的有效位能向波能的转换有一致的减弱, 伊朗高原—青藏高原及其北侧基本气流的有效位能向波能的转换有一致增强。

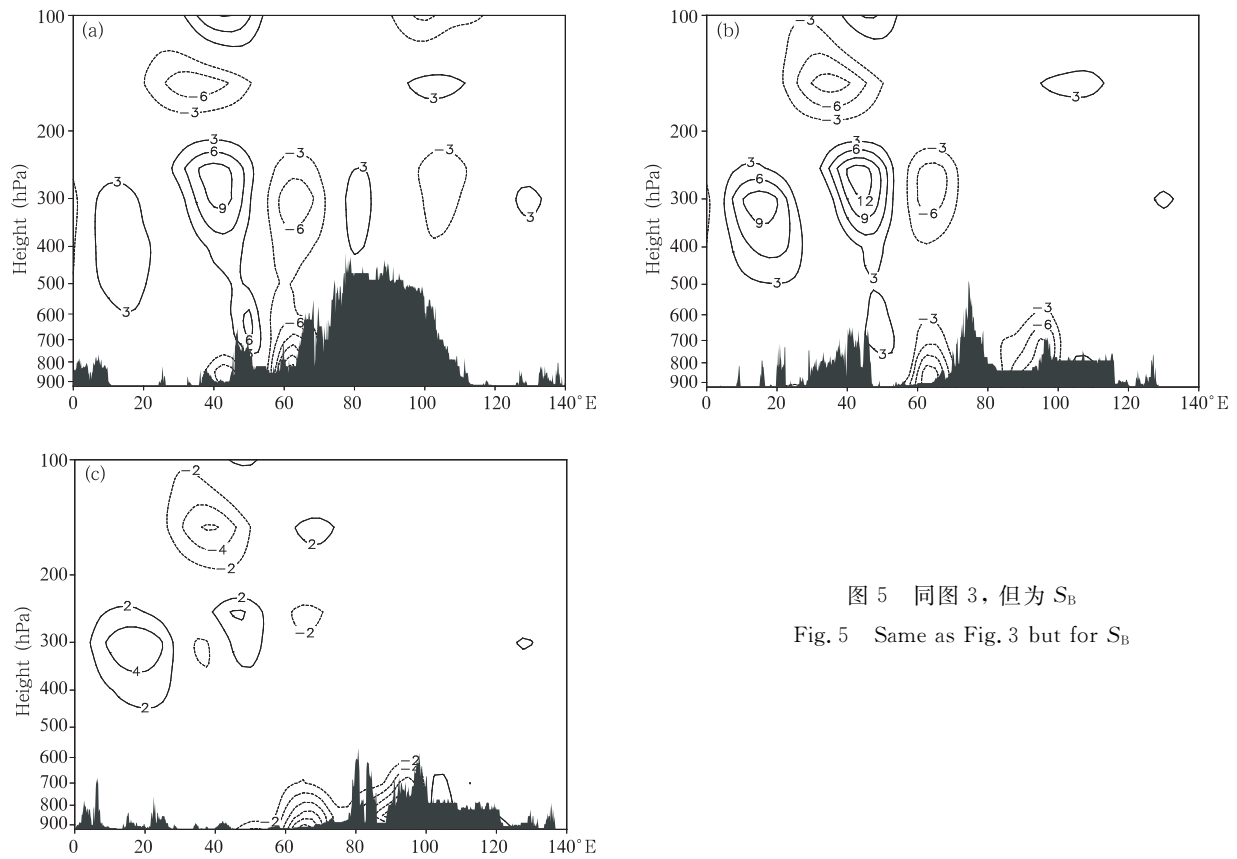


图 5 同图 3, 但为 S_B
Fig. 5 Same as Fig. 3 but for S_B

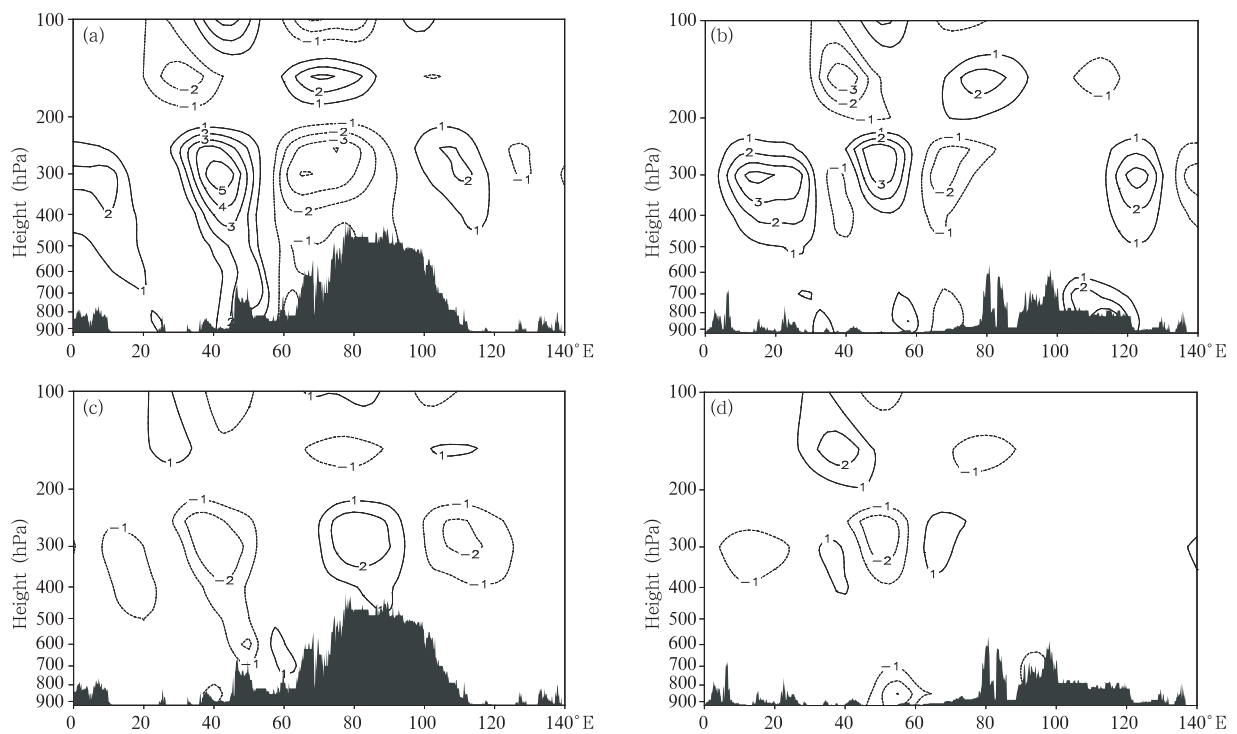


图 6 同图 4, 但为 S_B
Fig. 6 Same as Fig. 4 but for S_B

4.3 非绝热加热产生扰动有效位能特征

图 7 为夏季气候平均 S_c 沿亚洲急流轴南侧 35°N 、急流轴 40°N 和急流轴北侧 45°N 气压-纬向剖面图,沿 35°N (图 7a)整个对流层伊朗高原和青藏高原上空为非绝热加热产生的强扰动有效位能区($S_c > 0$),甚至伊朗高原比青藏高原上空大,表明这两个高原非绝热加热产生波动能量是亚洲西风急流南侧最强的。沿急流轴 40°N (图 7b)伊朗高原和青藏高原北侧上空仍为非绝热加热产生强波动能量区,对流层中高层 S_c 比 35°N 附近减弱一半,同时,地中海

上空非绝热加热产生强波动能量与两大高原相当,两大高原北侧对流层低层 S_c 比中高层强,与这一干旱、半干旱区夏季地表强感热加热有关。上述表明,沿亚洲西风急流轴有 3 个相当的非绝热加热产生强扰动有效位能区:地中海、伊朗高原及其北侧和青藏高原及其北侧。沿急流轴北侧 45°N (图 7c)对流层中高层 S_c 进一步减弱,黑海东侧—咸海为非绝热加热产生弱波动能量区,对流层底层中亚—中国西北地区也出现非绝热加热产生强波动能量区,与干旱、半干旱区夏季地表强感热加热有关。

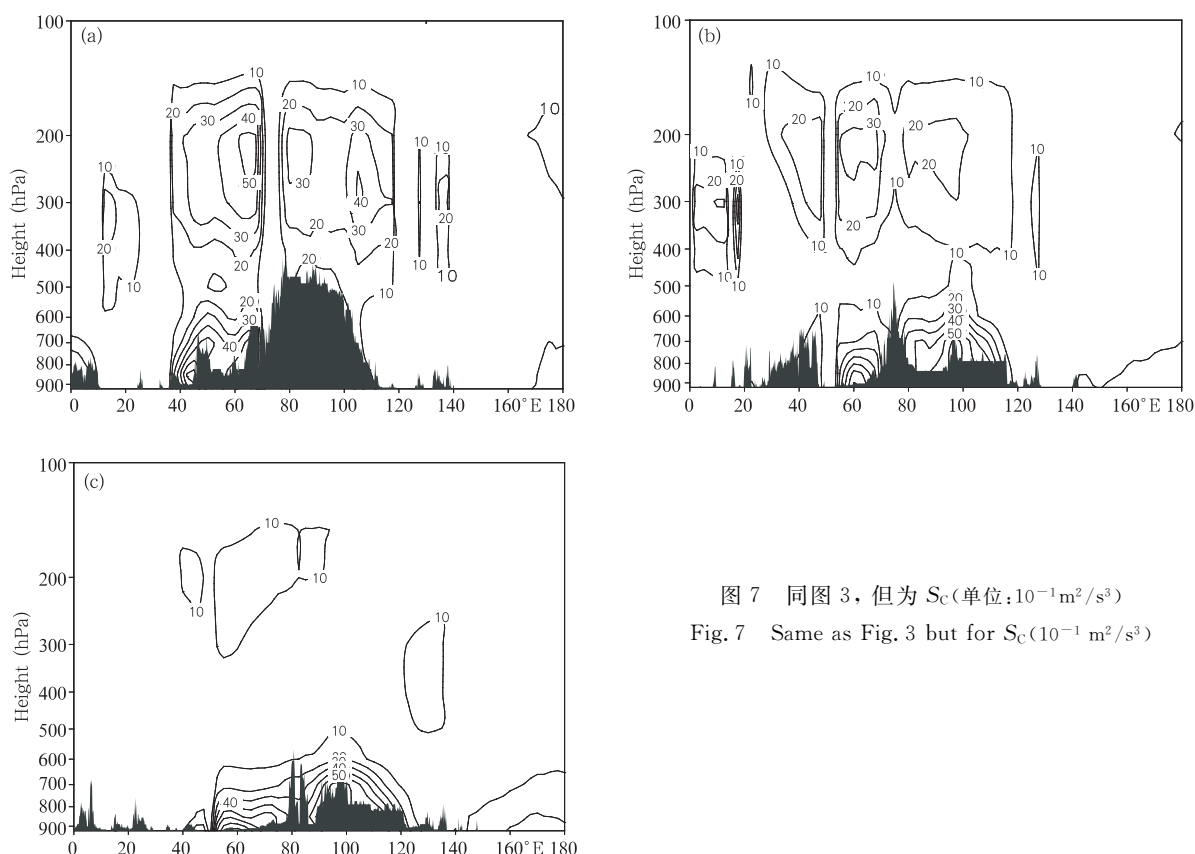
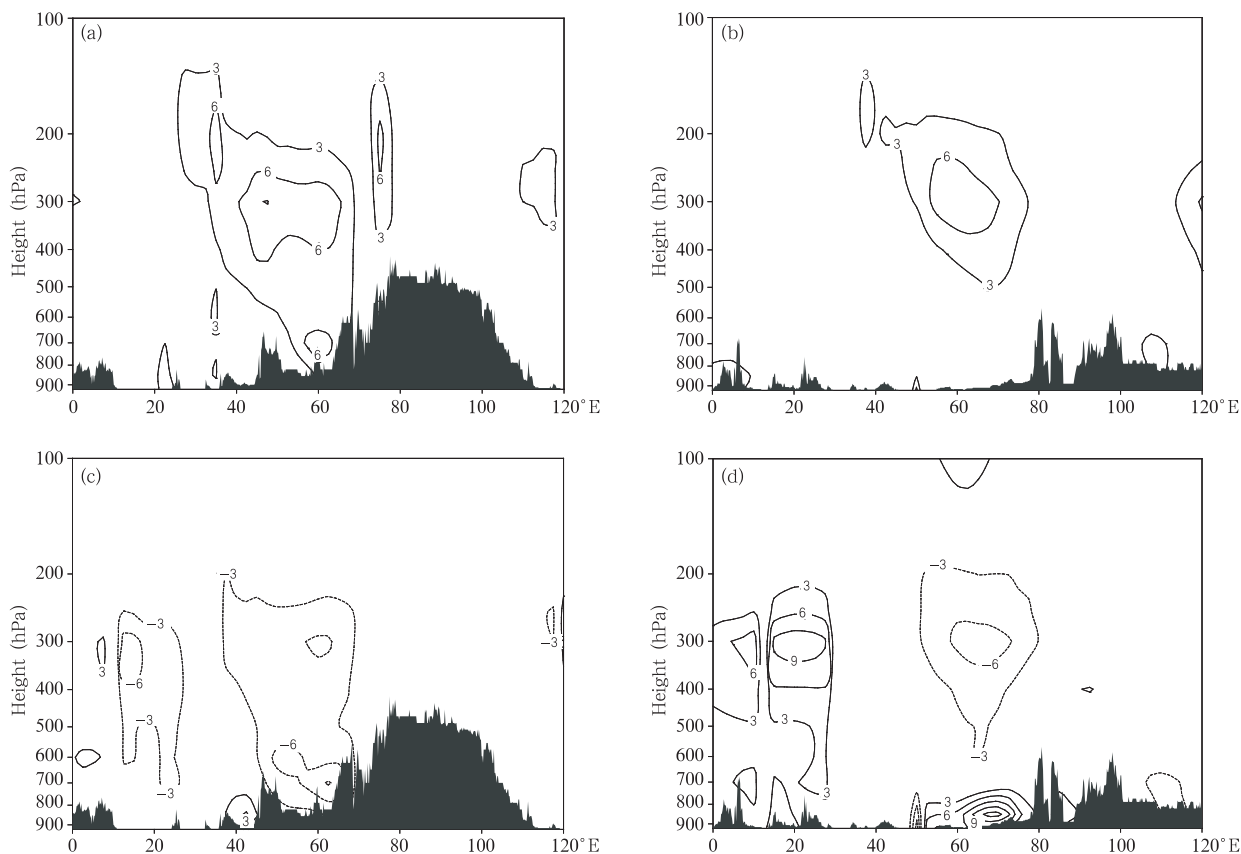


图 7 同图 3, 但为 S_c (单位: $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 7 Same as Fig. 3 but for S_c ($10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$)

图 8 为沿西亚急流 Rossby 波扰动强、弱年 S_c 距平分布,沿 35°N (图 8a),西亚急流和青藏高原西部 S_c 为正距平,表明地中海东部—青藏高原西部上空非绝热加热产生扰动有效位能比气候平均增强,沿 40°N (图略)西风急流轴 S_c 距平分布与 35°N 一致,只是伊朗高原上空正距平更强达 $9 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$,沿西风急流轴北侧 45°N (图 8b)仍然在 $40^\circ\text{—}80^\circ\text{E}$ 的西亚、中亚地区为正距平,表明西亚急

流扰动强年沿急流及其南北侧非绝热加热产生波动能量比气候平均增强,沿急流轴增强最显著。而扰动弱年(图 8c、d),沿急流及其南北侧 S_c 距平分布与强年基本相反,地中海、伊朗高原及其北侧的中亚地区非绝热加热产生波动能量比气候平均减弱。可见,地中海、伊朗高原及其北侧的中亚地区非绝热加热产生扰动有效位能的变化是西亚急流 Rossby 波活动异常的能量源。

图8 同图4,但为 S_C (单位: $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$)Fig. 8 Same as Fig. 4 but for $S_C (10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3)$

S_A 和 S_B 数量级为 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$, S_C 数量级则为 $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$, 西亚西风急流扰动强、弱年总的波动能量 $S_A + S_B + S_C$ (图略) 与 S_C 一致, 表明夏季北半球西亚急流附近非绝热加热激发出的扰动有效位能远远大于基本气流的动能和有效位能向波能的转换, 这从另一个角度验证了 Liu 等(2003)的数值模拟结果, 即夏季副热带地区行星尺度定常波的主要强迫因子是大范围的凝结潜热加热和感热加热。进一步说明非绝热效应是夏季中纬度地区大气波动能量的重要来源。

5 结 论

本文分析了西亚西风急流 Rossby 波活动强、弱年波源、能量传播和转换特征及其差异, 主要结论如下:

(1) 夏季西亚急流 Rossby 波活动强年定常辐射场强迫的波源位于冰岛—斯堪的那维亚半岛和地中海西部, 弱年波源则位于斯堪的那维亚半岛—中

欧和地中海东部—黑海地区。

(2) 沿西亚急流 Rossby 波活动强(弱)年冰岛—斯堪的那维亚半岛(斯堪的那维亚半岛以东) EP 通量强辐散区激发 Rossby 波并向东传播, 存在 2 条水平波活动传播路径, 一支向东传播在乌拉尔山附近转向东南并在里海、咸海—新疆上空进入亚洲副热带西风急流传播增强(减弱), 另一支直接向东南方向传播在地中海东部—黑海附近进入亚洲西风急流增强(减弱), 此外, 地中海上空 EP 通量辐散也增强(减弱), 它们共同作用使得沿西风急流 Rossby 波活动增强(减弱)。

(3) 沿西亚急流非绝热加热产生扰动有效位能远大于基本气流动能向扰动动能和基本气流有效位能向扰动有效位能的转换, 西亚急流 Rossby 波活动强年(弱年)伊朗高原及其北侧的西亚地区非绝热加热产生扰动有效位能增强(减弱)显著, 是西亚急流 Rossby 波活动增强(减弱)的能量源。

致谢: 中国科学院大气物理研究所布和朝鲁老师与第一

作者进行过有益的讨论, 特此致谢。

References

- Ambrizzi T, Hoskins B J, Hsu H H. 1995. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the Austral winter. *J Atmos Sci*, 52: 3661-3672
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Climate*, 18:3483-3505
- Duan Anming, Wu Guoxiong. 2005. Wave-mean flow interaction and atmosphere energy cycle under diabatic heating condition. *Sci China Series D Earth Sci(in Chinese)*, 35(4): 352-360
- Enomoto T, Hoskins B J, Yoshihisa Matsuda. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart J Roy Meteor Soc*, 587: 157-178
- Enomoto T. 2004. Interannual variability of the Bonin high associated with the propagation of Rossby waves along the Asian jet. *J Meteor Soc Japan*, 82:1019-1034
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci*, 38(6):1179-1196
- Koutarou Takaya, Hisashi Nakamura. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys Res Lett*, 24(23):2985-2988
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. The seasonal variation of the east Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 64(5): 30-41
- Li Chongyin, Wang Jough-Tai, Lin Shi-Zhei, et al. 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 28(5):641-658
- Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the north hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies. *Chinese J Geophy (in Chinese)*, 47(1): 10-18
- Liu Y M, Wu G X, Ren R C. 2003. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. *J Climate*, 17: 682-698
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer. *Tellus*, 54A: 44-55
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J Atmos Sci*, 42: 217-229
- Ran Lingkun, Gao Shouting, Li Chongyin. 2005. Propagation flow frequency Rossby wave with divergent wind. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(1): 13-20
- Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(4): 84-94
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *J Atmos Sci*, 45:1228-1251
- Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer. *J Applied Meteor Sci (in Chinese)*, 17(5):513-525
- Terao T. 1998. Barotropic disturbances on intraseasonal time scales observed in the midlatitudes over the Eurasian continent during the northern summer. *J Meteor Soc Japan*, 76: 419-436
- Terao T. 1999a. The zonal wavelength of the quasi-stationary Rossby waves trapped in the westerly jet. *J Meteor Soc Japan*, 77: 687-699
- Terao T. 1999b. Relationships between quasi-stationary Rossby waves in the subtropical jet and the mass and heat transport in the northern periphery of the Tibetan high. *J Meteor Soc Japan*, 77: 1271-1286
- Xu Xiangde, Gao Shouting. 1999. *Forcing and Dynamics of Wave-mean Flow Interaction (in Chinese)*. Beijing: Ocean Press, 245pp
- Yang Liangmei, Zhang Qingyun. 2008. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asia subtropical westerly jet stream. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 19(2):171-178
- Yang Lianmei. 2007. Research on interannual variation of Rossby waves activities along Asia westerly jet stream in summer [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 139pp
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 6: 1-16
- Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. 1986. *Handbook of Short-term Weather Forecast in Xinjiang (in Chinese)*. Urumqi: Xinjiang People Press, 457pp

附中文参考文献

- 段安民, 吴国雄. 2005. 非绝热条件下的波流相互作用与大气能量循环. *中国科学 D 辑*, 35(4): 352-360
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨. *气象学报*, 64(5): 30-41
- 李崇银, 王作台, 林士哲等. 2004. 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*, 28(5):641-658
- 廖清海, 高守亭, 王会军等. 2004. 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*, 47(1): 10-18
- 冉令坤, 高守亭, 李崇银. 2005. 辐散风作用下低频 Rossby 波的能量传播. *气象学报*, 63(1): 13-20
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动关系探讨. *气象学报*, 65(4): 84-94
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳. *应用气象学报*, 17(5):513-525
- 徐祥德, 高守亭. 1999. 外源强迫与波流作用动力学原理. 北京: 海洋出版社, 245pp
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流. *应用气象学报*, 19(2):171-178
- 杨莲梅. 2007. 夏季亚洲西风急流 Rossby 波活动年际变化研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 139pp
- 张家宝, 苏起元, 孙沈清等. 1986. 新疆短期天气预报指导手册. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 457pp