

冬夏东亚季风环流对太平洋热状况的响应

张庆云¹ 王媛^{1,2}

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 冬夏隔季韵律关系一直是我国长期天气预报和短期气候预测的一个重要依据, 然而迄今为止对它们之间的物理过程及成因机理并不十分清楚。利用 NCEP/NCAR 全球 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格月平均再分析资料, 研究 1951~2000 年冬夏东亚季风环流异常变化与太平洋海面温度 (SST) 的关系及对关键海温区响应机理。研究指出: 冬夏东亚季风环流隔季韵律关系及其年际变化与赤道东太平洋海面温度异常 (SSTA) 变化密切相关, 冬季赤道东太平洋出现 La Niña (El Niño) 型的 SST 分布, 有利冬、夏东亚季风环流加强 (减弱), 其影响过程通过赤道 Walker 环流强 (弱) 以及东亚地区 Hadley 环流强 (弱) 过程完成。冬季赤道东太平洋海温变化是冬、夏东亚环流季节以及年际变化的一个重要外强迫因子。

关键词 东亚季风 环流 海面温度

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0487-12 **中图分类号** P425 **文献标识码** A

The Response of East Asian Monsoon Circulation between Winter and Summer to Sea Surface Temperature over the Pacific Ocean

ZHANG Qing-Yun¹ and WANG Yuan^{1,2}

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 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract The response of East Asia monsoon circulation between summer and winter to sea surface temperature over the Pacific Ocean is investigated using the NCEP/NCAR reanalysis dataset during 1949–2000. The study focused on the cases that the intensity of East Asian monsoon circulation between winter and summer were similarly. It had been found out that the intensified (weakened) East Asian monsoon circulation both in winter and summer were associated to the stronger (weaker) Walker circulation in equatorial Pacific and Hadley circulation over East Asian. The variation of the intensity for Walker circulation in equatorial Pacific and the Hadley circulation over East Asian are affected by the variation of sea surface temperature anomaly (SSTA) over equatorial eastern Pacific. It had been pointed out that the East Asian monsoon circulation in both of winter and following summer became stronger (weaker) in La Niña (El Niño) years. The sea surface temperature (SST) over equatorial eastern Pacific was the most important force factor for the seasonal and annual variation of East Asian monsoon circulation.

Key words East Asian monsoon, circulation, sea surface temperature

收稿日期 2005-01-21 收到, 2006-02-06 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-221、KZCX3-SW-226 和国家自然科学基金项目 40523001

作者简介 张庆云, 女, 1950 年出生, 研究员, 主要从事亚洲季风和短期气候变化成因机理研究。E-mail: zqy@mail.iap.ac.cn

1 引言

20 世纪 80 年代以来,有关亚洲季风的研究取得了一系列新的进展和许多重要成果^[1~3]。夏季东亚季风环流年际变化的研究表明^[4,5],夏季东亚季风环流强弱对我国东部雨带变化有重要影响,东亚夏季风环流强,夏季雨带多位于我国华南和华北地区;东亚夏季风环流弱,雨带多位于长江中下游及江南北部地区。冬季东亚季风环流的强弱变化主要反映在风场、气温和气压的变化上,陈隽等^[6]研究指出,强冬季风年中高纬地区环流经向度大,从亚洲大陆至中南半岛以及澳大利亚北部的偏北风加强,冷涌活动频繁,有利于低纬地区的对流活动的发展,使高空辐散加强,从而加强 Hadley 环流和 Walker 环流的上升支;弱冬季风年则基本上呈相反的趋势。Webster 和 Yang^[7]研究指出,亚洲季风的年际变化受 ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 3~7 年周期变化影响,通常 El Niño 年对应弱季风,La Niña 年对应强季风。陶诗言和张庆云^[8]研究指出,El Niño (La Niña) 年冬季,南亚上空西风带位置偏南(北),南支西风扰动活动频繁,南亚大陆冬、春季降水或降雪偏多(少),春、夏季南亚大陆土壤水分分为正(负)距平,夏季增暖推迟(提前),导致夏季南亚大陆与其南面海洋之间热力对比小(大),造成亚洲夏季风减弱(加强)。穆明权^[9]、穆明权和李崇银^[10]、陈文^[11]研究也发现,El Niño 和 La Niña 事件显著的影响东亚冬、夏季风的循环。El Niño 盛期的冬季东亚地区则出现异常的南风距平;La Niña 对东亚冬、夏季风循环的影响则与 El Niño 大致相反,但是它的影响不如 El Niño 影响显著。

迄今为止,东亚季风环流自身演变过程与大气外部强迫因子海温的关系,多数主要集中在季节(冬季、夏季)或季节内的变化,而东亚季风环流冬、夏演变过程与大气外部强迫因子的关系以及冬、夏东亚大气环流对海洋响应过程的机理并不十分清楚。本文重点探讨冬、夏东亚季风环流异常时的大气内部动力过程的演变特征以及对北太平洋关键海温区异常变化的响应。

2 资料

全球 1948~2000 年的月平均 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点风场、高度场与 1950~2000 年的月平均 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 格点海温资料来自 NCEP/NCAR 再分析资料。中国 160 站 1951~2000 年的月平均降水资料由国家气候中心提供。本文的气候态为 1951~2000 年平均值;冬季平均是指 11 月到次年 3 月平均值;夏季平均是指 6~8 月平均值。

3 冬、夏东亚季风强弱年环流特征

为了客观化和定量化反映冬、夏东亚季风季节和年际强弱变化特征,用指数表征季风强弱变化是十分必要的。有关季风指数的定义,基本可分为 3 类:1) 用海陆之间海平面气压差的大小定义季风指数^[12~14];2) 用高、低空纬向风的切变或纬向、经向风定义季风指数^[15~17];3) 用 OLR 或直接用季风雨等来定义季风强度的变化^[18]。不同定义的季风指数各有优点,在研究和业务上都起了一定作用。鉴于季风的气候学概念是指某区域近地面层冬、夏盛行风向接近于相反且气候特征迥异的现象,因此定义的东亚季风指数既要反映东亚地区风场变化特征,也要反映东亚气候要素(如降水、温度)的变化。

东亚季风分为南海季风(热带季风)和副热带季风,即南海-西太平洋热带季风区和大陆-日本副热带季风区。张庆云和陶诗言^[4]的研究指出,夏季东亚季风系统中的热带辐合带(季风槽)和副热带辐合带(梅雨锋)的强度变化呈相反的变化趋势,当热带季风槽强度减弱(弱季风)时,副热带梅雨锋强度加强;反之,热带季风槽强度加强(强季风),副热带梅雨锋强度减弱。为了反映夏季东亚季风环流的这种变化特征,张庆云等^[19]利用东亚热带季风槽区($10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$)与东亚副热带地区($25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$) 6~8 月平均 850 hPa 高度上的 U 分量距平差代表东亚夏季风强度变化,表达式为 $I_{\text{EASM}} = U'_{850[10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}, 100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}]} - U'_{850[25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}, 100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}]}$, 我们计算了 1948~2000 年的逐年东亚夏季风指数(图 1a),将夏季风指数大于或等于 2 的年份定为强夏

季风年，小于或等于-2 的年份定为弱夏季风年（图 1a 中虚线）；该指数的年际变化表明，东亚夏季风环流减弱年（小于或等于-2 的年份），夏季长江流域降水都偏多，东亚夏季风环流加强年（大于或等于2 的年份），长江流域降水都偏少^[17]。本文所用的这个夏季风指数不但很好地反映了东亚地区风场及中国东部降水场的变化特征，且天气学意义清楚、计算简单。

陈文等^[20]定义的冬季风指数是利用 1 000 hPa 风场上西北风最大区域（25~40°N，120~140°E）的 11 月到第 2 年 3 月共 5 个月距平值表示。为了使冬、夏东亚季风指数具有相对的可比性和连续性，本文定义的东亚冬季风指数（图 1b）与夏季风指数一样也采用 850 hPa 风场定义。对多年平均的 11 月到次年 3 月共 5 个月平均的 850 hPa 风场分析发现，多年平均的冬季（5 个月）850 hPa 风场上的西北风最大的风速区集中在（35~50°N，120~135°E）的区域，因此我们利用冬季（11 月到次年 3 月）5 个月平均 850 hPa 高度上（35~

50°N，120~135°E）区域平均的经向风的距平代表东亚冬季风环流强度指数，表达式为 $I_{EAWM} = V_{850[35\sim50^{\circ}N,120\sim135^{\circ}E]}$ 。由于偏北风用负号表示，负距平越大表示偏北风越强，即冬季风越强。本文把东亚冬季风指数小于或等于-0.3 定义为强冬季风年，大于或等于 0.3 的为弱冬季风年（图 1b 中虚线）。

对 1948~2000 年冬、夏东亚季风指数求相关，相关系数为-0.231，信度检验达 90%，这说明冬、夏东亚季风强度变化存在一致性的概率达 90%。因此重点分析概率为 90% 的这类环流的特征，为了抓住主要特征，根据图 1a、b 的冬、夏东亚季风指数的强度变化，我们选择强冬季风年后的强夏季风年（1974、1978、1981、1984 和 1986 年）以及弱冬季风年后的弱夏季风年（1959、1969、1971、1983 和 1998 年）进行合成分析，探讨冬、夏季风强度变化表现一致时，其冬、夏东亚大气环流主要特征及其对海温的响应过程。

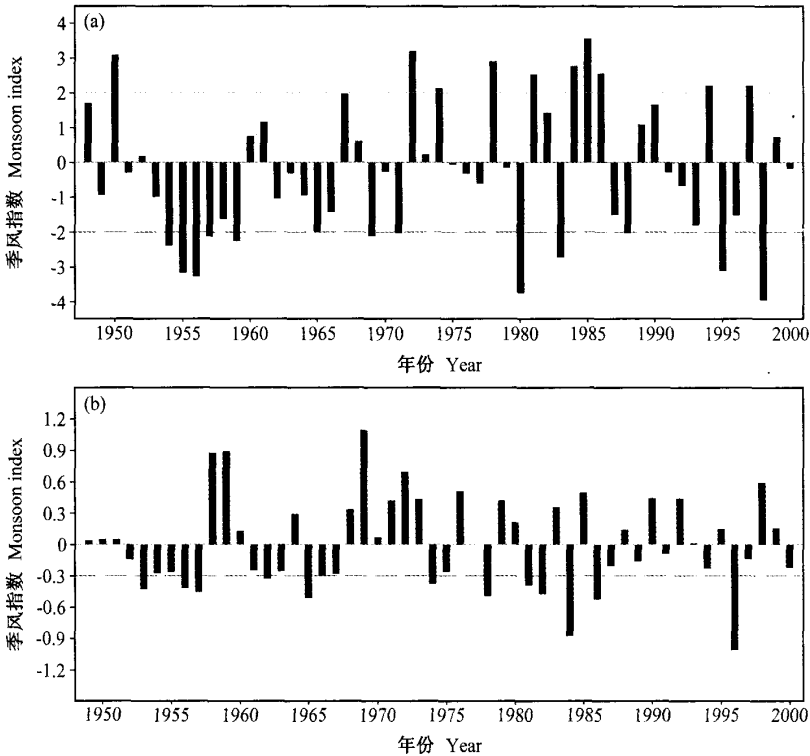


图 1 东亚季风指数：(a) 1948~2000 年东亚夏季风指数；(b) 1949~2000 年东亚冬季风指数

Fig. 1 East Asia monsoon index: (a) summer in 1948-2000; (b) winter in 1949-2000

图 2a、b 分别是冬、夏东亚季风环流都加强或减弱年的冬季（11 月到次年 3 月平均）850 hPa 距平风场。强东亚季风年的冬季，东亚季风区出现西北和东北 2 支偏北风距平气流（见图 2a），冬季东亚季风环流的加强与东亚季风区受 2 支偏北气流共同影响有关；弱东亚季风年的冬季，东亚季风区出现西南偏南风距平气流（见图 2b），这说明冬季东亚季风环流的减弱与东亚季风区偏北气流较常年减弱有关。图 2c、d 分别是冬、夏东亚季风环流都加强或减弱年的夏季（6~8 月平均）850 hPa 距平风场。强东亚夏季风年 850 hPa 风距平场上，一个闭合的气旋性距平环流出现在东亚—太平洋热带地区（见图 2c），东亚热带季风区出现气旋性距平环流，说明东亚夏季风环流加强；弱东亚夏季风年 850 hPa 风距平场上，一个闭合的反气旋性距平环流出现在东亚—太平洋热带地区（见图 2d），东亚热带季风区出现反气旋性距平环流，说明东亚夏季风环流减弱。

综上所述，强、弱东亚季风年对流层低层冬夏环流存在显著不同：强（弱）冬季风年冬季，东亚季风区偏北气流加强（减弱）；强夏季风年夏季，东亚—太平洋热带地区呈现闭合性的气旋性（反气旋性）距平环流。

为了进一步了解强、弱东亚季风年冬、夏东亚季风区整层环流特征，图 3a、b 分别是强、弱季风年冬季 30~50°N 纬度平均的东亚季风区垂直速度距平的经度—高度剖面；图 3c、d 分别是夏季 25~35°N 纬度平均的东亚季风区垂直速度距平经度—高度剖面。强冬季风年（图 3a），东亚 110~140°E 地区从高层（100 hPa）到近地面层的垂直速度距平都呈现下沉运动，强下沉运动出现在东亚季风区，说明东亚季风区冷空气强；弱冬季风年（图 3b），东亚 110~140°E 地区从近地面到高层的垂直速度距平呈现上升运动，东亚季风区下沉运动减弱造成东亚季风区冷空气减弱。强夏季风年（图 3c），东亚 110~140°E 地区从近地面到高层的垂直速度出现下沉运动距平，夏季梅雨锋区（25~35°N，110~140°E）上升运动减弱，表明东亚梅雨锋强度减弱，使得夏季长江流域降水减少（图略）；弱夏季风年（图 3d），东亚 110~140°E 地区垂直速度呈现为上升运动距平，强上升运动出现在梅雨锋区（25~35°N，110~140°E），

造成梅雨锋强度加强，有利夏季长江流域降水较多（图略）。

从上可见，强、弱季风年东亚地区垂直速度距平存在显著不同。强季风年的冬与夏，东亚地区垂直速度距平都出现下沉运动，冬季造成东亚地区冷空气加强，夏季使得梅雨锋减弱；弱季风年的冬与夏，东亚地区垂直速度距平都出现上升运动，冬季造成东亚地区冷空气减弱，夏季使得梅雨锋加强。因此冬、夏隔季韵律现象显著年份，实际是冬、夏东亚大气环流的强度变化出现了一致，那么在什么情况下，冬、夏东亚大气环流强度变化可能会出现相对一致？也就是说，冬、夏东亚大气环流强度变化出现一致的物理机理是什么？

4 冬夏东亚季风环流强度变化与太平洋热状况

冬夏季风环流的形成主要与冬夏海陆热状况有关。冬季大陆为冷源、海洋为热源，大陆为冷高压、海洋为热低压控制，根据梯度风原理，风从高压吹向低压，因此形成从陆地吹向海洋的冬季风环流。夏季陆地为热源、海洋为冷源，陆地为热低压、海洋为冷高压控制，产生由海洋吹向陆地的夏季风。季风环流的加强与海陆热力对比引起的温度梯度的加强有关，温度梯度加大，季风环流增强。可见海洋热状况对冬、夏东亚季风环流强弱变化有重要影响，因此我们进一步分析冬、夏东亚季风指数与冬、夏海温的关系。

图 4a、b 分别是冬季（11 月到次年 3 月平均，下同）海温与冬、夏东亚季风指数的相关分布，图中的阴影区表示相关系数信度达 99% 的区域（50 个样本相关系数为 0.354，其信度为 99%）。图 4a 是冬季海温与冬季风指数的同期相关（由于北风用负值代表，负值越大表示冬季风越强，因此正相关表示冬季风强对应海温低）。从图可见，最显著的正相关出现在赤道东太平洋地区，这说明强冬季风年对应冬季赤道东太平洋海温低（La Niña 型），弱冬季风年对应冬季赤道东太平洋 SST 高（El Niño 型）。图 4b 是前冬海温与夏季风指数的相关，图中负相关表示夏季风强对应 SST 低，从图可见，显著的负相关区出现在赤道东太平洋，正相关出现在西太平洋暖池区，这说明冬

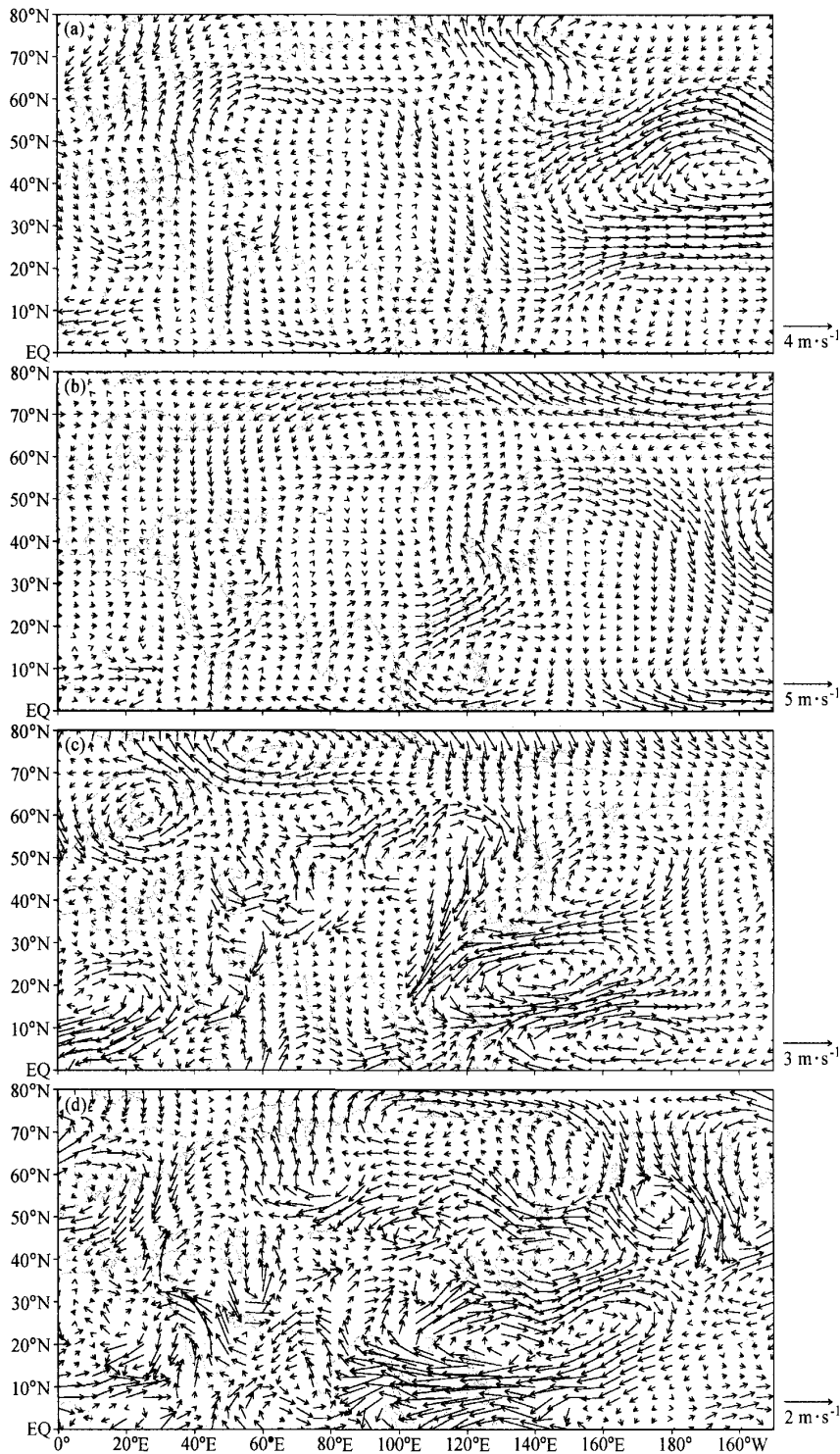


图 2 850 hPa 风距平合成: (a) 强冬季风; (b) 弱冬季风; (c) 强夏季风; (d) 弱夏季风

Fig. 2 Composite anomalous wind at 850 hPa: (a) strong East Asia winter monsoon; (b) weak East Asia winter monsoon; (c) strong East Asia summer monsoon; (d) weak East Asia summer monsoon

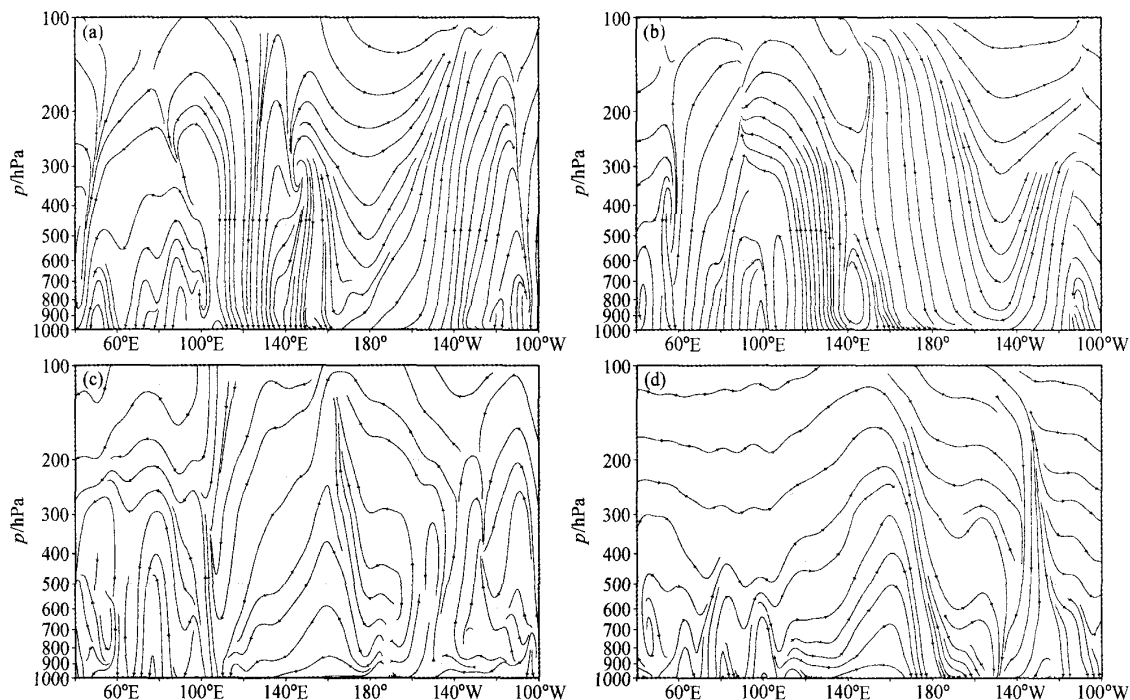


图3 纬度平均的垂直速度距平经度-高度剖面: (a) 强冬季风年 (30~50°N) 纬度平均; (b) 弱冬季风年 (30~50°N) 纬度平均; (c) 强夏季风年 (25~35°N) 纬度平均; (d) 弱夏季风年 (25~35°N) 纬度平均

Fig. 3 Height-longitude section for anomalous vertical velocity averaged over (30—50°N) in winter and (25—35°N) in summer: (a) strong East Asia winter monsoon; (b) weak East Asia winter monsoon; (c) strong East Asia summer monsoon; (d) weak East Asia summer monsoon

季赤道东太平洋 SST 低 (La Niña 型) 有利东亚夏季风强, 冬季赤道东太平洋 SST 高 (El Niño 型) 有利东亚夏季风弱。图 4a、b 的相关系数分布表明, 冬季赤道东太平洋 SST 热状况对冬、夏东亚季风环流的季节、年际变化有重要影响, 冬季赤道东太平洋 SST 低 (La Niña 型) 造成冬、夏东亚季风环流加强; 冬季赤道东太平洋 SST 高 (El Niño 型) 造成冬、夏东亚季风环流减弱。

图 4c 是夏季海温与东亚夏季风指数的同期相关。从图可见, 西太平洋中纬度以南为负相关、以北为正相关区, 这说明东亚夏季风加强年, 夏季西太平洋 SST 为南低、北高; 东亚夏季风环流减弱年, 夏季西太平洋 SST 表现南高、北低。张庆云等^[19]研究已指出, 夏季西太平洋 SST 出现南低、北高型时, 夏季西太平洋副热带高压位置相对偏北, 有利东亚热带季风槽加强 (强东亚季风) 而梅雨锋减弱; 夏季西太平洋 SST 呈南高、北低型, 西太平洋副热带高压位置相对偏南, 造成东

亚热带季风槽减弱 (弱东亚季风) 而梅雨锋加强 (详见文献 [21] 中第 83 页)。此外, 赤道东太平洋地区也呈现为一个显著的负相关区 (图 4c), 表明夏季赤道东太平洋 SST 低 (高) 对应东亚夏季风环流强 (弱)。

综上所述, 太平洋 SST 对冬、夏东亚季风环流强弱变化有重要影响, 特别是赤道东太平洋 SST 对冬、夏东亚季风环流演变有重要影响。冬、夏赤道东太平洋 SST 都低 (高) 时, 冬、夏东亚季风环流都强 (弱), 这说明赤道东太平洋 SST 热状况变化冬夏一致时, 冬夏东亚大气环流隔季韵律现象更显著, 赤道东太平洋 SST 是东亚季风环流季节变化的重要外强迫因子。

为了清楚看出强、弱东亚季风年太平洋海温异常 (SSTA) 状况, 图 5 是强、弱季风年的冬、夏季 SSTA 合成。强季风年的冬、夏季 SSTA 合成图 (图 5a、c) 在赤道东太平洋地区都出现显著的负距平, 表明强季风年的冬夏季, 赤道东太平

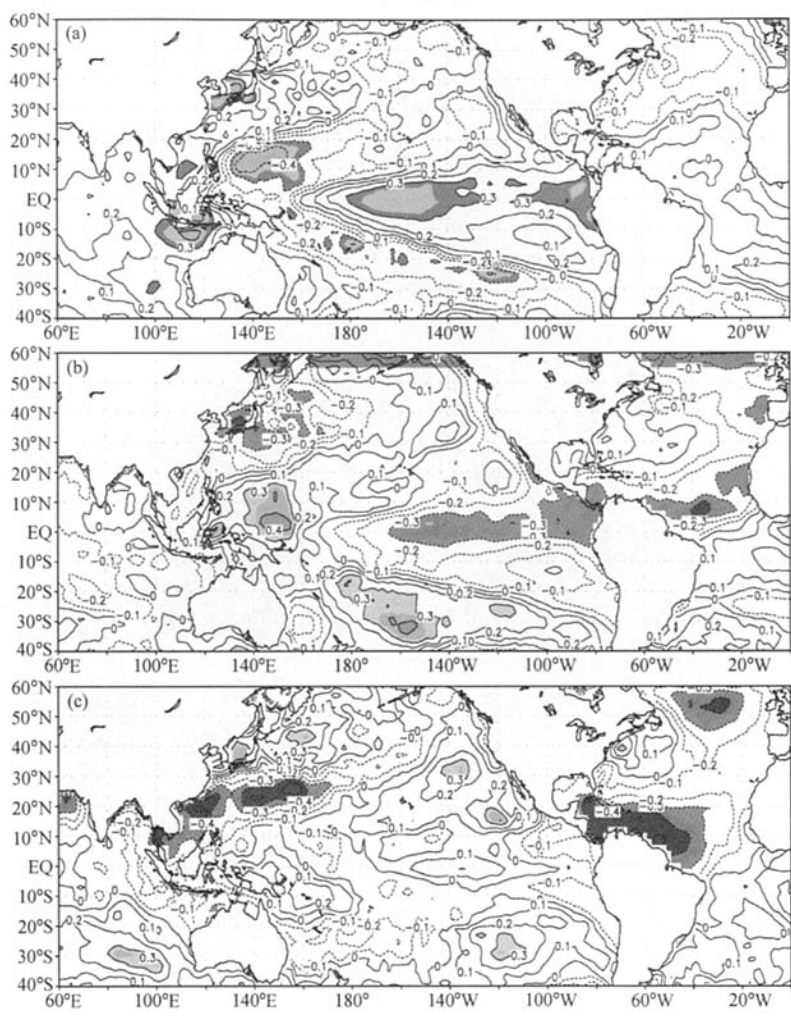


图4 东亚季风指数与 SST 相关分布：(a) 东亚冬季风指数与冬季 SST 相关；(b) 东亚夏季风指数与前冬 SST 相关；(c) 东亚夏季风指数与夏季 SST 相关（阴影区信度高于 99%）
Fig. 4 Correlation coefficient between East Asian monsoon index and SST; (a) East Asian winter monsoon index (EAWMI) and SST in winter; (b) EASMI and SST in winter; (c) EASMI and SST in summer (The statistically significant features are shaded 99%)

洋 SST 都比正常年偏低；弱季风年的冬、夏季（见图 5b、d），赤道东太平洋地区 SST 都呈现显著正距平，说明弱季风年的冬夏季，赤道东太平洋 SST 都比常年偏高。强、弱年冬夏海温距平特征（图 5）与图 4 相关分析结果一致，说明赤道东太平洋 SSTA 变化对东亚季风强、弱的影响有统计学意义。

为了探讨东亚大气环流隔季韵律现象的物理机制，我们进一步给出冬季东亚大气环流异常对赤道太平洋 SST 的响应过程。图 6a、b 分别是强、

弱冬季风年，冬季赤道地区（5°S~5°N 平均）垂直速度距平的高度—经度剖面图。强冬季风年，赤道东太平洋地区上空垂直速度距平出现下沉运动、而赤道西太平洋区域上空呈上升运动（见图 6a），垂直速度距平的这种分布状态，说明赤道太平洋地区 Walker 环流加强，此时对应的赤道东太平洋 SST 偏低（见图 5a），可见赤道东太平洋 SST 偏低，大气的响应过程表现为赤道太平洋 Walker 环流加强。弱季风年，赤道东太平洋地区上空垂直速度距平呈上升运动、而赤道西太平洋

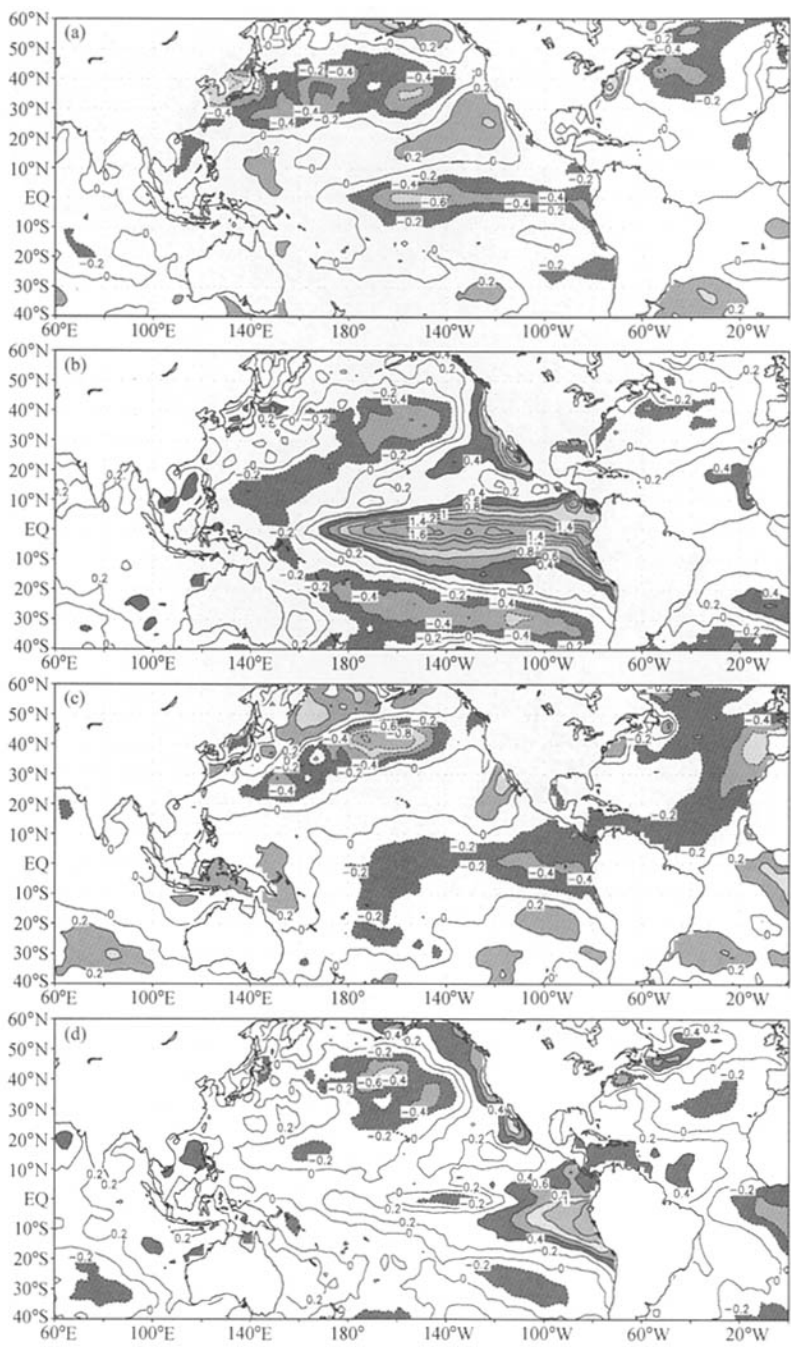


图 5 SSTA 合成分布: (a) 强季风年冬季; (b) 弱季风年冬季; (c) 强季风年夏季; (d) 弱季风年夏季
Fig.5 Composite SSTA: (a) strong monsoon case in winter; (b) weak monsoon case in winter; (c) strong monsoon case in summer; (d) weak monsoon case in summer

区域上空呈下沉运动 (见图 6b), 垂直速度距平的这种分布状态, 表明赤道 Walker 环流减弱, 此时对应的赤道东太平洋 SST 高 (见图 5b), 可见赤道东太平洋 SST 偏高时, 大气的响应过程表现

为赤道太平洋 Walker 环流减弱。

赤道太平洋 Walker 环流加强或减弱，东亚局地 Hadley 环流是如何响应？图 7a、b 分别是强、弱冬季风年冬季东亚地区（110~130°E 平均）的垂直速度距平高度—纬度剖面。强东亚季风年冬季，东亚地区的局地 Hadley 环流圈在 5~15°N 地区呈现距平上升运动（见图 7a），这与图 6a 中 Walker 环流上升支加强一致，在 25~40°N 地区出现距平下沉运动，东亚地区垂直速度距平的这种分布表明东亚局地 Hadley 环流加强。由上可见，冬季赤道东太平洋 SST 偏低时（图 5a），赤道太平洋地区大气环流对海洋的响应表现为 Walker 环流加强（图 6a），东亚大气环流的响应表现为局地 Hadley 环流加强（图 7a），有利东亚冬季风环流加强。

弱东亚季风年冬季，东亚地区的局地 Hadley

环流圈在 5~15°N 地区出现距平下沉运动（见图 7b），这与图 6b 所示的 Walker 环流上升枝减弱一致，在 25~40°N 地区出现距平上升运动，东亚地区垂直速度距平的这种分布说明东亚局地 Hadley 环流减弱。从上可见，冬季赤道东太平洋 SST 偏高（图 5b），赤道太平洋地区大气环流对海洋的响应表现为 Walker 环流减弱（图 6b），东亚大气环流的响应表现为局地 Hadley 环流减弱（图 7b），有利东亚冬季风环流减弱。

图 8a、b 分别是强、弱东亚夏季风年 5°S~5°N 平均的垂直速度距平高度—经度剖面。图 9a、b 分别是强、弱东亚夏季风年东亚区域（110~130°E）平均垂直速度距平的高度—纬度剖面。夏季东亚季风强、弱年 Walker 环流（见图 8a、b）及东亚局地 Hadley 环流（见图 9a、b）强度变化与强、弱冬季风年情况一样，大气对海洋的响应

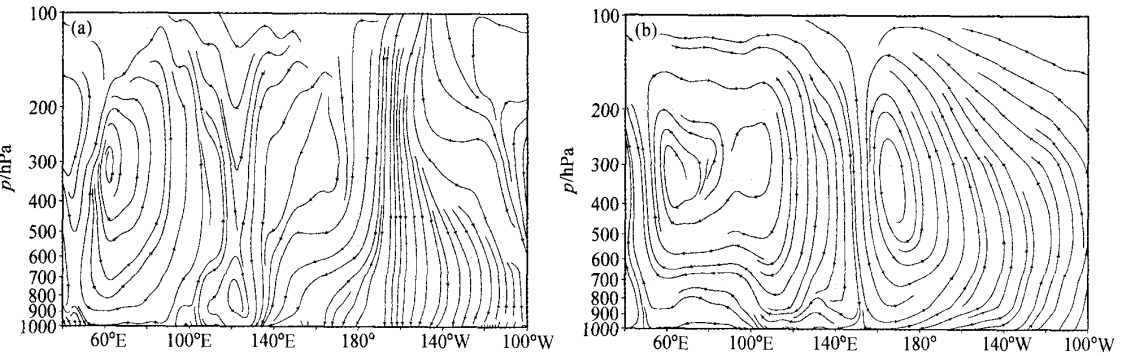


图 6 冬季 5°S~5°N 平均垂直速度距平高度—经度剖面：(a) 强东亚冬季风年；(b) 弱东亚冬季风年
Fig. 6 Height-longitude section for anomalous vertical velocity averaged over (5°S–5°N) in winter: (a) strong East Asian winter monsoon case; (b) weak East Asian winter monsoon case

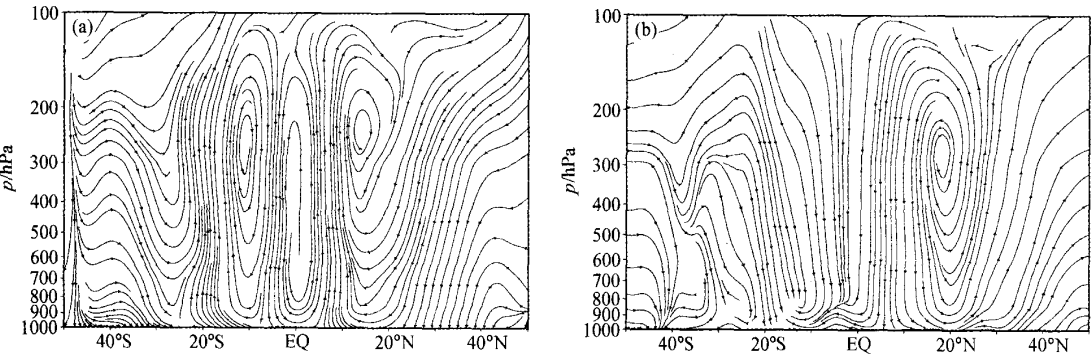


图 7 冬季 110~130°E 区域平均的垂直速度高度—纬度距平剖面：(a) 强冬季风年；(b) 弱冬季风年
Fig. 7 Height-latitude section for anomalous vertical velocity averaged by (110–130°E) in winter: (a) strong East Asian winter monsoon case; (b) weak East Asian winter monsoon case

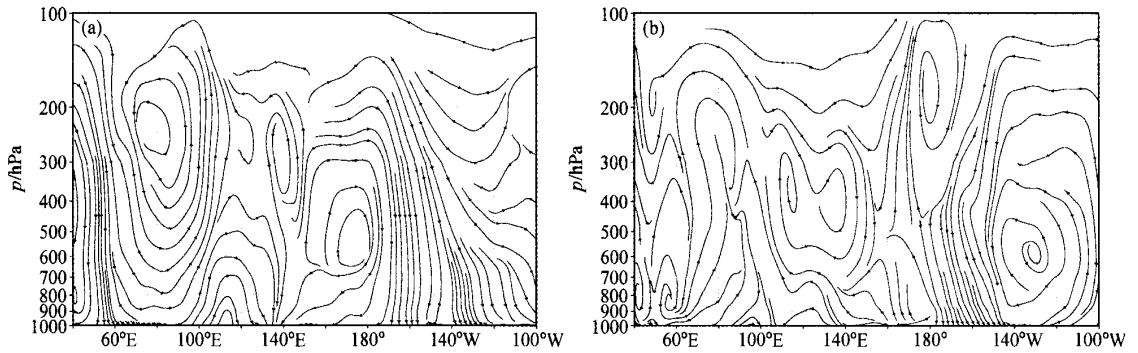


图 8 夏季 5°S~5°N 平均的垂直速度距平高度-经度剖面: (a) 强东亚夏季风年; (b) 弱东亚夏季风年

Fig. 8 Height-longitude section for anomalous vertical velocity averaged over (5°S–5°N) in summer; (a) strong East Asian summer monsoon case; (b) weak East Asian summer monsoon case

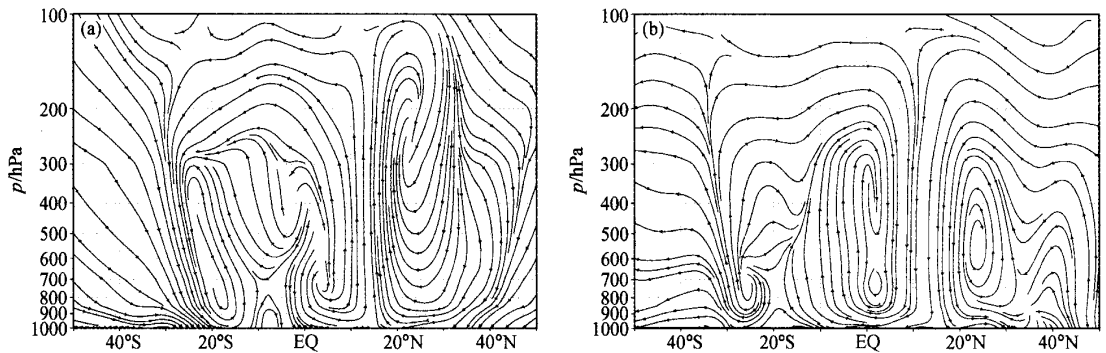


图 9 夏季东亚 110~130°E 区域平均的垂直速度距平高度-纬度剖面: (a) 强东亚夏季风年; (b) 弱东亚夏季风年

Fig. 9 Height-latitude section for anomalous vertical velocity averaged by (110–130°E) in summer; (a) strong East Asian summer monsoon case; (b) weak East Asian summer monsoon case

也是表现为赤道太平洋 Walker 环流与东亚局地 Hadley 环流加强 (减弱), 东亚夏季风环流强 (弱)。

上述分析清楚可见, 强、弱东亚夏季风年的夏季, 赤道太平洋 Walker 环流对海洋的响应以及东亚局地 Hadley 环流的响应与强、弱冬季风年响应过程一致, 主要原因与冬、夏赤道东太平洋海温异常热状况变化趋势一样有关 (见图 5)。当冬、夏赤道东太平洋海温热状况异常趋势一致时, 东亚季风环流冬、夏隔季韵律现象相对显著; 冬、夏赤道东太平洋 SST 热状况异常趋势不一致时, 东亚季风环流冬、夏隔季韵律现象就不显著。因此赤道东太平洋冬、夏海温状况趋势是东亚季风环流年际、季节变化的重要外强迫因子。

5 结论与讨论

本文分析了东亚季风环流冬、夏强弱变化一致时的环流特征, 探讨了东亚季风环流冬、夏强弱变化一致时与赤道东太平洋 SST 的关系, 指出赤道东太平洋 SSTA 是赤道 Walker 环流以及东亚局地 Hadley 环流强度变化的重要外强迫因子。赤道东太平洋冬、夏季出现 La Niña (El Niño) 海温分布型, 东亚大气环流对海洋的响应表现为冬、夏东亚季风环流加强 (减弱), 其响应过程通过赤道太平洋 Walker 环流及东亚局地 Hadley 环流加强 (减弱) 完成。赤道东太平洋冬、夏海温变化趋势一致是东亚季风环流冬、夏隔季韵律关系显著的一个重要原因。

需要指出的是, 本文仅讨论了冬、夏季风环流强度变化一致年其环流对大气外强迫因子赤道东太平洋冬、夏海温的响应; 对于冬季风强、夏季风弱, 或冬季风弱、夏季风强的情况并没有进行深入探讨, 虽然初步分析可能与赤道东太平洋冬、夏 SSTa 变化趋势不一致有关 (图略), 然而冬季风强、夏季风弱, 或冬季风弱、夏季风强的问题特别是异常的成因机理需要进一步深入探讨。研究还发现, 东亚冬、夏季风环流变化虽然与赤道东太平洋 SST 关系最显著, 但与印度洋、北太平洋中纬度 SST 也有一定关系 (见图 5), 由于北太平洋中纬度海温变化具有显著的年代际特征 (PDO), 因此 PDO 可能是冬、夏东亚季风环流年代际变化的重要外强迫因子。此外, 天气气候的演变除了受大气外强迫因子影响外, 还与大气内部动力过程自身演变有关。冬、夏东亚季风环流强弱与大气内部动力过程异常的关系也需要进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: *Monsoon Meteorology*, Cheng C P, Krishnamurti T N, Ed. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [2] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp
Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp
- [3] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 234~256
- [4] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水. *应用气象学报*, 1998, **9** (增刊): 16~23
Zhang qingyun, Tao Shiyan. Tropical and subtropical monsoon over East Asia and its influence on the rainfall over Eastern China in summer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (Suppl.): 16~23
- [5] 赵汉光, 张先恭. 东亚季风和我国夏季雨带的关系. *气象*, 1994, **22** (4): 8~12
Zhao Hanguang, Zhang Xiangong. The relationship between East Asian Monsoon and rainfall over China in summer. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1994, **22** (4): 8~12
- [6] 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究. *大气科学*, 1999, **23** (1): 101~111
- [7] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO, selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [8] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. *大气科学*, 1998, **22** (4): 399~407
Tao Shiyan, Zhang Qingyun. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (4): 399~407
- [9] 穆明权. 东亚冬季风异常与 ENSO 循环关系的进一步研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (3): 273~285
Mu Mingqian. A further research on the cyclic relationship between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 273~285
- [10] 穆明权, 李崇银. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 II. 模拟资料分析. *气候与环境研究*, 1999, **4** (2): 176~184
Mu Mingqian, Li Chongyin. ENSO signals in the inter-annual variability of East-Asian winter monsoon. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (2): 176~184
- [11] 陈文. El Nino 和 La Nina 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, **26**: 359~376
Chen Wen. Impact of El Nino and La Nina on the cycle of East Asian winter and summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 359~376
- [12] 郭其蕴. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. *地理学报*, 1986, **38** (1): 55~61
Guo qiyun. The intensity of East Asian monsoon indices and its association with variation. *Geographic Sinica* (in Chinese), 1986, **38** (1): 55~61
- [13] 施能. 近 40 年东亚季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系. *应用气象学报*, 1996, **7** (2): 175~182
Shi Neng. Features of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7** (2): 175~182
- [14] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常. *大气科学*, 1996, **20** (5): 575~583
Shi Neng, Zhu Qiangen, Wu Bingui. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-cl-

- mate anomaly in China for last 40 years. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20** (5): 575~583
- [15] 王斌, 樊真. 论南亚夏季风指数的选择. 见: 中国科学院大气物理研究所编, 东亚季风和中国暴雨. 北京: 气象出版社, 1998. 170~183
- Wang Bin, Fan Zhen. On choice of dynamically coherent South Asian summer monsoon indices. In: *East Asian Monsoon and Torrential Rainfall in China* (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 505pp
- [16] Wu Aiming, Ni yunqi. The influence of Tibetan Plateau on the inter-annual variability of Asian Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**: 491~504
- [17] 乔云亭, 陈烈庭, 张庆云. 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系. 大气科学, 2002, **26** (1): 69 (82)
- Qiao Yunting, Chen Lieting, Zhang qingyun. The definition of East Asian monsoon indices and their relationship to climate in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (1): 69~82
- [18] Fujikawa N K, Ishihara, Tada K. Synthetic study of the monsoon circulation. *JEXAM Annual Report*, 1997. 139~146
- [19] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 2003, **61** (5): 559~568
- Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 559~568
- [20] Chen Wen, Graf H F, Huang Ronghui. The inter-annual variability of East Asia winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (1): 48~60
- [21] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社, 2002. 314pp
- Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. *Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 314pp