

高低层纬向风切变的年际变率及气候学意义

胡豪然¹ 钱维宏² 李跃清¹

1 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

2 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

摘要 用 1959~1998 共 40 年全球格点风场资料计算了 200 hPa 与 850 hPa 的纬向风速差, 即对流层纬向风切变 (简称 TZWS), 并在此基础上得到其距平值。为了全面考察对流层中环流异常的年际变率特征, 根据 TZWS 的标准差分布, 文中选出了 7 个 TZWS 标准差数值大于 5 m/s 的代表性区域。这 7 个区域分别位于赤道中太平洋、赤道东太平洋、北太平洋亚热带地区、南太平洋亚热带地区、赤道大西洋、亚洲西南部以及东北部。前 5 个分别位于赤道、亚热带太平洋和大西洋的区域 TZWS 指数, 其年际变率与 ENSO 循环有密切联系, 反映了热带海洋温度异常对低纬度地区对流层环流的影响; 后 2 个区域的 TZWS 指数反映的是亚洲西南部和东北部的气候统变率, 在年际时间尺度上与 ENSO 循环有着明显的区别。通过对全球陆地降水和温度场的分析, 比较了热带、副热带的 TZWS 指数以及北极涛动指数的异同, 发现后 2 个区域 TZWS 指数能很好且能独立反映出北半球中高纬度地区陆地降水及陆地温度的异常模式。

关键词 对流层纬向风切变 年际变率 厄尔尼诺-南方涛动 北极涛动 北大西洋涛动

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0543-09 **中图分类号** P425 **文献标识码** A

Interannual Variability and Climatological Significance of Zonal Wind Shear between 200 hPa and 850 hPa

HU Hao-Ran¹, QIAN Wei-Hong², and LI Yue-Qing¹

¹ Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071

² Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract The monthly values of the zonal wind vertical difference or zonal wind shear (ZWS) between 200 hPa and 850 hPa are used to assess the interannual variability of the tropospheric circulation anomalies. Seven regional indices of ZWS with the standard deviation more than 5 m/s are constructed. These regions are located in the central equatorial Pacific, the eastern equatorial Pacific, the northern and southern subtropical Pacific, the equatorial Atlantic, subtropical Arabia and Northeast Asia. The interannual variability of ZWS indices in the first five regions in the equatorial-subtropical Pacific and equatorial Atlantic are closely correlated with the ENSO cycle, which reflects the impact of tropical ocean temperature anomaly on the tropospheric circulation in lower latitudes. The last two ZWA indices, which are the signals of the climate variation over South Asia and Northeast Asia, differ significantly from the ENSO index on the interannual timescale. By analyzing the global land precipitation and temperature fields and comparing the tropical and subtropical ZWS indices with the AO index, the last two ZWS indices can well represent anomalous mode of land precipitation and temperature fields in the middle and high latitudes.

Key words the tropospheric zonal wind shear, interannual variability, El Niño-Southern Oscillation, Arctic Oscillation, North Atlantic Oscillation

收稿日期 2006-12-04, 2007-03-15 收修定稿

资助项目 中国气象局气候变化专项 CCSF2007-24, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403602、2003CB415201-6, 中国气象局成都高原气象开放实验室基金课题 LPM2006003

作者简介 胡豪然, 男, 1977 年出生, 副研究员, 主要从事季风、海气相互作用研究工作。E-mail: hhr@pku.org.cn

1 引言

中高纬度地区 200 hPa 的西风强度常常被用来反映高空急流的活动特征,例如, Yang 等^[1]用西北太平洋上冬季的 200 hPa 纬向风异常构造的区域指数表征东亚高空急流的年际变率,发现这一指数在冬季与 ENSO 事件的相关并不显著。近年来, Pielke 等^[2]利用 200 hPa 纬向风考察大气环流的变率及变化趋势,发现从 1958 年以来 200 hPa 风在高纬度地区有增强的趋势。十几年前, Webster 和 Yang^[3]提出一个表征南亚夏季风变率的指数。这一风切变指数是利用区域 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 平均的 200 hPa 与 850 hPa 纬向风异常的差值构建的。在高纬度地区的对流层中,根据热成风关系,由于低纬度的温度高于高纬度,纬向地转风速随高度是增加的。低层的自由大气大概是在 850 hPa 附近,因此在中高纬度可以把 200 hPa 与 850 hPa 的纬向风速差看作是局地对流层的纬向热成风。而在低纬度地区,由于不满足地转风关系,200 hPa 与 850 hPa 的纬向风速差反映的是海表温度梯度或海陆温度梯度等热力驱动的大气运动。

在本文中,用 1959~1998 共 40 年的空间分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料^[4, 5]计算 200 hPa 与 850 hPa 间纬向风速差(风切变),得到的 1959~1998 年全球月平均的对流层纬向风切变(简称 TZWS)被用来全面考察对流层环流的年际变率特征。通过分析全球 TZWS 的标准差分布,找到变率的中心区域,考察这些区域 TZWS 指数的特征以及与其他指数(ENSO 指数、北极涛动指数)的关系。为了进一步研究选取 TZWS 指数的气候学意义,本文还使用从欧洲气候研究中心获得的全球陆地降水温度资料^[6]。这一资料从 1901~2002 共 103 年,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[7](为了与文中使用的 NCEP 资料长度统一,仅使用了 1959~1998 这一时间段)。

2 全球对流层纬向风切变标准差分布

图 1a 是年平均对流层纬向风切变的标准差全球分布,从图中可以看到,最大的变率中心位于赤道中太平洋,数值超过 8.5 m/s;次之的变率中心位于赤道大西洋,数值超过 7.5 m/s;其他的 4 个大值中心分别位于南北太平洋的亚热带地区、亚洲

西南部和亚洲东北部。从 2 月份的 TZWS 标准差全球分布(图 1b)来看,在赤道东太平洋存在一个独立的大值中心。因此,我们在图 1a 中选择并标识了从 A~G 共 7 个 TZWS 年际变率最大的代表性区域,它们分别是:A 区 ($10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)、B 区 ($5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$)、C 区 ($20^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)、D 区 ($20^{\circ}\text{S}\sim 35^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)、E 区 ($10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $30^{\circ}\text{W}\sim 5^{\circ}\text{W}$)、F 区 ($35^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{E}$)、G 区 ($42.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 175^{\circ}\text{E}$)。值得指出的是,在 Webster 和 Yang^[3]选择的 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 这一区域并没有发现显著的大值中心。

3 区域对流层纬向风切变指数

从 1959~1998 年逐月全球纬向风切变距平场计算得到各个选定区域的纬向风切变指数(各区域纬向风切变距平的区域平均),并对其作了标准化处理。上述的距平值是相对于 1959~1998 年共 40 年平均的气候平均态而言。在图 2 中给出了这 7 条指数序列,从中可以看到,赤道中太平洋区域的纬向风切变的年际变率清楚地显示在 1982~1983 年和 1997~1998 年出现最大的负距平。而就在这两个冬天,赤道中东太平洋也发生了最强的 El Niño 事件。在图 2 的前 7 个时间序列图中,同时给出了 Niño 3 区 ($5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 的 SSTA 指数(Niño 3 区表层海温距平的区域平均,以下简称 Niño 3 指数)。从第一个时间序列图中(A 区和 Niño 3 区),可以看到两条时间序列具有明显的反向振荡趋势,高达 -0.73 的相关系数(R)说明发生在赤道中东太平洋的 El Niño 事件中的海表温度异常导致了热带地区对流层中 Walker 环流的减弱。显然,赤道中太平洋地区的月平均纬向风切变是 ENSO 循环的直接反映。

赤道东太平洋区域的纬向风切变指数与 Niño 3 指数间相关达 -0.28。从图 2 中可以看到, B 区的纬向风切变指数同时具备逐渐减小的缓变以及高频振荡的两种特征。由于这一区域靠近赤道东太平洋边缘,这里的海表温度异常变率比 Niño 3 区更高,因此在年际时间尺度上的 B 区域 TZWS 的高频变率是对局地海陆温度对比的一种积极响应,而 B 区域 TZWS 的缓变特征可能是由热带东太平洋海表温度相对于南美洲赤道地区陆地温度的年代际增暖

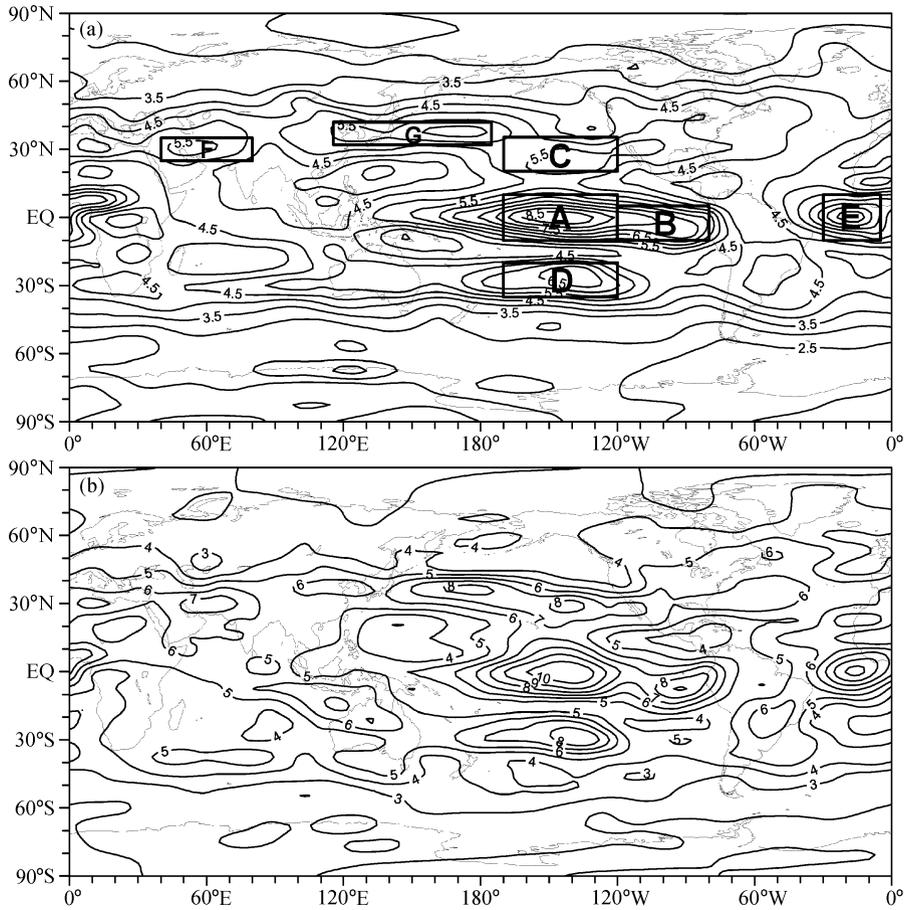


图1 年平均 (a) 和 2 月份月平均 (b) 对流层纬向风切变的标准差分布 (单位: m/s)
 Fig.1 (a) The annual mean standard deviation of zonal wind shear and (b) the monthly mean standard deviation of zonal wind shear in Feb (units: m/s)

所导致的。

亚热带太平洋北、南部区域 (C 区、D 区) 的 TZWS 指数与 Niño3 指数间都是正相关关系, 分别是 0.57 和 0.47。这意味着在 El Niño 事件暖位相期间对流层上层西风和下层东风会加强。根据热成风关系, 亚热带太平洋的 TZWS 加强必然是源于赤道地区的大气增温或中纬度地区的大气降温, 因而很容易理解亚热带地区的 TZWS 加大是因为 El Niño 事件期间赤道中东太平洋的大气增暖。

赤道大西洋区域 (E 区) 的 TZWS 指数与 Niño 3 指数间相关达 0.42。这个相关关系类似于 Niño 3 指数和亚热带太平洋区域 TZWS 的相关关系。在 El Niño 事件期间, 赤道大西洋地区的对流层上层西风增强而下层东风减弱的现象也伴随发生。

亚洲西南部地区的 TZWS 指数和 Niño 3 指数

间没有明显的相关, F 区大致位于副热带地区, 其 TZWS 指数的年际变率同热带太平洋地区 SSTA 的并不一致。而北非的对流层高空急流位于这一地区, 这一区域的 TZWS 变率可能与其局地温度对比有关。

亚洲东北部地区的 TZWS 指数和 Niño 3 指数间也没有明显的相关。G 区大部分位于中纬度的西北太平洋上。从图 1a 可以看到, 这一位置正是西北太平洋上空的高空急流区所在^[1]。这一区域的 TZWS 变率表征急流的强度变化, 直接同年际时间尺度上中低纬度的加热变率相关。同 Niño 3 指数的微弱相关也表明 El Niño 事件对于亚洲东北部的年际气候变率没有什么显著影响。

为了考察各区域 TZWS 间的关系, 图 2 中也给出了 A 区分别同 E、F、G 区间的相关 (见最后 3 幅时间序列图), 从图中可以看到, 赤道中太平洋

TZWS 与赤道大西洋 TZWS 有明显的负相关, 而赤道中太平洋 TZWS 同亚洲西南部、东北部

TZWS 都没有显著的相关关系。

表 1 中列出了所有时间序列 (包括 7 个区的

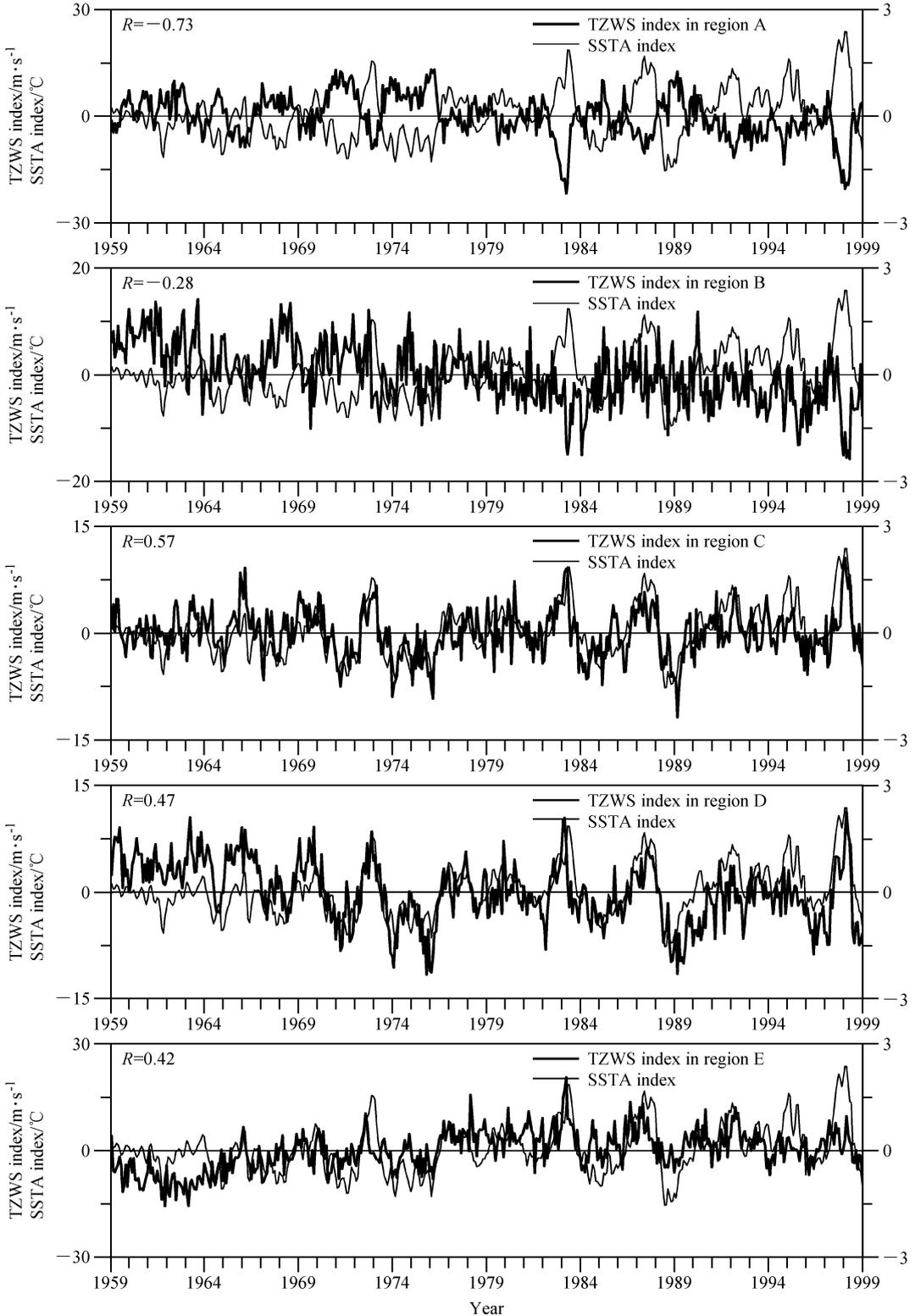


图 2 7 个区域 TZWS 指数及 Niño 3 区 SSTA 指数

Fig. 2 Time series of the SSTA index in the Niño 3 region and the TZWS index in the seven areas. R is the correlation coefficient

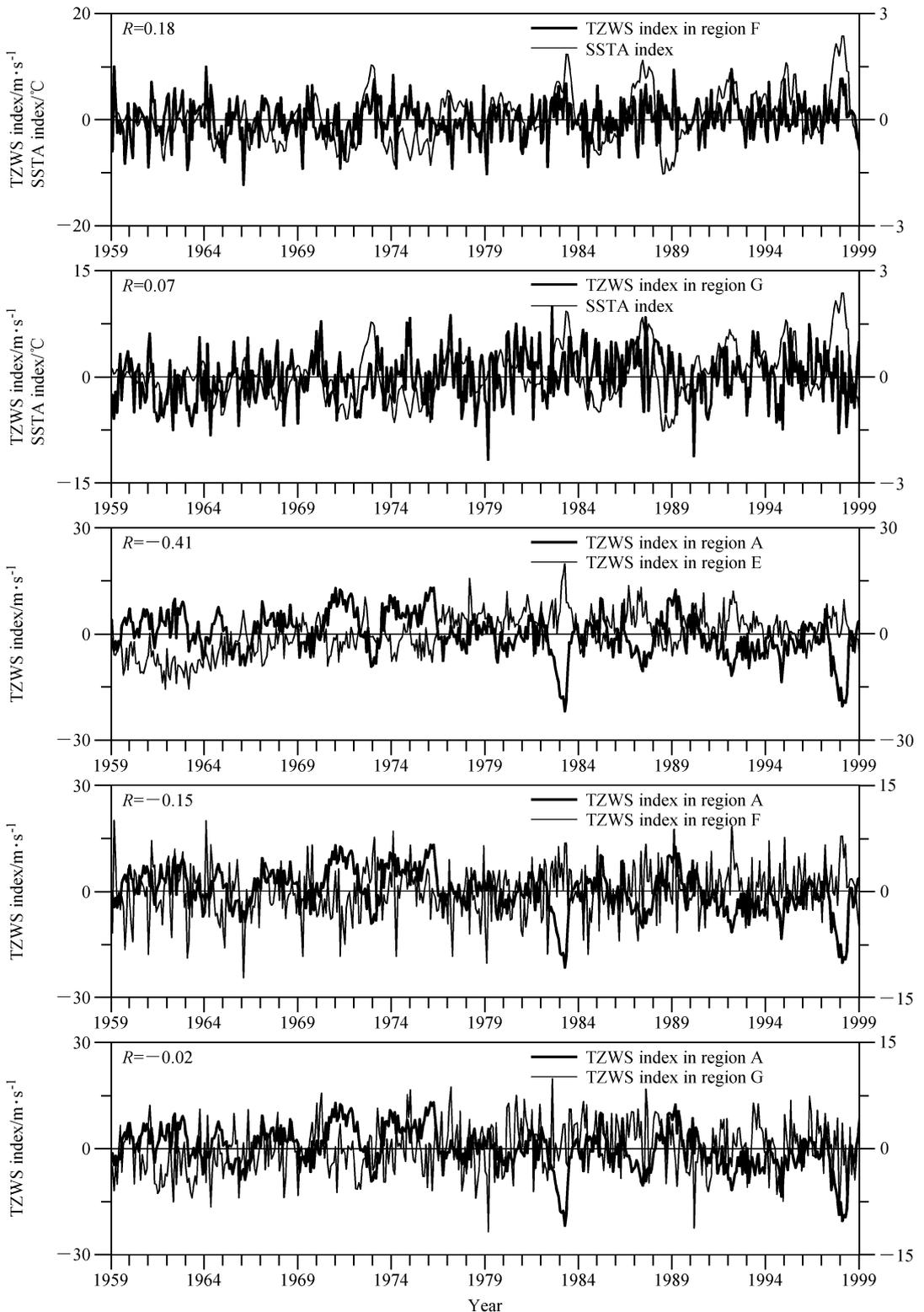


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

TZWS、Niño 3 指数、AO 指数^[8]和 NAO 指数^[9]间的相关关系，其中 Niño 3 指数、AO 指数和 NAO

指数都是从文献^[10]获得)。赤道中太平洋和赤道东太平洋 TZWS 序列间有 0.5 的正相关，而赤道东

表 1 各区域 TZWS 指数及 Niño 3、AO、NAO 指数间相关

Table 1 Correlations between TZWS index and TZWS index, Niño 3 index, AO index, NAO index,

	TZWS 指数						
	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区	G 区
A 区 TZWS 指数	1.00	0.50*	-0.65*	-0.55*	-0.41*	-0.15*	-0.022
B 区 TZWS 指数		1.00	-0.086	-0.078	-0.21*	-0.12*	-0.071
C 区 TZWS 指数			1.00	0.58*	0.26*	0.063	-0.16*
D 区 TZWS 指数				1.00	-0.035	0.10	-0.086
E 区 TZWS 指数					1.00	0.028	0.25*
F 区 TZWS 指数						1.00	-0.002
G 区 TZWS 指数							1.00
Niño3 指数	-0.73*	-0.28*	-0.57*	0.47*	0.42*	0.18*	0.066
AO 指数	0.09	-0.023	-0.12*	-0.18*	-0.056	0.29*	-0.25*
NAO 指数	-0.018	-0.043	-0.064	-0.071	-0.004	0.34*	-0.045

注：* 表示达到 0.01 的显著性水平。

太平洋和亚热带太平洋 TZWS 间基本没有相关，赤道中太平洋、亚热带太平洋和赤道大西洋 ZWS 间存在显著相关。除了亚洲东北部，其他区域的 ZWS 都与 Niño 3 指数显著相关。而 AO 指数同除热带以外的区域指数的相关很近似。NAO 指数仅仅与亚洲东北部 TZWS 指数有着显著相关。

4 各区域对流层纬向风切变指数的气候学意义

为了考察选定区域 TZWS 的气候意义，我们计算了其中 4 个区域指数，分别是赤道中太平洋、赤道大西洋、亚洲西南部和亚洲东北部以及 AO 指数共 5 条序列与逐月陆地降水间的相关。如图 3a 所示，A 区 TZWS 与全球陆地降水间的显著相关主要分布在低纬度地区。正相关主要分布在海陆交杂地带、南非和南美洲的热带地区，而负相关分布在南美洲的南部和北美洲西部的副热带地区。这些相关的区域分布同 Ropelewski 和 Halpert^[11] 在 1987 年研究中给出的图示是一致的。图 3b 给出了赤道大西洋 TZWS 指数同全球陆地降水的相关分布，其分布态势基本与图 3a 所示相反，唯一的显著负相关区域分布在非洲的热带地区和南美洲的赤道区域。

如图 3c 所示，F 区 TZWS 与全球陆地降水的相关呈现从西欧到东亚的正-负的波列状分布。在中国东南部，0.25 的正相关出现在长江以南。类似的正-负波列状相关分布也在 G 区 TZWS 与全球

陆地降水相关中出现（图 3d），只是分布区域有一定差异。从上述相关分布可以看到一种有趣的现象：副热带 TZWS 指数可以很好地表征北半球中纬度地区的降水异常。

北大西洋涛动 (NAO) 是指亚速尔高压同冰岛低压之间气压的反向变化关系，即当亚速尔地区气压偏高时，冰岛地区气压偏低，反之亦然。NAO 是北大西洋地区大气最显著的模式，其气候影响主要在北美及欧洲。Thompson 等^[8] 基于北半球大气环流的分析，提出了北极涛动 (AO) 的概念。Wallace^[12] 指出，AO 与 NAO 二者本质上是一致的，是同一事物在不同侧面的两种表现，实际上反映的都是中纬度地区西风的强弱，只不过 AO 尺度更大，而 NAO 是其在北大西洋区域的表现。近年来，能很好地表征中纬度地区气候异常的纬向环流指数或 AO 指数在很多研究中被广泛应用^[13~19]。最近，Li 和 Wang^[20] 定义了一种新的中纬度环流指数。从图 3e 中可以看到 AO 指数对于全球逐月陆地降水有着一定的气候学指示意义，显著相关的模式非常清楚，正相关中心位于北欧而负相关中心位于欧洲南部，其余的 2 个正显著相关中心分别位于俄罗斯北部和阿拉斯加。

图 4 给出这 5 个指数同全球陆地温度的相关分布，明显可以看到区域相关关系比降水更加显著。比较 A 区和 E 区 TZWS 与陆地温度的相关分布可以看到（图 4a、b），基本呈相反态势分布，特别是在热带地区更为明显。图 4a 中，显著负相关主要

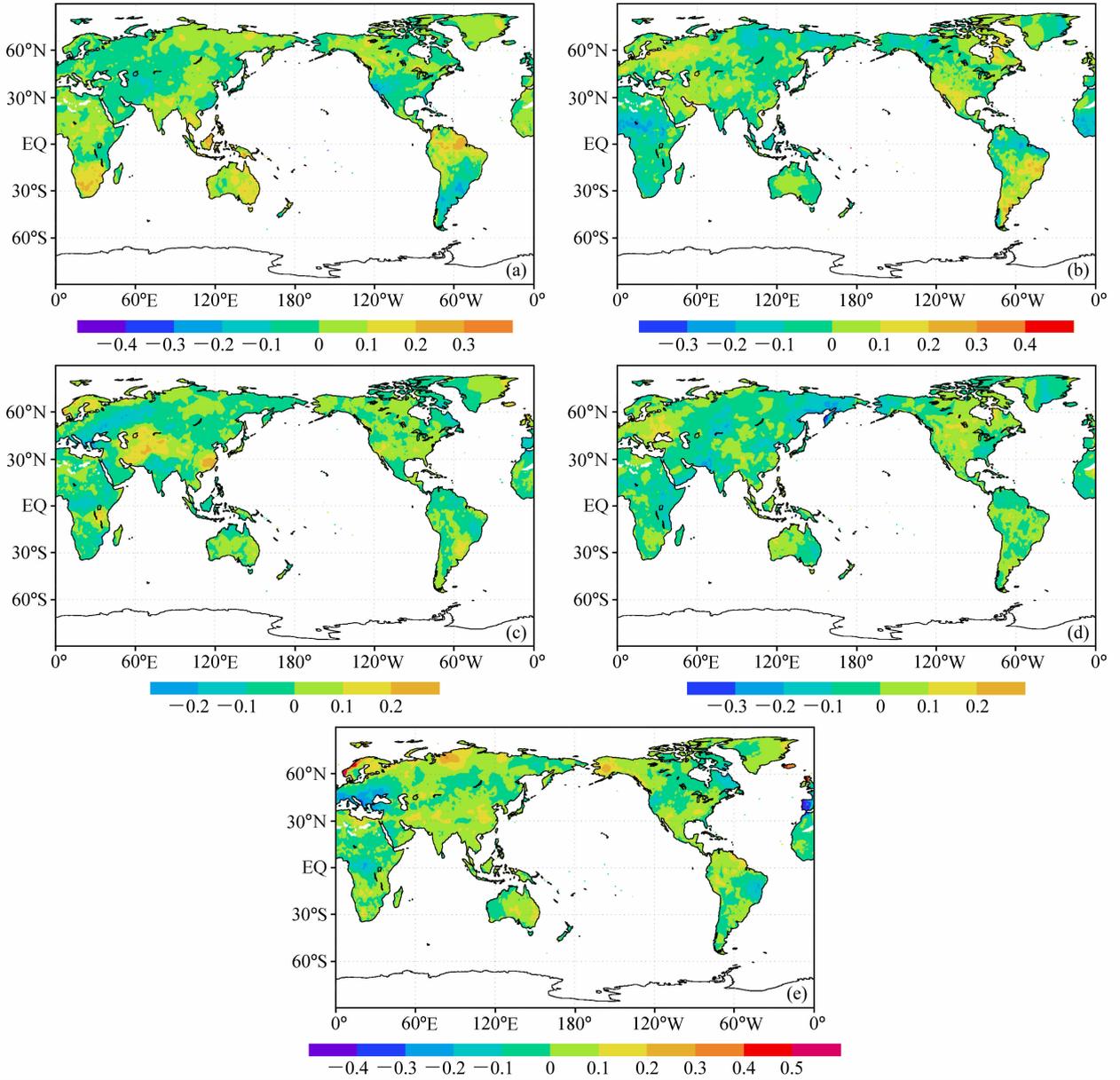


图3 各区域 TZWS 指数与全球陆地降水的相关分布：(a) A 区域，(b) E 区域，(c) F 区域，(d) G 区域；(e) AO 指数与全球陆地降水的相关分布。 $R=0.15$ 达到 99% 的显著性检验水平

Fig. 3 Correlations between global terrestrial precipitation and TZWS indices in (a) the central equatorial Pacific (region A), (b) the equatorial Atlantic Ocean (region E), (c) Southwest Asia (region F), (d) Northeast Asia (region G); (e) correlations between global terrestrial precipitation and AO index. Correlation coefficient 0.15 is at the 0.01 significance level

分布在非洲、亚洲和美洲的热带地区。图 4b 中，E 区 TZWS 指数对热带及热带以外陆地的温度异常都有很好的反映。图 4c、d 中的相关分布更能说明一定问题。如图 4c 所示，在欧亚大陆上存在一对相邻的由正转负的高相关中心，另一个显著相关出现在海陆交杂地带。而在图 4d 中，相反的相关关系存在于东亚大陆和北美洲的西北部。这一横跨北

太平洋的偶极子型相关模态类似于东亚急流指数和 GISS (Goddard Institute for Space Studies, 美国宇航局实验室的简称) 大气温度的相关分布^[1]。从图 4e 可以看到，AO 指数对北半球中高纬度地区的温度异常有着很好的指示作用。3 个正相关大于 0.3 的显著区域分别位于欧亚大陆北部和美国东南部，其他 2 个负相关的显著区域分别位于非洲北部和美

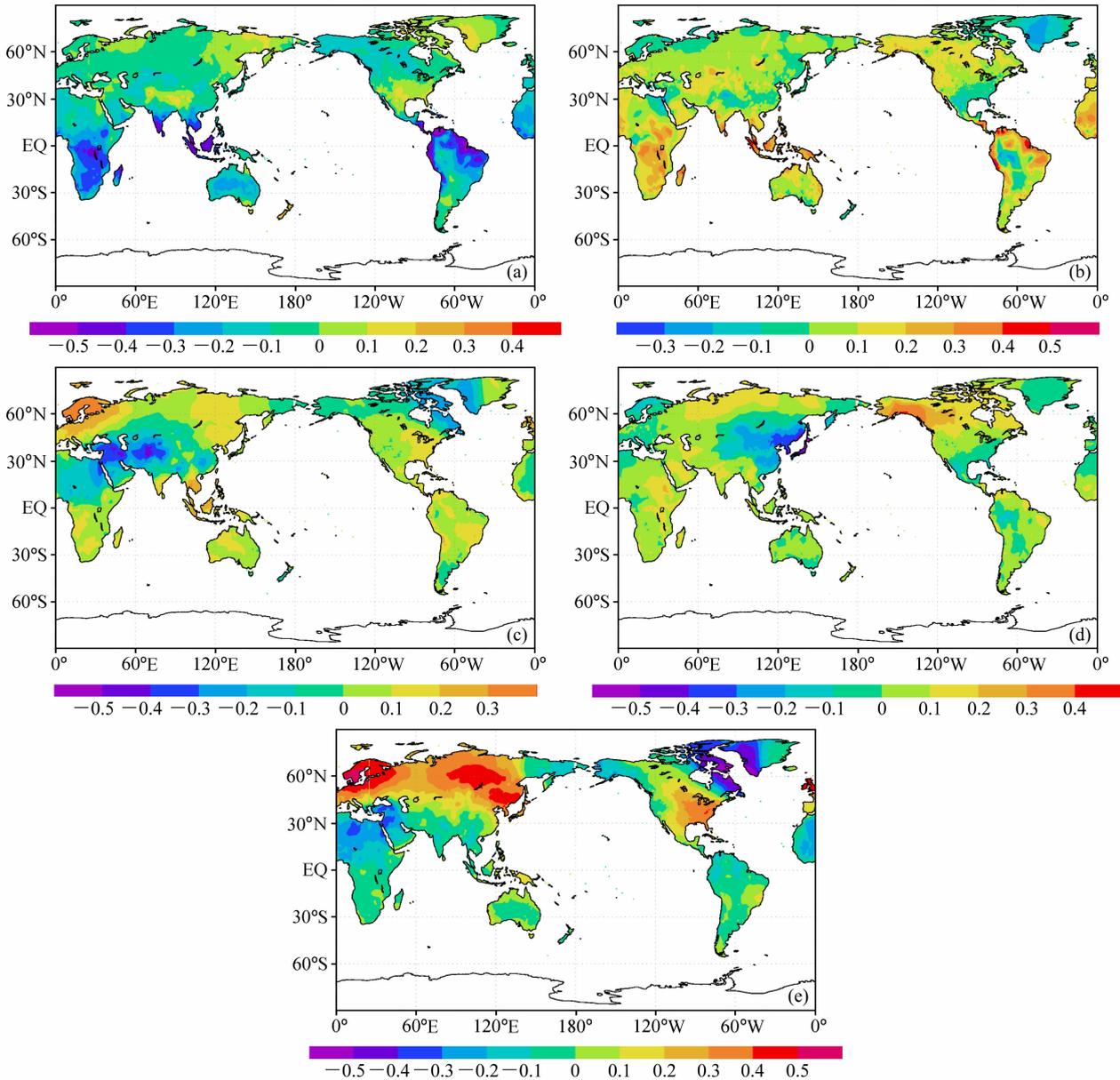


图4 同图3, 但为各指数与全球陆地温度的相关分布

Fig. 4 Same as in Fig. 3, except for correlations between global terrestrial temperature and the five indices

国东北部。

5 结论与讨论

200 hPa 与 850 hPa 间的纬向风切变在热带以外地区可以看作是对流层热成风的量度, 在热带地区则是对热力强迫的量度。本文选取了 7 个 TZWS 标准差大于 5 m/s 的区域分别构建了区域环流指数。这些区域分别是赤道中东太平洋、赤道东太平洋、亚热带南太平洋、亚热带北太平洋、赤道大西

洋、亚洲西南部以及亚洲东北部。通过分析发现, 赤道及亚热带太平洋和赤道大西洋区域 TZWS 指数同 ENSO 循环是密切相关的, 反映出热带洋盆海温异常对于低纬度地区对流层环流的影响。而亚洲西南部及东北部区域的 TZWS 指数反映的气候系统变率在年际时间尺度上不同于 ENSO 指数。这些不同区域 TZWS 指数同 ENSO 循环的关系有助于更好地理解 Ropelewski 和 Halpert^[11] 给出的概念图, 此图中 El Niño 事件对于低纬度地区 (特别是

热带太平洋及其周边地区) 的大气环流及其变化有着巨大的调节作用。AO 指数对北半球高纬度地区的气候异常有着很好的指示作用。同 El Niño 循环和 AO 相比, 亚洲西南部和东北部的 TZWS 指数反映出的气候学意义是有显著差别的, 具有明显的局地性特征, 这一问题有待在未来工作中深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian - Pacific - American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15**: 306~325
- [2] Pielke R A, Chase T N, Kittel T G F, et al. Analysis of 200 mbar zonal wind for the period 1958 - 1997. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D21): 27287~27290
- [3] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [4] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [5] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 247~267
- [6] <http://www.cru.uea.ac.cn/link>
- [7] New M, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 2000, **13**: 2217~2238
- [8] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1297~1300
- [9] Rogers J C. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 1999~2015
- [10] http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/site_index.shtml
- [11] Ropelewski C F, Halpert M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1606~1626
- [12] Wallace J M. North Atlantic Oscillation/Northern Hemisphere annular mode: Two paradigms-one phenomenon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 791~805
- [13] Deser C. On the teleconnectivity of the Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (6): 779~782
- [14] Wang J, Ikeda M. Arctic Oscillation and Arctic sea-ice oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (9): 1287~1290
- [15] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28** (10): 2073~2076
- [16] Gong D Y, Ho C H. Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D2), 4066, doi: 10.1029/2002JD002193
- [17] 程胜, 李崇银. 北半球冬半年平流层大气低频振荡特征的研究. *大气科学*, 2006, **30** (4): 660~670
Cheng Sheng, Li Chongyin. The features of the wintertime stratospheric atmospheric low-frequency oscillation in the Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (4): 660~670
- [18] 陈文, 康丽华. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. *大气科学*, 2006, **30** (5): 863~870
Chen Wen, Kang Lihua. Linkage between the arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 863~870
- [19] 沈学顺, 木本昌秀. 春季欧亚大陆地表气温变化特征的气候意义. *大气科学*, 2007, **31** (1): 19~27
Shen Xueshun, Masahide Kimoto. Studies of the interannual variability of springtime Eurasian surface air temperature. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 19~27
- [20] Li J P, Wang J X L. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (20), 1632, doi: 10.1029/2003GL017441