

春季大气南北涛动年际变化 及其与中国气候的联系*

卢楚翰 管兆勇**

南京信息工程大学 气象灾害重点实验室, 大气科学学院, 南京 210044

摘要 结合 NCEP/NCAR 月平均再分析资料以及我国地面站点观测资料, 分析了春季大气质量南北涛动 (IHO) 的年际变化特征及其与我国春季气候的联系. 研究发现春季 IHO 表现为明显的两半球中高纬地区大气质量间的“跷跷板”分布, 且有相一致的垂直环流结构. 对去除 AO (北极涛动)、AAO (南极涛动) 信号后的纬向平均地表气压作 EOF 分析, 发现其第一特征向量 IHO 特征明显, 其对应的时间系数与 I_{IHO} 相关系数高达 0.93. 春季 IHO 与我国同期气候变动联系密切. 我国站点地面气压、地面温度以及相对湿度均与 I_{IHO} 有较好相关. 我国西北地区尤其与青海、甘肃、陕西及内蒙地区春季沙尘暴的发生与 IHO 联系密切. 正位相 IHO 有利于西伯利亚高压的加强, 此时 60°E 至 150°W 的纬向风存在着由北极延伸至南极的经向遥相关结构, 导致亚洲地区出现正西风异常, 对我国春季气候产生影响.

关键词 大气质量 南北涛动 (IHO) 春季气候 中国

大气质量的空间分布以及各种气象要素分布模式的变化, 由于自身时间尺度的多重性^[1-3], 对大气环流变化有着重要影响^[4, 5]. 同时, 大气异常质量分布有着各种空间尺度, 包括局部地区、半球内甚至跨半球分布. 近年来, 得益于全球资料的积累和再分析网格点资料的获得, 不少学者开始关注两半球之间大气质量交换及其影响^[3, 6-8]. 因 ENSO, 越赤道气流以及与之相关的 Hadley 环流季节调整等可带来跨半球环流变动^[9], 因此两半球间的大气质量必然存在交换. 分析逐日地表气压可以知道, 大气质量的补偿的确不局限于半球内, 大气质量的交换可以一直延伸至另一球^[6]. Carrera 等^[7]研究了 6-10 d 尺度的北半球干空气质量持续损失事件, 揭示了两半球间大气质量交换的事实.

2001 年, 通过分析地表气压场时间序列,

Guan 等^[10]揭示了南北半球之间存在因大气质量重新分布而形成的振荡, 简称为“南北涛动” (IHO). 由于大气环流变化的多时间尺度特征, IHO 同样具有多重时间尺度. Lu 等^[11]通过计算两半球气候态的大气及水汽质量, 揭示了 IHO 的季节变化特征. 分析不同季节的 IHO 年际变化特征, 管兆勇等^[1]指出在春季 IHO 作为地表气压 EOF 分析的第一模态, 呈现出两半球中高纬度大气质量异常分布形态, 其信号强于北极涛动 (AO) 及南极涛动 (AAO). 但 AO, AAO 为中高纬度大气的较强低频信号, 文献 [10] 亦指出 AAO 及 AO 对 IHO 指数方差贡献分别为 9.9% 及 3.1%, 它们对不同季节的 IHO 产生着不同的影响. 因为春季是冬夏季风更替的季节, 同时又是大气质量变化和交换的活跃季节^[1, 2], 有必要研究春季大气质量的年

2008-09-03 收稿, 2008-11-12 收修改稿

* 国家科技支撑计划 (批准号: 2007BAC29B02)、国家自然科学基金 (批准号: 40675025) 和江苏省研究生培养创新工程 (批准号: CX08B_017Z) 资助项目

** 通信作者, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

1) 管兆勇, 卢楚翰, 梅士龙. 南北涛动年际变化的季节性差异 (待发表).

际异常分布形态与 IHO 的关系. 本文前半部分将对滤去 AAO 及 AO 信号的春季大气质量变化特征进行分析, 找出其中纯 IHO 信号及相应的环流结构.

我国幅员辽阔, 受到低纬和中高纬乃至南半球环流的共同影响, 大气异常质量重新分布将对我国天气及气候变化产生影响. Carrera 等^[7, 8]曾经指出在北半球干空气质量持续损失事件中, 东南亚气压涌升是北半球干空气质量向南半球输送的重要起源. 范可等^[12]曾指出南极涛动与东亚春季气候以及我国沙尘暴发生频数有着密切联系. 作为大气质量交换的活跃季节, 春季 IHO 信号强于 AAO, 它引起的大气质量异常分布主要集中于中高纬地区, 是否会对我国气候变化产生影响? 为此, 本文后半部分将通过春季纯 IHO 与我国站点资料的相关分析, 尝试找出其与我国气候的联系.

1 资料及方法

1.1 资料

表 1 给出本文所用数据集来源及覆盖时段, 主要数据取自 NCEP/NCAR 再分析数据集^[13], 所用变量为地表气压 (p_s)、位势高度及地表和高空风场 (u, v), 格点分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 覆盖时段

为 1958—2006 年, 共 49 个春季 (3, 4, 5 月平均). 尽管 p_s 在该套资料中被划分为了 B 类资料 (高度地依赖于同化模式地形)^[13], 但文献 [7, 8, 11] 通过干空气质量守恒性验证了该变量的可靠性. 站点观测资料取自 1961—2006 年中国 753 站地面站点气压、温度、相对湿度资料, 去除资料缺失站后共 507 个站点, 站点分布如图 1 实心点所示, 其中青藏高原大部分地区资料缺少, 给分析带来一定局限性. 另取中国西北地区 94 站春季累计沙尘暴日数, 时段为 1960—2001 年.

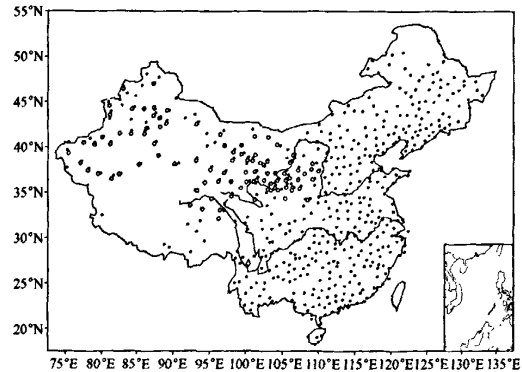


图 1 中国站点分布图
实心点表示中国 507 站, 空心圈表示西北 94 站

表 1 所用资料集情况

变量	时段 (资料长度)	资料来源
地表气压, 位势高度, 风场 (u, v)	1958—2006 (49 年)	NOAA CDC NCEP/NCAR reanalysis
本站气压, 地面相对湿度, 温度	1961—2005 (45 年)	中国气象局
沙尘暴日数	1960—2001 (42 年)	中国气象局

1.2 方法

由于原 IHO 指数包含 AO 及 AAO 引起的半球际大气质量交换信息 (文献 [10] 中表 1), 为提取纯 IHO 信号 (去除 AO, AAO 影响), 首先依据文献 [10] 对地表气压场 p_s 求春季 IHO 指数, 其公式如下:

$$\begin{aligned} I_{\text{IHO}} &= p_{\text{sNH}} - p_{\text{sSH}} \\ p_{\text{sNH}} &= \int_0^{\pi/2} \bar{p}_s \cos \varphi d\varphi \end{aligned} \tag{1}$$

式中 p_{sNH} , p_{sSH} 分别表示南、北半球表面异常气压的面积权重平均值, φ 为纬度. 再由 (2) 式得到 \tilde{p}'_s 场

$$\tilde{p}'_s = p_s - R(p_s) \tag{2}$$

式中 $R(p_s)$ 是 p_s 对 IHO 指数回归场. 分别对 $20^\circ\text{--}90^\circ\text{N(S)}$ 区域的 \tilde{p}'_s 作 EOF 分析, 其第一模态与 AO(AAO) 相对应, 并取其对应时间系数作为纯 AO(AAO) 指数 $I_{\text{AO}}(I_{\text{AAO}})$ 序列. 将 p_s 减去南北半球 p_s 对 I_{AAO} 和 I_{AO} 的回归场, 最终得出去除 AO 和 AAO 影响的 \tilde{p}'_s , 并由 \tilde{p}'_s 通过 (1) 式求得春季纯 IHO 指数 I_{IHO} .

2 春季纯 IHO 年际变化特征

依据前面定义, 通过 \tilde{p}'_s 计算了 1958—2006 年

春季 I_{IHO} 时间序列 (图 2), 可看出该指数年际变化明显, 且具有每 10 年上升 0.3 hPa 的显著趋势 (通过信度为 0.99 的 F 检验). 结合 IHO 指数的构造公式 (1), 该上升趋势说明由 \bar{p}'_s 所得的大气质量呈自南向北方向的半球际输送趋势, 由于年际以上尺度全球大气质量基本守恒 (文献 [10] 图 1 (a)), 因而 \bar{p}'_s 半球际不平衡质量可由纯两极涛动 (AO 及 AAO) 间相互作用补偿.

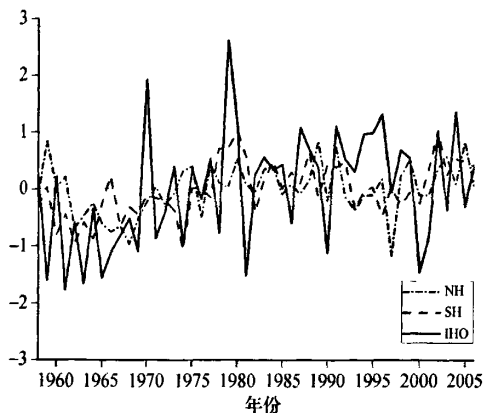


图 2 I_{IHO} (实线) 及南 (虚线)、北 (点划线) 极区平均的垂直平均温度异常年际变化曲线
纵坐标单位: I_{IHO}/hPa ; 温度/ $^{\circ}\text{C}$

气柱温度的变化可造成地表气压的改变. 图 2 还给出了北、南半球 60° — 90° 区域平均温度异常的变化, 可以看出, 南半球极区温度 ($0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) 上升较北半球极区 ($0.1^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) 明显. 以 1980 年为界, 之前两极区域温度均有明显升高趋势, 造成

I_{IHO} 指数的上升更为明显; 之后, 两极区域温度先减后增, 无明显变化趋势, I_{IHO} 指数上升趋势不如之前. 由于南、北极区温度趋势的差异导致了南半球极区气压的降低较北半球明显, 由 IHO 指数构造可知, 这导致了 IHO 指数的显著上升趋势.

为研究与 I_{IHO} 相应的异常质量分布及垂直环流结构, 图 3 给出了正 I_{IHO} 指数的 p_s 合成场以及 I_{IHO} 回归的纬向平均位势高度场 (\overline{hgt}) 和纬向风场 (\bar{u}). 由图 3 (a) 看出, 当 I_{IHO} 指数为正时, 大气异常质量纬向方向上的分布呈很强的局地性, 主要集中于两半球的中高纬地区, 其分布特征与逐月 I_{IHO} 正指数合成图相接近^[10], 正值大值区出现于北欧地区及 30°N 以北大西洋区, 而负值大值区则呈带状分布于 60°S 以南的南极区域, 这与类似于极涡等的大气活动中心或准定常环流系统可能相关. 跨越赤道, 通过经圈环流及越赤道质量流的传输, 两半球大气质量最终堆积于半球的中高纬地区. 由图 3 (b) 看出, 经 I_{IHO} 回归后的 \overline{hgt} 在两半球中高纬地区出现明显的正负异常大值中心, 这可能由于纬向平均的纬向风扰动造成了经向方向上的柯氏力改变, 从而改变压力梯度, 使 IHO 的高方差区域集中于中、高纬度. 同时, 在北半球热带至南半球 60°S 的 200 hPa 以上区域出现另一面积较大的正异常区, 它可能与两半球间大气质量高层传输有关. 与之对应, 纬向风回归场在两极中高纬平流层低层 \overline{hgt} 梯度较大处均出现大值异常区, 且由于角动量守恒, 两半球中低纬则出现了相反的纬向风异常区.

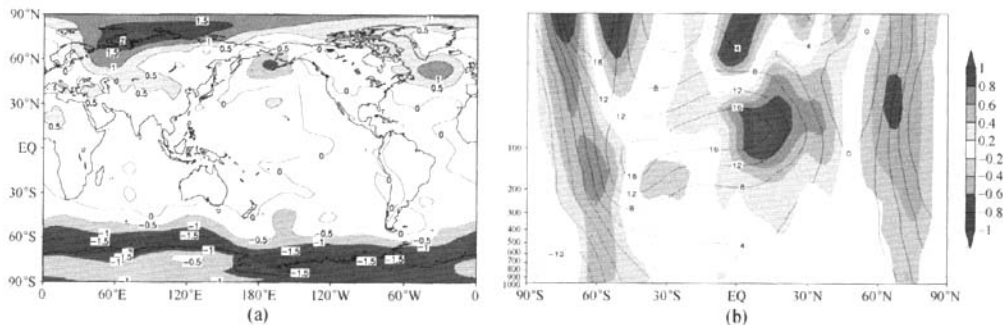
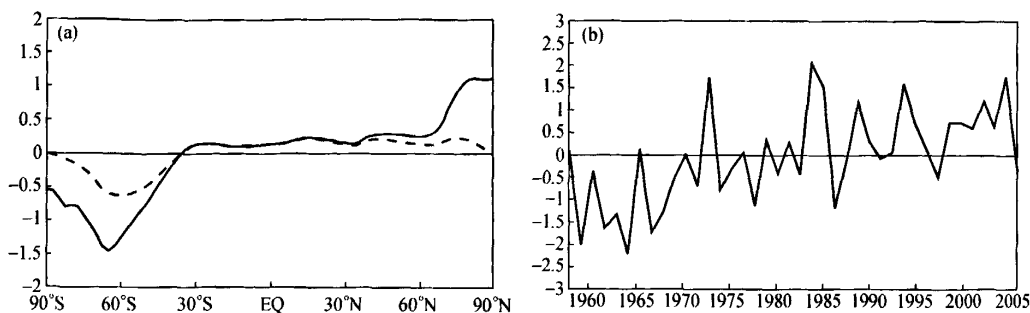


图 3 I_{IHO} 指数的合成场和线性回归场

(a) p_s 对正 I_{IHO} 指数的合成场; (b) \overline{hgt} (实线), \bar{u} (阴影) 对 I_{IHO} 指数的线性回归场.

等值线间隔: (a) 为 0.5 hPa; (b) 为 4 位势米

图4 \bar{p}_s' 经验正交分解模态结果(a) \bar{p}_s' EOF 第一模态 R_1 (虚线), R_1/μ (实线); (b) 第一模态的时间系数

为分析春季全球大气质量异常的主要分布及其演变特征, 分别对春季纬向平均的 \bar{p}_s' (\bar{p}_s) 进行 EOF 分解. 令 $h_n(t)$, $R_n(\varphi)$, $\mu (= \cos\varphi)$ 分别为第 n 个特征向量的时间系数、特征向量及面积权重因子, \bar{p}_s' 可表示为:

$$\bar{p}_s' = \sum_{n=1}^{\infty} h_n(t) R_n(\varphi) / \mu \quad (3)$$

表2及图4给出了对 \bar{p}_s' 作经验正交分解前三模态的相应结果, 可看出第一模态 R_1 主要表现为 IHO 型, 其时间系数与 I_{IHO} 的相关系数高达 0.93, 且 R_1 占总方差贡献的 40%. 与前面 p_s 合成场 (图3(a)) 一致, R_1 所显示的纬向平均异常质量仍集中于两个半球的中高纬地区, 涛动特征明显; 其时间系数与 I_{IHO} 具有紧密联系, 亦显示了显著的上升趋势, 这比分析含两极涛动信号的 \bar{p}_s 所得相关系数大, 说明本文去除两极涛动信号的必要性. 而 R_2 , R_3 (图略) 与 R_1 相比所含 IHO 信息较少, 表现为它们与 I_{IHO} 相关系数较低 (均未能达到显著相关标准), 且其方差贡献率也远低于 R_1 .

表2 \bar{p}_s' EOF 的各模态方差贡献率及与 I_{IHO} 指数的相关

EOF	1	2	3	总和
方差贡献率 (%)	40	21	13	74
与 I_{IHO} 的相关	0.93	-0.18	0.19	

3 春季纯 IHO 与我国春季气候的联系

大气质量南北涛动影响着不同时间尺度的大气质量重新分布^[10,11], 图5给出了 I_{IHO} 指数与全球 p_s'

场同时相关系数分布图, 可看出春季 IHO 影响的显著区域分布较广, 主要高值区出现于亚非欧大陆, 大西洋区, 以及 60°S 以南的极区. 值得关注的是, 我国大部分地区均出现超过 99% 信度的显著相关区域, 说明与我国春季大气质量有密切联系.

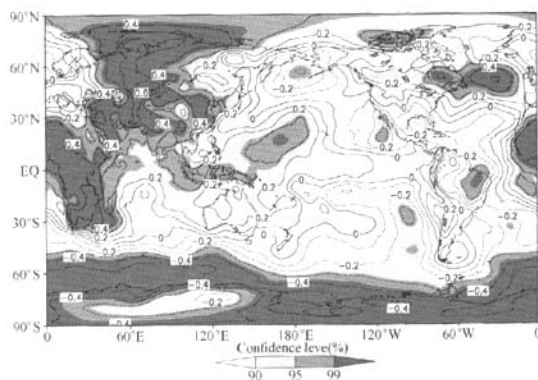
图5 I_{IHO} 与 p_s 相关系数分布阴影区表示通过 90% 以上 t 检验

图6给出了我国去线性趋势后的站点观测资料与 I_{IHO} 指数的相关系数分布图, 可以看出 I_{IHO} 与我国大部分地区的本站气压、相对湿度呈正相关关系, 而反相关区域则主要出现在青藏高原附近, 这体现了青藏高原地区与其周围气候的差异性^[14], 而温度的相关分布情况则相反, 这与我国寒潮减少的范围相似^[15]. 由图6(a)看出, 站点气压与 IHO 显著正相关区域主要集中于我国东部地区, 这与图5大致相符, 但显著信度有所降低, 这是由于地表气压 (ground pressure) 和站点气压毕竟存在观测高度的差异, 同时亦有可能是资料同化的误差造

成的. 图 6 (b) 则显示我国大部分地区地表温度与春季 IHO 存在显著负相关关系, 其总体相关系数达 -0.45 (通过 99% t 检验), 这说明春季地面热力强迫与 IHO 之间是紧密联系的; 同时温度的负相关区域与地面气压正相关区相对应, 这与“气压改变的热力原理”相符合^[16], 即温度低区域对应着地面气压高的区域, 反之亦然. 此外, 春季 IHO 与我国长江中下游区域的地表湿度场存在显著正相关 (图 6 (c)), 这可能与 IHO 导致该地区异常水汽输送有关, 但与我国同期降水关系不大.

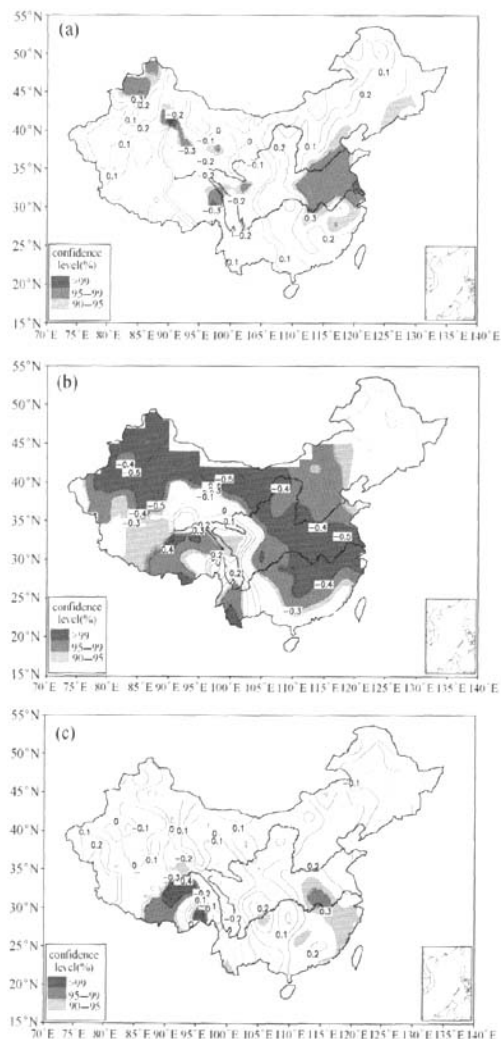


图 6 I_{HO} 与我国站点要素相关系数分布

(a) 站点气压; (b) 地表温度; (c) 地表相对湿度
阴影区表示同图 5

春季是沙尘暴的多发季节, 我国沙尘暴天气同时受到南北半球大气环流的共同影响^[17-19], 且多发生于我国西北地区^[20]. 图 7 (a) 给出了我国西北地区 94 站春季沙尘暴累计日数与 I_{HO} 相关分布图, 看出春季 IHO 与我国青海、甘肃、陕西及内蒙地区相关明显, 显著相关区呈一十分布, 与文献^[21] 分析结果相似. 低层风速及风向对沙尘暴的产生起决定作用, 利用 NCEP 地表风场与 I_{HO} 求相关 (图 7 (b)), 看出尽管没有通过显著检验, 但在甘肃、陕西附近出现了偏西北方向的风场较大值, 而其两侧风向与之有较大差异, 这与图 7 (a) 显著相关分布较为一致. IHO 改变着地表气压场, 同时地表气压场很大程度上决定了近地表风场^[22], 进而对我国西北地区沙尘暴天气产生影响.

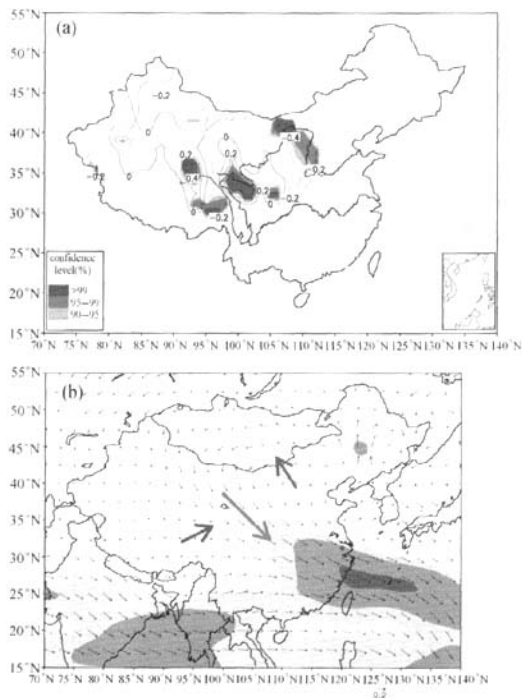


图 7 沙尘暴累计日数及 NCEP 地表风场与 I_{HO} 的相关性

(a) I_{HO} 与我国 94 站春季沙尘暴累计日数相关分布;
(b) I_{HO} 与 NCEP 地表风场相关分布,
箭头方向表示该区域风向主要方向. 阴影区表示同图 5

我国春季气候尤其是地面气温与同期 IHO 的显著联系, 其与 IHO 所表现的大尺度环流背景关系如何? 为此图 8 给出了正负 I_{HO} 指数相应的 500 hPa 纬

向风场合成差值场,可看出在亚洲大部分地区主要为正的西风异常,使得欧亚地区极锋偏南,有利于同期冷空气的加强,这与春季 I_{IHO} 指数与我国气温的负相关相对应(图6(b)).同时 IHO 在纬向方向上的气压分布并不均匀,呈现较强局地性,结合图3(a)地面气压以及 SLP(图略),可知春季 IHO 对应着西伯利亚高压的增强,亦有利于地面冷空气的加强,进而影响我国春季气候.

60°E 至 150°W 纬向风存在着由北极延伸至南极的经向遥相关结构(图8),由于 IHO 导致两半球中高纬地区的异常质量堆积,产生经向气压梯度力,半球间异常大气质量以遥相关形式进行交换补偿,从而在此过程中形成对区域气候的影响,这可能是春季 IHO 影响我国春季气候的物理机制,这与 AAO 对我国北方春季沙尘暴气候的影响形式相类似^[19].此外,北大西洋到南大西洋和南极存在另外一条遥相关路径.

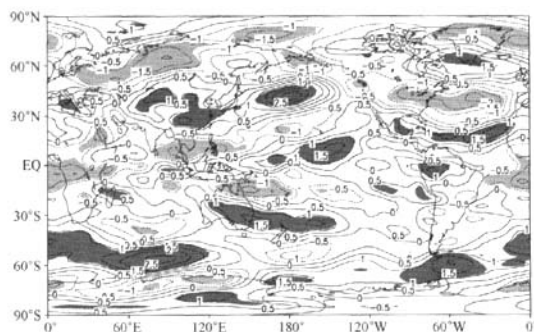


图8 正负 I_{IHO} 指数对应的 500 hPa 纬向风合成差值场
阴影区表示通过 95% 以上 t 检验

4 结论

结合 NCEP/NCAR 多年月平均再分析资料以及我国地面站点观测资料,分析了春季纯大气南北涛动(IHO)的年际变化特征及其与我国春季气候之间的联系,结果表明:

(1) 通过去除两极涛动信号(AO, AAO),构造纯 IHO 指数(I_{IHO}),该指数具有每 10 年上升 0.3 hPa 的显著上升趋势.

(2) 春季纯 IHO 表现为明显两半球中高纬地区大气质量间的“跷跷板”分布,且与其垂直环流

结构相一致.对纬向平均的地表气压 EOF 分析表明,其第一特征向量 IHO 特征明显,且其对应的时间系数与 I_{IHO} 相关系数高达 0.93.

(3) 春季 IHO 与我国春季气候联系密切,表现为我国站点地面气压、地面温度以及相对湿度均与 I_{IHO} 有较好相关,春季 IHO 与我国春季西北地区沙尘暴的发生频数相联系.

(4) 正位相春季 IHO 有利于西伯利亚高压的加强,且 60°E 至 150°W 纬向风存在着由北极延伸至南极的经向遥相关结构,在亚洲地区表现为正的西风异常,对我国地区冷空气活动产生影响.

参考文献

- 1 Trenberth KE, Christy JR, Olson JG. Global atmospheric mass, surface pressure, and water vapor variations. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D12): 14815–14826
- 2 Chen TC, Chen JM, Schubert S, et al. Seasonal variation of global surface pressure and water vapor. *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1997, 49A(5): 613–621
- 3 Holl MM, Wolff PM, Bush YA. Cross-equatorial air mass exchanges. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(12): 1377–1380
- 4 Lorenz EN. Seasonal and irregular variation of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile. *J Meteor*, 1951, 8: 52–59
- 5 Christy JR, Trenberth KE, Anderson JR. Large-scale redistributions of atmospheric mass. *Journal of Climate*, 1989, 2(2): 137–148
- 6 Baldwin MP. Annular modes in global daily surface pressure. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(21): 4115–4118
- 7 Carrera ML, Gyakum JR. Significant events of interhemispheric atmospheric mass exchange: Composite structure and evolution. *Journal of Climate*, 2003, 16(24): 4061–4078
- 8 Carrera ML, Gyakum JR. Southeast Asian pressure surges and significant events of atmospheric mass loss from the Northern Hemisphere, and a case study analysis. *Journal of Climate*, 2007, 20(18): 4678–4701
- 9 Bowman KP, Cohen PJ. Interhemispheric exchange by seasonal modulation of the Hadley circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(16): 2045–2059
- 10 Guan Z, Yamagata T. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 263–266
- 11 Lu CH, Guan Z, Mei SL, et al. Seasonal cycle of atmospheric mass interhemispheric oscillation. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(20): 3226–3234
- 12 范可, 王会军. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬季气候

- 的影响. 中国科学, D 辑, (地球科学), 2006, 36(4): 385—391
- 13 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437—471
- 14 Saha K, van den Dool H, Saha S. On the annual cycle in surface pressure on the Tibetan Plateau compared to its surroundings. *Journal of Climate*, 1994, 7(12): 2014—2019
- 15 钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖. *大气科学*, 2007, 31(6): 1266—1278
- 16 Austin JM. *Mechanism of Pressure Change. Compendium of Meteorology*. Boston: American Meteorological Society, 1951, 630—638
- 17 毛 睿, 龚道溢, 范一大. 春季天气变率对华北沙尘暴频次的影响. *地理学报*, 2005, 60(1): 12—20
- 18 Qian W, Quan L, Shi S. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *Journal of Climate*, 2002, 15(10): 1216—1229
- 19 Fan K, Wang H. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10): L10201
- 20 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 9—16
- 21 Qian WH, Tang X, Quan LS. Regional characteristics of dust storms in China. *Atmospheric Environments*, 2004, 38(29): 4895—4907
- 22 Murphree T, Van den Dool H. Calculating tropical winds from time mean sea level pressure fields. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(21): 3269—3282