doi:10.11676/qxxb2016.033 气象学报

秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动年际变化不同位相配置及其对中国气温异常的影响*

周 游[1] 管兆勇[1,2] 张 茜[1] 尹旸艳[1]
ZHOU You[1] GUAN Zhaoyong[1,2] ZHANG Qian[1] YIN Yangyan[1]

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044
2. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044
1. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*
2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*

2015-12-14 收稿,2016-03-24 改回.

周游,管兆勇,张茜,尹旸艳. 2016. 秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动年际变化不同位相配置及其对中国气温异常的影响. 气象学报,74(3):367-379

Zhou You, Guan Zhaoyong, Zhang Qian, Yin Yangyan. 2016. Circulation anomalies and their impacts on autumn temperature variations over China in association with different phase combinations of atmospheric mass migration between lands and oceans and inter-hemispheric oscillations. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(3): 367-379

Abstract Using the NECP/NCAR monthly reanalysis for the period of 1961 – 2010, circulation anomalies and their possible influences on variations of surface air temperature in China during the boreal fall in association with different phase combinations of migration of atmospheric mass between lands and oceans (MAMLO) and interhemispheric oscillations (IHO) have been investigated. Two indices including MAMLO and IHO are defined to describe the sea-saw-like surface air pressure oscillations between Eurasia and North Pacific and between the southern and northern hemispheres. It is found that the MAMLO and IHO are almost independent of each other in a statistical sense. Four types of phase combination of MAMLO and IHO have been configured. These four types are respectively defined as type-Ⅰ for both MAMLO and IHO in positive phases, type-Ⅱ for both in negative, type-Ⅲ for the MAMLO in positive and IHO in negative, and type-Ⅳ for the MAMLO in negative and IHO in positive. The mean climatological surface air pressure distribution in the boreal fall can be affected by these four types of anomalous surface air pressure patterns, and hence the surface air temperature in China and even in Eurasia-North Pacific can be modulated significantly. When type-Ⅰ cases occur, IHO tends to weaken the low pressure in North Pacific and intensify the high pressure in Eurasia by piling more than normal atmospheric mass in these two places, inducing an east-warm-west-cold pattern in North China when the MAMLO is in its positive phase. In type-Ⅱ cases, IHO weakens the positive air mass anomaly in Eurasia and strengthens the negative air mass anomaly in North Pacific, which leads to a consistent warm pattern in China. In Type-Ⅲ cases, an east-cold-west-warm pattern contrary to that for type-Ⅰ forms in North China. In type-Ⅳ cases, the spatial pattern of temperature is similar to that in type-Ⅱ cases. The above results indicate that MAMLO plays a primary role in the distribution of temperature anomaly in Eurasia during the boreal fall, whereas IHO imposes a disturbing effect superimposed on the influence of MAMLO on the temperature anomaly in North China. Results of the present study are helpful for our better understanding of the mechanisms for atmospheric circulation variations and related temperature changes in North China

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41175062、40675025)。
作者简介:周游,主要从事气候动力学研究。E-mail: zhouyou_1991@126.com
通讯作者:管兆勇,主要从事海气相互作用、季风动力学和气候动力学研究。E-mail:guanzy@nuist.edu.cn

and even in Eurasia.

Key words Migration of atmospheric mass between lands and oceans (MAMLO), Interhemispheric oscillation (IHO), Circulation anomalies, Surface air temperature changes in China, Boreal fall

摘 要 利用 NCEP/NCAR 逐月再分析资料,通过构建秋季欧亚大陆-太平洋区域的大气质量海陆间迁移(MAMLO)指数和大气质量南北涛动(IHO)指数,对大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同位相配置下环流特征及其对中国秋季气温的影响进行了研究。结果表明,大气质量海陆间迁移与南北涛动指数相关系数仅为 -0.06,二者在统计学意义上相互独立。二者存在 4 种位相配置类型,即大气质量海陆间迁移和南北涛动均为正位相(第Ⅰ类配置);大气质量海陆间迁移和南北涛动均为负位相(第Ⅱ类配置);大气质量海陆间迁移为正位相而南北涛动为负位相(第Ⅲ类配置);大气质量海陆间迁移为负位相而南北涛动为正位相(第Ⅳ类配置)。大气质量海陆间迁移和南北涛动呈现不同位相配置类型时,大气质量的重新分布造成了不同的地表气压场分布并显著地影响到了中国北方地区秋季气温异常分布。当二者为第Ⅰ类配置时,南北涛动削弱北太平洋地区大气质量的负异常,减弱了该区域的异常低压,增强欧亚地区大气质量正异常并加强了欧亚地区的地面高压环流,共同造成中国秋季气温异常成东西反位相型分布,东部暖而西部冷;当二者为第Ⅱ类配置时,南北涛动削弱欧亚大陆大气质量的正异常,增强北太平洋地区大气质量负异常。此时大气质量海陆间迁移和南北涛动通过影响地表风场使得气温异常成全国一致型分布,全区偏暖;而第Ⅲ类配置与第Ⅰ类配置对气温的影响类似,但为东部冷而西部暖,第Ⅳ类配置与第Ⅱ类配置的影响类似。这些表明大气质量海陆间迁移对秋季欧亚地区气温异常起到主要作用,而南北涛动则在大气质量海陆间迁移影响中国北方气温异常分布中起到干扰作用。这些结果对深刻认识秋季大气环流变化机理及中国北方乃至欧亚地区秋季气温异常具有重要意义。

关键词 大气质量海陆间迁移(MAMLO),南北涛动(IHO),环流异常,中国气温,秋季

中图法分类号 P434

1 引 言

中国地处欧亚大陆东部,东南两面濒临海洋,受西风带和季风影响,四季均可发生极端天气气候事件,天气气候灾害频发(温克刚,2008)。分析表明,灾害性气候的发生不仅受亚洲季风活动异常影响,还与气候系统变化有关。在气候系统变化和季风异常活动中,海洋和大陆热力效应起着重要作用(郭其蕴,1983)。海陆热力差异可以直接影响低层海陆地表气压变化,产生气压梯度驱动大气运动。地表气压变化实际上反映了大气质量的空间分布,而大气质量的异常分布则反映了大气环流、气候系统的变化(Lorenz,1951; Christy,et al,1989)。针对北半球的秋季,东亚地区仍受夏季风影响,但整个欧洲以及亚洲北方地区冷空气渐趋活跃,且其异常对同期及后期的天气气候均将产生深远影响。因此,认识和了解全球或半球大气质量的异常变化以及大气质量的输送过程是非常有必要的(Trenberth, et al, 1981, 1985, 1987, 1994, 2005)。

研究表明,全球大气总质量存在显著的年变化,且因为水汽含量变化使得大气总质量在 8 月达到最大,1 月最小,春、秋季处于转换位相。同时,全球大气质量以及水汽质量的变化位相和年变程具有一致的变化特征(Lu,et al, 2008, 2009)。然而,由于全球地表性状不均匀,下垫面热容量存在较大差异,且不同纬度大气接受的太阳辐射不同,因而大气质量存在着南、北半球间的交换(Guan, et al, 2001)以及海陆间的迁移(Guan, et al, 2015)。Guan 等(2001)通过研究地表气压场时间序列,揭示出南、北半球的大气质量年际异常存在此消彼长的"南北涛动"(Interhemispheric Oscillation, IHO)现象。南北涛动体现了半球间大气质量的重新分布和演变,与大气环流重新调整存在密切联系。Lu 等(2008)的研究表明,南北涛动具有明显的季节循环,并且辐射加热是南北涛动季节循环的主要驱动因子。

除了冬半球和夏半球间的大气质量交换,在大陆与海洋区域间亦存在明显的质量迁移。大陆和海洋热容量的较大差异使得冬、夏季地表气压发生巨大变化,而这种变化在亚洲地区可部分地反映季风活动。杨鉴初(1956)曾指出,海陆热力差异引起的海陆间大气质量的输送随季节发生转变。大气质量流随季节的变化与地表气压的季节差异密切相关。在北半球中纬度地区,大气质量流随季节变化最为显著(Van Den Dool, et al, 1993; Chen, et al, 1997)。随着季节变化,北半球纬向海陆热力梯度的大小和方向发生显著改变,从而改变北半球各大陆

与大洋大气质量输送以及大气质量的源与汇，进而形成了北半球各大气活动中心（王绍武，1962；施能等，2001）。最近，胡潮等（2014）的研究表明，北半球海陆区大气质量存在明显的季节变化，冬夏季大气海陆质量分布差异显著。这种海陆间大气质量分布的季节循环，实际上反映了各季节大气质量海陆间迁移（Migration of Atmospheric Mass between Lands and Oceans，MAMLO）。在北半球秋季，气候平均的海平面气压显示（图 1a），欧亚大陆主要受西伯利亚高压影响，而北太平洋则为阿留申低压控制，大陆与大洋上海平面气压场的变化异常必将对欧亚-太平洋区域天气气候产生重大影响。而海陆间大气质量的分布异常必将影响到欧亚大陆与北太平洋间的海平面气压分布。

综上，以往的研究大多集中在某一大气质量迁移模态（大气质量海陆间迁移或南北涛动），但目前在年际时间尺度上关于二者的不同位相配置下异常大气环流的分布型及其对天气气候影响的研究尚少。考虑到秋季是夏季风和冬季风更替的季节，同时又是北半球大气质量变化和通过越赤道气流实现半球际交换的活跃季节（Trenberth，et al，1987；Chen，et al，1997），研究大气质量海陆间迁移和南北涛动的同期变化将能从大气质量分布异常的角度揭示地表气压场变化机理并认识与之相关的大气环流变化和气候异常。故此，本研究将从南北涛动和大气质量海陆间迁移这两种大气质量迁移变化的位相配置出发，探讨大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同位相配置特征，并进而研究二者的不同位相配置对中国秋季气温异常的影响。结果将有助于深刻认识秋季大气环流变化规律和揭示中国气候变异成因。

2　资料和方法

所用资料主要为 NCEP/NCAR 逐月再分析资料（Kalnay，et al，1996），包括地表气压（p_s）、地表和高空风场（u，v）、垂直速度（ω）、位势高度场（H_{gt}）和温度场（T）等，水平网格分辨率为 2.5°×2.5°，垂直速度自 1000—100 hPa 分为 12 层，其余变量分为 17 层。各资料时段均为 1961 年 1 月—2010 年 12 月。文中秋季指 9—11 月，而秋季平均亦指 9—11 月的平均。使用的方法主要有线性相关分析、线性回归、合成分析等气候统计诊断方法。

文中主要考虑秋季环流和大气质量分布异常及相应的气候变异，所分析的大气中的扰动均为准定常扰动。在年（代）际变化时间尺度上，大气压力场与大气质量输送间维持着一定的平衡关系。同时，在年际时间尺度上，气柱内水汽含量的变化对地表气压扰动的贡献非常小以致可以忽略（Guan，et al，2001，2015）。

3　秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动的不同位相配置

为便于刻画海陆间大气质量交换特征，需要定义合适的指数。这里直接利用 Guan 等（2001）所定义的南北涛动指数来分析大气质量的南北涛动。而秋季大气质量海陆间迁移指数则采用了如下步骤进行定义。

3.1　秋季大气质量海陆间迁移指数的定义

首先，地表气压 p_s 是表征大气质量分布的重要参数。参照 Trenberth 等（1994），记 $f_d = 1.0020$ 为地球形变参数，$a = 6378.39$ km 为地球半径，$g = 9.80665$ m/s^2 为重力加速度。若考虑 p_s 随经度 λ 和纬度 φ 的变化，则任意水平区域 $\sum$ 内的大气质量可以表示为

$$m = \frac{a^2 f_d}{g}\iint_{\sum} p_s \cos\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \tag{1}$$

根据式（1），可用面积权重平均的地表气压表示区域 $\sum$ 内大气质量的变化。记秋季地表气压的多年平均值为 $\overline{p}_s$，而扰动气压为相对于 $\overline{p}_s$ 的距平记为 p_{sa}，则 $p_{sa} = p_s - \overline{p}_s$。

其次，扣除全球大气总质量年（代）际变化的影响。在实际全球大气质量变化过程中，由于大气固有成分比例特定，而水汽相变、人类活动造成的空气杂质、粉尘和排放物的变化虽可使大气质量并非严格守恒，但全球平均的大气质量的年际及年代际变化非常小（Guan，et al，2001）。与 1979 年之后的资料误差相比，1979 年之前的误差较大，因此，全球大气总质量变化的部分可被理解为因资料误差所致（Guan，et al，2001）。这里扣除了与全球大气总质量变化相关的部分。记全球地表气压变化的面积权重积分为 I_{Global}，μ 为回归系数，$\tilde{p}_s$ 为扣除 I_{Global} 影响后的地表气压扰动，则有

$$I_{\mathrm{Global}} = \iint_{\mathrm{Global}} p_{sa}\cos\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \Big/ \iint_{\mathrm{Global}} \cos\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \tag{2}$$

$$\tilde{p}_s = p_{sa} - \mu I_{Global} \tag{3}$$

此外,在考虑北半球内大气质量重新分布时需扣除南北涛动的影响。全球大气质量假设为基本守恒,因而南北半球间大气质量交换净值(即南北涛动)会引起北半球大气质量的异常变化(Lu, et al, 2008, 2009, 2010),即北半球(NH:EQ—90°N, 0°—360°E)面积权重平均的地表气压变化由南半球面积权重平均的地表气压变化来平衡。因此,在考虑北半球海陆间大气质量迁移时,主要考虑北半球内的大气质量的重新分布,其受到南半球地表气压变化信号影响的部分应予以滤除。记 I_{NIHO} 为北半球大气总质量的扰动,其与南半球大气质量扰动相差不大但变化位相相反。I_{NIHO} 可表示为

$$I_{NIHO} = \iint_{NH} \tilde{p}_s \cos\varphi d\lambda d\varphi \Big/ \iint_{NH} \cos\varphi d\lambda d\varphi \tag{4}$$

可用线性回归在 $\tilde{p}_s$ 中扣除 I_{NIHO} 的影响

$$p'_s = \tilde{p}_s - \eta I_{NIHO} \tag{5}$$

式中,η 为回归系数,p'_s 为扣除 I_{NIHO} 影响后的地表气压扰动,如此,p'_s 被用于定义大气质量海陆间迁移指数。

最后,选取定义大气质量海陆间迁移指数的关键区并定义指数。可计算整个北半球陆地面积权重平均的地表气压扰动

$$p'_{sL} = \iint_{Land} p'_s M_{Land} \cos\varphi d\lambda d\varphi \Big/ \iint_{Land} M_{Land} \cos\varphi d\lambda d\varphi \tag{6}$$

式中,M_{Land} 表示陆地在积分计算时的 MASK(陆地格点取为 1,海洋取为 0)。p'_{sL} 与 p'_s 的相关系数如图 1b 所示。秋季 p'_{sL} 与欧亚大陆大部分地区 p'_s 成显著的正相关,与北太平洋上 p'_s 成显著的负相关,而在北美大陆及大西洋大部分地区 p'_{sL} 与 p'_s 的相关并不显著。由此看到,秋季北半球大陆与海洋的地表气压变化主要表现为欧亚大陆与北太平洋的反相变化,即秋季北半球大气质量的海陆间迁移由欧亚大陆以及北太平洋地区的地表气压反相变化来决定。若用图 1 中的正相关区域来重新求得陆地面积权重平均的地表气压 p'_{sL},得到的 p'_{sL} 与 p'_s 的相关系数虽然在数值上有所提高,但在分布型上并无太大变化。

有许多学者曾对冬、春季的海平面气压场作经验正交函数(EOF)分析,发现其主要模态主要描写了北极涛动(AO)和南极涛动(AAO)等(Thompson, et al, 1998; Kidson,1999;Gong,et al, 1999; Wallace, 2000; 武炳义,2005)。Kutzbach(1970)等通过经验正交函数分析发现北半球冬季北大西洋海平面气压场的主分量为北太平洋涛动(NPO)。王林等(2011)发现北太平洋涛动在各个季节均具有明显的年际变化特征。尽管夏季风时期海平面气压场异常变化的主要特征与冬季的有所不同,但海平面气压场的经验正交函数第 1 模态仍然与北极涛动密切相关(龚道溢等,2000;邓伟涛等,2009)。这些不同时间尺度上的大气振荡均可导致局部的大气质量的重新分布。

根据图 1b,可取 Box-EC 即区域(50°—70°N, 40°—110°E)表示欧亚大陆中高纬度 p'_s 变化的关键区。求取了其上 p'_s 的秋季面积权重平均的地表气压 p'_{sEC} 与 p'_s 的相关,其结果分布与图 1 相似。同样,取北太平洋区域(40°—60°N,155°E—135°W)为另一关键区 Box-NP,其上的面积权重平均气压扰动 p'_{sNP} 与 p'_s 的相关分布亦与图 1b 接近。故而,定义 Box-EC 和 Box-NP 上的气压扰动差为大气质量海陆间迁移指数 I_{MAMLO}

$$I_{MAMLO} = p'_{sEC} - p'_{sNP} \tag{7}$$

式中,

$$p'_{sEC} = \iint_{EC} p'_s M_{EC} \cos\varphi d\lambda d\varphi \Big/ \iint_{EC} M_{EC} \cos\varphi d\lambda d\varphi$$
$$p'_{sNP} = \iint_{NP} p'_s M_{NP} \cos\varphi d\lambda d\varphi \Big/ \iint_{NP} M_{NP} \cos\varphi d\lambda d\varphi \tag{8}$$

式中,M_{EC} 和 M_{NP} 分别表示 EC 和 NP 在积分计算时的 MASK(等于 1 或 0)。计算发现,p'_{sEC} 与 p'_{sNP} 的相关系数为 −0.34(超过 95%的信度水平)。I_{MAMLO} 的标准差为 3.04 hPa,将经过标准化后的 I_{MAMLO} 指数记为 I^*_{MAMLO}。

北极涛动在北半球秋季仍为地表气压的最重要的分量,如果利用回归法滤除北极涛动,将滤除北极涛动后的地表气压扰动做经验正交函数分析,得到的第 1 模态(图略,方差贡献为 21.8%,且通过 North 检验)可显示出欧亚大陆与北太平洋间气压异常的反相变化。经验正交函数第 1 模态的时间系数与 I^*_{MAMLO} 指数的相关系数为 0.45。

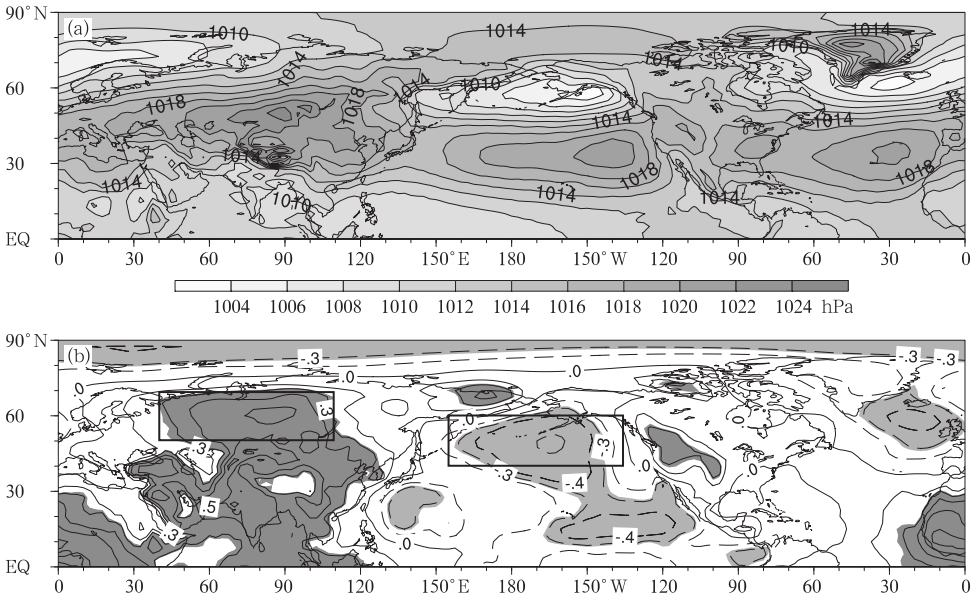

图 1　1961—2010 年秋季平均海平面气压(a)及北半球秋季陆地面积权重平均的地表气压(p'_{sL})与 p'_s的相关系数分布(b)

(深/浅阴影表示正/负相关系数通过 95%信度水平的 t 检验，方框分别为欧亚大陆和北太平洋关键区)

Fig. 1　Climatological mean sea level pressure in the boreal autumn during 1961－2010 (a) and its correlation with the land area-weighted average surface pressure (p'_{sL}) (b)(Shaded areas in (b) are for the values at and above the 95% confidence level using a t-test; the two black boxes denote the key areas of Eurasia and North Pacific, respectively)

3.2　秋季南北涛动指数的定义

参考 Guan 等(2001)的方法，利用扰动地表气压场($\tilde{p}_s$)定义秋季大气质量南北涛动指数 I_{IHO}

$$I_{IHO} = \tilde{p}_{sNH} - \tilde{p}_{sSH} \tag{9}$$

$$\tilde{p}_{sNH} = \int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} \tilde{p}_s \cos\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi$$
$$\tilde{p}_{sSH} = \int_{-\pi/2}^{0}\int_0^{2\pi} \tilde{p}_s \cos\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \tag{10}$$

式中，$\tilde{p}_{sNH}$($\tilde{p}_{sSH}$)表示北(南)半球区域平均的 $\tilde{p}_s$。计算得出，$\tilde{p}_{sNH}$与 $\tilde{p}_{sSH}$的相关系数为－1.00，I_{IHO}的标准差为 0.609 hPa，将经过标准化后的 I_{IHO}指数记为 I^*_{IHO}。

3.3　秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同位相配置

根据以上定义，计算出 1961—2010 年秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动指数(图 2)。功率谱分析表明，大气质量海陆间迁移具有 2.5、7 及 16 a 的周期①，而南北涛动则有 3 和 13 a 的周期(Guan, et al, 2001)。计算还发现，大气质量海陆间迁移和南北涛动的相关系数仅为－0.06，表明大气质量海陆间迁移和南北涛动在统计学意义上相互独立。由 I^*_{MAMLO}和 I^*_{IHO}可见，秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动在不同年份存在着不同位相的配置。例如，在 1981、1987 年等二者皆为正距平，为同位相配置；1967、1968、1969 年等则为反位相配置。据此，选取指数大于 0 的年份为正位相年，小于 0 的年份为负位相年，可以将大气质量海陆间迁移和南北涛动划分为 4 种不同配置类型，即大气质量海陆间迁移和南北涛动均为正位相(第Ⅰ类配置)；大气质量海陆间迁移和南北涛动均为负位相(第Ⅱ类配置)；大气质量海陆间迁移为正位相而南北涛动为负位相(第Ⅲ类配置)；大气质量海陆间迁移为负位相而南北涛动为正位相(第Ⅳ类配置)。统计表明(表 1)，近 50 年中，第Ⅰ类配置有 15 年，第Ⅱ类配置有 10 年，第Ⅲ类配置有 10 年，第Ⅳ类配置有 15 年。由此可见，大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同配置类型发生频率基本相当，即第Ⅰ类和第Ⅳ类均为 30%，第Ⅱ类配置和第Ⅲ类均为 20%。

①Zhou You, Guan Zhaoyong, Zhang Qian, et al. Interannual variations of migrations of atmospheric mass between lands and oceans over Eurasia-North Pacific regions in boreal autumn and their impacts on the climate of Eurasia. To be submitted.

表 1 大气质量海陆间迁移和与南北涛动不同位相配置所对应的年份

Table 1 Years of different phase combinations of MAMLO and IHO

配置	年份														
第Ⅰ类年	1974	1979	1980	1981	1984	1986	1987	1991	1992	1993	1996	1998	1999	2000	2007
第Ⅱ类年	1961	1964	1965	1966	1970	1977	1978	1983	1988	2010					
第Ⅲ类年	1962	1963	1967	1968	1969	1976	1997	2001	2002	2009					
第Ⅳ类年	1971	1972	1973	1975	1982	1985	1989	1990	1994	1995	2003	2004	2005	2006	2008

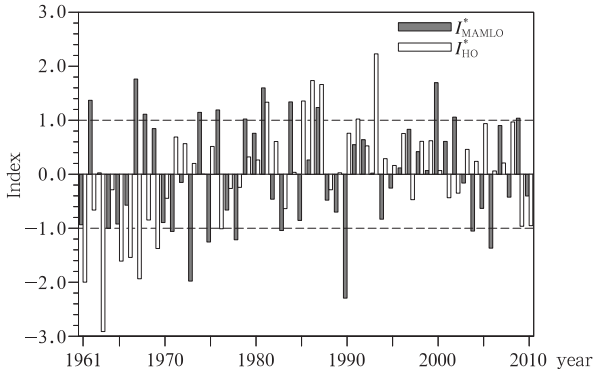

图 2 标准化的 1961—2010 年秋季 I^*_{MAMLO} 和 I^*_{IHO} 时间序列

Fig. 2 Normalized time-series of MAMLO and IHO indexes in the boreal autumn during 1961－2010

4 与秋季大气质量海陆间迁移和与南北涛动相联系的地表气压分布特征

与秋季大气质量海陆间迁移和与南北涛动相联系的大气质量分布异常可通过分别计算地表气压异常与 I^*_{MAMLO} 和 I^*_{IHO} 指数的相关获得。大气质量海陆间迁移的大气质量异常分布(图 3a)主要集中于西西伯利亚和北太平洋地区,其中西西伯利亚为正相关区,北太平洋为负相关区。该分布特点与北半球秋季欧亚大陆陆地面积权重平均的地表气压(p'_{sEC})与 p_s'的相关分布相近(图 1b)。这种异常的大气质量分布可能与西伯利亚高压和阿留申低压等大气活动中心或准定常环流系统的异常活动有关。

除了北半球中高纬度欧亚大陆和北太平洋地区存在相关外,南半球高纬度地区也出现了显著的正相关,且中纬度地区为负相关区,这说明南半球环状模与北半球大气质量海陆间迁移有一定的同期相关性(李晓峰等,2012)。近期 Tang 等(2015)分析了 12—2 月除了南北涛动之外的南北半球环流的同期变化,发现存在一种"热带-极地振动模态"。这里的大气质量海陆间迁移与南半球的关联是否与秋季南北半球环流的同期变化模态存在联系,尚有待进一步研究。图 1b 中位于热带季风区和热带东太平洋上的反相关在图 3a 中并未出现,意味着发生在中高纬度海陆间的大气质量迁移与位于较低纬度的纬向大气质量迁移关系并不密切,而后者可能与亚洲-太平洋涛动(赵平等,2008;章颖等,2012)有关。

大气质量存在显著的南北半球际振荡,且体现出了一定的海、陆差异。由图 3b 可见,在非洲和南美洲大陆呈现出显著正相关而其他大部分海洋地区均为负相关。Guan 等(2001)利用 1958—1997 年的逐月资料合成了南北涛动正异常月地表气压异常的

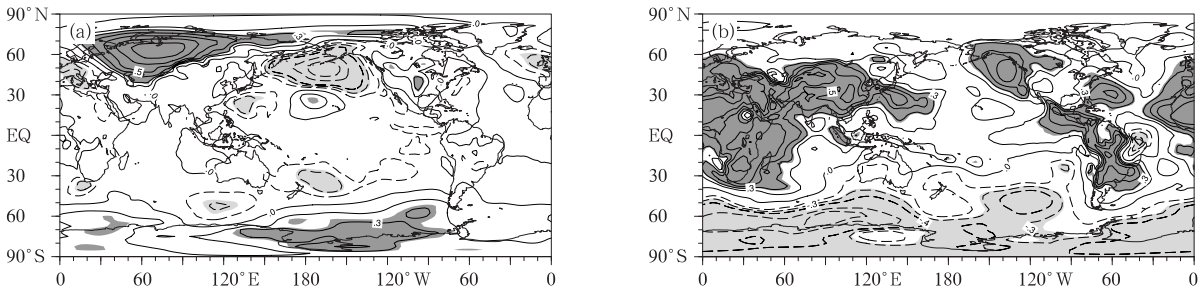

图 3 地表气压异常 $\tilde{p}_s$ 分别与 I^*_{MAMLO}(a)和 I^*_{IHO}(b)的相关系数分布

(深/浅阴影区表示正/负相关系数通过 95%信度水平的 t 检验)

Fig. 3 Correlations of surface pressure anomalies $\tilde{p}_s$ with I^*_{MAMLO}(a) and with I^*_{IHO}(b), respectively

(Shaded areas are for values significant at/above the 95% level of confidence using a t test)

典型分布形态，但并未给出秋季的结果。Guan 等(2010)计算了不同季节 I^*_{IHO} 与地表气压异常的相关，反映出了南北涛动显著的季节特征。图 3 给出的秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动的大气质量异常分布型中关于秋季南北涛动的结果与 Guan 等(2010)和丛菁等(2011)的结果类似。

由于大气质量的实际分布受大气质量海陆间迁移和南北涛动的共同影响，因此，依据 I^*_{MAMLO} 和 I^*_{IHO} 变化的不同位相配置得到了二者的 4 种配置形式。根据表 1 分别对 4 种配置下的扰动地表气压($\bar{p}_s$)做合成分析，结果如图 4。

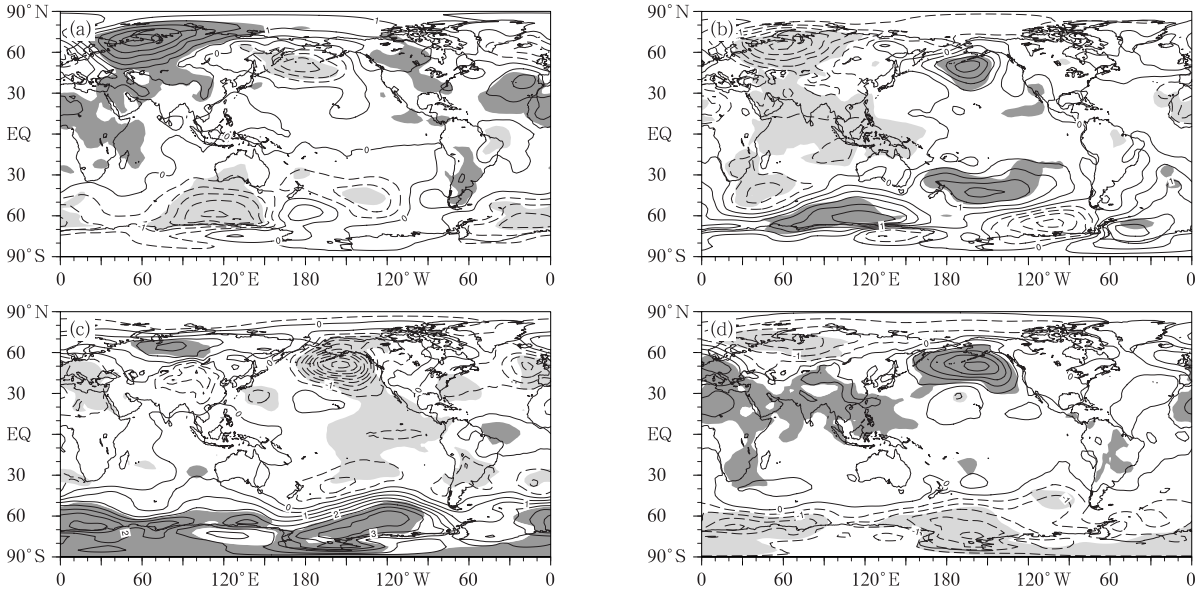

图 4　大气质量海陆间迁移和南北涛动不同配置下地表气压异常 $\bar{p}_s$ 的合成平均(单位：hPa)

(a－d. 第Ⅰ、第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ类配置；深/浅阴影区表示正/负异常通过 90%信度水平的 t 检验)

Fig. 4　Mean composites of $\bar{p}_s$ (unit: hPa) for years of different phase combinations of MAMLO and IHO

(a. for type Ⅰ cases, b. for type Ⅱ cases, c. for type Ⅲ cases, d. for type Ⅳ cases; Shaded areas are for values at/above the 90% confidence level using a t test)

对于第Ⅰ类配置，大气质量海陆间迁移和南北涛动同为正位相，大气质量北半球多而南半球少，大陆上多，海洋上少。此时，二者的共同作用使得北半球正异常区主要位于欧亚大陆地区，且北美西北部亦呈现较弱正异常，而北太平洋地区则为弱的负异常。与图 3 相比，图 4a 说明大气质量海陆间迁移和南北涛动确实对北半球环流变化均可起重要作用。南半球非洲中部和南美南部为正异常区，澳大利亚以南大片海域以及南太平洋中部则为显著负异常。第Ⅱ类配置(图 4b)则与第Ⅰ类配置几乎相反，主要表现为北半球欧亚大陆为显著负异常区，北太平洋地区为弱的正异常，而南半球澳大利亚以南大片海域以及南太平洋中部则为显著负异常。类似地，当出现第Ⅲ类配置时(图 4c)，南北涛动表现为北半球大气质量总体为负而南半球高纬度地区为正异常，北太平洋地区为显著负异常区，欧亚大陆存在较弱正异常。而第Ⅳ类配置下大气质量异常分布形态(图 4d)与第Ⅲ类配置几乎相反，主要表现为北太平洋地区为显著正异常区，欧亚大陆存在较弱负异常，而南半球高纬度地区则为大片正异常区。

以上 4 种配置下大气质量半球际差异均延伸至南半球 20°S 甚至以南。尽管北半球处于秋季而南半球处于春季，但从北半球秋分开始(一般为每年 9 月下旬)太阳直射点由赤道向南回归线移动，秋季太阳直射主要位于南半球，太阳辐射等作用使得秋季大气环流变化关于赤道并不完全对称。

5　秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动不同位相配置下环流场异常垂直变化

对流层下层和上层大气质量流动的主要部分可分别由 850 和 200 hPa 异常风场的旋转分量、辐散分量的分布揭示。由图 5a 可见，在第Ⅰ类配置下，

在对流层低层(850 hPa),北太平洋上辐合中心西侧生成气旋式环流,西西伯利亚辐散中心西北侧产生反气旋式环流。这种水平辐散运动与水平环流的联系可由 Sardeshmukh 等(1988)所揭示的辐散气流与罗斯贝波扰动的关系进行解释。风场在欧亚大陆上异常辐散,辐散中心位于西西伯利亚;北太平洋地区辐合、辐散分布复杂,但整体上表现为大洋地区有弱的辐合。由辐散分量反映出的大气质量输送可见,欧亚大陆上的大气质量向东输送与北太平洋上的大气质量流入相联系。对应地,在对流层上层(200 hPa),辐散风的分布情形与对流层低层相反,表现为在中高纬度欧亚大陆上空为辐合(图 5b)。第Ⅱ类配置(图 5c、d)与第Ⅰ类配置情况几乎相反,辐散风分布较复杂,异常的旋转风分量在北太平洋地区为反气旋式环流异常,西西伯利亚地区则为气旋式环流异常。第Ⅲ类配置下,对流层低层(850 hPa),异常旋转风分量显示,北太平洋上辐合中心西侧存在气旋式环流,西西伯利亚地区产生弱反气旋式环流,而辐散风则在北太平洋辐合(图 5e),辐合中心位于北美西海岸,大陆上空散度异常分布较为复杂。在对流层上层(200 hPa),大陆反气旋式环流较弱,而北太平洋气旋式环流显著,异常辐散风分量显示出北太平洋上空辐散,而欧亚大陆上空辐合(图 5f)。第Ⅳ类配置(图 5g、h)与第Ⅲ类配置情况几乎相反。

为进一步描述欧亚大陆与北太平洋间扰动的联系,需用垂直剖面揭示秋季北半球大气质量海陆间迁移和南北涛动不同位相配置下环流的空间结构特征。图 6 给出了大气质量海陆间迁移和南北涛动 4 种位相配置下合成的 40°—70°N 区域平均的位势高度和纬向环流垂直剖面。

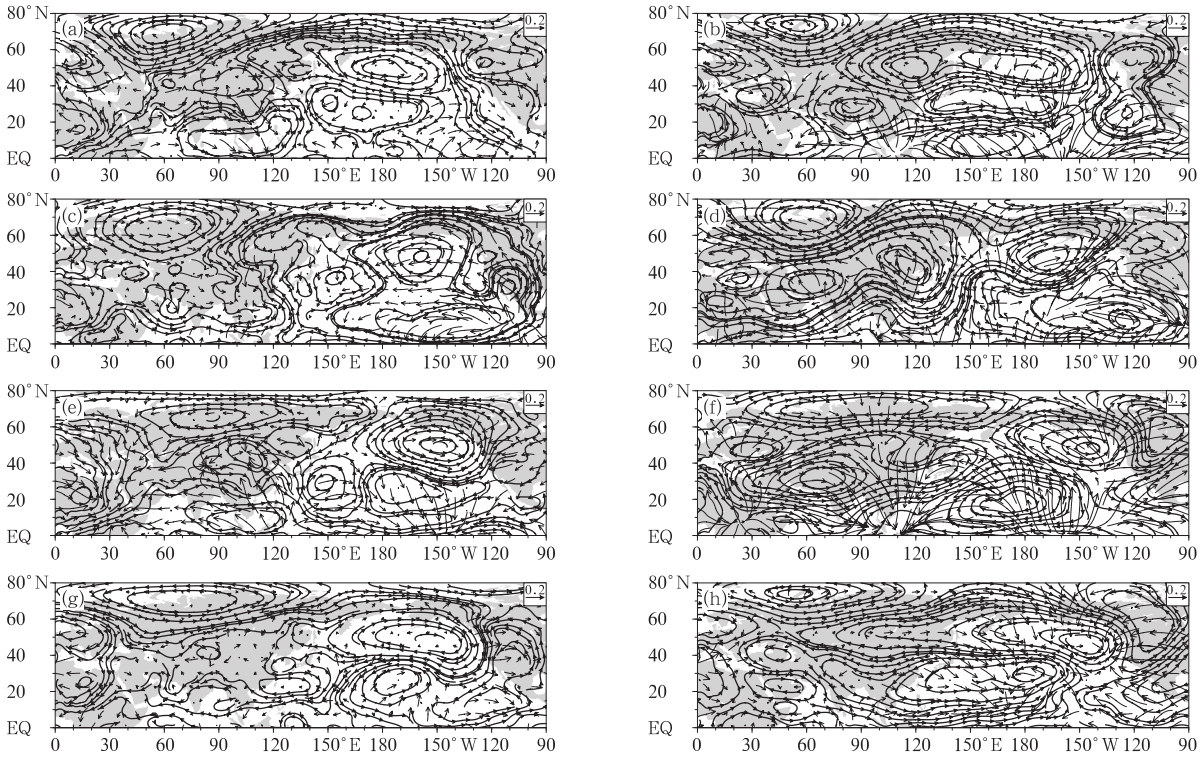

图 5 大气质量海陆间迁移和南北涛动不同配置下 850 hPa(a、c、e、g)和 200 hPa(b、d、f、h)辐散风(矢量,单位:m/s)及旋转风(流线,单位:m/s)的合成场(a、b. 第Ⅰ类配置,c、d. 第Ⅱ类配置,e、f. 第Ⅲ类配置,g、h. 第Ⅳ类配置;阴影表示陆地区域)

Fig. 5 Mean composites of anomalous divergent (vectors, m/s) and rotational wind (stream lines, m/s) components for cases with different types of phase combinations of MAMLO and IHO at 850 hPa (a, c, e, g) and 200 hPa (b, d, f, h) (a, c, e, g (b, d, f, h). for cases of type Ⅰ to type Ⅳ phase combinations of MAMLO and IHO, respectively; shaded areas indicate land area)

在第Ⅰ类配置下(图 6a),大气质量海陆间迁移指数和南北涛动指数同为正位相,欧亚大陆西部、太平洋中西部和太平洋东部分别出现明显的正、负、正

高度异常，且这种正、负异常可伸展至对流层整层，除了东亚地区外，在垂直方向上均表现为相当正压结构。上述分析表明，南北涛动为正位相时，北半球大气质量的整体偏多会增强欧亚大陆大气质量的正异常，削弱北太平洋大气质量的负异常。此时，纬向辐散风场在60°E处对流层上层呈现辐合，在对流层低层辐散，产生下沉运动，在对流层低层形成高压；而在180°附近对流层存在异常上升运动，对流层低层低压减弱。这些与图4a的结果吻合。第Ⅱ类配置(图6b)下，情形与第Ⅰ类配置几乎相反。大气质量海陆间迁移和南北涛动均为负位相时，大陆低层为异常低压，垂直运动较弱，但负位相的南北涛动使得阿留申低压增强，在北太平洋上空形成较完整的异常垂直环流，其上升支位于170°E、下沉支位于130°W附近。

类似地，在第Ⅲ类配置下(图6c)，垂直方向上位势高度扰动依然呈现相当正压结构。北太平洋上空表现为明显的负高度异常，欧亚大陆西部和大洋东部出现弱的正高度异常。从纬向环流来看，在130°W处的对流层上层呈现强的辐散，低层为强辐合，故而在大洋上空的低层形成低压，大气质量产生辐合运动，辐合上升后在对流层上层形成辐散；而在100°E处上层呈现辐合，低层辐散，产生下沉运动。这些与南北涛动为负位相时，北半球大气质量整体偏少从而削弱欧亚大陆高压，增强北太平洋地区低压有关。第Ⅳ类配置(图6d)与第Ⅲ类配置几乎相反。

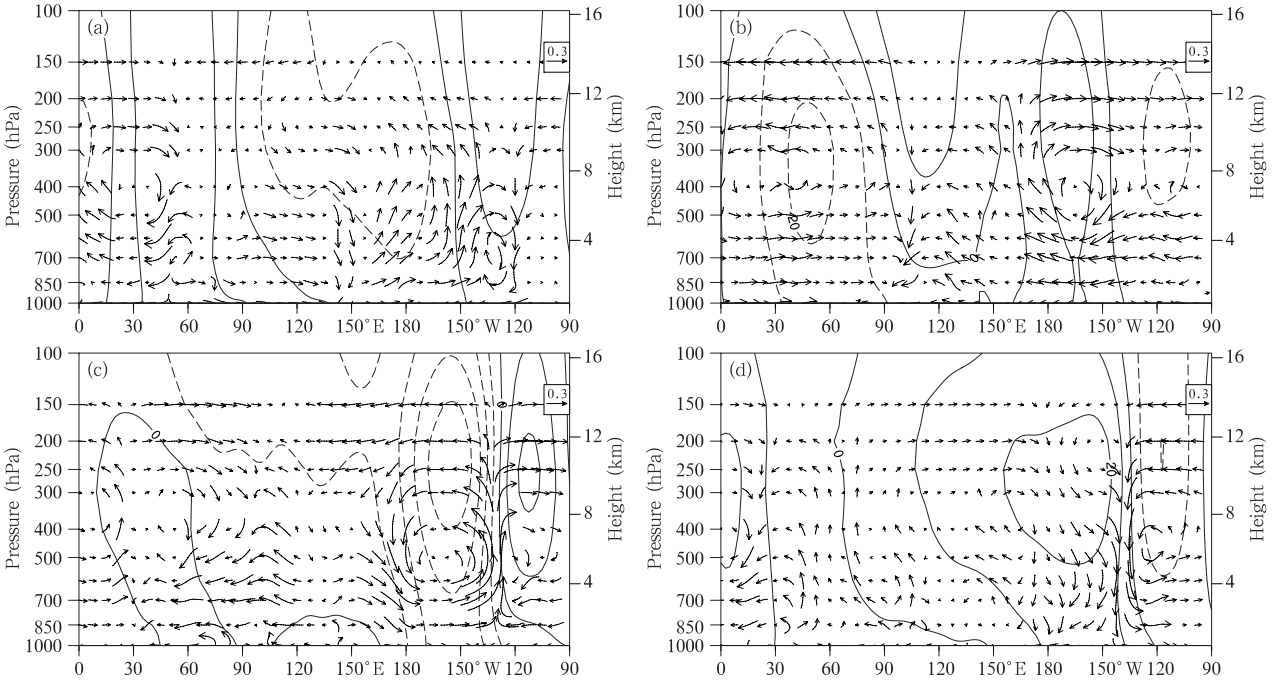

图6　大气质量海陆间迁移和南北涛动不同位相配置下40°—70°N区域平均的异常位势高度(等值线，单位：gpm)和纬向环流(单位：m/s，垂直速度放大100倍)合成垂直剖面(a.第Ⅰ类配置，b.第Ⅱ类配置，c.第Ⅲ类配置，d.第Ⅳ类配置)

Fig.6　Longitude-height cross sections for mean composites of anomalous geopotential height (unit: gpm) and zonal circulation (unit: m/s) averaged over 40°－70°N for cases of different phase combinations of MAMLO and IHO (a－d. for the first to the fourth types of phase combinations, respectively)

6　秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动不同位相配置下中国秋季气温异常的分布

6.1　秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动分别与中国气温异常的关系

秋季大气质量海陆间迁移主要反映中高纬度欧亚大陆和北太平洋大气质量的反位相分布；而南北涛动主要反映半球际大气质量的反位相分布。在两者共同影响下，对欧亚地区气候将产生重要变化。图7分别给出了I^*_{MAMLO}和I^*_{IHO}与秋季地表气温和风场的相关系数分布。可见大气质量海陆间迁移与中、东西伯利亚和中国大部分地区的气温成较强的

负相关,特别是中国东北地区,相关系数可达-0.5以上。而中国西南地区相关系数较小,这可能与中国西南地区气候主要受青藏高原影响有关(Luo, et al, 1984; 王颖等,2015)。图7a的结果表明,当大气质量海陆间迁移为正位相时,中国大部分地区气温均偏低;反之,大气质量海陆间迁移为负位相时,上述地区气温偏高。从地表风场结果来看,大气质量海陆间迁移为正位相时,西西伯利亚地区为异常反气旋式环流,环流东侧异常偏北风有利于北方寒冷空气向南输送,从而造成中国大部分地区气温偏低。相比于大气质量海陆间迁移,从图7b可以看出,南北涛动与中国东部(110°E以东)成正相关,西部为负相关。中国气温异常呈现出东西反位相型分布。从异常风场可以看出,南北涛动为正位相时,中国西部受到中高纬度异常偏北风影响,东部则受低纬度异常偏南风控制。这与Lu等(2009)研究的南北涛动与中国气温的关系结果吻合。

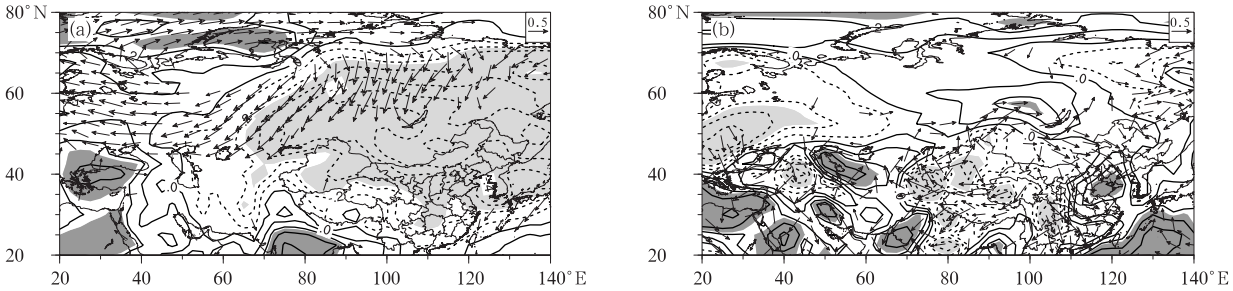

图7 秋季地表气温(等值线)和地表风场(矢量)与 I^*_{MAMLO}(a)和 I^*_{IHO}(b)的相关系数分布

(矢量和阴影区域表示相关系数通过90%信度水平的 t 检验;矢量由纬向风和经向风与 I^*_{MAMLO} 和 I^*_{IHO} 的相关系数构成)

Fig. 7 Correlations of surface variables with I^*_{MAMLO} (a) and with I^*_{IHO} (b) in the boreal autumn

(Contours are for surface temperature anomalies; vectors are composed of correlation coefficients of zonal and meridional components of anomalous winds with I^*_{MAMLO} in (a) and with I^*_{IHO} in (b); shaded areas and vectors are for values at/above the 90% confidence level using a t test, respectively)

6.2 秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动不同位相配置下中国气温异常的分布特征

上述分析揭示出大气质量海陆间迁移和南北涛动与中国秋季气候存在密切联系,但其中大气质量海陆间迁移信号和南北涛动信号如何共同影响中国秋季气候则需要详细分析。

由于中国秋季气温变化受到大气质量海陆间迁移和南北涛动的共同影响,故分别对大气质量海陆间迁移和南北涛动的4种位相配置下异常年份的中国秋季气温进行合成分析。对于第Ⅰ类配置(图8a),欧亚大部分地区气温为负异常,西西伯利亚异常反气旋式环流东侧偏北风盛行,使得中国西北方气温偏低,低纬度西太平洋异常东南风使得中国东部地区气温偏高,总体上中国气温异常呈现出东西反位相型分布。第Ⅰ类配置下气温异常在大部分地区未通过90%的信度水平检验,这表明第Ⅰ类配置下的气温异常随机性相对较强。第Ⅱ类配置(图8b)时,与第Ⅰ类配置情况相反,欧亚大部分地区气温为正异常,中国气温异常呈现出全区一致型分布,且均通过90%的显著性检验。这主要是由西西伯利亚地区的异常气旋式环流东侧偏南风盛行影响造成。

类似地,当出现第Ⅲ类配置时(图8c),欧亚地区气温异常整体上与第Ⅰ类配置类似,主要为显著负相关。中国气温异常呈现出东西反位相型分布,西部为正相关,东部为负相关。西西伯利亚异常反气旋式环流东侧偏北风和低纬度西太平洋西北风异常是造成该气温分布型的关键。第Ⅳ类配置(图8d)与第Ⅱ类配置情况类似,整个中国均表现为气温异常偏高,显著气温偏高区域亦位于东北、华北地区。

由上述分析可见,大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同配置对应的气温异常分布型迥然不同。但值得注意的是,比较第Ⅰ和Ⅳ类配置发现,当南北涛动同为正位相时,大气质量海陆间迁移位相的改变会造成欧亚地区气温完全相反的分布特征,比较第Ⅱ和Ⅲ类配置时亦是如此。而比较第Ⅰ、第Ⅲ类配置和第Ⅱ、Ⅳ类配置时发现,大气质量海陆间迁移

同为正或负位相时，南北涛动位相的改变对欧亚地区气温异常整体的分布的影响较为有限，表明大气质量海陆间迁移对欧亚地区气温异常起到主导作用。

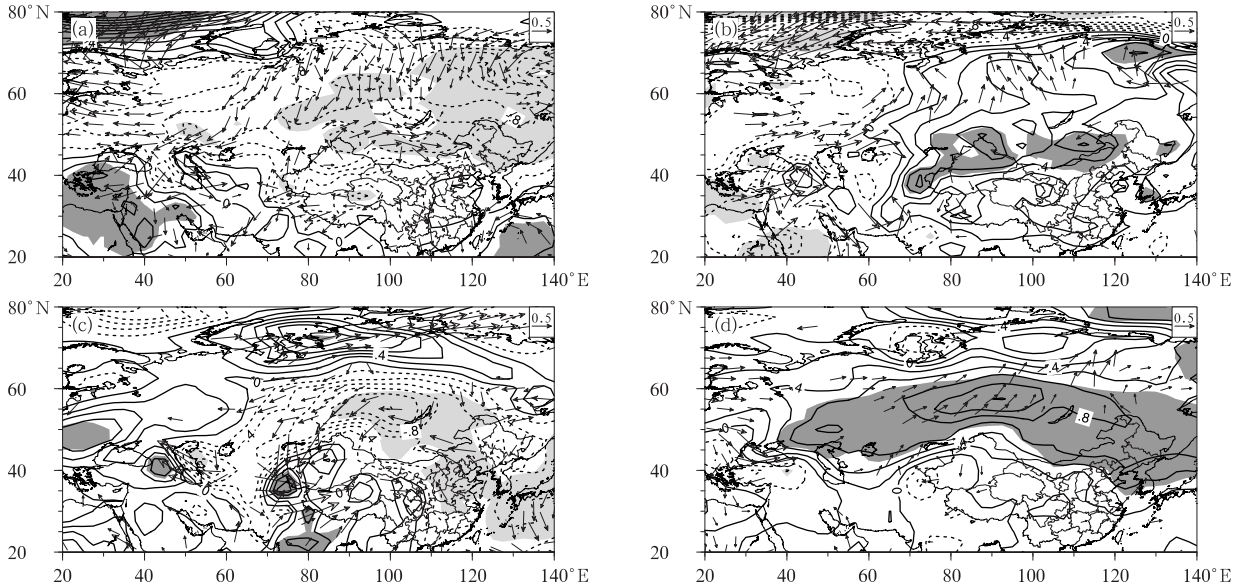

图 8　大气质量海陆间迁移和南北涛动不同配置下中国秋季平均的气温异常（等值线，单位：℃）和地表风场异常（矢量，单位：m/s）的合成平均（a. 第Ⅰ类配置，b. 第Ⅱ类配置，c. 第Ⅲ类配置，d. 第Ⅳ类配置；矢量箭头和阴影区域表示正/负异常通过 90% 信度水平的 t 检验）

Fig. 8　Mean composites of surface air temperature (contours, ℃) and surface wind (vectors, m/s) anomalies for different types of phase combinations of MAMLO and IHO in the boreal autumn (Shaded areas and vectors are for values at/above the 90% confidence level using a t-test, respectively)

7　结　论

综合上述分析可知，大气质量海陆间迁移和南北涛动不同位相配置可不同程度地改变欧亚-太平洋地区气压分布（图 1a），并进而可能影响中国秋季气温变化。根据大气质量海陆间迁移和南北涛动指数，考虑其不同位相配置，通过分析得到：

所构建的秋季欧亚大陆-太平洋区域的大气质量海陆间迁移（MAMLO）指数和大气质量南北涛动（IHO）指数分别可描述秋季欧亚-北太平洋地区大气质量海陆间迁移和大气质量南北涛动的主要特征，且这两个指数间相关系数仅为 −0.06，在统计学意义上相互独立。1961—2010 年，大气质量海陆间迁移和南北涛动的 4 种不同位相配置类型为大气质量海陆间迁移和南北涛动均为正位相（第Ⅰ类配置，共 15 年）；大气质量海陆间迁移和南北涛动均为负位相（第Ⅱ类配置，共 10 年）；大气质量海陆间迁移为正位相而南北涛动为负位相（第Ⅲ类配置，共 10 年）；以及大气质量海陆间迁移为负位相而南北涛动为正位相（第Ⅳ类配置，共 15 年）。表明大气质量海陆间迁移和南北涛动的不同配置发生频率大致相当。

秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动不同位相配置下大气质量分布表现为：第Ⅰ类配置下，南北涛动削弱北太平洋地区地表气压负异常，使该地区对流层低层气旋性环流减弱，增强欧亚地区地表气压正异常，使欧亚大陆上空高压增强。第Ⅱ类配置则与第Ⅰ类配置几乎相反。第Ⅲ类配置下，北太平洋地区气压负异常区显著增强，欧亚大陆上地表气压正异常显著减弱。第Ⅳ类配置大气质量异常分布与第Ⅲ类配置几乎相反，即北太平洋地区为显著正异常区，欧亚大陆存在较弱负异常。

在秋季大气质量海陆间迁移和南北涛动不同位相配置下，除了东亚地区，位势高度异常和水平环流异常在垂直方向上均表现为相当正压结构。大气质量显著正异常区的对流层上层存在辐合，而在对流层低层形成异常高压；反之亦然。

中国秋季气温与秋季大气质量海陆间迁移和南

北涛动关系密切。秋季大气质量海陆间迁移指数与中国大部分地区气温成显著负相关,可归因于在西西伯利亚地区形成的异常反气旋式环流,此反气旋东侧异常偏北风盛行,从而造成中国大部分地区气温偏低;南北涛动使得中国气温异常呈现出东西反位相型分布,这主要是由于中国西部受到中高纬度异常偏北风影响,东部则受低纬度异常偏南风控制。当二者为第Ⅰ类配置时,欧亚大部分地区气温整体呈现负异常,中国气温异常则为东西反位相型分布,西西伯利亚异常反气旋式环流东侧偏北风盛行,使得中国西北方气温偏低,低纬度西太平洋异常东南风使得中国东部地区气温偏高。第Ⅱ类配置下,西西伯利亚异常气旋式环流东侧偏南风盛行,造成欧亚大部分地区气温为正异常,中国气温异常呈现出全区一致型分布。第Ⅲ类配置与第Ⅰ类配置类似,中国气温异常呈现出东西反位相型分布,西部为正异常而东部为负异常。第Ⅳ类配置与第Ⅱ类配置情况类似,整个中国均表现为气温异常偏高。但通过比较可以知道,大气质量海陆间迁移对欧亚地区气温异常起到主导作用。

需要指出的是,Guan 等(2015)讨论了冬季液面海洋、大陆、北极海冰区域上空大气质量迁移的年际变化,结果表明,不同地表下垫面间异常加热的不一致是推动大气质量分布年际异常的重要原因。这里,关于秋季的大气质量海陆间迁移形成原因是什么仍需要进一步揭示。同时,影响中国秋季气温的因素很多,对于大气质量海陆间迁移和南北涛动共同影响的探讨可以部分解释中国秋季气温分布及其变化,且便于气候监测诊断和预测。但如何从大气质量海陆间迁移和南北涛动的这两个相互作用的因子预测中国秋季气温变化则还需要作进一步探索。

致　谢:NCEP/NCAR 资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center,网址为:http://www.esrl.noaa.gov/;文中诸图的绘制使用了 NCL 软件。

参考文献

丛菁,卢楚翰,管兆勇.2011.南北涛动与南极涛动及北极涛动的相互作用.大气科学学报,34(6):748-755. Cong J, Lu C H, Guan Z Y. 2011. Relationships among IHO, AO and AAO. Trans Atmos Sci, 34(6):748-755 (in Chinese)

邓伟涛,孙照渤,倪东鸿等.2009.NCEP/NCAR 再分析资料中北半球夏季海平面气压的年代际变化.南京气象学院学报,32(2):239-245. Deng W T, Sun Z B, Ni D H. 2009. Interdecadal variation of the Northern Hemisphere summer sea level pressure in the NCEP/NCAR reanalysis data. J Nanjing Institute of Meteorology, 32(2):239-245 (in Chinese)

龚道溢,王绍武.2000.北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率.大气科学,24(2):187-192. Gong D Y, Wang S W. 2000. The North Atlantic Oscillation index and its interdecadal variability. Chinese J Atmos Sci, 24(2):187-192 (in Chinese)

郭其蕴.1983.东亚夏季风强度指数及其变化的分析.地理学报,38(3):207-217. Guo Q Y. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation. Acta Geographica Sinica, 38(3):207-217 (in Chinese)

胡潮,管兆勇,李明刚.2014.北半球大洋与大陆区域间大气质量分布的季节循环.中国科学 D:地球科学,44(7):1519-1531. Hu C, Guan Z Y, Li M G. 2014. The seasonal cycle of redistribution of atmospheric mass between continents and oceans in the Northern Hemisphere. Sci China:Earth Sci, 44(7):1519-1531 (in Chinese)

李晓峰,李建平.2012.南半球环状模事件的准地转调整过程分析.大气科学,36(4):755-768. Li X F, Li J P. 2012. An analysis of the quasi-geostrophic adjustment process of the Southern Hemisphere annular mode. Chinese J Atmos Sci, 36(4):755-768 (in Chinese)

施能,陈辉,谌芸.2001.北半球冬季大气活动中心的基本态特征及影响研究.热带气象学报,17(3):215-222. Shi N, Chen H, Chen Y. 2001. A study of the climate base-state of the Northern Hemisphere winter atmospheric active centers (ACC) and its climate variability and effects. J Tropical Meteor, 17(3):215-222 (in Chinese)

王林,陈文,冯瑞权等.2011.北太平洋涛动的季节演变及其与我国冬春气候异常的联系.大气科学,35(3):393-402. Wang L, Chen W, Feng R Q. 2011. Seasonal evolution of the North Pacific Oscillation and its association with the interannual variation of China's climate in the boreal winter and spring. Chinese J Atmos Sci, 35(3):393-402 (in Chinese)

王绍武.1962.大气活动中心的多年变化.气象学报,31(4):304-318. Wang S W. 1962. The fluctuation of atmospheric centers of action. Acta Meteor Sinica, 31(4): 304-318 (in Chinese)

王颖,李栋梁.2015.变暖背景下青藏高原夏季风变异及其对中国西南气候的影响.气象学报,73(5):910-924. Wang Y, Li D L. 2015. Variation of the Tibetan Plateau summer monsoon under the background of global warming and its impact on the climate in southwestern China. Acta Meteor Sinica, 73(5):910-924 (in Chinese)

温克刚.2008.中国气象灾害大典(综合卷).北京:气象出版社,1-655pp. Wen K G. 2005. Year Book of Meteorological Disasters of China (Integration volume). Beijing: China Meteorological Press, 655pp (in Chinese)

武炳义,张人禾.2005.北极大气偶极子异常与冬季北极海冰运动.中国科学 D:地球科学,35(2):184-191. Wu B Y, Zhang R H. 2005. Arctic atmospheric dipole anomaly and Arctic sea ice movement in the winter. Sci China Ser D-Earth Sci, 35(2):184-

191 (in Chinese)

杨鉴初.1956.北半球大气质量的平均月际变化.气象学报,27(1):37-59. Yang J C. 1956. Mean monthly changes in air mass of the Northern Hemisphere. Acta Meteor Sinica, 27(1):37-59 (in Chinese)

章颖,赵平.2012.夏季亚洲-太平洋遥相关季节演变与大气环流和降水.气象学报,70(5):1055-1063. Zhang Y, Zhao P. 2012. Seasonal evolutions of the summertime Asian-Pacific teleconnection and associated atmospheric circulation and rainfall. Acta Meteor Sinica, 70(5):1055-1063 (in Chinese)

赵平,陈军明,肖栋等.2008.夏季亚洲-太平洋涛动与大气环流和季风降水.气象学报,66(5):716-729. Zhao P, Chen J M, Xiao D, et al. 2008. The summertime Asian-Pacific Oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall. Acta Meteor Sinica, 66(5):716-729 (in Chinese)

Chen T C, Chen J M, Schubert S, et al. 1997. Seasonal variation of global surface pressure and water vapor. Tellus, 49A(5):613-621

Christy J R, Trenberth K E, Anderson J R. 1989. Large-scale redistributions of atmospheric mass. J Climate, 2: 137-148

Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic Oscillation index. Geophys Res Lett, 26(4):459-462

Guan Z Y, Yamagata T. 2001. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field. Geophys Res Lett, 28(2):263-266

Guan Z Y, Lu C H, Mei S L, et al. 2010. Seasonality of interannual inter-hemispheric oscillations over the past five decades. Adv Atmos Sci, 27(5):1043-1050

Guan Z Y, Zhang Q, Li M G. 2015. Interannual variations in atmospheric mass over liquid water oceans, continents, and sea-ice-covered arctic regions and their possible impacts on the boreal winter climate. J Geophys Res Atmos, 120:11846-11861

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-471

Kidson J W. 1999. Principal modes of Southern Hemisphere low-frequency variability obtained from NCEP-NCAR reanalyses. J Climate,12:2808-2830

Kutzbach J E. 1970. Large-scale features of monthly mean Northern Hemisphere anomaly maps of sea-level pressure. Mon Wea Rev, 98(9):708-716

Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile. J Meteor, 8:52-59

Lu C H, Guan Z Y, Mei S L, et al. 2008. The seasonal cycle of interhemispheric oscillations in mass field of the global atmosphere. Chinese Science Bulletin, 53(20):3226-3234

Lu C H, Guan Z Y. 2009. On the interannual variation in spring atmospheric inter-hemispheric oscillation linked to synchronous climate in China. Progress Natural Sci, 19:1125-1131

Lu C H, Guan Z Y, Cai J X. 2010. Interhemispheric atmospheric mass oscillation and its relation to interannual variations of the Asian monsoon in boreal summer. Sci Chine Earth Sci, 53(9):1343-1350

Luo H B, Yanai M. 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part Ⅱ: Heat and moisture budgets. Mon Wea Rev, 112:966-989

Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. J Atmos Sci, 45(7):1228-1251

Tang W Y, Guan Z Y. 2015. ENSO-independent contemporaneous variations of anomalous circulations in the Northern and Southern Hemispheres: the polar-tropical seesaw mode. J Meteor Res, 29(6):917-934

Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 25(9):1297-1300

Trenberth K E. 1981. Seasonal variations in global sea level pressure and the total mass of the atmosphere. J Geophys Res, 86(C6):5238-5246

Trenberth K E, Christy J R. 1985. Global fluctuations in the distribution of atmospheric mass. J Geophys Res, 90(D5): 8042-8052

Trenberth K E, Christy J R, Olson J G. 1987. Global atmospheric mass, surface pressure, and water vapor variations. J Geophys Res, 92(D12):14815-14826

Trenberth K E, Guillemot C J. 1994. The total mass of the atmosphere. J Geophys Res, 99(D11):23079-23088

Trenberth K E, Smith L. 2005. The mass of the atmosphere: A constraint on global analyses. J Climate, 18:864-875

Van Den Dool H, Saha S. 1993. Seasonal redistribution and conservation of atmospheric mass in a general circulation model. J Climate, 6:22-30

Wallace J M. 2000. North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms-one phenomenon. Quart J Roy Meteor Soc, 126(564):791-805