

奚子惠, 管兆勇, 张茜, 等. 2016. 春季欧亚—北太平洋上空大气质量迁移规律及其对中国同期气候异常的可能影响 [J]. 大气科学, 40 (6): 1261–1272.  
Xi Zihui, Guan Zhaoyong, Zhang Qian, et al. 2016. Migration of atmospheric mass over regions between Eurasia and North Pacific in spring and its possible impacts on climate anomalies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1261–1272, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15278.

# 春季欧亚—北太平洋上空大气质量迁移规律及其对中国同期气候异常的可能影响

奚子惠<sup>1,2,3</sup> 管兆勇<sup>1,2</sup> 张茜<sup>1,2</sup> 陈丹萍<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

<sup>3</sup> 江苏省海洋环境监测预报中心, 南京 210036

**摘要** 利用 1979~2013 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料及 NOAA 研究中心的 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 月平均降水资料, 通过定义欧亚—北太平洋间大气质量迁移指数  $I_{\text{MAMEP}}$ , 分析了春季欧亚—北太平洋上空大气质量迁移 (MAMEP, Migration of Atmospheric Mass over Regions between Eurasia and North Pacific) 的年际变化规律及其与同期中国气候异常的联系。结果表明: 在北半球中高纬度存在一个纬向分布的欧亚—北太平洋遥相关型, 且其可能对中国同期气候异常的形成具有重要影响。春季 MAMEP 指数具有显著的长期趋势, 同时还具有 2~4 年及 5~7 年的振荡周期及明显的年代际变化特征。垂直环流和波动运动对欧亚—北太平洋间大气质量迁移具有重要作用。大气质量在欧亚西部低层异常辐合, 高层异常辐散, 在中、西太平洋地区低层异常辐散, 高层异常辐合, 在纬向上构成了顺时针的垂直环流圈, 将西北太平洋地区的大气质量变动与欧亚大陆上空的变动联系起来。另外, 来自西欧大陆的波扰能量可传播至北太平洋, 有利于这些区域上空位势高度异常扰动的维持。 $I_{\text{MAMEP}}$  与春季同期降水及地表气温异常关系密切。 $I_{\text{MAMEP}}$  为正时, 东亚以北地区、鄂霍次克海西岸以及西欧沿岸降水显著减少, 欧亚西部及我国华北地区降水显著增加。850 hPa 上西伯利亚受反气旋式环流控制, 太平洋上空受气旋式环流控制, 引起欧亚大陆北部地表显著增温, 西伯利亚以东、我国东北、华北—江淮地区及韩国、日本南部地表显著降温。西欧—我国西北部分地区大面积显著降温现象与这两个地区受异常反气旋东侧的偏北气流影响有关。这些结果有利于人们更深刻认识区域春季气候异常形成机理。

**关键词** 大气质量迁移 欧亚—北太平洋遥相关 气候异常 春季 中国

文章编号 1006-9895(2016)06-1261-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15278

## Migration of Atmospheric Mass over Regions between Eurasia and North Pacific in Spring and Its Possible Impacts on Climate Anomalies in China

XI Zihui<sup>1,2,3</sup>, GUAN Zhaoyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, and CHEN Danping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Key Laboratory of Ministry of Education for Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2015-09-25; 网络预出版日期 2016-03-17

作者简介 奚子惠, 女, 1991 出生, 硕士, 主要从事季风动力学研究。E-mail: dfxizihui@163.com

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41175062, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406024

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41175062), Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Grant GYHY201406024)

3 Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036

**Abstract** Using the NCEP/NCAR monthly mean reanalysis and CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) precipitation data for the period from 1979 to 2013, the authors define an index of the Migration of Atmospheric Mass over Regions between Eurasia and North Pacific ( $I_{\text{MAMEP}}$ ) to investigate the interannual variability of spring MAMEP and its impacts on climate anomalies over China. Our results demonstrate that spring MAMEP is mainly characterized by a seesaw-like structure in surface air pressure anomalies, which can also be referred to as Eurasia–North Pacific teleconnection pattern. The  $I_{\text{MAMEP}}$  varies with a remarkable long-term trend and periodicities of 2–4 years and 5–7 years as well as distinct interdecadal changes. It is found that an anomalous vertical circulation behaves like a bridge linking Eurasia and North Pacific with the migration of atmospheric mass between these two regions. The atmospheric mass fluxes anomalously converge in the lower troposphere and diverge in the upper troposphere in the west of Eurasia. However, the opposite situations are observed in the western and central Pacific. The wave activity fluxes show that the wave energy propagates eastward from western Europe into the North Pacific, facilitating the maintenance of the anomalous geopotential height disturbances there. In the spring, the  $I_{\text{MAMEP}}$  is highly correlated with anomalous rainfall and surface air temperature over China. When the  $I_{\text{MAMEP}}$  is positive, precipitation decreases significantly over the north of East Asia, the west of Okhotsk Sea, and the coastal western Europe, as opposed to the increase over the west of Eurasia and the north of China. The anticyclonic circulation in Siberia and the cyclonic circulation in North Pacific in the lower troposphere induce the anomalously high surface air temperature in northern Eurasia, along with the anomalously low temperature in the east of Siberia, Northeast China, North China, Yangtze–Huaihe River valley, Korea, and the south of Japan. The surface air temperature anomalously decreases in much of western Europe and northwestern China. These results are helpful for us to better understand the formation mechanisms for anomalous climate conditions in Eurasia and North Pacific regions in boreal spring.

**Keywords** Migration of atmospheric mass, Eurasia–North Pacific teleconnection pattern, Climate anomalies, Spring, China

## 1 引言

众所周知,地表气压作为描写气候系统的重要参数,其演变可反映大气质量的时空分布,而大气质量分布异常对大气环流的变化又有着重要影响(Lorenz, 1951; Christy et al., 1989)。近年来,随着全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)和数据同化系统的不断完善,不少学者开始利用高质量的观测资料和再分析资料对全球及半球间大气质量变化进行分析。Trenberth (1981)、Trenberth and Christy(1985)、Trenberth and Guillemot (1994)和Trenberth and Smith (2005)根据全球大气中干空气质量的守恒性揭示出,全球水汽质量和大气质量两者的变化位相及年变程一致,均存在显著年循环:全球大气质量在8月份最大,1月份达到最小。

由于 ENSO、越赤道气流以及 Hadley 环流的季节变化,在南北半球之间可发生大气质量的显著迁移(Bowman and Cohen, 1956; Chen et al., 1997; Baldwin, 2001; Zhao and Li, 2006)。Guan and Yamagata (2001)通过分析地表气压场时间序列发现了南北涛动(IHO, Interhemispheric Oscillations),

反映了南北半球大气质量年际异常的反位相分布特征。IHO 具有明显的季节循环,这种季节变化与中纬度大气质量变动相关(卢楚翰等, 2008)。两半球间大气质量交换从长时间来看基本上是平衡的,其季节变化特征表现为半年周期,且具有显著的十年际变化(张燕等, 2008)。利用 NCEP/NCAR、ERA-40 和 JRA25 三种资料计算过去 50 年 IHO 指数探讨其年际的季节变化得到一致的结果,并且在四个季节中,南北半球的地表气压异常均出现南北“跷跷板”现象(Guan et al., 2010)。卢楚翰和管兆勇(2009)针对春季去除北极涛动(AO, Arctic Oscillation)和南极涛动(AAO, Antarctic Oscillation)信号的大气南北涛动的年际变化做了相关工作,进一步指出:春季 IHO 表现为两半球中高纬地区大气质量间的“跷跷板”分布,且垂直环流结构一致,春季 IHO 还与我国同期气候变动联系密切。而夏季 IHO 主要对 30°S~60°N 纬度带及南极地区的大气异常质量分布有着较大的方差贡献,对这些区域的大气质量输送及水汽通量有显著影响,同时与这些区域的海平面气压场变化显著相关。此外夏季 IHO 与对流层中低层大气环流以及东亚夏季风异常亦存在显著联系(卢楚翰等, 2010)。从年代际尺度

上 PDO (Pacific Decadal Oscillation)、IHO 和东亚季风三者之间还存在紧密联系 (卢楚翰等, 2013), 其中 PDO 和 IHO 对全球大范围气温和气压异常上有一致的影响。

全球大气质量是基本守恒的, 由于太阳辐射的季节变化以及下垫面显著的热力性质差异, 大气质量除了在南北半球间输送, 还会在各大陆与海洋之间重新分布。杨鑑初 (1956) 就曾发现亚洲与太平洋两区大气质量的月际变化大都成相反现象, 并指出海陆间热力性质差异引起的海陆间大气质量的输送随季节发生改变。胡潮等 (2014, 2015) 利用再分析资料和 CMIP5 模式资料针对北半球分析了大洋与大陆区域大气质量重新分布的季节循环特征, 揭示出海陆间大气质量迁移的季节性变化机制。海陆间的热力差异既促使了季风的形成, 亦推动了大气质量在海陆上空迁移的季节循环, 并且大气质量堆积和亏损的维持还与大气质量通量散度以及蒸发和降水之差有关。

然而, 尽管研究南北半球间大气质量输送的工作已有不少, 但研究北半球大洋和大陆之间大气质量迁移的工作却不多, 研究春季北半球海陆间大气质量迁移规律及其对中国同期气候异常的影响更是少之又少。春季作为冬夏季风更替的过渡季节, 也是大气质量重新分布的活跃季节 (Trenberth et al., 1987; Chen et al., 1997; 卢楚翰和管兆勇, 2009), 春季的大气质量交换过程又有何特征? 为此, 本文将以前欧亚大陆和北太平洋作为研究的关键区, 利用再分析资料重点讨论春季欧亚—北太平洋上空大气质量的迁移规律以及与中国气候的联系。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文选取 NCEP/NCAR 提供的再分析数据集 (Kalnay et al., 1996), 垂直方向 17 层, 要素包括逐月平均地表气压 ( $p_s$ )、水平风场 ( $u, v$ )、垂直速度 ( $w$ )、比湿 ( $q$ )、位势高度 ( $h$ )、地表气温 ( $T$ ) 等, 此外还使用了 NOAA 研究中心的 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 逐月平均降水资料。以上资料水平网格分辨率均为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 覆盖时段为 1979~2013 年春季 (3 月、4 月、5 月的平均)。

### 2.2 方法

地表气压 ( $p_s$ ) 是描述环流系统变化的重要参

数 (Toumi et al., 1999), 同时也是大气质量的重要表征量, 其变化可大致反映大气柱中大气质量的变化。文中利用地表气压  $p_s$  (除去地形因素影响), 求各个格点春季的距平值  $p_{sa}$ , 得到春季距平场的时间序列, 即  $p_{sa} = p_s - \overline{p_s}$ , 其中,  $\overline{p_s}$  是地表气压  $p_s$  的 35 年春季的气候平均。北半球大气质量变化包括其内部变化及南北半球间的质量交换 (IHO)。为研究北半球内部自身的变化, 需扣除南半球变化带来的影响。文中采用一元线性回归的方法滤除大气质量的南北交换部分, 用  $p'_s$  来表征北半球海陆上空大气质量的异常。公式如下:

$$p'_s = p_{sa} - \alpha M_{NH}, \quad (1)$$

$$M_{NH} = \frac{\iint_{NH} p_{sa} \cos \phi d\phi d\lambda}{\iint_{NH} \cos \phi d\phi d\lambda}, \quad (2)$$

其中,  $M_{NH}$  是北半球表面异常气压  $p_{sa}$  的面积权重平均值, 其与南半球的大气总质量变化的大小近似相等, 但符号相反。 $\alpha$  为  $p_{sa}$  对  $M_{NH}$  时间序列回归的回归系数,  $\phi$  和  $\lambda$  分别为纬度和经度。

假设南北半球际大气质量交换不存在, 则北半球大气质量基本守恒 (水汽变化的影响非常小)。由于太阳辐射的季节变化以及海陆下垫面热容量的差异, 因而北半球大气质量将在海陆间发生显著迁移。分别选定陆地和海洋上的关键区域 Land-K 和 Ocean-K, 将陆地和海洋上空关键区面积权重平均的表面气压异常分别进行标准化, 用两者之差来构建春季陆地—海洋间大气质量迁移 (或称为春季陆地—海洋间大气质量振荡) 指数  $I_{MAMLO}$ , 表达式为

$$I_{MAMLO} = M_{Land}^* - M_{Ocean}^*, \quad (3)$$

其中,

$$M_{Land} = \frac{\iint_{Land-K} p'_s \cos \phi d\phi d\lambda}{\iint_{Land-K} \cos \phi d\phi d\lambda}, \quad (4)$$

$$M_{Ocean} = \frac{\iint_{Ocean-K} p'_s \cos \phi d\phi d\lambda}{\iint_{Ocean-K} \cos \phi d\phi d\lambda}, \quad (5)$$

式中, “\*”表示标准化处理。 $I_{MAMLO}$  为正 (负) 时, 表示大气质量在陆地上空异常堆积 (亏损), 而在海洋上空异常亏损 (堆积), 大气质量可能由海洋 (陆地) 向陆地 (海洋) 迁移。

为研究北半球春季大气质量在海陆间的输送特征, 根据胡潮等 (2014) 给出的公式计算了质量

平均的大气质量流。公式如下：

$$\mathbf{F}_M = \frac{1}{g(p_s - p_t)} \int_{p_t}^{p_s} \mathbf{V} dp, \quad (6)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $p_t$  为大气层顶气压 (取 10 hPa),  $\mathbf{V}$  表示水平风场。根据公式(6)可计算  $\nabla \cdot \mathbf{F}_M$  即为大气质量通量散度。从上式可看出大气质量流是由  $\mathbf{V}$  整层积分得到的二维矢量, 可分解为有旋无辐散 (旋转风) 和有辐散无旋 (辐散风) 两个部分, 即  $\mathbf{F}_M = \mathbf{F}_{Mrot} + \mathbf{F}_{Mdiv}$ 。对  $\mathbf{V}$  滤除线性趋势后进行垂直积分, 然后再求解其旋转分量和辐散分量。

本文还计算了波作用通量, 采用的是 Takaya and Nakamura (1997, 2001) 推导出的包含纬向非均匀基本流的计算公式来描述定常 Rossby 波的能量传播特征。该通量 (简称 T-N 通量) 在 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 近似假定下与波位相无关, 且与定常 Rossby 波列的局地群速度方向一致, 反映了 Rossby 群波能量的频散方向。其水平分量在对数气压坐标中的计算公式为

$$\mathbf{W} = \frac{1}{2|\mathbf{U}|} \left[ \begin{array}{l} U(\psi_x'^2 - \psi'_x \psi_{xx}') + V(\psi_x' \psi_y' - \psi'_x \psi_{xy}') \\ U(\psi_x' \psi_y' - \psi'_x \psi_{xy}') + V(\psi_y'^2 - \psi'_y \psi_{yy}') \end{array} \right], \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{U} = (U, V)$  为基本流场,  $\psi'$  为准地转扰动流函数。

### 3 春季欧亚—北太平洋间大气质量迁移年际变化特征与典型年份选取

#### 3.1 春季欧亚—北太平洋上空大气质量迁移指数的定义

为了分析春季北半球陆地上空大气质量的分布特征, 依据前面的公式, 首先将面积权重平均的陆地地表气压异常  $M_{Land}$  与北半球地表气压距平  $p_s'$  作相关分析 (图 1)。可看出除了青藏高原地区以外, 陆地绝大部分地区上空大气质量与  $p_s'$  成正相关关系, 地表气压异常升高 (降低) 时, 大气质量在陆地上空异常堆积 (亏损)。欧亚大陆  $50^\circ\text{N} \sim 62.5^\circ\text{N}$  之间有一个高值带, 高值中心位于贝加尔湖以北, 相关系数超过 0.5。选取欧亚大陆上相关系数大值区为关键区 (简称 EC 区域, 如图 1a 黑框所示), 范围为 ( $50^\circ\text{N} \sim 62.5^\circ\text{N}$ ,  $82.5^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ )。为了进一步探讨大气质量在欧亚大陆和北太平洋上空的分布特征, 本文以 EC 区域为研究对象, 计算其上空面积权重平均的地表气压异常  $M_{EC}$  和北半球地表气压距平  $p_s'$  的相关系数, 寻找北太平洋上空与

EC 区域关系最密切的地区。由图 1b 发现在北太平洋 ( $45^\circ\text{N} \sim 62.5^\circ\text{N}$ ,  $157.5^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ ) 范围内 (简称 NP 区域, 如图 1b 右边黑框所示) 存在与  $p_s'$  显著负相关区, 最大值中心位于鄂霍次克海以东的洋面上, 相关系数超过 -0.4, EC 区域表现为与  $p_s'$  显著的正相关关系, 相关系数达 0.9 以上。

实际上, 欧亚和北太平洋区域的反相关关系体现了地表气压距平纬向波动的变化, 这种波动有别于诸如北极涛动 AO 现象等的南北方向的振荡。为反映北半球中高纬度上欧亚—北太平洋区域呈现出的这种纬向的反位相分布特征, 本文根据 (3) 式构建的指数具体化至所用关键区上的气压变化来定义:

$$I_{MAMEP} = M_{EC}^* - M_{NP}^*, \quad (8)$$

其中,  $M_{EC}^*$  和  $M_{NP}^*$  分别表示两个区域面积权重平均的经过标准化处理的表面气压异常。

依据 (8) 式计算得到序列。当  $I_{MAMEP}$  为正值时, 表示大气质量在欧亚大陆上空堆积, 在北太平洋上空亏损; 反之, 当  $I_{MAMEP}$  为负值时, 大气质量在欧亚大陆上空亏损, 而在北太平洋上空堆积。

通过将地表气压距平  $p_s'$  作 EOF 分析 (图略), 第一模态显示出北极涛动 AO 的空间特征, 而第二模态的空间分布与欧亚—太平洋地区大气质量迁移 (MAMEP) 的空间结构相似, 其时间系数序列与  $I_{MAMEP}$  的相关达 0.77, 表示这一模态与欧亚—北太平洋大气质量迁移存在紧密联系。通过计算指数  $I_{MAMEP}$  和  $p_s'$  的相关系数可得 (图 2a), 欧亚大陆和北太平洋呈反位相分布, 且高值中心分别在 EC 和 NP 区域内, 分别达到 0.8 和 -0.8 以上, 负相关性显著 (通过 95% 的信度检验), 指数定义合理。

#### 3.2 指数的年际变化特征及典型年份的选取

为了考察 EC 和 NP 两关键区上空大气质量的长期演变特征, 给出了两关键区大气质量的时间序列变化 (图 2b), 两区域的时间序列呈反相关, 相关系数达 -0.4 (滤除线性趋势后为 -0.35)。  $I_{MAMEP}$  呈下降趋势, 其回归系数为 -0.034, 表明欧亚大陆上空大气质量有逐渐减少而中高纬北太平洋上空大气质量有逐渐增加的趋势。为了清楚地表示  $I_{MAMEP}$  的年际变化特征, 将  $I_{MAMEP}$  滤除线性趋势后再进行标准化, 得到年际变化曲线 (图 2b)。可看出春季 MAMEP 指数在时间变化上存在明显的年际变化特征。通过小波及功率谱分析显示 (图 3),  $I_{MAMEP}$  存在 2~4 年及 5~7 年的周期变化。由其 9

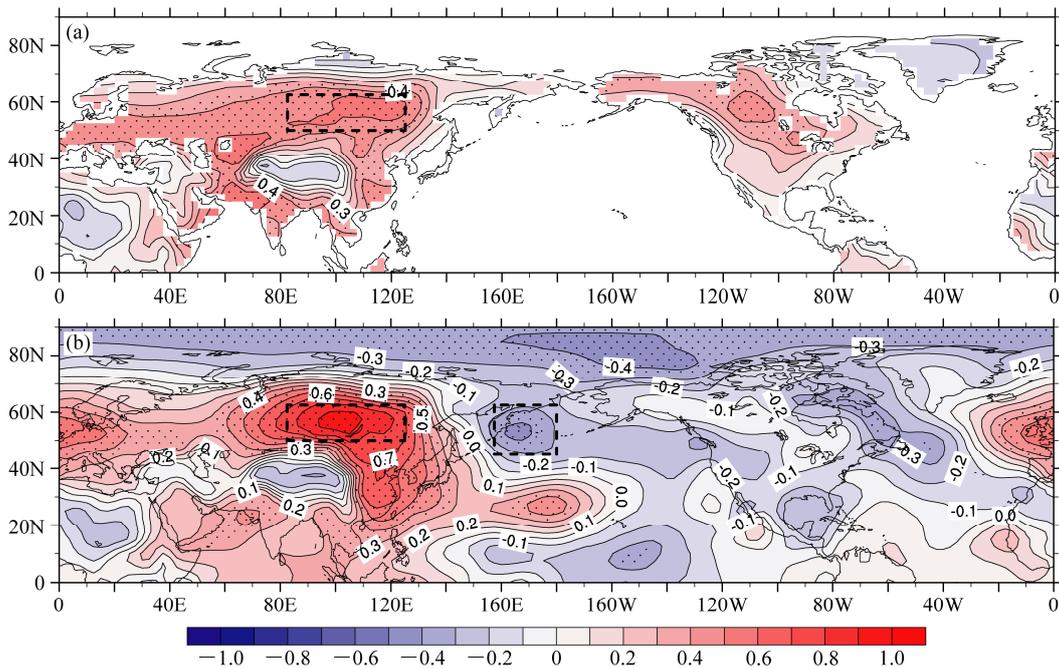


图1 北半球春季地表气压距平  $p_s'$  与 (a) 面积权重平均的陆地地表气压异常  $M_{Land}$  和 (b) 面积权重平均的 EC 区域上空地表气压异常  $M_{EC}$  的相关分布。带点区域表示正/负相关通过 95% 的信度检验

Fig. 1 Distributions of correlation coefficients of  $p_s'$  [the surface air pressure anomalies (SAPA)] in spring with (a) the area-averaged SAPA over land ( $M_{Land}$ ), and (b) the area-averaged SAPA over Eurasian Continent ( $M_{EC}$ ). The dotted areas represent positive/negative correlation above 95% confidence level using  $t$  test

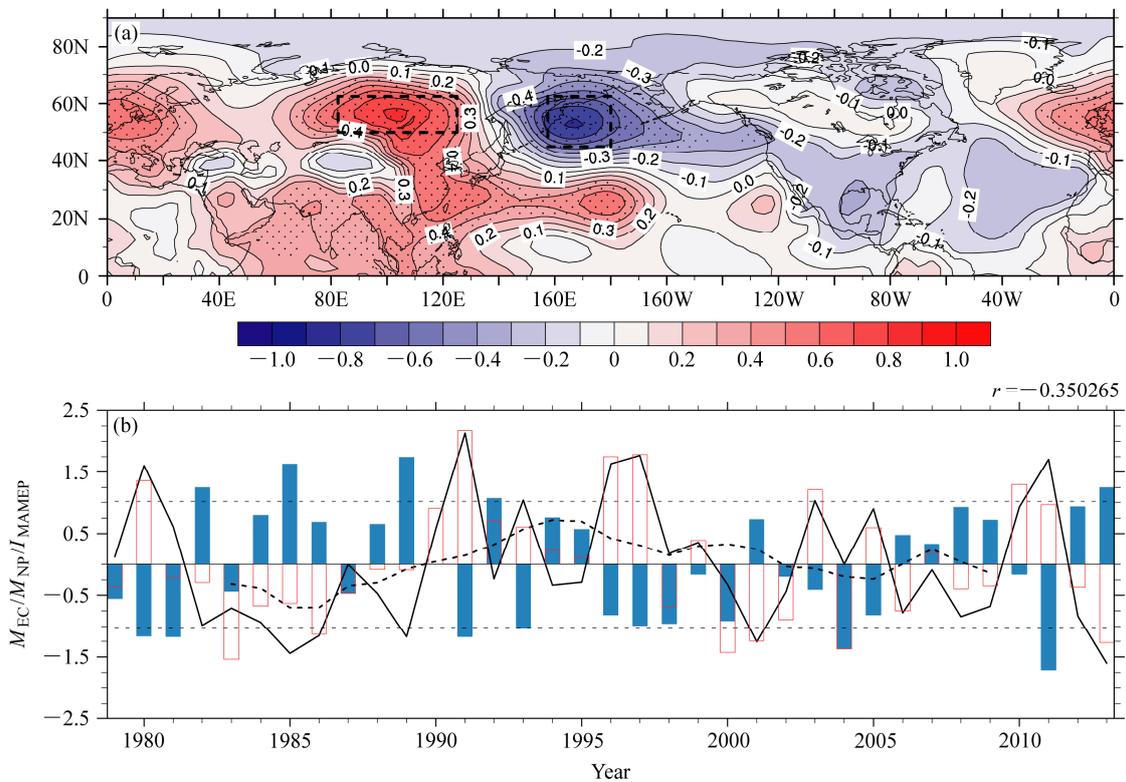


图2 (a) 北半球春季  $I_{MAMEP}$  与同期北半球地表气压距平  $p_s'$  的相关分布，带点区域表示正/负相关通过 95% 的信度检验。(b) 北半球春季标准化的  $M_{EC}$  (红色空心柱)、 $M_{NP}$  (蓝色实心柱)、 $I_{MAMEP}$  (黑色实线，已滤去趋势；黑色虚线表示其 9 年滑动平均值) 时间序列

Fig. 2 (a) Correlation coefficients of  $I_{MAMEP}$  (Index of Migration of Atmospheric Mass over Regions between Eurasia and North Pacific) with  $p_s'$  in boreal spring, the dotted areas represent positive/negative correlation at 95% confidence level using  $t$  test. (b) The normalized time-series of  $M_{EC}$  (red hollow bars), the area-averaged SAPA over North Pacific ( $M_{NP}$ , blue filled bars),  $I_{MAMEP}$  (black solid line, the trend has been removed; black dotted line represents its 9 years moving average) in boreal spring

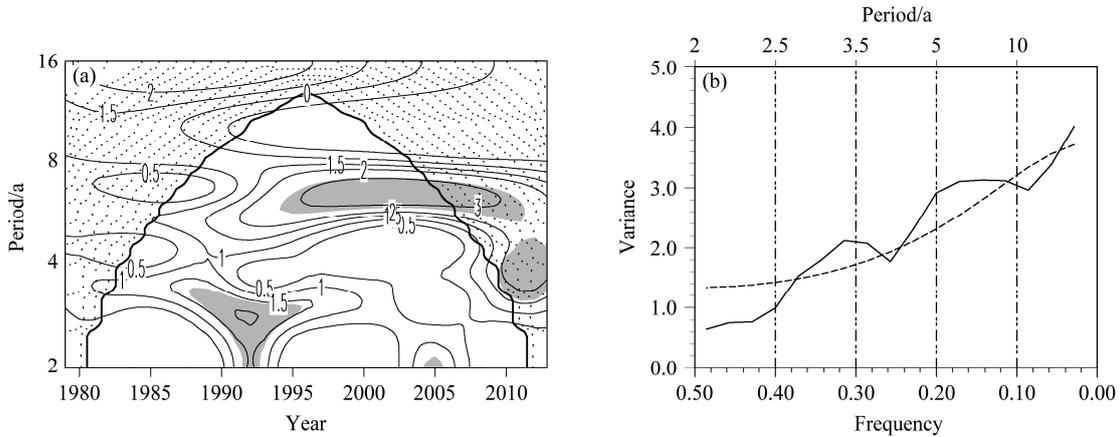


图3 春季  $I_{MAMEP}$  的 (a) Morlet 小波变换系数和 (b) 功率谱密度 (实线)。图 a 中阴影区表示通过 90% 的信度检验, 带点区域为小波变换受边界影响区。图 b 中虚线为红噪声谱

Fig. 3 (a) Transform coefficient of Morlet wavelet and (b) power spectral density (solid line) for  $I_{MAMEP}$  in spring. Shaded areas in Fig. a represent statistically significant correlation at 90% confidence level, and the dotted areas indicate the cone of border influence. Dashed line in Fig. b represents the reference red noise spectrum

年滑动平均值还可以看出在 2002 年之前存在明显的年代际变化。

为进一步分析环流变化, 根据滤除了线性趋势且经过标准化处理后的  $I_{MAMEP}$  时间序列, 挑选出  $I_{MAMEP} \geq |1\sigma|$  ( $\sigma$  表示标准差) 的 7 年典型正异常年及 5 年典型负异常年 (表 1)。下面将对这些年的有关要素进行合成分析 (正异常年的平均减去负异常年的平均)。需要说明的是, 在进行任一变量的合成前, 均扣除了其长期趋势。

表 1  $I_{MAMEP}$  典型正/负异常年的选取

Table 1 Typical years for typical positive and negative  $I_{MAMEP}$  cases

指数	年份
$I_{MAMEP} \geq 1\sigma$	1980, 1991, 1993, 1996, 1997, 2003, 2011
$I_{MAMEP} \leq -1\sigma$	1985, 1986, 1989, 2001, 2013

## 4 春季 $I_{MAMEP}$ 典型正/负异常年环流异常

### 4.1 大气质量流异常特征

大气质量流不仅可以直观地显示大气质量的源与汇以及迁移方向, 还与地表气压变化关系密切。质量流的辐合有利于维持局部地区上空大气质量的堆积, 使得地表气压升高, 反之, 其辐散则有利于维持局部地区上空大气质量的亏损, 引起地表气压降低。为进一步研究欧亚大陆—北太平洋间大气质量的空间分布及交换特征, 根据公式 (6) 计

算了大气质量流及质量通量散度, 并作了合成分析。如图 4a 所示, 在对流层中低层, 大气质量流在中西太平洋及贝加尔湖以西地区异常辐散, 辐散气流向西绕过青藏高原流经欧亚大陆在亚洲西部异常辐合, 与辐散场相对应, 亚洲西部异常辐合区存在气旋性环流异常, 中西太平洋和贝加尔湖以西的异常辐散区附近有反气旋性环流异常。500 hPa 以上的分布情况在辐散场上与对流层中低层相反, 大气质量流在亚洲西部异常辐散, 辐散气流向东流经欧亚在西伯利亚及西太平洋上空异常辐合。无辐散环流显示在对流层上层和下层环流异常在垂直方向上表现一致, 为相当正压结构。由于无辐散场对大气质量的输送通常比辐散场的输送要大, 从无辐散场上可以看出欧亚大陆上空大气质量环流与北太平洋上空大气质量环流呈“齿轮式”联系, 这在整个对流层内均如此。大气质量流的旋转和辐散分量的空间分布均表明了欧亚大陆和北太平洋间的确存在质量交换。

### 4.2 垂直环流异常特征

除了质量流之外, 垂直环流也可以反映大气运动在海陆间的联系。图 5 给出了位势高度和纬向环流的合成差值垂直剖面, 在纬向上欧亚—北太平洋上空存在一个顺时针环流圈。欧亚大陆西部上空存在深厚的上升气流, 西太平洋上空存在强烈的下沉气流。在位势高度场上, 欧亚大陆西部和北太平洋上空的异常低压系统延伸至对流层整层, 呈相当正

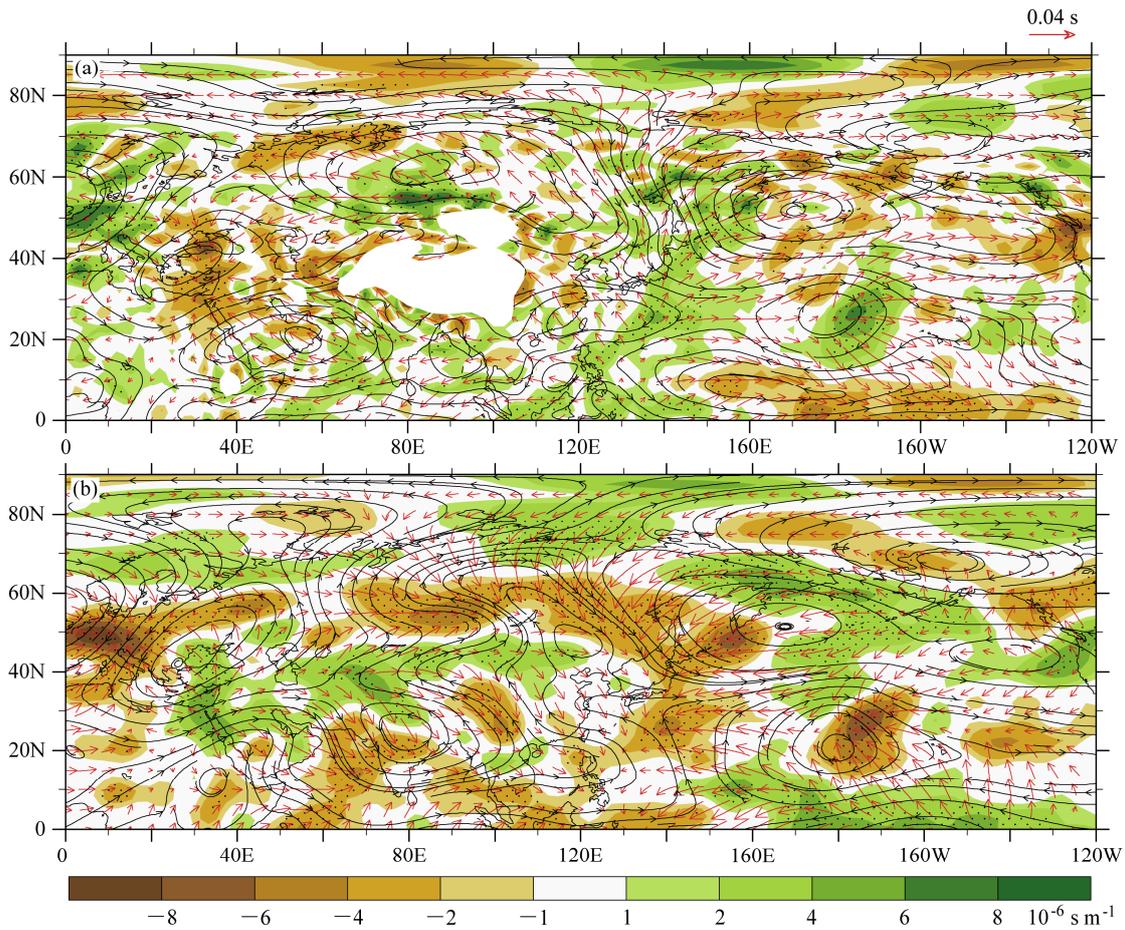


图4 春季  $I_{MAMEP}$  典型正/负异常年间大气质量流旋转分量的垂直积分（流线，单位：s）和辐散分量（箭头，单位：s）的合成差值：（a）地表至 500 hPa；（b）500 hPa 至 10 hPa。阴影区表示大气质量通量散度（单位： $10^{-6} \text{ s m}^{-1}$ ），带点区域表示散度通过 90% 信度检验

Fig. 4 The composite differences in rotational (streamlines, units: s) and divergent (arrows, units: s) components of atmospheric mass fluxes between typical years of positive and negative  $I_{MAMEP}$  anomalies in spring: (a) The mass fluxes are vertically integrated from the earth surface up to 500 hPa, (b) the mass fluxes are vertically integrated from 500 hPa up to 10 hPa. The shaded areas represent the divergence of atmospheric mass fluxes (units:  $10^{-6} \text{ s m}^{-1}$ ), the dotted areas represent statistically significant the divergence at 90% confidence level using  $t$  test

压结构，这些与大气质量流的高低层辐散场以及系统配置相吻合。大气质量在欧亚西部低层异常辐合，高层异常辐散，其上空的异常低压系统产生强烈的上升气流，补偿了高层的异常辐散，构成纬向环流的上升支；而大气质量在西太平洋低层异常辐散，高层异常辐合，北太平洋上空异常的低压系统使得其西侧产生下沉气流，补偿了低层的异常辐散，构成纬向环流的下沉支。辐散风场在对流层高、低层通过垂直运动互相补偿。可见，欧亚大陆和北太平洋上空大气质量的异常堆积和亏损的维持与他们上空异常的垂直运动有着密切的联系。同时，在  $80^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$  间的质量环流下沉支是该区域西侧及东侧垂直环流圈的共同支，体现了西欧地区、北太平洋地区环流变化与 EC 区域存在着密切地联

系。

### 4.3 波作用通量

为进一步揭示纬向异常垂直环流产生和维持的原因，根据 Takaya and Nakamura (1997, 2001) 的方法计算了波作用通量矢量的水平分量。从各层波作用通量和位势高度的合成差值分布亦可见（图6）大气呈相当正压结构。西欧沿岸、西伯利亚、北美西北部以及中低纬太平洋上空的位势高度为正异常，亚洲西部和中高纬太平洋上空的位势高度为负异常。亚洲西部有来自于西欧沿岸的波扰能量向东南方向的传播。波扰能量在亚洲西部地中海附近辐合，有利于加强该区域上空位势高度异常，使得该区域位势高度异常得以维持。自  $40^{\circ}\text{E}$  以东，波扰能量存在自西向东的分量并在西北太平洋地

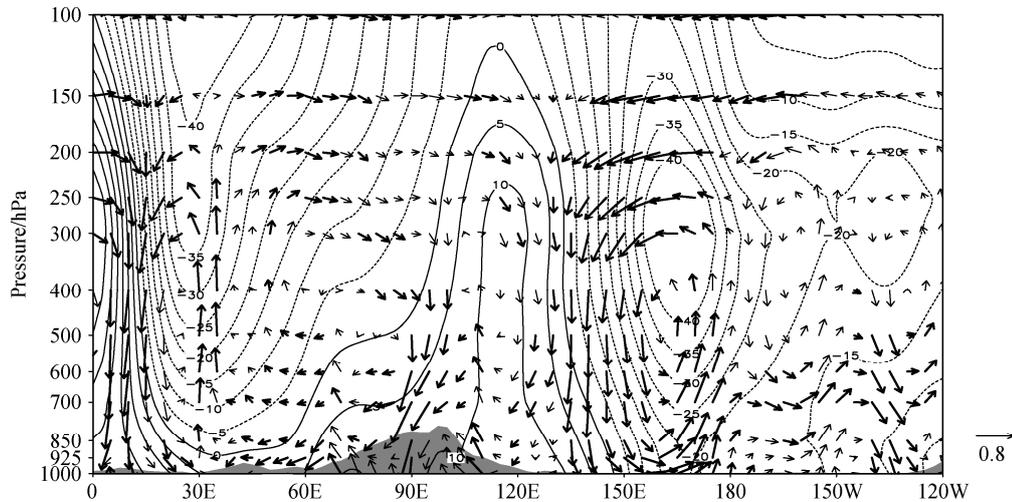


图 5 春季  $I_{MAMEP}$  典型正/负异常年间  $20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  上平均的位势高度(等值线, 单位: gpm)和垂直环流[箭头, 水平方向取辐散风纬向分量(单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 垂直速度单位:  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ ]的合成差值垂直剖面。粗箭头表示垂直环流通过 90% 的信度检验; 阴影区表示地形

Fig. 5 Vertical-zonal cross sections of composite differences in mean geopotential height (contours, units: gpm) and vertical circulation (arrows, the horizontal components are the zonal components of divergent winds (units:  $\text{m s}^{-1}$ ), and the units of vertical components are  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ ) averaged over  $20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  between typical years of positive and negative  $I_{MAMEP}$  anomalies in spring. Thick arrows represent statistically significant vertical circulation at 90% confidence level using  $t$ -test. The shaded areas represent topography

区辐合, 对西北太平洋区域的位势高度扰动的维持有利。

另外, 在对流层各层上均存在自副热带太平洋区经过中高纬太平洋向东北方向的波能传播, 最终在阿拉斯加附近辐合, 经向上形成并维持高度场异常中心“+ - +”的分布型, 且有利于阿拉斯加上空异常的反气旋性环流的维持与加强。

## 5 与中国同期气候异常的联系

研究表明, 纬向行星尺度波动在东亚季风的年际、年代际变化中起主导作用, 对东亚气候有着深远的影响 (Chen et al., 2003, 2005; Takaya and Nakamura, 2013)。可以预期, 上述北半球春季大气质量在欧亚—太平洋间的纬向振荡现象将对我国气候异常有着重要的影响。

### 5.1 $I_{MAMEP}$ 与春季降水的联系

水汽是太阳短波辐射和地表长波辐射的主要吸收体, 可以影响大气的热力状况, 从而推动海陆间大气质量的交换 (胡潮等, 2014), 同时水汽的源与汇可对当地降水的产生有重要影响。由于水汽主要集中在对流层中低层, 计算整层积分水汽通量时积分仅从地表气压  $p_s$  积分至 300 hPa。水汽通量的辐散辐合可以显示水汽输送的源与汇。由图 7a 所示,  $I_{MAMEP}$  与春季同期降水存在较好的

关系。 $I_{MAMEP}$  为正时, 在东亚以北地区、鄂霍次克海西岸以及西欧沿岸出现水汽辐散区, 对应当地降水显著减少, 而在欧亚西部及我国华北地区为水汽辐合区, 水汽分别来自于地中海和热带西太平洋洋面上空, 造成当地降水显著增多。 $I_{MAMEP}$  为负时, 东亚以北地区、鄂霍次克海西岸的水汽主要来自于中低纬太平洋洋面上空, 西欧沿岸的水汽则来自于北大西洋洋面上空 (图略)。可见热带和副热带海洋为欧亚大陆提供了充足的水汽来源, 并且水汽输送的源与汇和降水的分布也很好地对地对应。在纬向方向上, 由于水汽的摩尔数比干空气中氧气、氮气小得多, 水汽辐合的地区大气密度会减小, 辐散的地区大气密度会增大, 因此对纬向压力梯度异常可存在一定影响, 从而利于推动大气质量在海陆间进行交换。这与大气质量流辐散场的分布也是相一致的。

### 5.2 $I_{MAMEP}$ 与春季地表气温的联系

因为大气质量交换可使地表气温产生异常, 春季  $I_{MAMEP}$  与欧亚大陆春季地表气温也有密切联系 (图 7b)。当  $I_{MAMEP}$  为正时, 850 hPa 上欧亚大陆和西欧沿岸上空主要受反气旋式环流控制, 中高纬太平洋上空受气旋式环流控制。这三个环流系统对欧亚大陆的地表气温异常产生重要的影响。在西伯利亚反气旋的西侧, 其西南偏暖气流的北上有助于

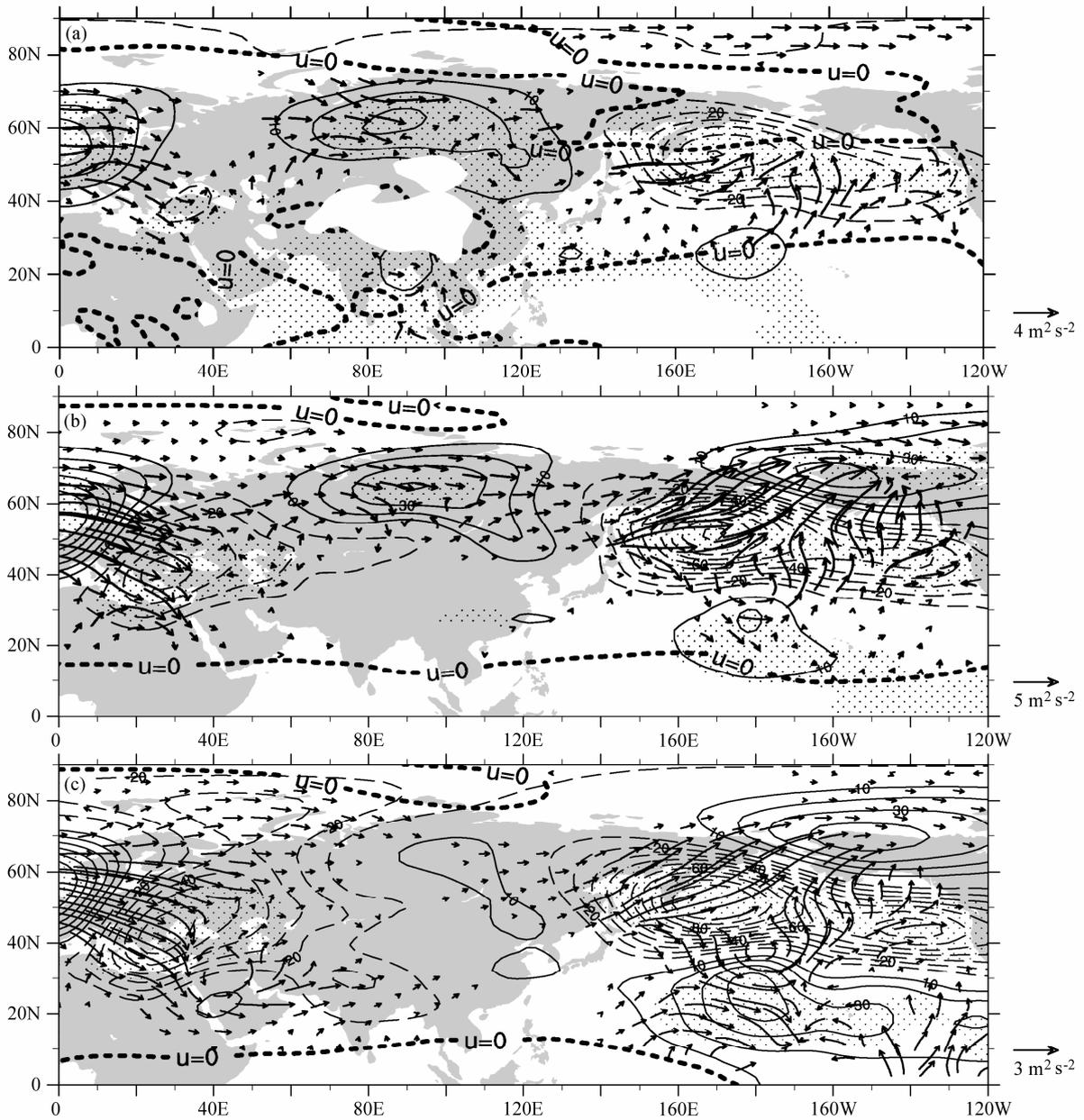


图 6 春季  $I_{MAMEP}$  典型正/负异常年间波作用通量 (箭头, 单位:  $m^2 s^{-2}$ ) 和位势高度 (阴影, 单位:  $gpm$ ) 的合成差值场: (a) 850 hPa; (b) 500 hPa; (c) 200 hPa. 打点区域表示位势高度通过 90% 信度检验, 粗虚线为纬向风零线

Fig. 6 Composite differences of wave activity fluxes (arrows, units:  $m^2 s^{-2}$ ) and geopotential height (shaded, units:  $gpm$ ) at (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa between typical years of positive and negative  $I_{MAMEP}$  anomalies in spring. The dotted areas represent geopotential height anomaly at 90% confidence level using  $t$  test, thick dotted line represent zero line of zonal wind

大气质量从中纬地区向高纬地区输送, 引起欧亚大陆北部地表温度显著升高, 而其东侧的偏南气流和太平洋上空气旋式环流西侧的东北气流使极地的冷空气南下, 大气质量从极地、高纬地区向中高纬地区输送, 有利于中高纬同期冷空气的加强, 这与  $I_{MAMEP}$  和西伯利亚以东、我国东北、华北—江淮地区以及韩国、日本南部的地表气温呈负相关相对

应。另外受西欧沿岸反气旋东侧偏北气流的影响, 来自极地和中高纬的冷空气南扩, 大气质量向南迁移, 这解释了当  $I_{MAMEP}$  为正时, 西欧至我国西北部分地区发生大面积显著降温的现象。

## 6 结论

利用 NCEP/NCAR 逐月平均地表气压、风场、

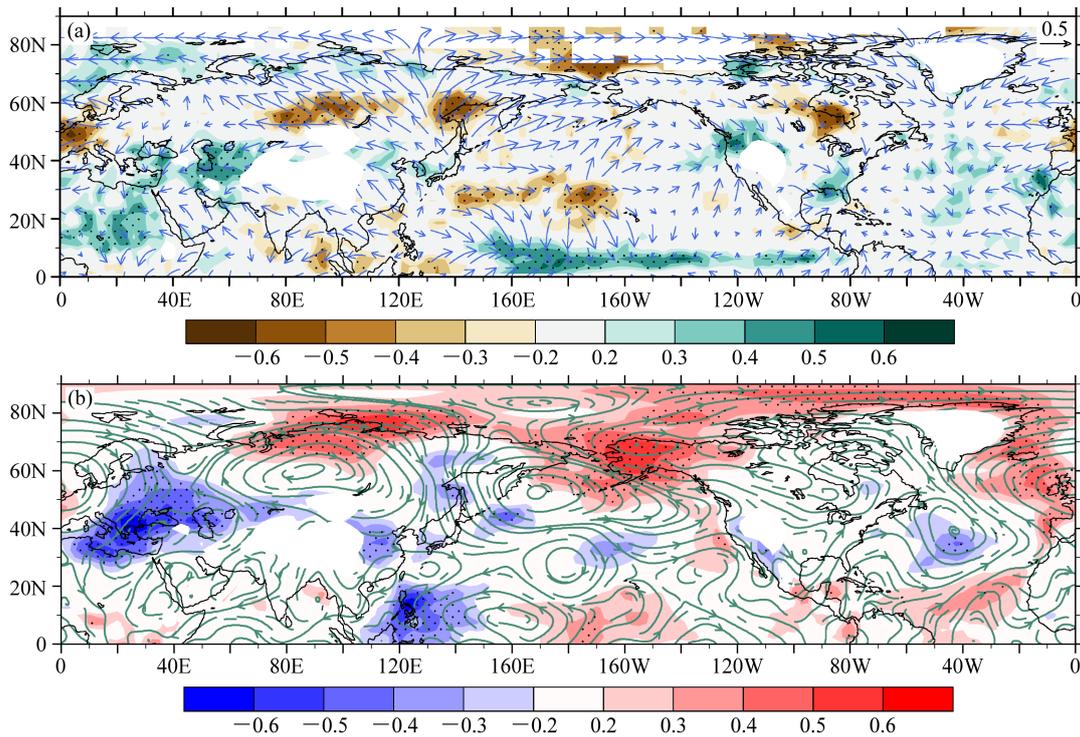


图7 北半球春季  $I_{MAMEP}$  与 (a) 同期春季 CMAP 降水量 (阴影)、整层水汽通量积分的辐散分量 (箭头) 的相关系数分布及与 (b) 地表气温 (阴影)、850 hPa 风场旋转分量 (流场) 的相关分布。(a) 中水汽通量从地表积分至 300 hPa。带点阴影区域表示正/负相关通过 95% 的信度检验  
 Fig. 7 Correlation coefficients of  $I_{MAMEP}$  in spring with (a) CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) rainfall (shaded) and the divergent component of integrated for total water vapor fluxes (arrows), and (b) surface air temperature (shaded), the rotational component of winds at 850 hPa (streamlines). In Fig.a, water vapor fluxes are integrated vertically from the earth surface up to 300 hPa. The dot-shaded areas represent positive/negative correlation at 95% confidence level using  $t$  test

比湿、位势高度、地表气温再分析资料以及 CMAP 月平均降水资料,对春季欧亚大陆—北太平洋上空大气质量迁移规律进行了研究,结果表明:

(1) 在 1979~2013 年期间,大气质量在欧亚大陆和中高纬太平洋上空呈反位相分布特征,为了描述这种现象,滤除南北半球际的质量交换的影响,定义了春季北半球欧亚—北太平洋上空大气质量迁移指数  $I_{MAMEP}$ 。分析表明,欧亚—太平洋间大气质量迁移具有显著的长期趋势。同时还具有 2~4 年及 5~7 年的周期变化。在 2002 年之前还存在明显的年代际变化特征。

(2) 整层积分的大气质量流显示在欧亚大陆和北太平洋之间存在明显的质量交换。在对流层中低层表现为大气质量在中西太平洋及贝加尔湖以西地区异常辐散,在亚洲西部异常辐合。500 hPa 以上的分布情况在辐散场上与对流层中低层相反。尽管高低层辐散风场方向变化大甚至相反,但大气水平扰动环境仍呈相当正压结构。在纬向上欧亚—北太平洋上空存在一个顺时针垂直环流圈,上升支位

于欧亚大陆西部,下沉支位于西太平洋上空。此外来自于西欧沿岸的波扰能量向东南方向传播,并在地中海、北太平洋附近辐合,利于这些区域上空位势高度异常扰动的维持。因此,垂直环流和波动水平运动在欧亚大陆和西北太平洋大气质量异常迁移中具有重要作用。

(3)  $I_{MAMEP}$  与春季同期降水及地表气温异常关系密切。 $I_{MAMEP}$  为正时,东亚以北地区、鄂霍次海西岸以及西欧沿岸为水汽辐散区,降水显著减少;欧亚西部及我国华北地区为水汽辐合区,降水显著增加。欧亚大陆的水汽主要来源于热带和副热带洋面上空。850 hPa 上西伯利亚反气旋西侧的大气质量向北输送使欧亚大陆北部地表显著增温,其东侧以及太平洋上空气旋西侧的大气质量向南输送则使西伯利亚以东、我国东北、华北—江淮地区及韩国、日本南部地表显著降温。另外西欧—我国西北部分地区发生的大面积显著降温现象与西欧沿岸反气旋东侧大气质量的向南迁移有关。

要说明的是,这里分析了春季北半球欧亚大陆与

北太平洋间可通过大气质量迁移和波动传播使环流异常在海陆区域间形成遥相关联系。Guan et al. (2015) 的分析表明,除了大气质量环流和 Rossby 波动传播,北半球冬季海陆间异常地表气压变化间的联系还与海陆热力差异推动有关。那么,在北半球春季,大陆与海洋地表气压变化的遥相关是否也受到海陆热力差异强迫呢?这一问题还有待未来深入研究。

**致谢** NCEP/NCAR 再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<http://www.cdc.noaa.gov>)。文中诸图均用 NCL 及 GrADS 软件绘制。

### 参考文献 (References)

- Baldwin M P. 2001. Annular modes in global daily surface pressure [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (21): 4115–4118, doi:10.1029/2001GL013564.
- Bowman K P, Cohen P J. 1997. Interhemispheric exchange by seasonal modulation of the Hadley circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (16): 2045–2059, doi:10.1175/1520-0469(1997)054<2045:IEBSMO>2.0.CO;2.
- Chen T C, Chen J M, Schubert S, et al. 1997. Seasonal variation of global surface pressure and water vapor [J]. *Tellus A*, 49 (5): 613–621, doi:10.1034/j.1600-0870.1997.t01-4-00007.x.
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4797, doi:10.1029/2003JD003834.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D14): D14110, doi:10.1029/2004JD005669.
- Christy J R, Trenberth K E, Anderson J R, et al. 1989. Large-scale redistributions of atmospheric mass [J]. *J. Climate*, 2 (2): 137–148, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<0137:LSROAM>2.0.CO;2.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2001. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2): 263–266, doi:10.1029/2000GL011563.
- Guan Z Y, Lu C H, Mei S L, et al. 2010. Seasonality of interannual inter-hemispheric oscillations over the past five decades [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (5): 1043–1050, doi:10.1007/s00376-009-9126-z.
- 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]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120 (23): 11846–11861, doi:10.1002/2015JD023850.
- 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 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (7): 1519–1531. Hu Chao, Guan Zhaoyong, Li Minggang. 2014. The seasonal cycle of redistribution of atmospheric mass between continent and ocean in the Northern Hemisphere [J]. *Sci. China Earth Sci. (in Chinese)*, 57 (7): 1501–1512, doi:10.1007/s11430-014-4871-y.
- 胡潮, 卢楚翰, 管兆勇, 等. 2015. 9 个 CMIP5 模式模拟的大气质量海陆间迁移的季节循环 [J]. *大气科学学报*, 38 (5): 588–598. Hu Chao, Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, et al. 2015. Seasonal cycle of atmospheric mass migrations between continents and oceans simulated by nine CMIP5 models [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 588–598, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150318002.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–472, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea level pressure profile [J]. *J. Meteor.*, 8 (1): 52–59, doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0052:SAIVOT>2.0.CO;2.
- 卢楚翰, 管兆勇, 梅士龙, 等. 2008. 大气质量南北涛动的季节循环 [J]. *科学通报*, 53 (21): 2638–2645. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Mei Shilong, et al. 2008. The seasonal cycle of interhemispheric oscillations in mass field of the global atmosphere [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 53 (20): 3226–3234, doi:10.1007/s11434-008-0316-3.
- 卢楚翰, 管兆勇. 2009. 春季大气南北涛动年际变化及其与中国气候的联系 [J]. *自然科学进展*, 19 (5): 513–519. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong. 2009. On the interannual variation in spring atmospheric inter-hemispheric oscillation linked to synchronous climate in China [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 19 (5): 513–519, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2009.05.006.
- 卢楚翰, 管兆勇, 蔡佳熙. 2010. 夏季南北半球际大气质量涛动及其与季风异常的联系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 40 (6): 802–809. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Cai Jiaxi. 2010. Interhemispheric atmospheric mass oscillation and its relation to interannual variations of the Asian monsoon in boreal summer [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 53 (9): 1343–1350, doi:10.1007/s11430-010-4023-y.
- 卢楚翰, 管兆勇, 李永华, 等. 2013. 太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1084–1094. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Li Yonghua, et al. 2013. Interdecadal linkages between Pacific decadal oscillation and interhemispheric air mass oscillation and their possible connections with East Asian monsoon [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 56 (4): 1084–1094, doi:10.6038/cjg20130404.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (23): 2985–2988, doi:10.1029/97GL03094.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- Takaya K, Nakamura H. 2013. Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves [J]. *J. Climate*, 26 (23): 9445–9461, doi:10.1175/JCLI-D-12-00842.1.
- Toumi R, Hartell N, Bignell K. 1999. Mountain station pressure as an indicator of climate change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (12): 1751–1754, doi:10.1029/1999GL900351.
- Trenberth K E. 1981. Seasonal variations in global sea level pressure and the total mass of the atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 86 (C6): 5238–5246, doi:10.1029/JC086iC06p05238.
- Trenberth K E, Christy J R. 1985. Global fluctuations in the distribution of atmospheric mass [J]. *J. Geophys. Res.*, 90 (D5): 8042–8052, doi:10.

- 1029/JD090iD05p08042.
- Trenberth K E, Christy J R, Olson J G. 1987. Global atmospheric mass, surface pressure, and water vapor variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 92 (D12): 14815–14826, doi:10.1029/JD092iD12p14815.
- Trenberth K E, Guillemot C J. 1994. The total mass of the atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D11): 23079–23088, doi:10.1029/94JD02043.
- Trenberth K E, Smith L. 2005. The mass of the atmosphere: A constraint on global analyses [J]. *J. Climate*, 18 (6): 864–875, doi:10.1175/JCLI-3299.1.
- 杨鑑初. 1956. 北半球大气质量的平均月际变化 [J]. *气象学报*, 27 (1): 37–59. Yang C C. 1956. The mean monthly changes of air mass of the Northern Hemisphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27 (1): 37–59, doi:10.11676/qjxb1956.003.
- 张燕, 黄菲, 宫晓庆. 2008. NCEP/NCAR 再分析资料中南北半球大气质量交换的特征研究 [J]. *热带气象学报*, 24 (1): 74–80. Zhang Yan, Huang Fei, Gong Xiaoqing. 2008. The characteristics of the air mass exchange between the Northern and Southern Hemisphere [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (1): 74–80, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.01.010.
- Zhao Y F, Li J P. 2006. Discrepancy of mass transport between the Northern and Southern Hemispheres among the ERA-40, NCEP/NCAR, NCEP-DOE AMIP-2, and JRA-25 reanalysis [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (20): L20804, doi:10.1029/2006GL027287.