

冯珺, 廖宏. 2017. 冬春季东亚气溶胶流出通量年际变率的相关环流异常分析 [J]. 大气科学, 41 (2): 251–262. Feng Jin, Liao Hong. 2017. Interannual variation of East Asian aerosols outflow in the winter–spring and the associated atmospheric circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 251–262, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1607.16146.

# 冬春季东亚气溶胶流出通量年际变率的相关环流异常分析

冯珺<sup>1</sup> 廖宏<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室 (LAPC), 北京 100029

2 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044

**摘 要** 本文使用戈达德对地观测系统 (Goddard Earth Observing System, GEOS) 全球三维大气化学传输模式 GEOS-Chem 模拟了气象场驱动下 1986~2006 年冬春季东亚到太平洋区域气溶胶的流出通量, 分析了流出通量的年际变率及其相关的环流异常。结果表明, 偏多 (少) 的东亚气溶胶流出对应东北亚—西太平洋区域 (Northeast Asia–western Pacific, NAWP) 500 hPa 定常波负值中心强度变强 (弱)。NAWP 区域 500 hPa 位势高度场负 (正) 异常还可能造成气溶胶流出路径的变化, 即更多 (少) 的气溶胶相对于气候态偏北 5~10 个纬度的路径向太平洋区域传输。这种位势高度场上的异常伴随着对流层中低层西风和大气斜压性异常, 从而引起东亚到太平洋区域气溶胶流出通量及其路径的年际变化。

**关键词** 冬春季 东亚 气溶胶流出 年际变率 大气环流

文章编号 1006-9895(2017)02-0251-12

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1607.16146

## Interannual Variation of East Asian Aerosols Outflow in the Winter–Spring and Associated Atmospheric Circulation

FENG Jin<sup>1</sup> and LIAO Hong<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** The interannual variation (IAV) in aerosols mass outflow from East Asia to Pacific driven by meteorological fields in the winter–spring time and the associated atmosphere circulations are explored by the global three-dimensional Goddard Earth Observing System (GEOS) chemical transport model (GEOS-Chem) over 1986–2006. More (less) East Asian aerosols outflow to the downstream North Pacific region is concurrent with the enhanced (depressed) stationary wave center over Northeast Asia/western Pacific region (NAWP) at 500 hPa. More East Asian aerosols mass tends to be transported downstream through a path 5–10 degrees north of the climatological path in the years with negative geopotential height anomalies over NAWP. The anomalies of the geopotential height at 500 hPa over NAWP regions are accompanied by anomalies of westerly winds and baroclinicity in the lower troposphere, which induce the IAV of the flux

收稿日期 2016-03-06; 网络预出版日期 2016-07-14

作者简介 冯珺, 男, 1983 年出生, 博士, 主要从事气象场对气溶胶的影响和大气动力学方面的研究。E-mail: jfeng@ium.cn

通讯作者 廖宏, E-mail: hongliao@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441200

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2014CB441200)

and the path of the East Asian aerosols outflow.

**Keywords** Winter-spring, East Asian, Aerosol outflow, Interannual variation, Atmospheric circulation

## 1 引言

随着东亚地区工业化水平快速发展,大量的人类活动气溶胶及其前体物被排放于大气中(Irie et al., 2005; Ohara et al., 2007; Zhang et al., 2007a, 2007c),使得当前东亚地区的气溶胶浓度在整个北半球中高纬度已达到了较高水平。东亚地区排放的气溶胶不仅可以引起东亚本地严重的空气污染和气候变化(Kaufman et al., 2002; 石广玉等, 2008; Li et al., 2011; Zhang et al., 2012; Wang et al., 2013; Luo et al., 2014; Mu and Liao, 2014; 廖礼等, 2015),也会向下游地区的太平洋和北美大陆(Simoneit, 2004; Dunlea et al., 2009; Uematsu et al., 2010; Verma et al., 2015)等地区流出,影响这些地区的空气质量,引起下游地区明显的气候效应(Jaffe et al., 1999, 2005; Holzer et al., 2003, 2005; Park et al., 2004; Liang et al., 2004; Heald et al., 2006; Chin et al., 2007; Hadley et al., 2007; Liu et al., 2008; Wang et al., 2009; Yu et al., 2012; Matsui et al., 2013a; Jiang et al., 2013; Lin et al., 2014)。通过全球三维大气化学传输模式 GEOS-Chem 模拟的 1998 和 2001 年的全球气溶胶, Park et al. (2004) 指出跨太平洋输送的亚洲硫酸盐对美国硫酸盐地面背景浓度的贡献可达 30%,这完全可以影响美国本地的减排效果。使用戈达德化学气溶胶辐射传输模式(Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport Model, GOCART), Yu et al. (2012) 指出跨太平洋输送并流入北美的气溶胶可以使得北美大气层顶和地面的晴空气溶胶辐射强迫分别减少  $1.7 \text{ W m}^{-2}$  和  $3.0 \text{ W m}^{-2}$ , 分别占北美气溶胶直接辐射强迫的 31% 和 37%。另外,在太平洋地区,亚洲流出的气溶胶沉降到海洋中,可以影响海洋生态系统(Elliott et al., 2003; Nakamura et al., 2006),甚至通过影响云微物理过程还可能进一步影响北太平洋的风暴轴强度的长期变化(Zhang et al., 2007b; Wang et al., 2014b)以及太平洋地区热带气旋的发展(Wang et al., 2014a, 2014c)。鉴于此,认识东亚气溶胶流出及其年际变率对于研究下游地区乃至全球的气候变率具有一定的参考价值。

许多文献已经指出全年东亚气溶胶流出峰值

出现在冬春季。例如,使用空气质量模式 CMAQ/PASCAL, Matsui et al. (2013b) 指出亚洲黑碳的流出在冬春季最高而夏季最低。Yang et al. (2015) 通过分析 1986~2006 年 GEOS-Chem 模拟结果,认为在环流场的影响下,硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )、硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )、铵盐( $\text{NH}_4^+$ )、有机碳(OC)和黑碳(BC)的流出峰值出现在 1~5 月。冬春季节中纬度气旋和相应的暖输送带活动相对其他季节更加频繁,同时对对流层高层西风急流也更强(Holzer et al., 2003; Liang et al., 2004; Holzer et al., 2005; Wuebbles et al., 2007; Yu et al., 2012; Luan and Jaeglé, 2013; Matsui et al., 2013b; Yang et al., 2015),这可能使得环流场对东亚地区气溶胶的输出起到明显的作用。除了季节差异,东亚气溶胶流出也存在明显的年际变化。使用 GEOS-Chem 模式, Yang et al. (2015) 在同时考虑东亚排放变化和气象场变化的情况下,使用平均距平绝对值百分比作为统计量,定量计算了东亚气溶胶的全年流出量平均年际变率可达 5.2%。然而其文中并没有深入分析导致这一年际变率的环流系统原因和可能机制。

针对天气尺度的气溶胶流出事件,很多研究分析指出影响东亚气溶胶流出的有利气象场和中纬度天气尺度气旋活动有关(Holzer et al., 2005; Wuebbles et al., 2007; Luan and Jaeglé, 2013)。关于沙尘气溶胶年际变化, Gong et al. (2006) 使用 1960~2003 年的北半球气溶胶区域气候模式(Northern Aerosol Regional Climate Model, NARCM)的结果研究了亚洲沙尘的输出量同北美地区沙尘的输入量之比,发现该比值和太平洋—北美遥相关(Pacific/North America teleconnection, PNA)指数为显著负相关,和西太平洋遥相关指数(West Pacific teleconnection, WP)为显著正相关,这说明气溶胶的跨太平洋输送和大范围的环流背景场具有密切的关系。而针对东亚地区人类活动气溶胶流出年际变率的环流背景场问题,还很少有研究涉及。本文将使用大气化学传输模式 GEOS-Chem 模拟的结果,定量计算大气环流影响下冬春季东亚气溶胶流出年际变率的幅度,分析与其年际变率关联的环流场异常,阐述环流场异常影响流出年际变率的可能物理过程和机制。

## 2 模式和方法

本文使用的 GEOS-Chem (<http://acmg.seas.harvard.edu/geos/index.html> [2016-04-30], 8-02-01 版本) 由美国哈佛大学大气化学模式小组作为管理核心, 由全体用户组成的开源社区支持, 可以使用美国国家航空航天局下属全球模拟同化办公室发展的戈达德对地观测系统(Goddard Earth Observing System, GEOS) 提供的 GEOS-4 同化气象场资料进行驱动运行。GEOS-Chem 当前已经发展成为较为完整的大气化学模拟系统, 并且在全球大气化学成分研究的各个领域得到了广泛的应用, 被认为是一个成熟的、可用于研究大气成分问题的三维全球大气化学传输模式。

本文使用的模拟方法和设置参考 Yang et al. (2015), 包括: 采用的标准全化学模拟可以详细模拟对流层臭氧—氮氧化物—碳氢化合物—气溶胶(O<sub>3</sub>—NO<sub>x</sub>—hydrocarbon—aerosol) 大气化学机制。该机制能够详细地模拟对流层中气溶胶及其前体物分布及浓度, 包括硫酸盐(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、铵盐(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、一次和二次有机碳(OC)、黑碳(BC)、沙尘和海盐气溶胶(Bey et al., 2001; Park et al., 2003, 2004; Alexander et al., 2005; Liao et al., 2007)。模式水平分辨率为 2.5°经度×2°纬度。模拟使用的参数化方案包括: 边界层混合过程采用 TURBDAY 全混合方案 (Bey et al., 2001; Wu et al., 2007; Walker et al., 2012); 示踪物平流过程采用 Lin and Rood (1996) 的半拉格朗日通量平流算法; 深对流采用 Zhang and McFarlane (1995) 的方案, 浅对流采用 Hack (1994) 的方案; 湿沉降采用 Liu et al. (2001) 描述的湿沉降方案。

模式的排放, 在 GEOS-Chem 模式中除亚洲地区的人为排放外, 全球其他地区的臭氧前体物、气溶胶前体物及气溶胶排放清单参考 Park et al. (2003, 2004) 的设置。在亚洲区域的人为排放清单则参考了 Streets et al. (2003), Streets et al. (2006) 和 Zhang et al. (2007a) 的设置。生物质燃烧来自于全球火灾排放数据库 (Global fire emissions database, GFED V2, Giglio et al., 2006; van der Werf et al., 2006)。生物排放清单则来自于自然气体和气溶胶排放模块 MEGAN 2.0 (Guenther et al., 2006)。本文重点考虑气象场在驱动东亚气溶胶输出长期变率中的作用。考虑到人类活动气溶胶和生物质燃烧气溶胶排放

也具有比较明显的年际变率 (Schultz, 2002; Duncan et al., 2003), 可能会影响结果。所以本文将人类活动和生物质燃烧排放水平固定到 2005 年, 以便突出气象场的作用。

考虑到东亚地区主要以人类活动产生的气溶胶为主, 海盐和沙尘为自然源为主的气溶胶, 并非这一地区的主要成分 (Ye et al., 2003; Duan et al., 2006), 所以设定模拟的 PM<sub>2.5</sub> 通量设定为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC 和 BC 这 5 种气溶胶通量之和。本文定义东亚气溶胶的流出为: 通过东亚下游 150°E, 纬度范围为 25°~55°N, 垂直范围为地表到 100 hPa 的经度剖面的气溶胶通量。由于 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC 和 BC 的流出峰值出现在 1~5 月, 所以定义冬春季气溶胶流出量为这 5 个月的流出通量之和。通过和 2001~2006 年间 MODIS 卫星资料观测的东亚下游地区气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 进行对比, Yang et al. (2015) 认为在以上模拟方案设定下, GEOS-Chem 模式对东亚流出气溶胶通量具有良好的模拟效果。

在此基础上, 本文利用以上设置下运行该模式得到的模拟资料进行统计分析。东亚气溶胶流出的年际变率可以由流出通量的距平绝对值 (Absolute Departure, 下面用  $F^{AD}$  表示) 和距平绝对值百分比 (Absolute Percentage Departure, 下面用  $F^{APD}$  表示) 说明, 两者分别定义为

$$F_i^{AD} = \left| F_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \right|, \quad (1)$$

$$F_i^{APD} = \frac{F_i^{AD}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i} \times 100\%, \quad (2)$$

其中,  $i$  为年份,  $F_i$  是第  $i$  年冬春季气溶胶的流出总量,  $n$  为总年数, 这里为 1986~2006 共 21 年。 $F_i^{AD}$  和  $F_i^{APD}$  分别说明了每年流出量年际变率的绝对和相对大小。 $F^{AD}$  和  $F^{APD}$  序列的多年平均值为平均距平绝对值和平均距平绝对值百分比, 已经在一些气溶胶浓度的年际变率研究中使用过 (Fu and Liao, 2012; Mu and Liao, 2014)。

## 3 气象场驱动下冬春季东亚气溶胶流出通量的气候态和年际变率

图 1 显示了东亚地区多年平均的 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC 和 BC 气溶胶流出通量沿 150°E 垂直剖面的分布。可见 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC

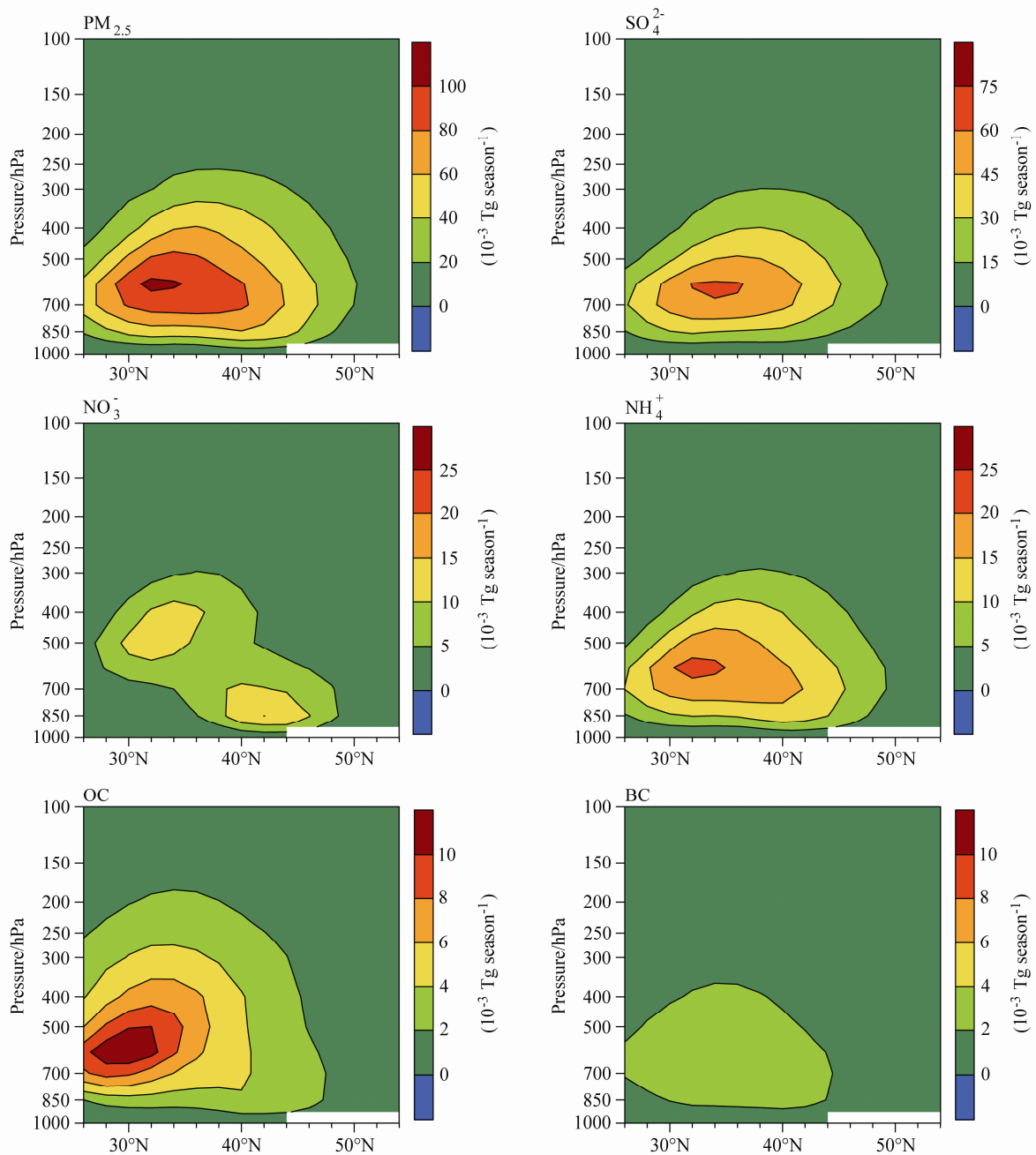


图1 1986~2006年模拟的冬春季东亚流出的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、OC和BC气溶胶通量(单位: $10^{-3} \text{ Tg season}^{-1}$ )的沿着 $150^\circ\text{E}$ 的纬度—高度剖面( $25^\circ\sim 55^\circ\text{N}$ ,  $1000\sim 100 \text{ hPa}$ )

Fig. 1 The simulated multi-year mean  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , OC and BC outflow fluxes (units:  $10^{-3} \text{ Tg season}^{-1}$ ) along the latitude–height ( $25^\circ\sim 55^\circ\text{N}$ ,  $1000\sim 100 \text{ hPa}$ ) cross section of  $150^\circ\text{E}$  in the winter–spring of 1986–2006

和BC的流出最大值位于 $30^\circ\sim 40^\circ\text{N}$ 范围的700 hPa高度,这同前人研究结论一致(Wang et al., 2009; Yang et al., 2015)。而 $\text{NO}_3^-$ 流出存在两个最大值中心,分别位于 $30^\circ\sim 34^\circ\text{N}$ 范围500 hPa高度附近以及 $40^\circ\sim 50^\circ\text{N}$ 范围850 hPa高度附近。另外, $155^\circ\text{E}$ ,  $145^\circ\text{E}$ 剖面上的气溶胶流出通量结构(图略)和 $150^\circ\text{E}$ 剖面的结构一致。说明 $150^\circ\text{E}$ 处的气溶胶流

出通量垂直结构具有较好的代表性。

图2为1986~2006年间气象场驱动的东亚地区 $\text{PM}_{2.5}$ 流出通量距平的多年序列。可见 $\text{PM}_{2.5}$ 流出通量距平具有较强的年际变化特征。这里仅仅给出 $\text{PM}_{2.5}$ 流出通量距平的结果是因为 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、OC和BC流出通量距平的年际变化序列同 $\text{PM}_{2.5}$ 流出通量距平序列的相关系数均大于0.72,

均通过了 99% 的信度检验。下面分析气溶胶流出通量的环流场特征也将主要使用  $PM_{2.5}$  流出通量作为代表序列进行分析。

图 3 为最大和多年平均的冬春季东亚气溶胶流出通量的  $F^{AD}$  和  $F^{APD}$  值。 $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、OC 和 BC 的多年平均年际变率分别为 0.40、0.19、0.08、0.08、0.04 和 0.02  $Tg\ season^{-1}$ ，最大年际变率分别可达 1.06、0.51、0.24、0.23、0.10 和 0.04  $Tg\ season^{-1}$ 。可见冬春季东亚硫酸盐流出通量无论是多年平均值还是最大值都超过其他气溶胶种类 2~10 倍，这与硫酸盐及其前体物在东亚地区人类活动排放中的比例以及硫酸盐在东亚地区气溶胶浓度的比例是一致的 (Ohara et al., 2007; Mu and Liao, 2014; Yang et al., 2015)。多年平均的  $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、

$NH_4^+$ 、OC 和 BC 流出通量的平均相对年际变率值分别为 6.7%、5.8%、11.6%、7.2%、7.4% 和 5.6%；最大值分别为 17.7%、15.7%、37.0%、20.6%、16.8% 和 15.1%。很明显在环流的影响下东亚流出硝酸盐的年际变化最为明显。

#### 4 与冬春季东亚气溶胶流出年际变率相关的环流场

图 4 给出了冬春季  $PM_{2.5}$  流出通量年际序列和东亚及其下游的北太平洋地区的海平面气压场、850 hPa 和 500 hPa 位势高度场上的相关图。我们主要考虑中低对流层的环流场是因为过去的研究 (Chin et al., 2007; Wang et al., 2009) 和上一节的结果已经表明气溶胶的跨界传输的主要层次位于对

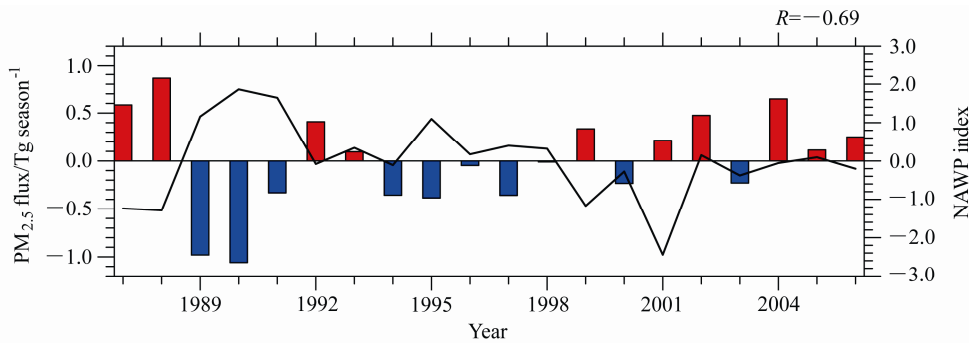


图 2 模拟的 1986~2006 年冬春季从图 1 所示剖面的  $PM_{2.5}$  流出通量距平的年际序列 (柱状图, 左坐标轴) 和 GEOS-4 资料计算的东北亚—西太平洋区域标准化的面积加权平均位势高度场序列 (NAWP 指数, 详见第 4 节, 折线图, 右坐标轴), 两者的相关系数为 -0.69

Fig. 2 The interannual departure series of the simulated  $PM_{2.5}$  outflow flux from the vertical cross section shown in Fig. 1 (color bars, left axis) and the Northeast Asian-western Pacific region (NAWP) index calculated from the GEOS-4 dataset (black line, right axis) in the winter-spring over 1986–2006. The correlation coefficient between the two series is -0.69

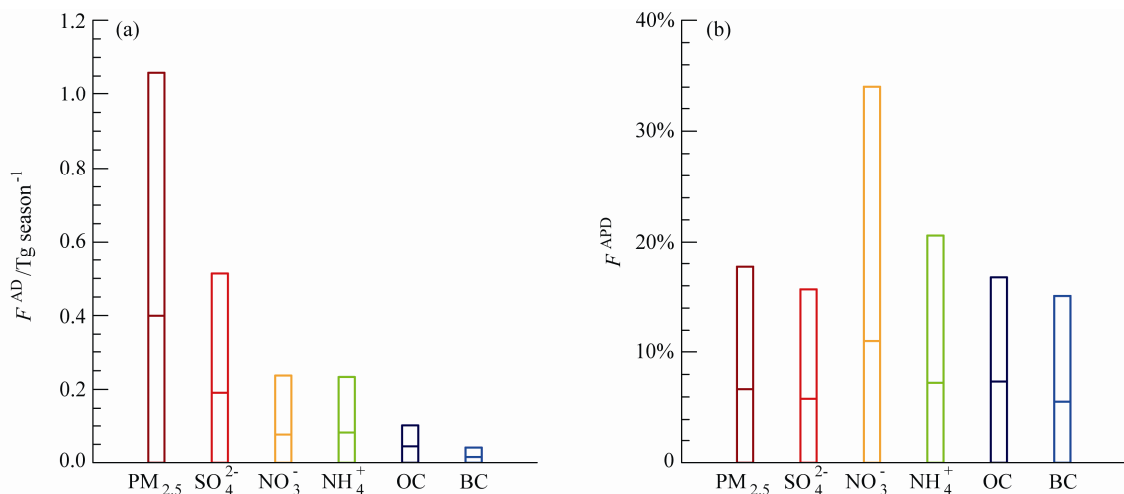


图 3 模拟的 1986~2006 年冬春季东亚  $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、OC 和 BC 气溶胶流出通量的 (a) 最大 (柱状图的上限) 和平均 (柱状图中间线) 的年际距平绝对值 ( $F^{AD}$ ) 以及 (b) 最大 (柱状图的上限) 和平均 (柱状图中间线) 的年际百分比距平绝对值 ( $F^{APD}$ )

Fig. 3 (a) The maximum (top edges of the bars) and averaged (middle lines in the bars) interannual absolute departure ( $F^{AD}$ ), and (b) the maximum (top edges of the bars) and averaged (middle lines in the bars) interannual absolute percentage departures ( $F^{APD}$ ) of the simulated  $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、OC and BC outflow fluxes from East Asia in the winter-spring over 1986–2006



流层的中低层。其中图 4c 显示在 500 hPa 位势高度场上, 东北亚—西太平洋区域 (Northeast Asia/western Pacific, NAWP) ( $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ )

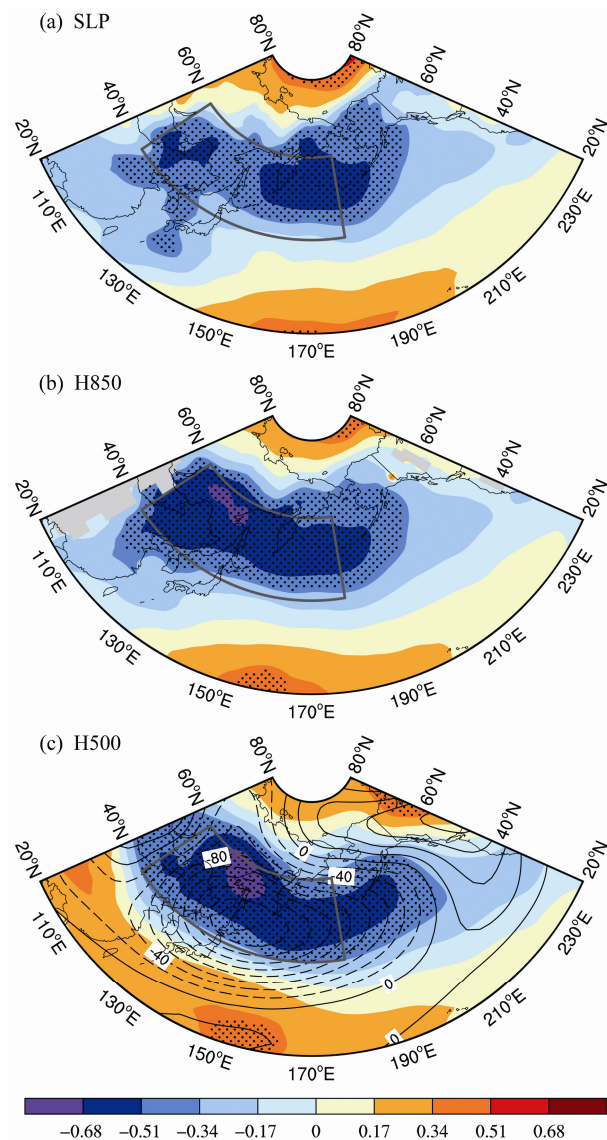


图 4 模拟的 1986~2006 年东亚  $\text{PM}_{2.5}$  流出通量年际序列和 GEOS-4 (a) 海平面气压 (SLP)、(b) 850 hPa 位势高度场和 (c) 500 hPa 位势高度场的相关系数分布。打点区域代表通过 95% 的信度检验, 图 4c 中等值线为 500 hPa 位势高度场纬偏场, 代表 500 hPa 的定常波, 灰色框代表东北亚—西太平洋区域 (NAWP)

Fig. 4 Correlation coefficient between simulated East Asian  $\text{PM}_{2.5}$  outflow flux and the (a) sea level pressure (SLP), (b) geopotential height at 850 hPa (H850), and (c) geopotential height at 500 hPa (H500) from GEOS-4 data over 1986–2006. The dotted areas are for values passing the two-tail  $t$  test at the 95% confidence level. The contours in (c) represent the zonal anomalies of geopotential height at 500 hPa, denoting the stationary wave at 500 hPa. The grey polygon denotes the Northeast Asia–western Pacific region (NAWP)

存在一个显著的负相关区。说明这一地区冬春季 500 hPa 位势高度的负 (正) 异常总是伴随着同期东亚地区气溶胶流出量的正 (负) 异常。本文主要基于 500 hPa 的位势高度场定义的异常对东亚冬春季气溶胶流出的环流特征进行分析, 不但因为在 SLP 和 850 hPa 位势高度场上, 相关的环流异常的分布型同 500 hPa 的结果类似 (图 4), 而且因为对比 500 hPa 位势高度场纬偏场 (减去纬向平均) 的气候态, NAWP 区域位势高度场的异常是 500 hPa 中高纬度定常波的一部分, 对应一个负值中心。利用 GEOS-4 资料, 我们将 NAWP 区域标准化的面积加权平均位势高度场序列作为一个与冬春季东亚气溶胶流出量年际变率关联的大气环流指数, 称之为 NAWP 指数 (图 2)。则负 (正) 的 NAWP 指数反映了这一地区 500 hPa 定常波中心的强 (弱)。考虑到这一地区冬季定常波对应着东亚大槽, 所以进一步计算得到 NAWP 指数和东亚大槽强度年际序列 (崔晓鹏和孙照渤, 1999) 的相关系数为 0.58, 通过 99% 信度的  $t$  检验, 说明 NAWP 指数的确对应了这一区域定常波的年际变化。1986–2006 年期间 NAWP 指数和冬春季东亚  $\text{PM}_{2.5}$  流出量年际序列则呈现显著的反相关, 相关系数为  $-0.69$ , 通过了 99% 的显著性检验。这表明, NAWP 区域的强 (弱) 定常波总是伴随着冬春季亚洲气溶胶的流出量的正 (负) 异常。

为了进一步探讨 NAWP 区域定常波强度 (或者 NAWP 指数) 与东亚气溶胶流出通量和流出结构变化的关系, 本文以分别选取 5 个负 NAWP 指数年 (1988、1989、1990、1994、1996) 和 5 个正 NAWP 指数年 (1986、1987、1998、2000、2002) 对冬春季亚洲气溶胶的流出结构进行合成分析 (负 NAWP 指数年减去正 NAWP 指数年, 图 5), 可见在 NAWP 区域定常波振幅偏强 (弱) 年, 各个种类的气溶胶流出量偏多 (少)。对于剖面上流出量之和, NAWP 指数负年相对于正年的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、OC 和 BC 流出量分别增加 0.98 (18%)、0.46 (15%)、0.18 (31%)、0.10 (10%)、0.11 (20%) 和 0.04 (16%)  $\text{Tg season}^{-1}$ , 且均通过了 99% 的显著性检验。除了流出通量的差异,  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  流出分布在垂直剖面上最大的差异出现在  $40^{\circ}\text{N}$  附近 700 hPa 的高度上, 较多年平均的位置更偏北 5~10 个纬度。这说明 NAWP 区域定常波中心的正异常年 (NAWP 指数的负位相) 不仅伴随着整个冬春季东亚气溶胶流出量的明显增加, 还使得更多的气溶胶

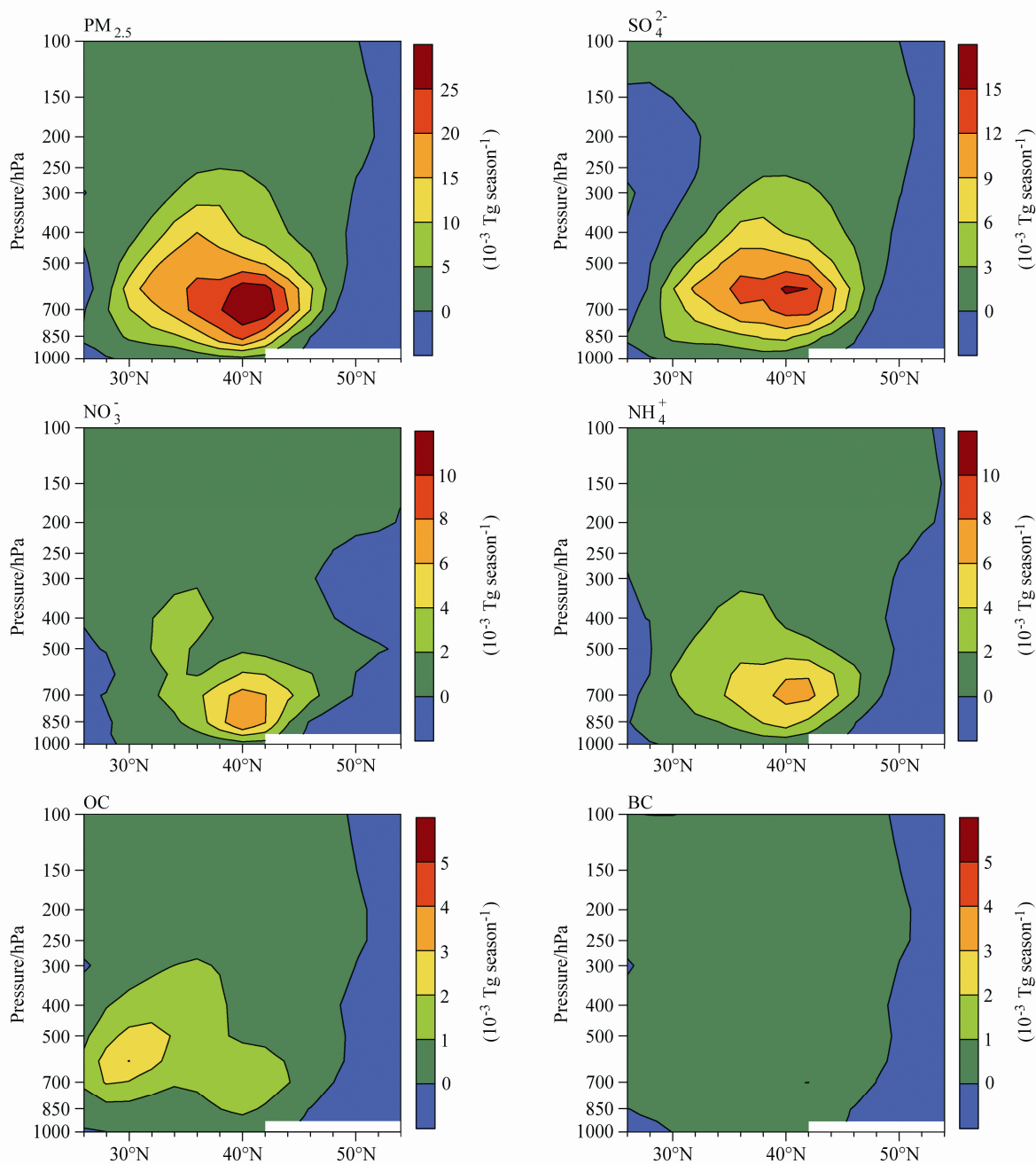


图5 模拟的1986~2006年冬春季东亚流出的 $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、OC和BC气溶胶流出通量(单位： $10^{-3} \text{ Tg season}^{-1}$ ) 在NAWP指数的5个负位相年和5个正位相年的合成差。图中垂直剖面同图1

Fig. 5 The composite differences in the simulated  $PM_{2.5}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , OC and BC fluxes (units:  $10^{-3} \text{ Tg season}^{-1}$ ) between the five negative NAWP index years and five positive NAWP index years in the winter–spring over 1986–2006. The vertical cross section is the same as that in Fig. 1

自更偏北的路径流出。

## 5 环流场影响冬、春季东亚气溶胶流出年际变化的可能机制

### 5.1 准定常的西风平流作用

由于西风导致的气溶胶平流作用(Wuebbles et

al., 2007), NAWP 区域的中纬度西风强度的年际变率可能会影响到东亚气溶胶流出通量的年际变化。本小节讨论 NAWP 指数代表的定常波异常伴随的西风异常及其与冬春季亚洲气溶胶的流出量及结构的关系。本文主要分析 700 hPa 上的风场异常特征, 因为这一层是气溶胶流出最大值所在的层次

(图 1)。图 6a 为 1986~2006 年 GEOS-4 资料得出东亚—太平洋地区多年平均的 700 hPa 风场, 可见 (30°~40°N, 130°E~170°W) 区域为西风急流轴, 最大西风风速可达 16~20 m s<sup>-1</sup>, 这与气溶胶的流出最大轴的位置一致(图 1)。图 6b 为风场在 NAWP 指数负、正位相年的合成差(负位相年减去正位相年), NAWP 指数的负、正位相年西风风速在东亚到太平洋上空的差异同样是显著的, 在 150°E 附近的最大风速差为 3.0~4.5 m s<sup>-1</sup>, 位于 40°N 附近, 和气溶胶流出通量在 NAWP 指数的负、正位相年的最大差异位置相同(图 5), 也比多年平均的位置偏北 5~10 个纬度。这说明西风风速的差异可能是造成冬春季东亚气溶胶外流年际变率的主要因素之一。

## 5.2 斜压性异常的作用

除了西风导致的平流作用, 东亚气溶胶的外流过程同样也受到这一地区中纬度天气尺度气旋活动的影响(Yu et al., 2012)。导致污染物跨太平洋输出的三种方式: 暖输送带对污染物颗粒的提升、锋前边界层传输和锋前低层急流传输都同天气尺度气旋活动有密切的关系(Liang et al., 2004; Wuebbles et al., 2007)。中纬度天气尺度气旋活动能量是由大气背景场斜压不稳定造成背景场动能转化而来。在年际尺度上, 很多研究已经指出强(弱)的对流层低层斜压性可以提供有利(不利)于中纬度气旋发生发展的大尺度环境, 从而可以增加(减少)天气尺度气旋的发生频率(Geng and Sugi, 2001, 2003; Reason and Murray, 2001; Teng et al., 2008; Lim and Simmonds, 2009; McDonald, 2011; Zhang et al., 2012; Isobe and Kako, 2012; 符娇兰等, 2013; Kruschke et al., 2014; Yanase et al., 2014)。因此这里将计算大气斜压性的年际变率从而说明中纬度气旋活动频率对东亚气溶胶流出年际变化的可能影响。斜压性常常使用 Eady 模态增长率来表示( $\sigma_{\text{Eady}}$ , Eady, 1949; Hoskins and Valdes, 1990; Lim and Simmonds, 2009):

$$\sigma_{\text{Eady}} = 0.31 \times \frac{M^2}{N}, \quad (3)$$

其中,  $M^2$  表示经向位温梯度,  $N$  为 Brunt-Väisälä 频率。

图 7a 为 1986~2006 年 GEOS-4 资料得出的多年平均的 700 hPa 东亚—太平洋地区斜压模态增长率的分布图。由图可见, 斜压模态增长率在华北到

北太平洋 30°~40°N 范围存在一个东西方向大值带, 同图 1 显示的这一纬度带上东亚气溶胶流出量最大的特征一致。同样, NAWP 指数负、正位相年大气斜压性差异在东亚到太平洋上空低对流层同样是显著的, 也呈现一个东西方向的带状结构, 最大差异出现在 40°N 附近, 比多年平均的位置偏北 5~10 个纬度(图 7b)。

## 6 结论和讨论

使用 1986~2006 年的 GEOS-Chem 模式模拟结果研究了大气环流影响下冬春季东亚气溶胶流出的年际变率特征和相关的大气环流异常特征。结果显示各种东亚气溶胶的流出量均存在显著的年际变率。这种年际变率与东北亚—西太平洋的 500 hPa 位势高度场定义的环流指数(NAWP 指数)之间具有很好的关系。NAWP 指数的负(正)位相代表了这一地区定常波的振幅偏强(弱)。相比于 NAWP 指数正异常年, 负异常年的 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC 和 BC 流出量分别增加 0.98(18%)、0.46(15%)、0.18(31%)、0.10(10%)、0.11(20%) 和 0.04(16%) Tg season<sup>-1</sup>。另外, NAWP 指数的负异常不仅伴随着整个冬春季东亚气溶胶流出量的明显增加, 还使得更多的气溶胶自更偏北 5~10 个纬度的路径流出。NAWP 指数的变化对冬春季东亚气溶胶流出年际变率的影响可能主要通过西风平流和斜压性导致的中纬度气旋发生频率的年际变化起作用。东亚—北太平洋区域的大气活动中心可以通过影响西风平流和大气斜压性的年际变化, 进一步导致东亚气溶胶向下游地区输出的年际变化。NAWP 区域定常波中心强度异常偏强(弱)时, 斜压性的增强可能使得更多的气溶胶将以偏北的路径流出。

本文主要强调了只考虑气象场驱动下大气环流异常对冬春季东亚气溶胶流出年际变率的作用。而排放因素和气象场是影响大气气溶胶含量的两个重要方面, 东亚气溶胶的流出会同时受到这两者的作用。Yang et al. (2015) 利用 1986~2006 年的模拟, 也指出伴随着东亚地区气溶胶及其前体物排放的增长, 东亚气溶胶的流出也会产生年代际尺度上长期增长的趋势, 同时气象场导致的东亚气溶胶流出的趋势不明显, 反而体现为较为明显的年际变化特征。由于大气环流往往也呈现出一些明显的年代际趋势, 例如图 4 已经表明北太平洋的海平面气



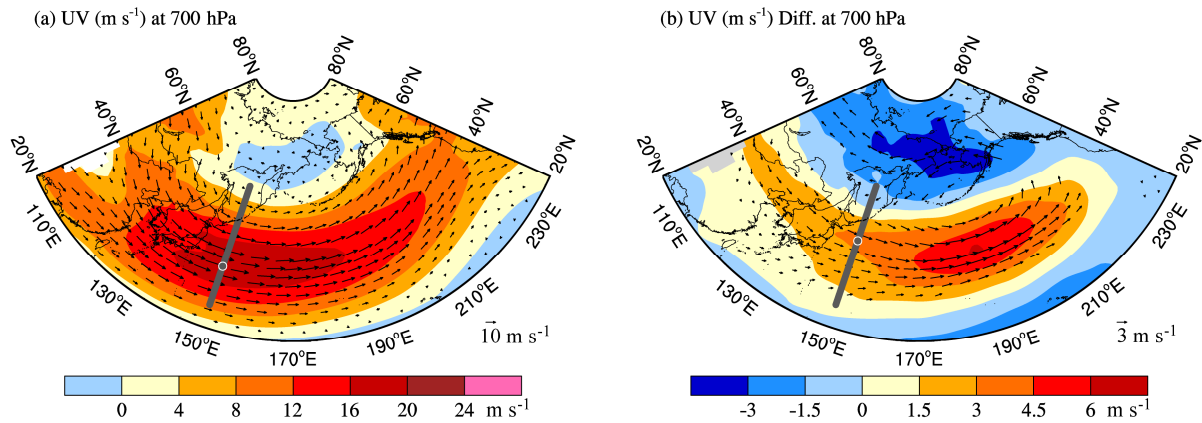


图 6 1986~2006 年 GEOS-4 资料中 (a) 700 hPa 多年平均的水平风 (矢量) 和西风风速 (填色区域)、(b) 700 hPa 水平风速 (矢量) 和西风风速 (填色区域) 在 NAWP 指数的 5 个负位相年和 5 个正位相年的合成差。图中灰色线代表图 1 所示的东亚流人气溶胶通量的计算剖面。图 (a) 和 (b) 中的白色圆圈分别代表流出通量计算剖面上最大的西风风速的位置和最大西风风速合成差的位置。图 (b) 中的水平风矢量显示的区域为通过 95% 信度检验区域

Fig. 6 (a) Multi-year mean horizontal winds (vectors) and westerly wind speed (colored contours), and (b) the horizontal winds (vectors) and westerly wind speed (colored contours) differences between the 5 negative and 5 positive NAWP index years at 700 hPa from GEOS-4 dataset over 1986–2006. The gray line denotes the longitude along which the East Asian aerosols mass outflow fluxes are calculated as shown in Fig. 1. The white circles in (a) and (b) denote the location of the maximum westerly speed and that of the maximum difference in westerly speed between the negative and positive NAWP index years in the vertical cross section, respectively. The areas with the wind vectors in (b) denote the regions with values passing the  $t$  test at the 95% confidence level

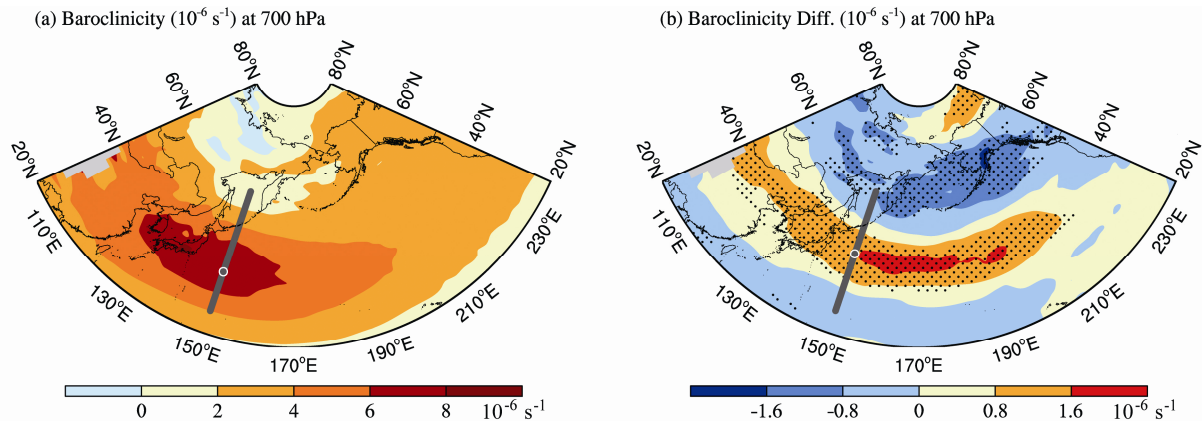


图 7 1986~2006 年 GEOS-4 再分析资料中 (a) 700 hPa 多年平均的 Eady 模态增长率、(b) 700 hPa Eady 模态增长率在 NAWP 指数的 5 个负位相年和 5 个正位相年的合成差。图中灰色线代表图 1 所示的东亚流人气溶胶通量的计算剖面。图 (a) 和 (b) 中的白色圈分别代表流出通量计算剖面上最大 Eady 模态增长率的位置和最大 Eady 模态增长率合成差的位置。(b) 中的打点区域为通过 95% 信度检验区域

Fig. 7 (a) The multi-year mean baroclinicity ( $\sigma_{Eady}$ ) at 700 hPa, and (b) the baroclinicity difference at 700 hPa between the five negative and five positive NAWP index years from GEOS-4 data over 1986–2006. The gray line denotes the longitude along which the East Asian aerosols mass outflow fluxes are calculated as shown in Fig.1. The white circles in (a) and (b) denote the location of the maximum baroclinicity and that of the maximum difference in baroclinicity between the negative and positive NAWP index years in the vertical cross section, respectively. The dotted areas in (b) indicate the regions with values passing the  $t$  test at the 95% confidence level

压场同冬春季东亚气溶胶流出量关系密切。而前人的研究已经指出北太平洋区域海平面气压场存在着明显的年代际变化 (Trenberth and Hurrell, 1994)。那么在更长时间尺度上, 排放和环流因素共同造成的东亚气溶胶流出的长期变化趋势问题还值得进一步研究。另外, 本文对与冬春季东亚气溶胶流出

年际变率相关的环流分析主要是基于 NAWP 区域的 500 hPa 位势高度场, 也就是这一地区的定常波活动异常。而一些气候系统的大尺度异常也可能强迫出准定常的异常环流并向外传播, 可能对这一地区的定常波产生影响, 从而间接地影响了东亚气溶胶的流出。最后, 本文所采用的 GEOS-Chem 模式

是一个再分析资料驱动的单向大气化学传输模式,难以得到环流场对气溶胶气候效应的反馈。那么东亚气溶胶向下游流出的变化所造成的环流异常是否可以反过来影响到气溶胶向下游的流出特征,这也需要使用一个气象场—气溶胶双向反馈的模式进行进一步研究。

### 参考文献 (References)

- Alexander B, Park R J, Jacob D J, et al. 2005. Sulfate formation in sea-salt aerosols: Constraints from oxygen isotopes [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D10): D10307, doi:10.1029/2004JD005659.
- Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, et al. 2001. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D19): 23073–23095, doi:10.1029/2001JD000807.
- Chin M, Diehl T, Ginoux P, et al. 2007. Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: Implications for regional air quality [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7 (21): 5501–5517, doi:10.5194/acp-7-5501-2007.
- 崔晓鹏, 孙照渤. 1999. 东亚冬季风强度指数及其变化的分析 [J]. *南京气象学院学报*, 22 (3): 321–325. Cui Xiaopeng, Sun Zhaobo. 1999. East Asian winter monsoon index and its variation analysis [J]. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 22 (3): 321–325, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.1999.03.005.
- Duan F K, He K B, Ma Y L, et al. 2006. Concentration and chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China: 2001–2002 [J]. *Sci. Total Environ.*, 355 (1–3): 264–275, doi:10.1016/j.scitotenv.2005.03.001.
- Duncan B N, Martin R V, Staudt A C, et al. 2003. Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D2): ACH 1-1–ACH 1-22, doi:10.1029/2002JD002378.
- Dunlea E J, DeCarlo P F, Aiken A C, et al. 2009. Evolution of Asian aerosols during transpacific transport in INTEX-B [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (19): 7257–7287, doi:10.5194/acp-9-7257-2009.
- Eady E T. 1949. Long waves and cyclone waves [J]. *Tellus*, 1 (3): 33–52, doi:10.1111/j.2153-3490.1949.tb01265.x.
- Elliott S, Blake D R, Blake N J, et al. 2003. BIBLE A whole-air sampling as a window on Asian biogeochemistry [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108 (D3): 8407, doi:10.1029/2001JD000790.
- 符娇兰, 董林, 康志明. 2013. 影响我国北方冬半年气旋的气候特征及年际变率 [J]. *大气科学*, 37 (3): 679–690. Fu Jiaolan, Dong Lin, Kang Zhiming. 2013. Climatology and interannual variability of extratropical cyclones in the winter half-year in northern China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37 (3): 679–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12055.
- Fu Y, Liao H. 2012. Simulation of the interannual variations of biogenic emissions of volatile organic compounds in China: Impacts on tropospheric ozone and secondary organic aerosol [J]. *Atmos. Environ.*, 59: 170–185, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.053.
- Geng Q Z, Sugi M. 2001. Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEP–NCAR reanalysis data [J]. *J. Climate*, 14 (18): 3863–3873, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3863:VOTNAC>2.0.CO;2.
- Geng Q Z, Sugi M. 2003. Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols—Study with a high-resolution AGCM [J]. *J. Climate*, 16 (13): 2262–2274, doi:10.1175/1520-0442(2003)16<2262:PCOECA>2.0.CO;2.
- Giglio L, van der Werf G R, Randerson J T, et al. 2006. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6 (4): 957–974, doi:10.5194/acp-6-957-2006.
- Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. 2006. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections [J]. *J. Climate*, 19 (1): 104–122, doi:10.1175/JCLI3606.1.
- Guenther A, Karl T, Harley P, et al. 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6 (11): 3181–3210, doi:10.5194/acp-6-3181-2006.
- Hack J J. 1994. Parameterization of moist convection in the National Center for Atmospheric Research community climate model (CCM2) [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D3): 5551, doi:10.1029/93JD03478.
- Hadley O L, Ramanathan V, Carmichael G R, et al. 2007. Trans-Pacific transport of black carbon and fine aerosols (D<2.5 um) into North America [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D5): D05309, doi:10.1029/2006JD007632.
- Heald C L, Jacob D J, Park R J, et al. 2006. Trans-Pacific transport of Asian anthropogenic aerosols and its impact on surface air quality in the United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D14), doi:10.1029/2005JD006847.
- Holzer M, McKendry I G, Jaffe D A. 2003. Springtime trans-Pacific atmospheric transport from East Asia: A transit-time probability density function approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D22): 4708, doi:10.1029/2003JD003558.
- Holzer M, Hall T M, Stull R B. 2005. Seasonality and weather-driven variability of transpacific transport [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D23), doi:10.1029/2005JD006261.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (15): 1854–1864, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<1854:OTEOST>2.0.CO;2.
- Irie H, Sudo K, Akimoto H, et al. 2005. Evaluation of long-term tropospheric NO<sub>2</sub> data obtained by GOME over East Asia in 1996–2002 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (11): L11810, doi:10.1029/2005GL022770.
- Isobe A, Kako S. 2012. A role of the yellow and East China seas in the development of extratropical cyclones in winter [J]. *J. Climate*, 25 (23): 8328–8340, doi:10.1175/JCLI-D-11-00391.1.
- Jaffe D, Tamura S, Harris J. 2005. Seasonal cycle and composition of background fine particles along the west coast of the US [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (2): 297–306, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.016.
- Jaffe D, Anderson T, Covert D, et al. 1999. Transport of Asian air pollution to North America [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (6): 711–714, doi:10.1029/1999GL900100.
- Jiang H, Liao H, Pye H O T, et al. 2013. Projected effect of 2000–2050 changes in climate and emissions on aerosol levels in China and associated transboundary transport [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (16):

- 7937–7960, doi:10.5194/acp-13-7937-2013.
- Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. 2002. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 419 (6903): 215–223, doi:10.1038/nature01091.
- Kruschke T, Rust H W, Kadow C, et al. 2014. Evaluating decadal predictions of northern hemispheric cyclone frequencies [J]. *Tellus A*, 66: 22830, doi:10.3402/tellusa.v66.22830.
- Li Z Q, Li C, Chen H, et al. 2011. East Asian studies of tropospheric aerosols and their impact on regional climate (EAST-AIRC): An overview [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D7): D00K34, doi:10.1029/2010JD015257.
- Liang Q, Jaeglé L, Jaffe D A, et al. 2004. Long-range transport of Asian pollution to the Northeast Pacific: Seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D23), doi:10.1029/2003JD004402.
- Liao H, Henze D K, Seinfeld J H, et al. 2007. Biogenic secondary organic aerosol over the United States: Comparison of climatological simulations with observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D6): D06201, doi:10.1029/2006JD007813.
- 廖礼, 漏嗣佳, 符瑜, 等. 2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响 [J]. *大气科学*, 39 (1): 68–82. Liao Li, Lou Sijia, Fu Yu, et al. 2015. Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on the synoptic scale in eastern China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 39 (1): 68–82, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13302.
- Lim E P, Simmonds I. 2009. Effect of tropospheric temperature change on the zonal mean circulation and SH winter extratropical cyclones [J]. *Climate Dyn.*, 33 (1): 19–32, doi:10.1007/s00382-008-0444-0.
- Lin J, Pan D, Davis S J, et al. 2014. China's international trade and air pollution in the United States [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 111 (5): 1736–1741, doi:10.1073/pnas.1312860111.
- Lin S J, Rood R B. 1996. Multidimensional flux-form semi-Lagrangian transport schemes [J]. *Mon. Weather Rev.*, 124 (9): 2046–2070, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2046:MFFSLT>2.0.CO;2.
- Liu J, Mauzerall D L, Horowitz L W. 2008. Source-receptor relationships between East Asian sulfur dioxide emissions and Northern Hemisphere sulfate concentrations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (14): 3721–3733, doi:10.5194/acp-8-3721-2008.
- Liu H Y, Jacob D J, Bey I, et al. 2001. Constraints from  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D11): 12109–12128, doi:10.1029/2000JD900839.
- Luan Y, Jaeglé L. 2013. Composite study of aerosol export events from East Asia and North America [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (3): 1221–1242, doi:10.5194/acp-13-1221-2013.
- Luo Y X, Zheng X B, Zhao T L, et al. 2014. A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data [J]. *Int. J. Climatol.*, 34 (3): 863–870, doi:10.1002/joc.3728.
- Matsui H, Koike M, Kondo Y, et al. 2013. Seasonal variations of Asian black carbon outflow to the Pacific: Contribution from anthropogenic sources in China and biomass burning sources in Siberia and Southeast Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (17): 9948–9967, doi:10.1002/jgrd.50702.
- McDonald R E. 2011. Understanding the impact of climate change on Northern Hemisphere extra-tropical cyclones [J]. *Climate Dyn.*, 37 (7): 1399–1425, doi:10.1007/s00382-010-0916-x.
- Mu Q, Liao H. 2014. Simulation of the interannual variations of aerosols in China: Role of variations in meteorological parameters [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14 (18): 9597–9612, doi:10.5194/acp-14-9597-2014.
- Nakamura T, Ogawa H, Maripi D K, et al. 2006. Contribution of water soluble organic nitrogen to total nitrogen in marine aerosols over the East China Sea and western North Pacific [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (37): 7259–7264, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.06.026.
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7 (16): 4419–4444, doi:10.5194/acp-7-4419-2007.
- Park R J, Jacob D J, Chin M, et al. 2003. Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D12): 4355, doi:10.1029/2002JD003190.
- Park R J, Jacob D J, Field B D, et al. 2004. Natural and transboundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammonium aerosols in the United States: Implications for policy [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D15): D15204, doi:10.1029/2003JD004473.
- Reason C J C, Murray R J. 2001. Modelling low frequency variability in Southern Hemisphere extra-tropical cyclone characteristics and its sensitivity to sea-surface temperature [J]. *Int. J. Climatol.*, 21 (2): 249–267, doi:10.1002/joc.608.
- Schultz M G. 2002. On the use of ATSR fire count data to estimate the seasonal and interannual variability of vegetation fire emissions [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2 (5): 387–395, doi:10.5194/acp-2-387-2002.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 32 (4): 826–840. Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 32 (4): 826–840, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.11.
- Simoneit B R T. 2004. Aerosol particles collected on aircraft flights over the northwestern Pacific region during the ACE-Asia campaign: Composition and major sources of the organic compounds [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D19): D19S09, doi:10.1029/2004JD004565.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D21): 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- Streets D G, Zhang Q, Wang L T, et al. 2006. Revisiting China's CO emissions after the Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: Synthesis of inventories, atmospheric modeling, and observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D14), doi:10.1029/2006JD007118.
- Teng H Y, Washington W M, Meehl G A. 2008. Interannual variations and future change of wintertime extratropical cyclone activity over North America in CCSM3 [J]. *Climate Dyn.*, 30 (7–8): 673–686, doi:10.1007/s00382-007-0314-1.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 9 (6): 303–319, doi:10.1007/BF00204745.
- Uematsu M, Hattori H, Nakamura T, et al. 2010. Atmospheric transport and deposition of anthropogenic substances from the Asia to the East China Sea [J]. *Mar. Chem.*, 120 (1–4): 108–115, doi:10.1016/j.marchem.2010.

- 01.004.
- van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, et al. 2006. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6 (11): 3423–3441, doi:10.5194/acp-6-3423-2006.
- Verma S K, Kawamura K, Chen J, et al. 2015. Thirteen years of observations on biomass burning organic tracers over Chichijima Island in the western North Pacific: An outflow region of Asian aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (9): 4155–4168, doi:10.1002/2014JD022224.
- Walker J M, Philip S, Martin R V, et al. 2012. Simulation of nitrate, sulfate, and ammonium aerosols over the United States [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (22): 11213–11227, doi:10.5194/acp-12-11213-2012.
- Wang K, Zhang Y, Jang C, et al. 2009. Modeling intercontinental air pollution transport over the trans-Pacific region in 2001 using the Community Multiscale Air Quality modeling system [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D4), doi:10.1029/2008JD010807.
- Wang Y, Zhang Q Q, He K, et al. 2013. Sulfate-nitrate-ammonium aerosols over China: Response to 2000–2015 emission changes of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and ammonia [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (5): 2635–2652, doi:10.5194/acp-13-2635-2013.
- Wang Y, Lee K H, Lin Y, et al. 2014a. Distinct effects of anthropogenic aerosols on tropical cyclones [J]. *Nat. Climate Change*, 4 (5): 368–373, doi:10.1038/nclimate2144.
- Wang Y, Wang M H, Zhang R Y, et al. 2014b. Assessing the effects of anthropogenic aerosols on Pacific storm track using a multiscale global climate model [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 111 (19): 6894–6899, doi:10.1073/pnas.1403364111.
- Wang Y, Zhang R Y, Saravanan R. 2014c. Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis [J]. *Nat. Commun.*, 5: 3098, doi:10.1038/ncomms4098.
- Wu S L, Mickley L J, Jacob D J, et al. 2007. Why are there large differences between models in global budgets of tropospheric ozone? [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D5): D05302, doi:10.1029/2006JD007801.
- Wuebbles D J, Lei H, Lin J T. 2007. Intercontinental transport of aerosols and photochemical oxidants from Asia and its consequences [J]. *Environ. Pollut.*, 150 (1): 65–84, doi:10.1016/j.envpol.2007.06.066.
- Yanase W, Niino H, Hodges K, et al. 2014. Parameter spaces of environmental fields responsible for cyclone development from tropics to extratropics [J]. *J. Climate*, 27 (2): 652–671, doi:10.1175/JCLI-D-13-00153.1.
- Yang Y, Liao H, Lou S J. 2015. Decadal trend and interannual variation of outflow of aerosols from East Asia: Roles of variations in meteorological parameters and emissions [J]. *Atmos. Environ.*, 100: 141–153, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.11.004.
- Ye B M, Ji X L, Yang H Z, et al. 2003. Concentration and chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmos. Environ.*, 37 (4): 499–510, doi:10.1016/S1352-2310(02)00918-4.
- Yu H, Remer L A, Chin M, et al. 2012. Aerosols from overseas rival domestic emissions over North America [J]. *Science*, 337 (6094): 566–569, doi:10.1126/science.1217576.
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model [J]. *Atmosphere-Ocean*, 33 (3): 407–446, doi:10.1080/07055900.1995.9649539.
- Zhang Q, Streets D G, He K B, et al. 2007a. NO<sub>x</sub> emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D22), doi:10.1029/2007JD008684.
- Zhang R Y, Li G H, Fan J W, et al. 2007b. Intensification of Pacific storm track linked to Asian pollution [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 104 (13): 5295–5299, doi:10.1073/pnas.0700618104.
- Zhang X Y, Zhang P, Zhang Y, et al. 2007c. The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO<sub>2</sub> over China during 1997–2006 based on satellite measurement [J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 50 (12): 1877–1884, doi:10.1007/s11430-007-0141-6.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (2): 779–799, doi:10.5194/acp-12-779-2012.