氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

东亚冬季风异常对区域气溶胶分布的影响

谢 王体健 高达 李树 庄炳亮 刘芷君

Impact of Anomalous East Asian Winter Monsoon on the Spatial Distribution of Aerosols over East Asia

XIE Min WANG Tijian GAO Da LI Shu ZHUANG Bingliang LIU Zhijun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20155

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及ENSO的作用

The Relationship between the East Asian Winter Monsoon Anomaly and the Subsequent Summer Monsoon Onset over the South China Sea and the Impact of ENSO

气候与环境研究. 2018, 23(4): 401 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17026

中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系

Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon

气候与环境研究. 2021, 26(1): 1 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018

近十年北京气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究

Aerosol Optical Properties and Direct Radiative Forcing in Beijing in the Recent Decade

气候与环境研究. 2021, 26(2): 155 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20057

南亚高压的东西偏向对亚洲季风区对流层顶附近水汽分布的影响

Impact of the East-West Phase of South Asia High on Water Vapor Distribution near Tropopause over the Asian Monsoon Region

气候与环境研究. 2018, 23(3): 341 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17048

气溶胶对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟

A Numerical Study of Aerosol Effects on Microphysical Process and Electrification in Thunderstorms

气候与环境研究. 2018, 23(6): 758 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18047

CMIP6情景中主要温室气体和气溶胶排放强度的时空分布特征分析

SpatialTemporal Characteristics of the Emission Intensities of Several Major Greenhouse Gases and Aerosols under CMIP6 Scenarios

气候与环境研究. 2020, 25(4): 366 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

谢旻, 王体健, 高达, 等. 2021. 东亚冬季风异常对区域气溶胶分布的影响 [J]. 气候与环境研究, 26(4): 438−448. XIE Min, WANG Tijian, GAO Da, et al. 2021. Impact of Anomalous East Asian Winter Monsoon on the Spatial Distribution of Aerosols over East Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (4): 438−448. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20155

东亚冬季风异常对区域气溶胶分布的影响

谢旻 王体健 高达 李树 庄炳亮 刘芷君

南京大学大气科学学院，南京 210023

摘 要 气溶胶已是东亚地区最主要的大气污染物之一，其时空分布会受到东亚季风气候的影响。利用 2000～2014 年 MODIS/AOD（Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer/Aerosol Optical Depth）和 NCEP 月平均气象场再分析资料，本研究分析了东亚冬季风长期变化趋势、气溶胶年际变化规律，探讨了东亚冬季风强度变化对气溶胶分布的影响。基于 MODIS/AOD，发现近 10 年东亚地区冬季 AOD 呈现上升趋势，最大值为 2007 年的 0.44，高值区覆盖四川盆地、华北平原及长江中下游大部分地区。风场特征类冬季风指数分析表明，东亚冬季风存在明显的年际和年代际差异，近年出现逐渐减弱的趋势。强冬季风年，海陆气压差增大、东亚大槽加深增强，东亚地区偏北风异常，风场的增强将引导更多冷空气南下，从而给东亚大部分地区带来明显的降温天气；弱年相反。气象场差异引起气溶胶分布变化，强年较强的偏北风将气溶胶向南方输送，东亚地区 AOD 出现“北低南高”的空间分布；弱年偏北风较弱，导致气溶胶集中在华北平原一带，AOD 出现“北高南低”的空间分布。

关键词 东亚冬季风 季风指数 气溶胶 气溶胶光学厚度（AOD）

文章编号 1006-9585(2021)04-0438-11 **中图分类号** P461.8 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20155

Impact of Anomalous East Asian Winter Monsoon on the Spatial Distribution of Aerosols over East Asia

XIE Min, WANG Tijian, GAO Da, LI Shu, ZHUANG Bingliang, and LIU Zhijun

School of Atmospheric Science, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023

Abstract Aerosol is one of the most significant air pollutants in East Asia. Its temporal and spatial distribution can be affected by the East Asia winter monsoon. Using the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol product and the National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis monthly meteorological field data between 2000 and 2014, this study statistically analyzes the variation trend of the East Asia winter monsoon (EAWM), the annual variation of the aerosol optical depth (AOD) over East Asia, and the effect of the anomalous EAWM on the distribution of aerosols. The analysis based on the aerosol product shows that the AOD values continually increase during the recent decade in the winter of East Asia with a maximum value of 0.44 in 2007. High values usually occur in the Sichuan Basin, the North China Plain, and most areas of the middle and lower reaches of Yangtze. With the aid of the EAWM index defined by the characteristics of the wind field, the EAWM is found to have strong interannual and interdecadal variations and exhibits a gradually decreasing trend. Results also show that the EAWM has a considerable

收稿日期 2020-09-16；**网络预出版日期** 2020-12-16

作者简介 谢旻，男，1978 年出生，博士，副教授，主要从事空气污染及成因研究。E-mail: minxie@nju.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC0213502、2018YFC1506404，国家自然科学基金项目 41475122，重庆市气象局开放式研究基金项目 KFJJ-201607

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC0213502 and 2018YFC1506404), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475122), Open Research Fund of Chongqing Meteorological Bureau (Grant KFJJ-201607)

effect on the spatial distribution of aerosols. In strong EAWM years, the stronger north wind can enhance the transportation of aerosols to the southern area and form the spatial distribution pattern of the north low and south high for the AOD over East Asia. However, in weak EAWM years, the transportation effect is weakened, resulting in the accumulation of more aerosols in the North China Plain and the formation of the AOD pattern of the north high and south low.

Keywords East Asia winter monsoon, East Asia winter monsoon index, Aerosol, Aerosol optical depth (AOD)

1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中稳定存在的固态和液态颗粒物的总称，其直径一般介于 0.001～100 μm。它不仅是重要的大气污染成分（Sun, 1988; Spurny, 1996），而且会通过直接或间接改变大气辐射、云物理和降水过程影响地球气候、是非常重要的气候强迫因子（Twomey, 1977; Albrecht, 1989; Rosenfeld, 2000; Ramanathan et al., 2001; Rosenfeld et al., 2008; Li et al., 2010, 2011）。另一方面，区域和局地气象条件的改变，如温度、降水和季风环流等的变化，也会影响大气颗粒物排放、输送、化学以及沉降过程，进而造成环境空气质量的恶化（Isaksen et al., 2009; Jacob and Winner, 2009; von Schneidemesser et al., 2015; Wu et al., 2016）。近些年，随着科学研究的深入，气溶胶和气候系统的相互关系逐渐受到重视（IPCC, 2013）

东亚地区是世界上人口最为密集的区域之一。近几十年来，该区域经济、工农业发展突飞猛进，人口增长迅速，人类活动向大气中排放了大量的气溶胶粒子（Streets and Waldhoff, 2000; Streets et al., 2003; Richter et al., 2005; Ohara et al., 2007）。已有观测表明，该区域（特别是中国东部）的气溶胶浓度仅次于南亚城市，人为源气溶胶（硫酸盐、硝酸盐、黑碳和有机碳）占有很大比例（Zhang et al., 2008, 2012b; 张小曳等, 2013），对大气环境（Quan et al., 2014）、天气（Ding et al., 2013, 2016）与气候（Zhuang et al., 2013a; 2013b; Wang et al., 2015）产生了不同程度的影响。与此同时，东亚处于显著的季风区，是长期以来全球气候变化研究的关键区域。季风变化直接关系到东亚区域的温度、降水、大气环流等气候特征，也会影响水汽、云滴以及污染物等大气物质的输送，气溶胶的生成、排放、输送和沉降更是显著地受到季风环流变化的影响（Wu et al., 2016）。因此，东亚季风对气溶胶影响的研究是气候变化与大气环境相互影响研究的热点问题。

大量研究表明，东亚特别是中国东部地区冬季重雾—霾事件频发，除了人类活动导致的气溶胶排放增加因素外，还可能与同期东亚冬季风（East Asia Winter Monsoon，EAWM）环流的变化有紧密联系（Wu et al., 2016）。例如，针对 2012～2013 年冬季中国东部的大范围持续性强雾—霾天气过程，Zheng et al.（2015）研究指出适宜的大气环流条件是导致华北严重雾—霾的主要原因；Guo et al.（2014）分析北京的有机气溶胶观测资料，发现风速和风向等气象条件是控制局地雾—霾事件周期性变化的关键因素；Zhao et al.（2013）和张小曳等（2013）认为，高浓度的局地气溶胶会减弱入射地表太阳辐射，增加大气层结稳定度，使气溶胶持续累积增长，同时弱冬季风阻碍了气溶胶的向外输送，继而导致华北地区雾霾天气的持续出现；Zhang et al.（2014）分析气象条件发现，弱冬季风下高空西风急流减弱，水平风垂直切变减小，减弱了天气尺度扰动的发展和大气的垂直混合，而且对流层中低层异常南风减弱了雾霾向外输送，这些异常使得雾霾天气在中国东部长时间维持并发展。除了上述污染事件的观测分析和模拟研究外，一些研究者还分析了污染数据和气候的长期变化。Niu et al.（2010）研究发现过去 30 年中国中部和东部地区雾的发生次数增加了近两倍，同期地面风速减小了约 19%、冬季寒潮次数减少了约 29%，认为东亚冬季风的减弱与这些变化有密切关系。Li et al.（2016）利用 1972～2014 年的长期观测资料，发现中国中东部冬季雾—霾天气的年际变化与东亚冬季风存在显著的联系，认为东亚冬季风的年际变化是造成中国中东部冬季雾—霾天气年际变化的重要原因，弱（强）东亚冬季风导致更多（少）的雾—霾天气。

为了深入清晰地认识东亚冬季风环流变化对气溶胶分布传输的影响，本文将利用 NASA（National Aeronautics and Space Administration）的 MODIS（Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer）

气溶胶光学厚度产品和 NCAR/NECP 的再分析气象场资料，统计分析 2000～2014 年东亚地区气溶胶污染的时间变化特征，并结合风场特征类冬季风指数分析东亚冬季风的长期变化趋势，探讨强、弱季风年大气环流变化造成的气溶胶分布差异。

2 资料和方法

2.1 气溶胶资料

本文所讨论的冬季均指当年 12 月到次年 2 月。在研究东亚地区气溶胶分布特征时所利用的资料主要为 MODIS 气溶胶 AOD（Aerosol Optical Depth，气溶胶光学厚度）产品（以下简称 MODIS/AOD），取自 MODIS COLLECTION 5.1 数据集，波段为 550 nm，水平分辨率为 1°（纬度）×1°（经度），时间从 2000 年到 2014 年的逐月平均数据。对 MODIS 气溶胶产品的适用性验证，国内外已经做了大量的工作，结果表明：MODIS/AOD 已达到设计精度，即误差在 ±0.05～±0.20τ 以内（Chu et al., 2002）；中国地区 MODIS 产品的适用性存在较大地域和季节性差异，在地表均一、植被良好区域，生长季 MODIS 产品的利用率可达 80% 以上，>70% 产品符合 NASA 误差标准（Wang et al., 2007）。总体来说，MODIS/AOD 的精确度满足研究要求，并具有较高的空间分辨率和较大的时间覆盖，这点优势使其在研究中得到大量应用（Tao et al., 2013; 李嘉伟和韩志伟, 2016）。

2.2 冬季风指数及相关气象资料

研究东亚冬季风的变化规律，需要合适的、能够准确表达其强弱的指数。东亚冬季风作为一种复杂的大气环流系统，影响其强弱的要素众多。过去研究中使用的冬季风指数较多，归纳起来常用的有五大类，分别是环流特征类、风场特征类、高压特征类、海陆气压差类和综合类，它们侧重点各不同，对冬季风强弱的界定并不完全一致，研究表明环流类和风场类指数要优于海陆气压差类和高压特征类（邵鹏程和李栋梁, 2012）。刘芷君等（2015）已应用环流类指数开展过相关研究，因此本文应用风场类指数作为衡量冬季风的强弱指标。

东亚冬季风主要由北半球高纬度地区南下的冷空气和中、高纬度西风带气流相叠加产生，表现为西北或北风，可以利用对流层低层的经向风来表征冬季风强度（王会军和姜大膀，2004）。基于其工作，本文计算每年 12 月和次年 1、2 月区域（25°N～50°N，115°E～145°E）850 hPa 的平均风速 $\overline{V}$。然后，$\overline{V}$再经过标准化处理为 [−1,1] 区间的冬季风指数，计算公式如下：

$$I_{\mathrm{EAWM}} = \frac{\overline{V}_i - \mu}{\sigma}, \qquad (1)$$

其中，I_{EAWM} 为东亚冬季风指数，$\overline{V}_i$为待标准化的数值，μ和 σ 分别表示所有样本数据的均值和标准差。计算所需的气象数据选取 1979～2015 年全球月平均 NECP/NCAR 再分析资料，水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度），包括高度场、温度场、纬向风、经向风、海平面气压场和地面降水等。

3 结果和讨论

3.1 东亚地区冬季气溶胶的年际变化特征

图 1 给出了 2000～2014 年东亚地区冬季平均 MODIS/AOD 变化的时间序列。从 AOD 的线性变化趋势来看（图 1 中虚线），近 10 年来气溶胶一直呈现明显的增加。可见，近年来东亚地区经济发展迅速，工业活动向大气中排放大量的颗粒物是导致其上升的主要原因之一（Zhang et al., 2012b）。一些研究也表明日益严重的气溶胶污染还可能与同期东亚季风环流的减弱有关（Niu et al., 2010; Li et al., 2016）。此外，图 1 也显示 2000～2011 年东亚地区冬季气溶胶 AOD 存在较大的年际变化，最大值出现在 2007 年、为 0.44，最小值在 2001 年、为 0.36。这意味着东亚季风环流的变化，比如强弱

图 1 2000～2013 年东亚地区冬季平均 AOD 年际变化（实线）和线性变化趋势（虚线）

Fig. 1 Interannual variation of the winter-time average AOD (Aerosol Optical Depth) in East Asia from 2000 to 2013 (solid line) and the long-term trend (dash line)

冬季风，可能对该区域冬季气溶胶浓度的年际变化产生较大影响。

图 2a 给出了 2000～2013 年冬季平均的 AOD 空间分布。可见，东亚地区冬季气溶胶分布具有很强的地域差异，虽然不同月份 AOD 数值所有变化，但高值区的空间分布基本不变，主要集中在中国四川盆地、渤海湾及长江中下游地区。图 2b 给出了该区域冬季 AOD 的 10 年变化情况。显然，东亚的大部分地区 AOD 都呈上升趋势。总体上，华北、华中、四川盆地及长三角区域的增加较为明显。综上所述，东亚气溶胶污染较为严重的区域主要包括，京津冀地区（35°N～41°N，115°E～120°E），长三角地区（30°N～34°N，117°E～122°E）以及四川盆地（28°N～32°N，103°E～107°E）。此外，珠三角地区（18°N～24°N，111°E～116°E）是华南非常重要的城市群区域，其颗粒污染在中国南方也很有代表性。

图 3 给出了 2000～2013 年上述 4 个典型区域平均的冬季 AOD 年际变化特征。可见，4 个典型区域中长三角地区冬季 AOD 数值最大，多年平均值为 0.55，最高值为 0.59（2000 年），最低值为 0.48（2004 年）；四川盆地平均值为 0.44，最高值为 0.51（2012 年），最低值为 0.31（2001 年）；京津冀地区平均值为 0.42，最高值 0.51（2012 年），最低值 0.32（2003 年）；珠三角地区 AOD 平均值为 0.36，最高值为 0.43（2003 年），最低值为 0.28（2012 年）。除了珠三角地区以外，其他 3 个典型区域冬季 AOD 均有不同程度的上升趋势。其中，京津冀地区 10 年增幅最大、为 13.1%；四川盆地次之，为 9.4%；长三角地区为 2.4%。卫星遥

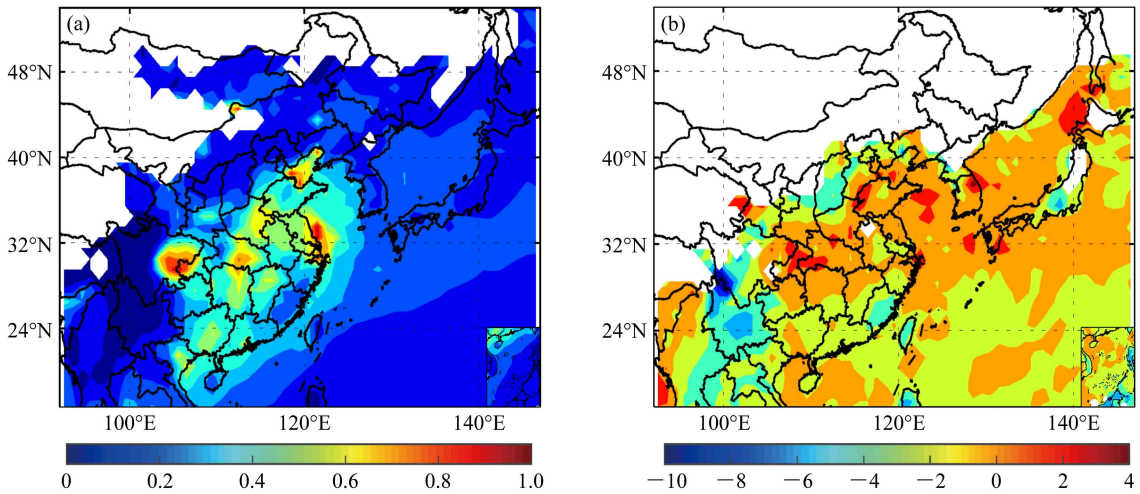

图 2　2000～2013 年东亚地区（a）冬季平均的 AOD 空间分布特征以及（b）冬季 AOD 10 年变化占 10 年平均的百分比

Fig. 2　Spatial distribution of (a) winter-time average AOD in East Asia during 2000–2013 and (b) the variation percentage from 2000 to 2013

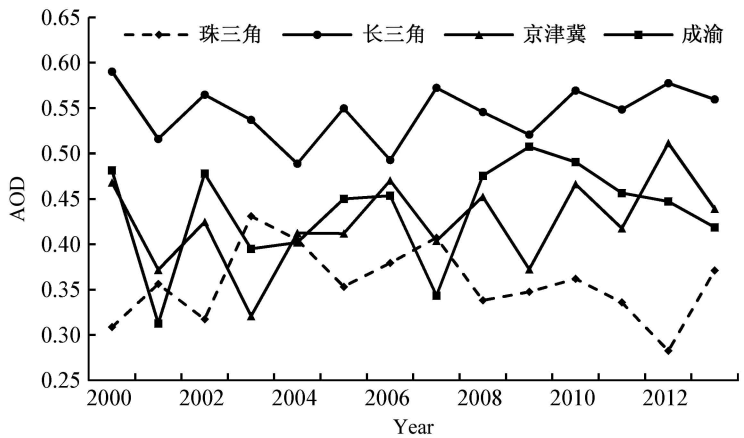

图 3　2000～2013 年中国 4 个典型区域冬季 AOD 年际变化

Fig. 3　Interannual variations of the winter-time AOD in the four typical areas of China from 2000 to 2013

感资料研究发现，过去十多年京津冀和长三角地区氮氧化物浓度增长最为迅速（Zhang et al., 2012a），可对这些区域的颗粒物浓度有影响。四川盆地人口密集，工农业排放导致污染增加，盆地地形一定程度上抑制气溶胶的输送扩散，因此四川盆地近年来 AOD 也呈增长趋势（Chen et al., 2014）。珠三角地区近 10 年来 AOD 有略微降低的趋势，“十年增幅”为－3.6%。珠三角地区由于近年来环境质量控制力度加大，大部分城市区域空气质量呈现出显著的改善趋势，因此其近年的 AOD 变化趋势与其他地区有所差异（关佳欣和李成才, 2010）。

3.2 东亚冬季风的年际变化特征

图 4 给出了 1979～2014 年风场特征类东亚冬季风指数（I_{EAWM}）的年际变化的时间序列。当 I_{EAWM} 大于 0 时，表示 850 hPa 风场出现正距平，北半球高纬度地区南下的冷空气较强，东亚地区出现较强偏北风；当 I_{EAWM} 小于 0 时，表示 850 hPa 风场出现负距平，北半球高纬度地区南下的冷空气较弱，东亚地区出现较弱偏北风。因此，$I_{\mathrm{EAWM}}>0$ 表示冬季风偏强，$I_{\mathrm{EAWM}}<0$ 表示冬季风偏弱。图 4 显示 I_{EAWM} 具有很强的年际变化，其最大值为 1.98，最小值为−2.74，最大年际差异高达 4.72，表现东亚冬季风有较明显的强弱年变化。参照王会军和姜大膀（2004）的标准，选取 $I_{\mathrm{EAWM}}>0$ 表示强冬季风年、$I_{\mathrm{EAWM}}<0$ 表示弱年。则在 1979～2014 年，有 14 个强冬季风年，分别为 1979 年、1983～1987 年、1991 年、1995 年、1997 年、2001 年、2004 年、2007 年、2010 年、2014 年；11 个弱冬季风年，分别为 1980 年、1981 年、1988 年、1989 年、1994 年、1996 年、1998 年、2000 年、2005～2006 年、2013 年。图 4 中虚线还给出了 1979～2014 年东亚地区冬季风的发展趋势，可见近几十年东亚冬季风是逐渐减弱的。这个结论同其他指数得到的结果一致（Jhun and Lee, 2004; Wang et al., 2009; 刘芷君等，2015）。

图 5 给出了风场特征类 I_{EAWM} 与东亚地区冬季各气象要素场的相关系数的空间分布。从 I_{EAWM} 和 500 hPa 高度场的关系可见，两者在华东地区出现明显的负相关区（图 5a）。随着冬季风增强（I_{EAWM} 增加），500 hPa 东亚大槽越来越深厚，表明所选用的指数能够较好地反映随冬季风变化而出现的 500 hPa 位势高度场变化。从 I_{EAWM} 和温度的关系来看，两者在中国东部大部分地区呈反相关，即随着冬季风增强（I_{EAWM} 增加）东亚地区表面温度降低（图 5b）。这应该是由于强冬季风年份东亚大陆受到较强冷空气南下影响，导致地表温度降低。从 I_{EAWM} 和海平面气压关系来看，两者在西太平洋海域存在负相关，即随着冬季风增强（I_{EAWM} 增加），北太平洋气压下降（图 5c）。可见，强冬季风年份，海上气压降低，东西向海平面气压差加大；弱冬季风年，海洋上的气压上升，海陆之间气压差减小，冬季风环流较常年减弱。从 I_{EAWM} 和地面降水的关系可见，两者在东亚大陆区呈负相关（图 5d）。这意味着随冬季风增强（I_{EAWM} 增加）降水减少，表明中国东部地区在强冬季风年出现干冷气候。与刘芷君等（2015）的研究比较，本文所选用的风场特征类冬季风指数虽然在刻画冬季风年际变化方面与环流特征类指数有所差异，但两类指数均一致反应出冬季风减弱的趋势，以及能够在一定程度上反映东亚大陆冬季平均 500 hPa 高度、表

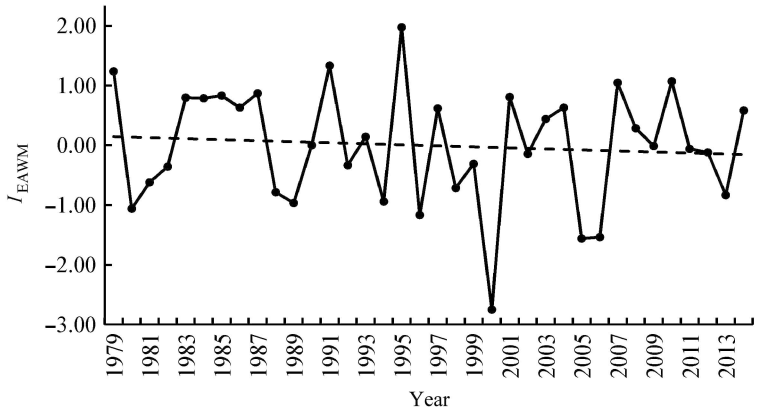

图 4 1979～2014 年风场特征类东亚冬季风指数 I_{EAWM} 的年际变化（实线）和变化趋势（虚线）

Fig. 4 Interannual variation of I_{EAWM} (East Asia winter monsoon index) from 1979 to 2014 (solid line) and the long-term trend (dash line)

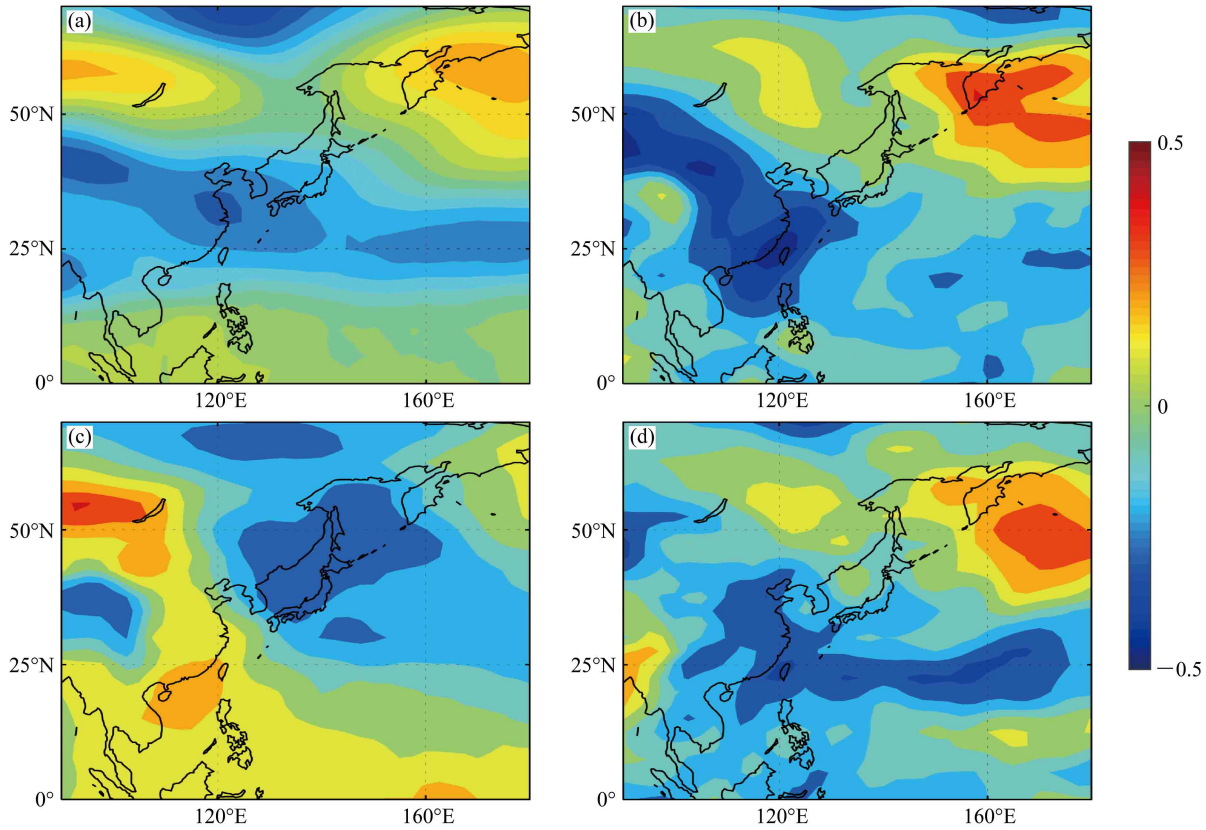

图 5　风场特征类冬季风指数与各气象要素的相关系数分布：（a）500 hPa 高度场；（b）表面温度；（c）海平面气压场；（d）地面降水

Fig. 5　Spatial distribution of the correlation coefficient between I_{EAWM} and each meteorological factor: (a) Geopotential height at 500 hPa; (b) surface air temperature; (c) sea level pressure; (d) precipitation

面温度、海平面气压、地面降水的异常变化。

3.3　强、弱冬季风年的气象场变化

本文进行了强、弱冬季风年气象场的对比分析，年份包括 3.2 节中的 14 个冬季风强年和 11 个冬季风弱年，图 6 为强、弱年各要素冬季平均距平场。可见，强、弱冬季风年的气象要素变化特征几乎完全相反。从强、弱冬季风年 500 hPa 位势高度距平场（图 6a 和 6b）可以看出，弱冬季风年我国东部地区东亚大槽出现正距平，表示东亚大槽变浅、强度变弱；强冬季风年为负距平，表示东亚大槽较常年较深厚、强度较强。图 6c 和 6d 为强、弱冬季风年 850 hPa 风场距平。可见，强冬季风年我国东部地区 850 hPa 盛行偏北风；弱冬季风年 850 hPa 风场环流形式相反。图 6e 和 6f 为强、弱冬季风年海平面气压距平场。可见，强冬季风年海陆气压差较弱，冬季风更强；弱季风年则呈现相反的变化，东西向海陆气压差减弱，冬季风较常年更弱。图 6g 和 6h 为强、弱冬季风年表面温度距平场。可见，强冬季风年，我国东部大部分地区冬季平均气温出现负距平，冬季风将北部冷空气大量向南输送，造成气温降低；弱季风年则相反。综上所述，风场特征类指数和环流特征类指数一样，较好地反应了强、弱冬季风年各气象要素的异常分布特征。由于风场特征类指数侧重的是 850 hPa 风场，其对风场的表述优于环流类指数，而对 500 hPa 位势高度的描述不如环流类指数（刘芷君等，2015）。

3.4　强、弱冬季风年气溶胶分布差异

气溶胶的时空分布不仅与局地排放源有密切关系，还与环流场的输送作用和降水的清除作用密切相关。东亚地区处于显著的季风区，为了研究冬季风对气溶胶分布的影响，本小节主要分析强、弱冬季风年气溶胶分布差异。由于 2000 年以后才有 MODIS/AOD 资料，因此主要分析 2000 年之后的 3 个冬季风强年（2001 年、2007 年、2010 年）平均和 3 个冬季风弱年（2000 年、2005 年、2006 年）平均的差异。

图 7a 和 7b 分别为多个强年和弱年冬季平均 AOD 分布。由图可见，强、弱冬季风年 AOD 高

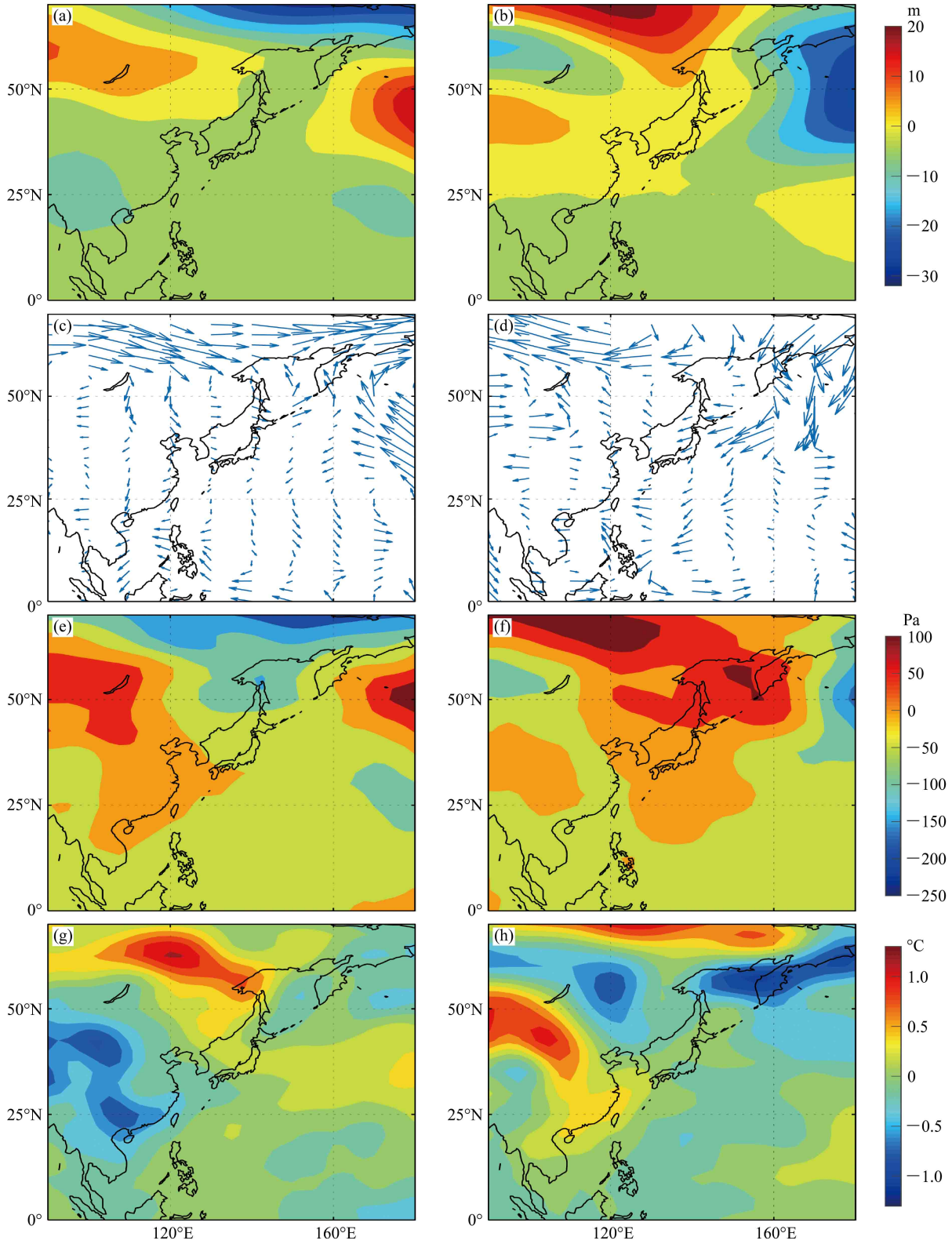

图 6 冬季风（a、c、e、g）强年和（b、d、f、h）弱年冬季各气象要素距平场合成：（a、b）500 hPa 位势高度（单位：m）；（c、d）850 hPa 风场；（e、f）海平面气压场（单位：Pa）；（g、h）表面温度场（单位：°C）

Fig. 6 Spatial distribution of anomalous values for meteorological factors in (a, c, e, g) strong EAWM years and (b, d, f, h) weak EAWM years: (a, b) Geopotential height at 500 hPa; (c, d) wind field at 850 hPa; (e, f) sea level pressure; (g, h) surface air temperature

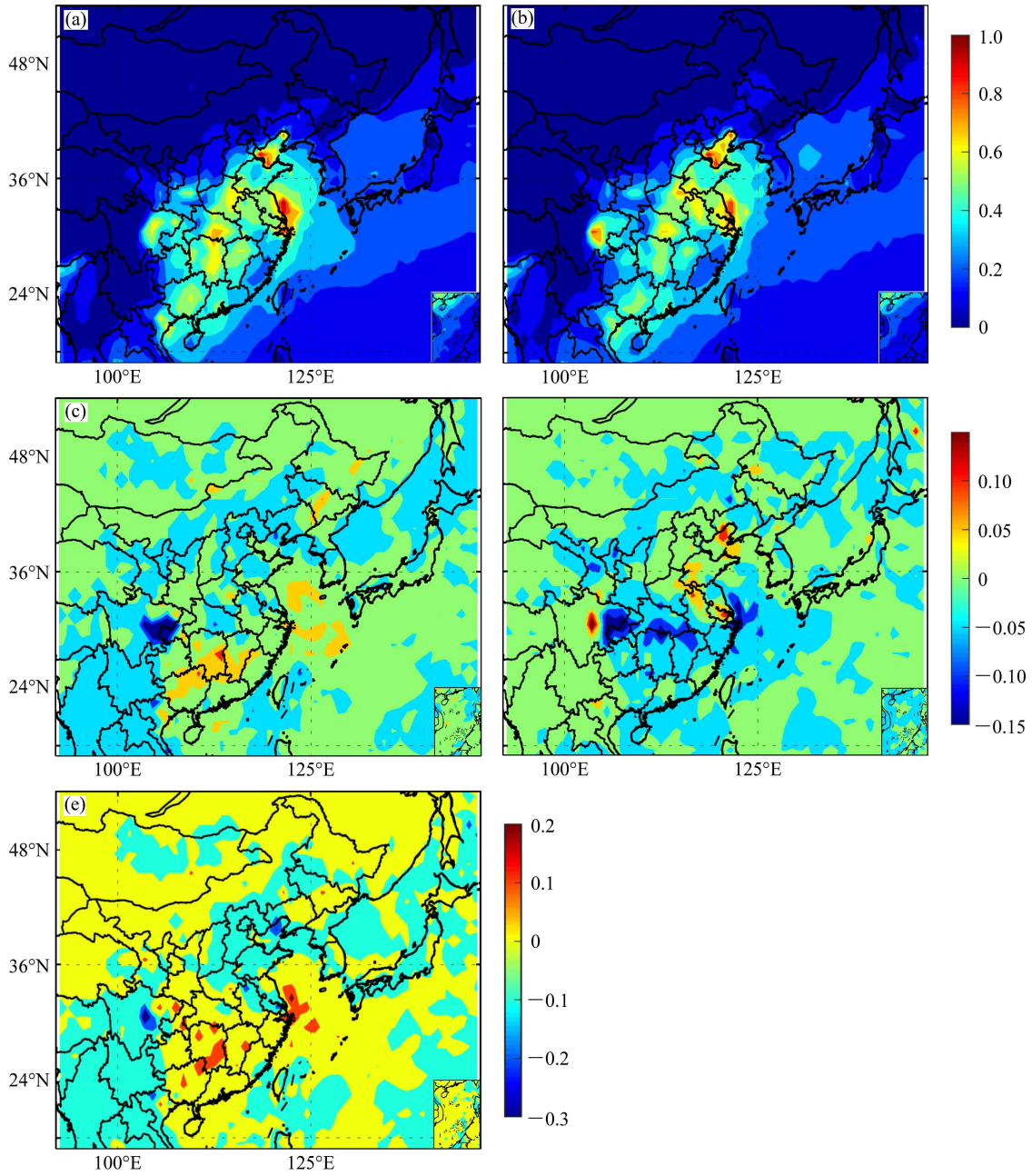

图 7　2000 年后 3 个冬季风强年与 3 个冬季风弱年东亚地区 AOD 合成分布：（a）强年 AOD 平均分布；（b）弱年 AOD 平均分布；（c）强年 AOD 距平分布；（d）弱年 AOD 距平分布；（e）强、弱年冬季 AOD 差异分布

Fig. 7　Spatial distribution of AOD in three strong and three weak winter monsoon years: (a) AOD in strong winter monsoon years; (b) AOD in weak winter monsoon years; (c) anomaly of AOD in strong winter monsoon years; (d) anomaly of AOD in weak winter monsoon years; (e) the difference of AOD between the strong and weak winter monsoon years

值区位置大致不变，都主要集中在工业发达的渤海湾、长江中下游、华北平原等地区，说明导致冬季气溶胶高值分布最主要的原因是当地的人为排放，冬季风对冬季气溶胶分布的影响不占主导。图 7c 和 7d 为强、弱冬季风年下气溶胶分布差异（强年和弱年平均 AOD 减去多年平均 AOD 得到的距平分布场）。图 7c 显示，强冬季风年华北平原 AOD 距平值约为－0.05，这些地区气溶胶浓度较常年有所减少；南部地区 AOD 距平值为 0.05～0.1，这些地区气溶胶浓度较常年有所增加。图 7d 显示，弱季风年 AOD 分布与强年相反，华北平原 AOD 距平值为 0.05，气溶胶浓度有增加；而我国南部大部分地区 AOD 距平值为－0.05～0.15，局部地区可达－0.2，这些地区气溶胶较常年有所减小。可

见，强季风年与弱季风年相比，南部地区气溶胶浓度较高而北部地区气溶胶浓度较低。为了更清晰地看出在强弱冬季风背景下东亚地区气溶胶分布差异，将强季风年冬季 AOD 平均值减去弱季风年的，得到强、弱冬季风年 AOD 差异分布，如图 7e 所示。从图中可以明显看出，强冬季风年，四川盆地气溶胶浓度较低，东亚南部地区 AOD 高于北部我国华北平原一带。与 3.3 节中气象场变化比较，强季风年东亚地区出现 AOD “北低南高”的分布特征应该与强年盛行偏北风有关。上述分析和基于环流类指数分析的结果有较好的一致性（刘芷君等，2015）。

上述强、弱冬季风年多年平均差异可能有排放源的变化带来的影响，因此本文还分析了相邻强、弱年风场和气溶胶 AOD 的差异分布（2007 强年—2006 弱年）。相邻两年气溶胶的排放源一般不会出现巨大变化，因此可以近似认为气溶胶分布差异主要是由冬季风环流变化引起的。结果显示（图略），强、弱季风年 AOD 差异范围为−0.4～0.2，变化幅度为−50%～50%：强冬季风年比弱年，华南地区 AOD 增加、增加值高达 0.2、变化幅度达 40%，而华北平原 AOD 减小较为明显、减小值为−0.3、差异幅度达−40%。这应该风场的输送作用有关，2007 年为强冬季风年，东亚 30°N 以南地区偏北风异常，将大量气溶胶向南输送，累积在四川盆地、云贵高原和长江流域一带，AOD 较常年高；而 2006 年为弱年，整个东亚地区偏北风较常年减弱，850 hPa 风场距平出现南风异常，导致气溶胶集中在华北平原一带。

4 结论

本文利用 MODIS/AOD 分析了东亚地区气溶胶的空间分布特征和长期变化趋势；选取风场特征类冬季风指数，利用 NCEP 再分析资料，分析了东亚冬季风的长期变化趋势和季风强、弱年；结合气象和 AOD 数据，讨论了强、弱季风年气溶胶分布的异常及环流输送作用的差异。主要结果如下：

近 10 年东亚大部分地区冬季 AOD 呈现增长趋势，有明显的年际变化特征，最大值为 2007 年的 0.44、最小值为 2001 年的 0.36。冬季 AOD 高值区覆盖四川盆地、华北平原及长江中下游大部分地区，这些区域 AOD 增加趋势明显。利用风场类冬季风指数发现 1979～2014 年的时间段内，有 14 个强冬季风年，分别为 1979 年、1983～1987 年、1991 年、1995 年、1997、2001 年、2004 年、2007 年、2010 年、2014 年；11 个弱冬季风年，分别为 1980 年、1981 年、1988 年、1989 年、1994 年、1996 年、1998 年、2000 年、2005～2006 年、2013 年。近几十年东亚冬季风是逐渐减弱。强、弱季风年的气象条件不同，强年海陆气压差增大、东亚大槽加深增强，东亚地区偏北风异常，风场的增强将引导更多冷空气南下，从而给东亚大部分地区带来明显的降温天气；弱季风年则相反。冬季气溶胶高值分布最主要的原因是当地的人为源排放，强冬季风年东亚地区偏北风增强，将气溶胶向南方输送，东亚地区 AOD 出现“北低南高”的空间分布；弱冬季风年，整个区域偏北风较常年减弱，导致气溶胶集中在华北平原一带，AOD 出现“北高南低”的空间分布。

参考文献（References）

Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. Science, 245(4923): 1227−1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227

Chen Y, Xie S D, Luo B, et al. 2014. Characteristics and origins of carbonaceous aerosol in the Sichuan Basin, China [J]. Atmos. Environ., 94: 215−223. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.037

Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. Geophys. Res. Lett., 29(12): MOD2-1−MOD2-4. doi:10.1029/2001GL013205

Ding A J, Fu C B, Yang X Q, et al. 2013. Intense atmospheric pollution modifies weather: A case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 10545−10554. doi:10.5194/acp-13-10545-2013

Ding A J, Huang X, Nie W, et al. 2016. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. Geophys. Res. Lett., 43(6): 2873−2879. doi:10.1002/2016GL067745

关佳欣, 李成才. 2010. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 46(2): 185−191. Guan Jiaxin, Li Chengcai. 2010. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over eastern and central China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 46(2): 185−191.

Guo S, Hu M, Zamora M L, et al. 2014. Elucidating severe urban haze formation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(49): 17373−17378. doi:10.1073/pnas.1419604111

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change 2013 —The Physical Science Basis: Working Group I

Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Isaksen I S A, Granier C, Myhre G, et al. 2009. Atmospheric composition change: Climate−Chemistry interactions [J]. Atmos. Environ., 43(33): 5138−5192. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.08.003

Jacob D J, Winner D A. 2009. Effect of climate change on air quality [J]. Atmos. Environ., 43(1): 51−63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. J. Climate, 17(4): 711−726. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2

李嘉伟, 韩志伟. 2016. 中国东部气溶胶光学厚度季节变化的数值模拟 [J]. 遥感学报, 20(2): 205−215. Li Jiawei, Han Zhiwei. 2016. Numerical simulation of the seasonal variation of aerosol optical depth over eastern China [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 20(2): 205−215. doi:10.11834/jrs.20165106

Li Q, Zhang R H, Wang Y. 2016. Interannual variation of the wintertime fog–haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon [J]. International Journal of Climatology, 36(1): 346−354. doi:10.1002/joc.4350

Li Z Q, Lee K H, Wang Y S, et al. 2010. First observation-based estimates of cloud-free aerosol radiative forcing across China [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 115(D7): D00K18. doi:10.1029/2009JD013306

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.: Atmos., 116(D7): D00K18. doi:10.1029/2010JD015257

刘芷君, 王体健, 谢旻, 等. 2015. 东亚地区冬季风对气溶胶传输和分布的影响研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 51(3): 575−586. Liu Zhijun, Wang Tijian, Xie Min, et al. 2015. Influence of winter monsoon on aerosol transport and distribution in East Asia [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 51(3): 575−586.

Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 115(D7): D00K20. doi:10.1029/2009JD013484

Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 7(16): 4419−4444. doi:10.5194/acp-7-4419-2007

Quan J N, Tie X X, Zhang Q, et al. 2014. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China [J]. Atmos. Environ., 88: 83−89. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.058

Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294(5549): 2119−2124. doi:10.1126/science.1064034

Richter A, Burrows J P, Nüß H, et al. 2005. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. Nature, 437(7055): 129−132. doi:10.1038/nature04092

Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 287(5459): 1793−1796. doi:10.1126/science.287.5459.1793

Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. Science, 321(5894): 1309−1313. doi:10.1126/science.1160606

邵鹏程, 李栋梁. 2012. 东亚冬季风指数的分类和比较 [J]. 气象科学, 32(2): 226−235. Shao Pengcheng, Li Dongliang. 2012. Classification and comparison of East Asian winter monsoon indices [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 32(2): 226−235. doi:10.3969/2012jms.0018

Spurny K R. 1996. Aerosol air pollution its chemistry and size dependent health effects [J]. Journal of Aerosol Science, 27: S473−S474. doi:10.1016/0021-8502(96)00309-6

Streets D G, Waldhoff S T. 2000. Present and future emissions of air pollutants in China: SO_2, NO_x, and CO [J]. Atmos. Environ., 34(3): 363−374. doi:10.1016/S1352-2310(99)00167-3

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.: Atmos., 108(D21): 8809. doi:10.1029/2002JD003093

Sun M. 1988. Acid aerosols called health hazard [J]. Science, 240(4860): 1727. doi:10.1126/science.240.4860.1727-a

Tao J H, Zhang M G, Chen L F, et al. 2013. A method to estimate concentrations of surface-level particulate matter using satellite-based aerosol optical thickness [J]. Science China Earth Sciences, 56(8): 1422−1433. doi:10.1007/s11430-012-4503-3

Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. J. Atmos. Sci., 34(7): 1149−1152. doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2

von Schneidemesser E, Monks P S, Allan J D, et al. 2015. Chemistry and the linkages between air quality and climate change [J]. Chemical Reviews, 115(10): 3856−3897. doi:10.1021/acs.chemrev.5b00089

王会军, 姜大膀. 2004. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异 [J]. 第四纪研究, 24(1): 19−27. Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. A new East Asian winter monsoon intensity index and atmospheric circulation comparison between strong and weak composite [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 24(1): 19−27. doi:10.3321/j.issn:1001-7410.2004.01.003

Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. J. Climate, 22(18): 4860−4872. doi:10.1175/2009JCLI2973.1

Wang L L, Xin J Y, Wang Y S, et al. 2007. Validation of MODIS aerosol products by CSHNET over China [J]. Chinese Science Bulletin, 52(12): 1708−1718. doi:10.1007/s11434-007-0222-0

Wang T J, Zhuang B L, Li S, et al. 2015. The interactions between anthropogenic aerosols and the East Asian summer monsoon using RegCCMS [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 120(11): 5602−5621. doi:10.1002/2014JD022877

Wu G X, Li Z Q, Fu C B, et al. 2016. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China [J]. Science China Earth

Sciences, 59(1): 1−16. doi:10.1007/s11430-015-5198-z

Zhang Q, Geng G N, Wang S W, et al. 2012a. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996−2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 57(22): 2857−2864. doi:10.1007/s11434-012-5015-4

Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 26−35. doi:10.1007/s11430-013-4774-3

Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, et al. 2008. Aerosol monitoring at multiple locations in China: Contributions of EC and dust to aerosol light absorption [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 60(4): 647−656. doi:10.1111/j.1600-0889.2008.00359.x

Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012b. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(2): 779−799. doi:10.5194/acp-12-779-2012

张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58(13): 1178−1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58(13): 1178−1187. doi:10.1360/972013-150

Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(11): 5685−5696. doi:10.5194/acp-13-5685-2013

Zheng G J, Duan F K, Su H, et al. 2015. Exploring the severe winter haze in Beijing: The impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(6): 2969−2983. doi:10.5194/acp-15-2969-2015

Zhuang B L, Li S, Wang T J, et al. 2013a. Direct radiative forcing and climate effects of anthropogenic aerosols with different mixing states over China [J]. Atmos. Environ., 79: 349−361. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.004

Zhuang B L, Liu Q, Wang T J, et al. 2013b. Investigation on semi-direct and indirect climate effects of fossil fuel black carbon aerosol over China [J]. Theor. Appl. Climatol., 114(3): 651−672. doi:10.1007/s00704-013-0862-8