

宿兴涛, 许丽人, 张志标, 等. 2015. 基于卫星观测的我国北方地区紫外吸收性气溶胶的时空分布研究 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 11–20, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13079. Su Xingtao, Xu Liren, Zhang Zhibiao, et al. 2015. A study on the spatio-temporal distribution of UV-absorbing aerosols in northern China based on satellite observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 11–20.

基于卫星观测的我国北方地区紫外吸收性 气溶胶的时空分布研究

宿兴涛¹ 许丽人¹ 张志标¹ 吴洪星²

¹ 北京应用气象研究所, 北京 100029

² 解放军 93173 部队气象台, 辽宁瓦房店 116300

摘 要 利用气溶胶指数 (Aerosol Index, AI) 资料研究了东亚地区紫外吸收性气溶胶的时空分布特征, 主要得出以下结论: 1) 雨云七号卫星 (Nimbus 7, N7) 和地球探测卫星 (Earth Probe, EP) 搭载的臭氧总量测绘光谱仪 (Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS) 以及臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 反演的 AI 数据在东亚大陆具有较好的一致性, 但 EP/TOMS-OMI AI 的连续性较好, 而 N7/TOMS-EP/TOMS AI 的连续性较差; 2) 东亚地区紫外吸收性气溶胶主要位于塔克拉玛干沙漠及其东部周边的库姆塔格、柴达木盆地沙漠、古尔班通古特沙漠、内蒙古中西部、蒙古国南部以及我国东北、华北地区; 3) 紫外吸收性气溶胶具有明显的月际变化特征; 4) 旋转正交经验函数分析不仅能分离紫外吸收性气溶胶的源区范围, 还能给出源强相对大小的定性信息。

关键词 紫外吸收性气溶胶 气溶胶指数 沙尘 生物质燃烧 旋转正交经验函数

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0011-10

中图分类号 P412.27

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13079

A Study on the Spatio-Temporal Distribution of UV-Absorbing Aerosols in Northern China Based on Satellite Observations

SU Xingtao¹, XU Liren¹, ZHANG Zhibiao¹, and WU Hongxing²

¹ Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

² Meteorological Observatory of No. 93173 Unit of PLA, Wafangdian Liaoning 116300

Abstract Aerosol Index (AI) data was used to study the spatio-temporal distribution of ultraviolet (UV)-absorbing aerosols over East Asia. The main conclusions are as follows. In addition to continuity from the Earth Probe (EP)/Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) AI to the Ozone Monitoring Instrument (OMI) AI, which differs from the Nimbus 7 (N7)/TOMS AI to EP/TOMS AI, good consistency was shown among N7/TOMS, EP/TOMS, and OMI AI. UV-absorbing aerosols are mostly located in the Taklimakan Desert, Kumutage Desert, Qaidam Basin Desert, Gurbantünggüt Desert, Midwestern Inner Mongolian Autonomous Region, Southern Mongolia, Northeastern China, and North China. Moreover, UV-absorbing aerosols have obvious characteristics of inter-monthly variation. Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF) analysis can isolate source domains of UV-absorbing aerosols and provide quantitative information on the relative strengths of these sources.

Keywords UV-absorbing aerosol, Aerosol Index (AI), Dust, Biomass burning, Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF)

收稿日期 2013-05-08; 网络预出版日期 2014-10-14

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2011CB403202

作者简介 宿兴涛, 男, 1984 年出生, 博士, 工程师, 主要从事气溶胶与大气环境研究。E-mail: suxingtao@sina.com

1 引言

气溶胶既可以通过吸收和散射长短波辐射的“直接方式”影响气候,又可以作为云凝结核或冰核影响云的微物理过程的“间接方式”影响气候。根据对太阳辐射的吸收程度,气溶胶可分为吸收性气溶胶和非吸收性气溶胶。除上述两种方式,吸收性气溶胶由于对太阳辐射有着较强的吸收,还能通过加热大气、改变大气稳定度、蒸发云滴、减少云量等“半直接方式”影响气候(IPCC, 2007)。因此,为了更全面地了解气溶胶对气候的影响,吸收性气溶胶必不可少,而吸收性气溶胶的时空分布又是首先需要了解的。

NASA 的臭氧总量测绘光谱仪(Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS)气溶胶指数(Aerosol Index, AI)用于表示气溶胶在紫外波段对太阳辐射的吸收程度,是一个非常实用的识别气溶胶源和传输类型的定性指标。目前,已经有学者利用 AI 来研究紫外吸收性气溶胶的分布情况,如 Herman et al. (1997)利用 TOMS AI 研究了全球紫外吸收性气溶胶分布以及几个主要源区紫外吸收性气溶胶的年际变化,其中既包括沙尘源区也包括生物质和化石燃料燃烧源区;Li et al. (2009)利用 TOMS 和臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI) AI 研究了全球范围紫外吸收性气溶胶的时空变化特征。

沙尘气溶胶对 AI 信号贡献最大,因此 AI 能用来识别沙尘源区。Prospero et al. (2002)通过给 TOMS AI 设定最小临界值+1 来识别全球的沙尘源区,并研究了各源区的环境特征;Israelevich et al. (2002)利用长期平均的 TOMS AI 局部最大值法来识别沙尘源区,并推断出北非是夏季最稳定的沙尘源区,而且来自于这个地区的沙尘沿地中海向北、向东传输;Washington et al. (2003)也曾利用 TOMS AI 来识别全球的沙尘暴源区。

除了沙尘,农业烧荒、森林火灾等生物质燃烧对 AI 信号的贡献也比较显著。Ji and Stocker (2002)对 TOMS AI 资料进行正交经验函数和奇异谱分析,研究了大火的全球分布和季节变化;Habib et al. (2006)研究发现,除了沙尘浓度较高的地区外,印度其它地区 TOMS AI 与人为源气溶胶排放强度存在相关关系;Badarinath et al. (2007)研究表明,在印度东北地区, AI 与大火的时空分布存在显著相关。

石油产品、煤等化石燃料燃烧等产生的烟(smoke)对 AI 的贡献也比较显著(Herman et al., 1997)。另外, AI 对火山爆发产生的火山灰(也称火山气溶胶)也比较敏感(Seftor et al., 1997),但在东亚地区其影响较小,本文将不作考虑。

我国和韩国等东亚学者也相对较早利用 AI 资料进行过有关研究,但对象基本上仅限于东亚地区的沙尘天气过程。张军华等(2002)研究了利用 TOMS 资料定量遥感沙尘暴的方法,通过对一次沙尘暴过程的研究,得到了沙尘暴发生、发展、强度以及影响范围等特征;高庆先等(2004a)通过对 TOMS AI 分析,揭示了我国北方沙尘气溶胶的时空分布特征和长期演变规律;高庆先等(2004b, 2005)和金正润等(2009)利用 AI 资料分析了我国和韩国沙尘天气过程的强度及其演变。

东亚地区紫外吸收性气溶胶(此处特指 AI 指数所反映的紫外吸收性气溶胶)主要来自沙尘、生物质燃烧和化石燃料燃烧,生物质燃烧和化石燃料燃烧几乎均为人为源。沙尘源区主要位于我国西北、北部以及蒙古国南部。研究表明,东亚沙尘源每年约 800 Tg 沙尘释放进入大气中(Zhang et al., 1997),可能达到全球粉尘释放总量的一半左右(张小曳和龚山陵, 2005)。我国是农业大国,季节性的农业烧荒产生的烟污染不容忽视,尤其在我国东部地区。另外,改革开放以来随着社会、经济等的快速发展,石油、煤等消耗非常严重,尽管已经采取各种节能减排措施,但每年依然有大量化石燃料燃烧源气溶胶等排放进大气,造成大气污染。由于位于东亚季风区,不同季节大气环流特征显著,可以造成东亚大陆产生的沙尘、生物质燃烧、化石燃料燃烧源气溶胶等进行交叉传输。因此,了解东亚大陆紫外吸收性气溶胶的时空分布特征,对研究其对区域乃至全球尺度气候、环境等产生的影响均具有重要的意义。

目前,对紫外吸收性气溶胶的排放强度评估的主要方法有元素示踪(Zhang et al., 1997)、数值模拟(Zhang et al., 2003)、地面气象观测记录(Zhou and Zhang, 2003)、汇总基础数据制作排放清单(Cao et al., 2006)等,但这些方法由于本身存在的各种缺陷而导致评估结果不确定性很大。本文通过将旋转正交经验函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)方法引入到 AI 资料分析中,不仅能有效获取东亚地区紫外吸收性气溶胶更为详

细的源区范围及时空变化信息, 还能定性推算源强的大小。

2 资料与方法

AI 是研究紫外吸收性气溶胶源区、传输以及一些很强个体事件如森林大火等的定性半定量指标。AI 利用 TOMS 或 OMI 在两个近紫外波长辐射率的差异来定义, 可表示为:

$$A_i = -100[\lg(I_A/I_B)_{\text{meas}} - \lg(I_A/I_B)_{\text{calc}}], \quad (1)$$

其中, A_i 为 AI 值, I_{meas} 为 A 和 B 波段卫星测得的后向散射辐射量, I_{calc} 为完全雷利 (Rayleigh) 大气中计算的 A 和 B 波长后向散射辐射量。对于雨云七号卫星 (Nimbus 7, N7) 搭载的 TOMS 探测器 (N7/TOMS), A 和 B 分别为 340 nm、380 nm, 而对于地球探测卫星 (Earth Probe, EP) 搭载的 TOMS (EP/TOMS) 探测器和 OMI 探测器, A、B 分别为 331 nm 和 360 nm。这种定义的差别将不可避免导致 N7/TOMS AI 在数值上与 EP/TOMS 和 OMI AI 存在系统性差异。AI 正值表示吸收性气溶胶, 0 左右 (0 ± 0.2) 表示云或较大粒径 ($\geq 0.2 \mu\text{m}$) 非吸收性气溶胶, 负值表示较小粒径非吸收性气溶胶。AI 的反演技术利用了近紫外遥感的两项独特优势: 1) 在所有地表类型均具有低反射率, 使陆地上空的气溶胶反演成为可能; 2) 对吸收紫外的气溶胶类型有较强的敏感性, 这样可以将沙尘、生物质燃烧、化石燃料燃烧源气溶胶等紫外吸收性气溶胶与纯散射粒子如硫酸盐、海盐气溶胶区分开来。

TOMS 曾被放置在不同的卫星上, 首先是 N7 (1978 年 11 月至 1993 年 5 月), 然后是 Meteor 3 卫星 (1991~1994 年) 和 EP (1996 年 7 月至 2005 年 12 月), 最后被 OMI 仪器代替放置在 Aura 卫星上 (自 2004 年 10 月起)。由于出现仪器退化 (instrumental degradation) 问题, EP/TOMS 从 2000 年开始出现偏差, 因此对于 EP/TOMS 本文采用 1997~1999 年的 AI 记录。考虑到气候存在的年际或年代际变化以及对比时间的一致性, N7/TOMS 和 OMI 分别取 1987~1989 年、2007~2009 年的 AI 资料。Meteor 3/TOMS AI 目前不可用, 不在本文研究范围。AI 每日探测一次, N7/TOMS 和 EP/TOMS AI 的分辨率为 1° (纬度) $\times 1.25^\circ$ (经度), OMI AI 的分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度), 这些资料均可从 NASA FTP 下载 (<ftp://jwocsky.gsfc.nasa.gov/pub/version8/>

<ftp://jwocsky.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/aerosol> [2013-05-08])。Torres et al. (2002) 研究表明, N7/TOMS 和 EP/TOMS 反演的吸收性气溶胶光学厚度在 AERONET (Aerosol Robotic Network) 地基观测总气溶胶光学厚度 30% 以内。另外, 高庆先等 (2004a) 利用傅里叶展开和 Li et al. (2009) 时空分析均表明, 虽然经过波段调整、不同使用时间等因素, 但 3 个时期 AI 产品均具有较高精度, 并且在全球和中国北方地区均具有较好的可比性和连续性。

根据 Herman et al. (1997) 和 Prospero et al. (2002) 的研究, 只有在 AI 值大于 +1 的情况下才能用于紫外吸收性气溶胶的研究。因此, 首先对 1987~1989 年、1997~1999 年、2007~2009 年每日 AI 低于 +1 的值进行过滤, 在此基础上进行月平均来研究 AI 的年循环 (月际变化)。

经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析是一种将变量场时空结构分离的常用方法, 但 EOF 分析主要存在 3 种局限性 (魏凤英, 2007): 1) 分离出的空间分布结构不能清晰地表示不同地理区域的特征; 2) 所取范围不同会导致特征向量空间分布不同, 给进行物理解释带来困难; 3) 取样大小不同, 对反映真实分布结构的相似度也会有不同, 即存在一定的取样误差。而采用 AI 研究东亚地区紫外吸收性气溶胶的时空分布, 既要考虑其源区的分布, 又要考虑到 AI 资料的提取对东亚地区的确切范围不敏感, 而 REOF 分析能克服上述缺陷, 因此本文采用 REOF 分析进行研究, 关于 REOF 方法详细介绍见参考文献 (魏凤英, 2007)。

3 结果与讨论

3.1 气溶胶指数年平均分布

Li et al. (2009) 研究表明, N7/TOMS-EP/TOMS-OMI AI 的空间分布在全球尺度上具有较好的一致性, 但在区域尺度可能存在差异。高庆先等 (2004a) 研究表明, 1997~2002 年, AI 在中国北方沙尘源区和影响区具有较好的连续性与可比性, 但其仅采用了 EP/TOMS AI 资料。因此, 首先对 N7/TOMS-EP/TOMS-OMI AI 在东亚地区的一致性与连续性进行验证。本文对一致性定性的定义为 AI 分布形势的吻合程度; 对连续性定性的定义为 AI 数值大小的差异程度。

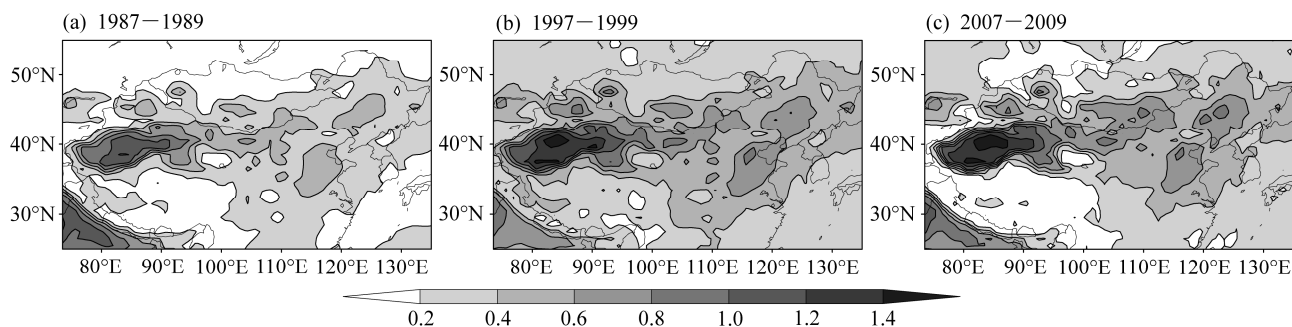


图1 东亚地区 AI 分布

Fig. 1 Distribution of aerosol index (AI) over East Asia

图 1a-1c 分别为东亚地区 1987~1989 年、1997~1999 年、2007~2009 年平均 AI 分布图。由图可见，东亚地区 N7/TOMS、EP/TOMS 和 OMI AI 分布形势相似，AI 相对大值区主要位于我国北方地区和蒙古国大部，紫外吸收性气溶胶的主要源区有塔克拉玛干沙漠及其东部周边的库姆塔格和柴达木盆地沙漠、古尔班通古特沙漠、内蒙古中西部、蒙古国南部以及东北、华北地区。华北和东北地区是我国沙尘天气的主要影响区（周自江，2001），同时这两个地区人口稠密，工农业均比较发达，燃煤、燃油等化石燃料燃烧和农业烧荒等生物质燃烧源很强（Cao et al., 2006），因此这两个地区紫外吸收性气溶胶主要来源为沙尘和生物质燃烧、化石燃料燃烧等人为排放的混合。其他几个源区紫外吸收性气溶胶的主要来源为沙尘，因为这些地区人口稀少、工业落后，相对于我国东部和南部，生物质燃烧和化石燃料燃烧较弱（Cao et al., 2006）。值得注意的是，由于这些地区大小不等的沙漠或沙地较多，除塔克拉玛干沙漠外，其他源区边界在图 1 中并不清晰。由于波段调整及排放强度的年际变化等因素，虽然 1987~1989 年 AI 信号较 1997~1999 年和 2007~2009 年要弱，但三者分布特征基本一致，表明 N7/TOMS-EP/TOMS-OMI AI 在东亚地区具有较好的一致性。

3.2 气溶胶指数月际变化

根据图 1，自西向东选择了 4 个代表性区域（图 2）用于研究 AI 的月际变化，采用资料为 N7/TOMS、EP/TOMS 和 OMI 月平均 AI 数据集。其中，1~4 区的范围分别为（36°N~43°N，75°E~95°E）、（37°N~43°N，95°E~107°E）、（35°N~41°N，114°E~122°E）、（41°N~50°N，120°E~128°E）。比较 AI 的月际变化的部分原因是，3 组资

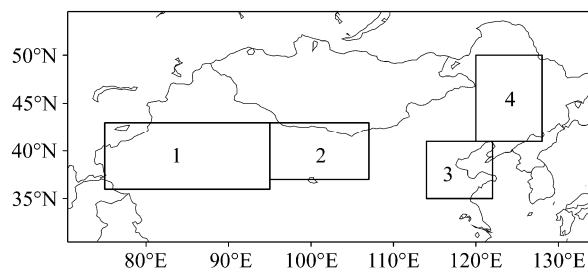


图2 根据 REOF 分析结果选择的代表性区域

Fig. 2 Representative regions according to the results of rotated empirical orthogonal function (REOF) analysis

料在时间上没有重叠，而由于气溶胶浓度的年际变化，不可能在相同时间段进行直接的对比。1 区和 2 区位于我国西北干旱与半干旱地区，分别为塔克拉玛干沙漠及其周边沙漠、巴丹吉林沙漠及其周边沙漠，是东亚沙尘的主要源区（Zhou and Zhang, 2003），紫外吸收性气溶胶的主要来源为沙尘，而 3 区和 4 区为沙尘与人为混合排放源区。

图 3 为 4 个区 AI 值的月际变化图。由图可见，AI 值在所有区域均呈现出明显的月际变化特征。1 区和 2 区 3 组数据基本均在 3~5 月数值较高，最大值均出现在 4 月，与我国沙尘暴天气的主要发生季节基本一致，也从侧面说明了 1 区和 2 区紫外吸收性气溶胶的主要来源为沙尘；N7/TOMS 和 EP/TOMS AI 在 4 月后波动减小，在秋冬季节相交的 11~12 月达到最小，而对于 OMI，1 区 7~11 月相差很小，均处于一年中的低值，2 区 7~9 月出现极小值。除 3 区 OMI AI 在 11~12 月也较大外，3 区和 4 区均是在 1~5 月出现高值，7~9 月出现低值。值得注意的是，由于边界层的紫外吸收性气溶胶信号相对于来自地面的噪音要弱，因此探测器对 1 km 高度以下边界层内的紫外吸收性气溶胶不

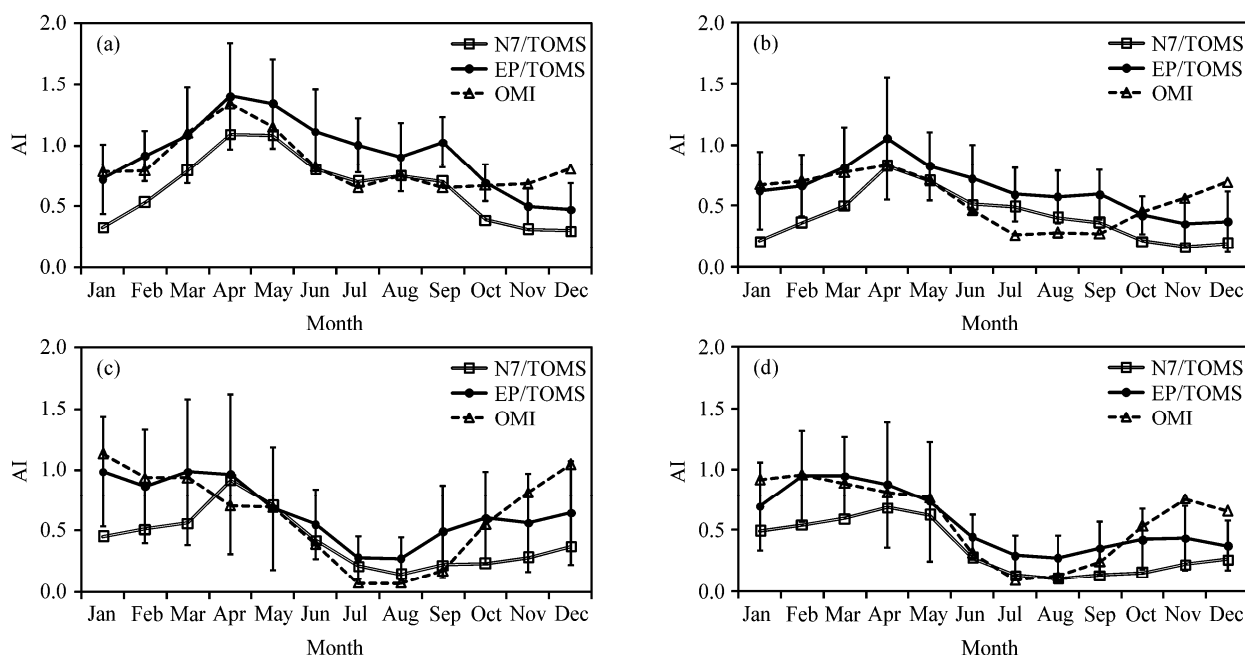


图3 (a) 1区、(b) 2区、(c) 3区、(d) 4区 N7/TOMS、EP/TOMS 和 OMI AI 值的月际变化 (误差线为 EP/TOMS AI ± 标准差)

Fig. 3 Monthly variations of N7/TOMS, EP/TOMS, and OMI AI in (a) region 1, (b) region 2, (c) region 3, and (d) region 4 (short bars are EP/TOMS AI ± standard deviations)

敏感,而在1~5月,3区和4区混合排放物在多发
 的锋面活动作用下能被抬升到更高的高度 (Herman
 et al., 1997), 更容易被卫星探测到信号。夏秋季
 沙尘活动处在一年中的最低值,加上夏季降水对气
 溶胶的冲刷,导致这两个区 AI 均在夏季和秋初出
 现低值。

除个别月份外,4个区 N7/TOMS-EP/TOMS-
 OMI AI 的月际变化趋势吻合较好。由表 1 可见,
 N7/TOMS、OMI 与 EP/TOMS 月平均 AI 值序列的
 相关系数很高,基本都在 0.70 以上,绝大多数通过
 0.01 以上水平的显著性检验,尤其是在 1、2、4 区,
 N7/TOMS 和 EP/TOMS AI 的相关系数甚至分别高
 达 0.97、0.91、0.94,进一步证实了 AI 在 N7/TOMS-
 EP/TOMS-OMI 的一致性较好。但是,2 区 OMI 和
 EP/TOMS AI 相关性不好 (相关系数为 0.45),主要
 原因该区域沙尘扩散受大风天气影响较大 (姚正毅
 等, 2006), 而大风次数受气候年际变率的影响相
 对更显著。由于 1 区地势封闭以及 3、4 区紫外吸
 收性气溶胶主要来源为生物质燃烧等原因,1、3、
 4 区 AI 受气候变率的影响相对较小,因此表现出更
 好的一致性。此外, N7/TOMS AI 与 EP/TOMS 和
 OMI AI 存在的系统性差异导致 N7/TOMS 到
 EP/TOMS 的连续性较差;而由于采用了两个相同
 的近紫外波长,除个别月份外, OMI AI 的月际变

化大体在 EP/TOMS 误差线以内,反映了从
 EP/TOMS 到 OMI AI 的连续性较好。所以,总体来
 说,3 组数据的一致性较好,而且 EP/TOMS 到 OMI
 AI 的连续性也比较好,但 N7/TOMS 到 EP/TOMS AI
 的连续性较差。考虑到设备的不同或者被放置在
 不同的卫星上,而且之前 MODIS (MODerate-
 resolution Imaging Spectroradiometer) TERRA 和
 MODIS AQUA 出现了不一致 (Mishchenko et al.,
 2007a, 2007b), 因此不同时期 AI 产品的一致性与
 连续性检验对于利用该产品研究东亚地区紫外吸
 收性气溶胶具有重要参考意义。

表 1 1~4 区 EP/TOMS 与 N7/TOMS、OMI 月平均 AI 值
 序列的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of N7/TOMS and OMI
 with EP/TOMS monthly mean AI series in four regions

区域	与 N7/TOMS 的相关系数	与 OMI 的相关系数
1	0.97**	0.70*
2	0.91**	0.45
3	0.76*	0.83**
4	0.94**	0.83**

*表示通过 0.01 的显著性检验, **表示通过 0.001 的显著性检验。

3.3 REOF 分析

利用 REOF 分析进一步研究东亚地区紫外吸收
 性气溶胶的时空变化特征,尤其是局地特征。尽管

可能不能识别全球模态 (Dommenguet and Latif, 2002), 但 REOF 对于分离区域特征是有用的。旋转后的典型分布结构清晰, 不但能较好反映不同区

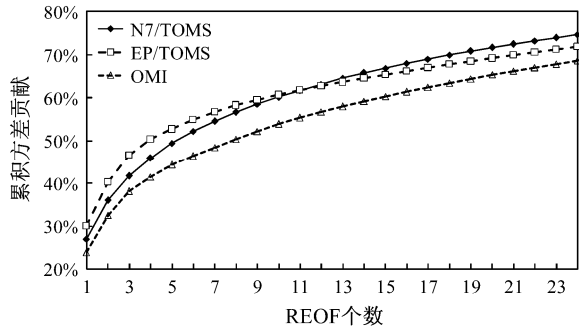


图4 选取的前 24 个 REOF 模态累积方差贡献

Fig. 4 Percentages of variance explained by the first 24 REOF modes

域的变化, 还可以反映不同区域的相关分布情况。

与大多数 EOF 分析研究不同, 旋转后的方差贡献均匀分散 (图 4)。根据紫外吸收性气溶胶源区的大体分布情况以及 REOF 分析结果, 选取了 EOF 前 24 个模态用于旋转。尽管 REOF 前 24 个模态累积方差贡献分别仅为 74.6%、71.8%、68.6%, 但它们的空型却基本上包含了所要研究的绝大部分信息。图 5~7 分别列出了 N7/TOMS、EP/TOMS、OMI 候平均 AI 数据集分离出来的主要紫外吸收性气溶胶分布区域。其中, 正值区表示在研究时段内该区域 AI 存在增强趋势; 反之, 负值区表示存在减弱趋势。由图可见, 由于紫外吸收性气溶胶排放的年际变化, 不同年份分离出来的紫外吸收性气溶胶源区范围和 REOF 的顺序均存在差别, 但主要

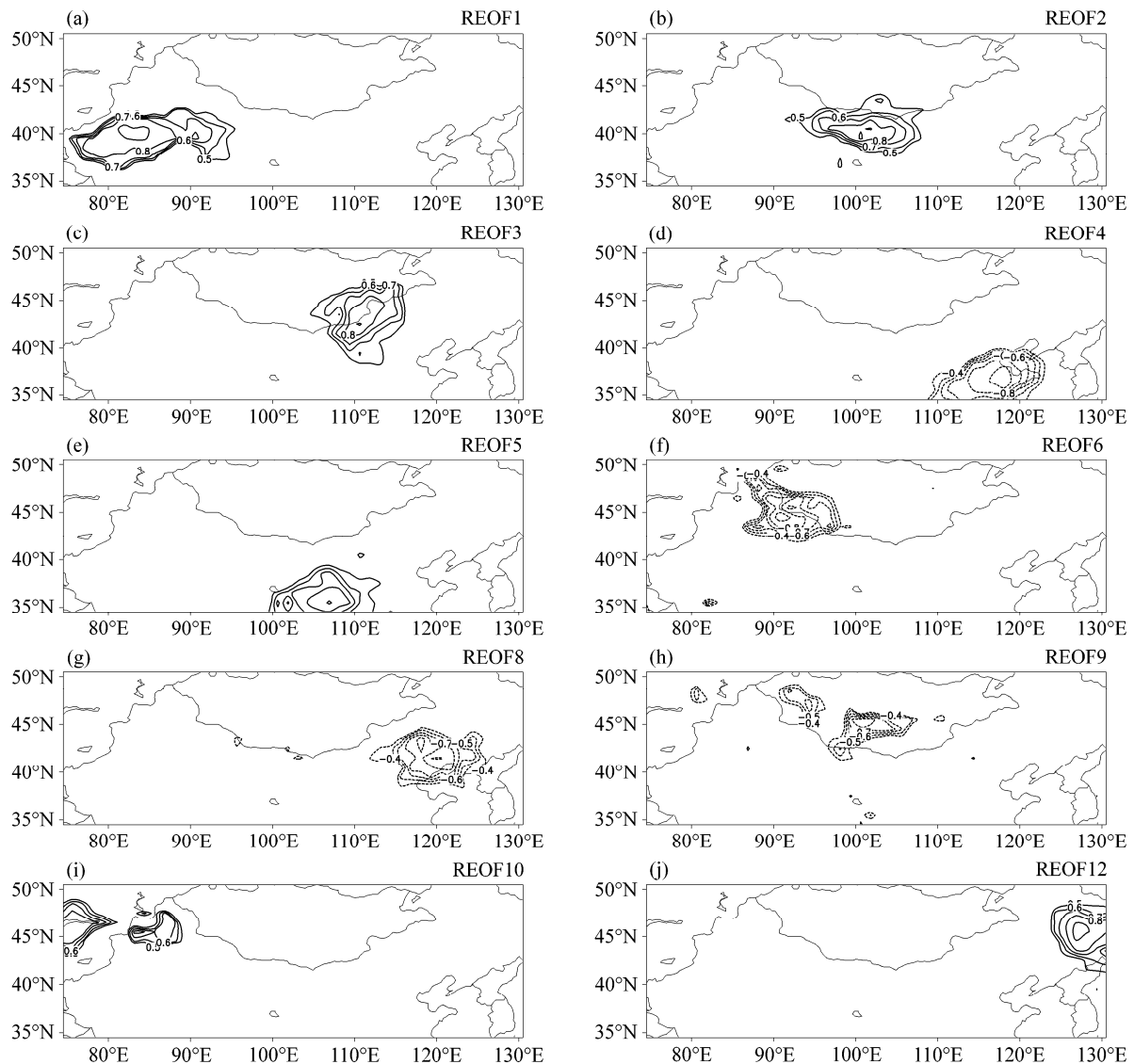


图5 N7/TOMS AI 分离出来的主要紫外吸收性气溶胶源区

Fig. 5 Major sources of UV-absorbing aerosols from N7/TOMS AI

源区位置基本保持不变。

东亚地区沙漠或沙地较多,但这只是决定沙尘释放能力的条件之一,即丰富的沙源(物质条件);除此之外,较大的风力(动力条件)以及不稳定的大气层结状态(局地热力条件)也是影响沙尘释放能力的两个重要条件,这3个条件共同决定了一个地区的沙尘释放能力。如古尔班通古特沙漠虽然是东亚第二大沙漠,但其沙尘释放能力并不强,在

N7/TOMS 和 EP/TOMS 为第 10 旋转空间模态,在 OMI 为第 8 旋转空间模态,而且在 N7/TOMS 是和哈萨克斯坦的萨雷耶西克阿特劳沙漠(Saryesik-Atyrau Desert)一起分离出来,在 OMI 也只是作为其他源区的一部分,并没有单独显示出很强的信号。

塔克拉玛干沙漠及其东部周边的库姆塔格、柴达木盆地沙漠区域是东亚地区沙尘释放能力最强

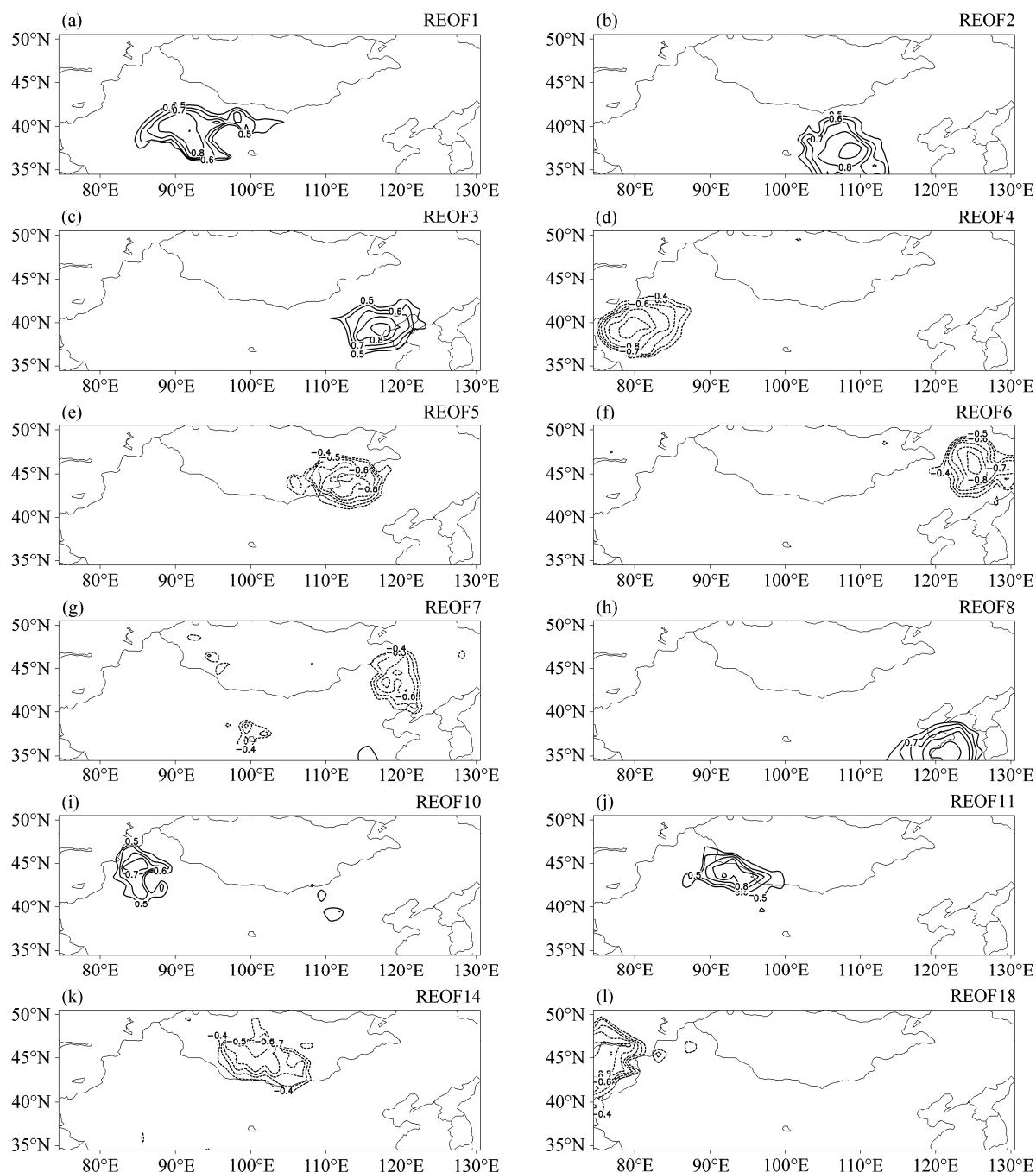


图 6 同图 5, 但为 EP/TOMS AI

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for EP/TOMS AI

的地区, 在 N7/TOMS 和 OMI 为第 1 旋转空间模, 而在 EP/TOMS 中被分离为第 1、4 两个旋转空间模, 库姆塔格、柴达木盆地及巴丹吉林沙漠区域为第 1 旋转空间模, 塔克拉玛干沙漠为第 4 旋转空间模。即使在全球尺度, 塔克拉玛干沙漠及其周边地区也是沙尘释放明显的源区之一 (Prospero et al., 2002; Washington et al., 2003; Li et al., 2009)。图 8a 为

N7/TOMS 和 OMI 第 1 旋转空间模、EP/TOMS 第 4 旋转空间模的时间系数变化曲线, 通过与图 3a 比较可见, 时间系数的变化特征与塔克拉玛干沙漠 AI 的月际变化趋势比较吻合, 反映了分离出来的旋转空间模态的合理性。

巴丹吉林沙漠在 N7/TOMS 为第 2 旋转空间模, 在 OMI 为第 4 旋转空间模, 在 EP/TOMS 为第 1 旋

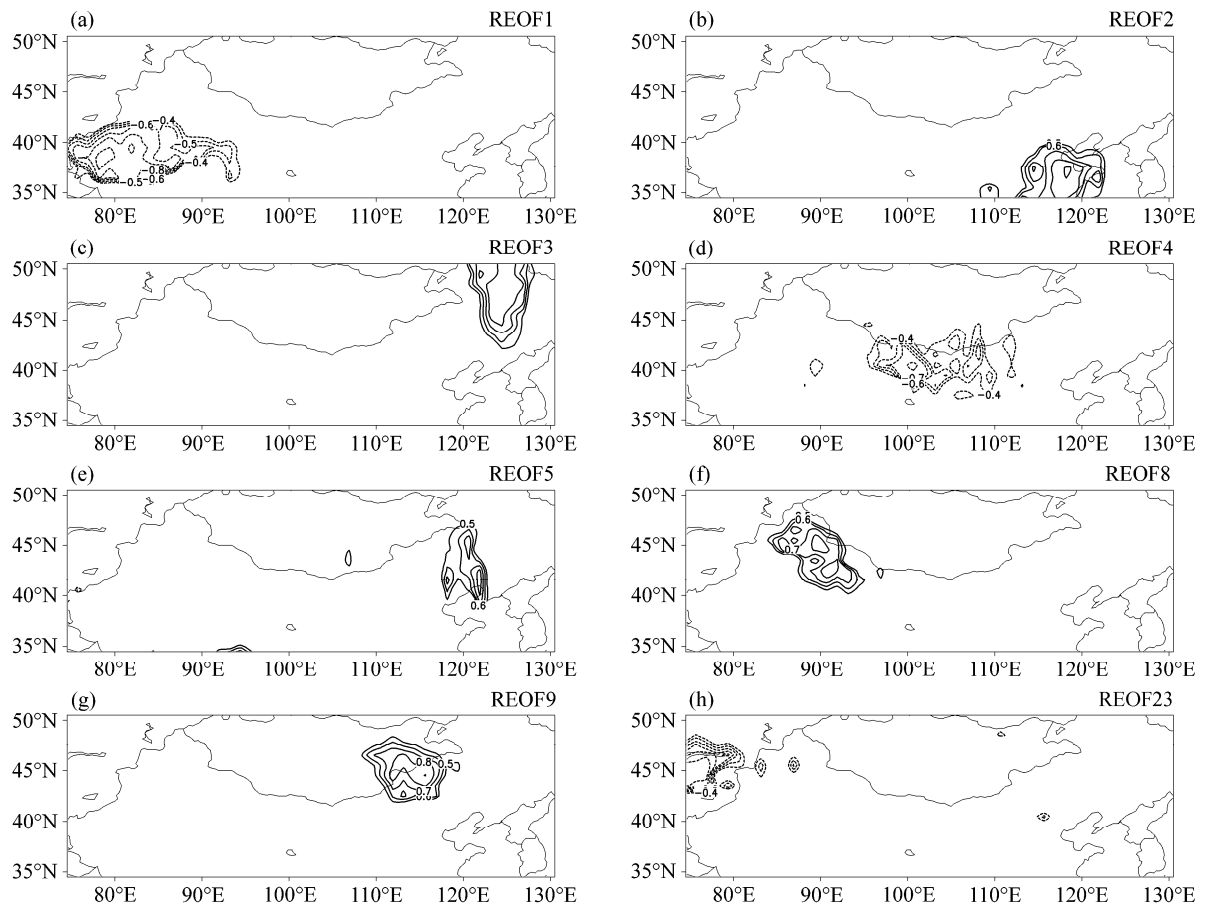


图 7 同图 5, 但为 OMI AI

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for OMI AI

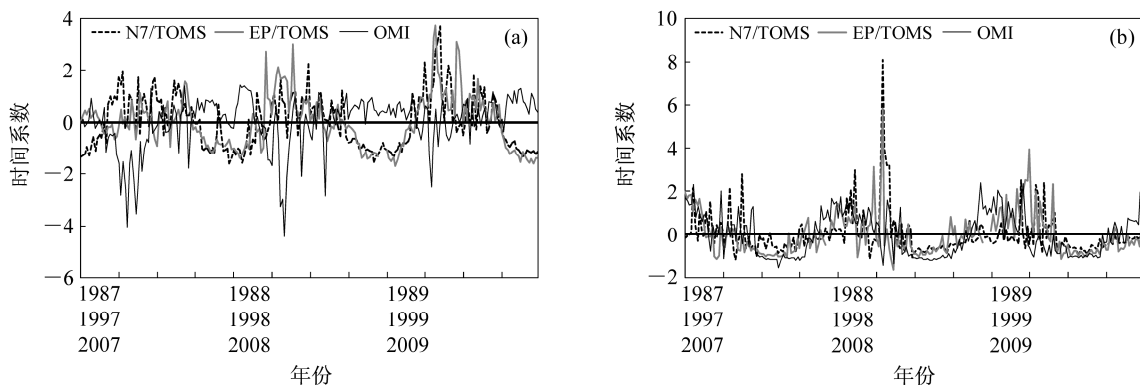


图 8 (a) 塔克拉玛干沙漠及其周边源区与 (b) 华北源区对应的时间系数序列

Fig. 8 Time coefficients corresponding to (a) Taklimakan Desert and adjacent sources and (b) North China sources

转空间模的一部分，沙尘释放强度在东亚沙尘源区排第二位。内蒙古中部与蒙古国交界地区（分别为第 3、6、9 旋转空间模）、古尔班通古特沙漠东部与蒙古国交界地区（分别为第 6、11、8 旋转空间模）以及萨雷耶西克阿特劳沙漠（分别为第 10、18、23 旋转空间模）均存在一个沙尘释放较强的中心，在 3 组数据中均将其分离出来。萨雷耶西克阿特劳沙漠虽然距离东亚地区较近，但沙尘释放能力相对较弱，因此对东亚地区的影响有限。

另外，还存在几个沙尘释放较强的中心，但仅在其中 1 组或 2 组数据中被分离出来。如鄂尔多斯高原在 N7/TOMS、EP/TOMS 分别被分离为第 5、2 旋转空间模，且在 N7/TOMS 中源区位置偏南；科尔沁沙地及周边地区在 EP/TOMS 和 OMI 分别被分离为第 7、5 旋转空间模。蒙古国南部的戈壁沙漠（Natsagdorj et al., 2003）在 N7/TOMS、EP/TOMS 分别被分离为第 9、14 旋转空间模。这些源区在某些年份没有被分离出来，原因可能在于气候的年际变率，因为相对于沙漠化等因素，气候的年际变率对沙尘释放的影响更大（Zhang et al., 2003）。

华北和东北这两个沙尘和人为混合排放源区，在 3 组数据中均被分离出来，华北地区在 N7/TOMS 和 OMI 分离为第 4、2 旋转空间模，在 EP/TOMS 被分离为第 3、8 两个旋转空间模，而东北地区在 3 组数据分别被分离为第 12、6、3 旋转空间模。3 组数据中华北源区的 REOF 顺序均在东北源区之前，说明华北地区紫外吸收性气溶胶排放强度比东北地区大，这一点也与 Cao et al. (2006) 研究一致。图 8b 为华北源区所对应的时间系数序列，同该地区 AI 的月际变化同样吻合较好。

综合上述分析可见，将 REOF 分析方法应用到 AI 数据处理，不仅有效获取了东亚大陆紫外吸收性气溶胶不同尺度源区的确切范围和时空信息，还能给出源强相对大小的定性信息。

4 结论

利用 AI 数据研究了东亚地区紫外吸收性气溶胶的时空分布特征，主要结论有：

(1) N7/TOMS-EP/TOMS-OMI AI 数据在东亚大陆具有较好的一致性，而且 EP/TOMS 到 OMI AI 的连续性也比较好，但 N7/TOMS 到 EP/TOMS AI 的连续性较差。

(2) 东亚大陆紫外吸收性气溶胶主要位于塔克拉玛干沙漠及其东部周边的库姆塔格、柴达木盆地沙漠、古尔班通古特沙漠、内蒙古中西部、蒙古国南部以及我国东北、华北地区，东北和华北地区紫外吸收性气溶胶的主要来源为沙尘与生物质燃烧、化石燃料燃烧等人为混合排放，其他源区主要来源为沙尘。

(3) 紫外吸收性气溶胶具有明显的月际变化特征，沙尘源区春季 AI 值最高，而沙尘与人为混合排放源区 1~5 月 AI 值较高。

(4) REOF 分析不仅能分离紫外吸收性气溶胶的源区范围，还能给出源强相对大小的定性信息。

最后需要指出的是，尽管 AI 资料可用于研究紫外吸收性气溶胶的空间分布特征，但是与其它气溶胶光学厚度资料如甚高分辨率扫描辐射仪（Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR）不同，AI 资料不能用于紫外吸收性气溶胶的时间趋势分析。气溶胶光学厚度资料不依赖于气溶胶类型与高度，仅仅依赖气溶胶浓度；而 AI 资料不仅依赖气溶胶类型，还依赖气溶胶层的高度。由于来自地面“噪声”的干扰，TOMS/OMI 传感器对 1 km 高度以下边界层吸收性气溶胶信号不敏感。另外，AI 信号大多数来自一些短期的事件如沙尘暴、生物质燃烧，存在较大的偶然性，趋势性较弱。然而，AI 资料缺乏明显的趋势并不代表某一种紫外吸收性气溶胶也不存在明显趋势，因为 AI 资料包括了大气中所有紫外吸收性气溶胶的相互作用，且对气溶胶高度和结果分析中 AI 临界值的设置敏感。因此，紫外吸收性气溶胶更准确的趋势分析需要结合地面观测、数值模拟等方法。

参考文献 (References)

- Badarinath K V S, Kharol S K, Chand T R K. 2007. Use of satellite data to study the impact of forest fires over the northeast region of India [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 4 (3): 485–489.
- Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. 2006. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. Atmos. Environ., 40 (34): 6516–6527.
- Dommenget D, Latif M. 2002. A cautionary note on the interpretation of EOFs [J]. J. Climate, 15 (2): 216–225.
- 高庆先, 任阵海, 李占青, 等. 2004a. 中国北方沙尘气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响 [J]. 资源科学, 26 (5): 2–10. Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Li Zhanqing, et al. 2004a. Spatial and temporal distribution of dust aerosol and its impacts on radiation based on analysis

- of EP/TOMS satellite data [J]. *Resources Science* (in Chinese), 26 (5): 2–10.
- 高庆先, 任阵海, 张运刚, 等. 2004b. 利用静止卫星资料跟踪沙尘天气的发生、发展及其传输 [J]. *资源科学*, 26 (5): 24–29. Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Zhang Yungang, et al. 2004b. Dust event and its formation, development and transportation based on satellite data [J]. *Resources Science* (in Chinese), 26 (5): 24–29.
- 高庆先, 任阵海, 李占青, 等. 2005. 利用 EP/TOMS 遥感资料分析我国上空沙尘天气过程 [J]. *环境科学研究*, 18 (4): 96–101. Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Li Zhanqing, et al. 2005. Analysis of dust storms over China using EP/TOMS remote sensing data [J]. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 18 (4): 96–101.
- Habib G, Venkataraman C, Chiappello I, et al. 2006. Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: Relationship to regional meteorology and emissions [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (11): 1909–1921.
- Herman J R, Bhartia P K, Torres O, et al. 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14): 16911–16922.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The Physical Science Basis* [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 153.
- Israelovich P L, Levin Z, Joseph J H, et al. 2002. Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D21): AAC 13-1–AAC 13-13, doi: 10.1029/2001JD002011.
- Ji Y M, Stocker E. 2002. Seasonal, intraseasonal, and interannual variability of global land fires and their effects on atmospheric aerosol distribution [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23): ACH 10-1–ACH 10-11, doi: 10.1029/2002JD002331.
- 金正润, 牛生杰, 河惠卿, 等. 2009. 利用 EP/TOMS 气溶胶指数分析中国和韩国的沙尘天气过程 [J]. *中国沙漠*, 29 (4): 750–756. Kim Jeoungyun, Niu Shengjie, Ha Hyekyeong, et al. 2009. Analysis of dust weather over China and Korea using EP/TOMS aerosol index [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (4): 750–756.
- Li J, Carlson B E, Lacis A A. 2009. A study on the temporal and spatial variability of absorbing aerosols using Total Ozone Mapping Spectrometer and Ozone Monitoring Instrument Aerosol Index data [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D9), doi: 10.1029/2008JD011278.
- Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, et al. 2007a. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 106 (1–3): 325–347.
- Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Rossow W B, et al. 2007b. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend [J]. *Science*, 315 (5818): 1543, doi: 10.1126/science.1136709.
- Natsagdorj L, Jugder D, Chung Y S. 2003. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937–1999 [J]. *Atmos. Environ.*, 37 (9–10): 1401–1411.
- Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Rev. Geophys.*, 40 (1): 2-1–2-31, doi: 10.1029/2000RG000095.
- Seftor C J, Hsu N C, Herman J R, et al. 1997. Detection of volcanic ash clouds from Nimbus 7/total ozone mapping spectrometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14): 16749–16759.
- Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. 2002. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (3): 398–413.
- Washington R, Todd M, Middleton N J, et al. 2003. Dust-storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and surface observations [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 93 (2): 297–313.
- 魏凤英. 2007. *现代气候统计诊断与预测技术* (第2版) [M]. 北京: 气象出版社, 117–124. Wei Fengying. 2007. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology* (2nd ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 117–124.
- 姚正毅, 王涛, 周俐, 等. 2006. 近 40 年阿拉善高原大风天气时空分布特征 [J]. *干旱区地理*, 29 (2): 207–212. Yao Zhengyi, Wang Tao, Zhou Li, et al. 2006. Spatial-temporal distribution characteristics of windy weather in recent 40 years in Alxa Plateau, Inner Mongolia [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 29 (2): 207–212.
- 张军华, 毛节泰, 王美华. 2002. 利用 TOMS 资料遥感沙尘暴的研究 [J]. *高原气象*, 21 (5): 457–465. Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. 2002. Remote sensing dust storm using TOMS data [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 21 (5): 457–465.
- Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. 1997. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D23): 28041–28047.
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (24), doi: 10.1029/2003GL018206.
- 张小曳, 龚山陵. 2005. 中国的人为沙漠化因素对亚洲沙尘暴的贡献 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (4): 147–150. Zhang Xiaoye, Gong Shanling. 2005. Contribution of the anthropogenic desertification in China to Asian dust storm [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 1 (4): 147–150.
- 周自江. 2001. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气 [J]. *第四纪研究*, 21 (1): 9–17. Zhou Zijiang. 2001. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 21 (1): 9–17.
- Zhou Z J, Zhang G C. 2003. Typical severe dust storms in northern China during 1954–2002 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (21): 2366–2370.