

# 东亚沙尘分布、源汇及输送特征的模拟研究

郭俊<sup>1,2</sup>, 银燕<sup>1,3\*</sup>, 王咏薇<sup>1</sup>, 康汉青<sup>1</sup>, 肖辉<sup>4</sup>, 陈魁<sup>1</sup>, 郝团<sup>1</sup> (1.南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏南京 210044; 2.江苏省气候中心, 江苏南京 210008; 3.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, 江苏南京 210044; 4.中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东广州 510080)

**摘要:** 采用全球气溶胶模式(GOCART)模拟结果, 讨论了东亚地区沙尘气溶胶时空分布、排放与沉降以及区域输送特征。结果表明, 中国境内沙源主要位于塔克拉玛干沙漠、河西走廊及河套地区。排放强度春季最大, 夏季和秋季逐渐减小, 冬季最弱, 且强度逐年减弱, 区域年平均排放为 581Tg/a。模拟的沙尘光学厚度(AOD)分布与卫星观测具有很好的一致性, 其中塔克拉玛干沙漠 AOD 大值与沙尘暴活动密切相关, 其出现时间最早, 持续时间最长。区域平均而言, 干沉降和湿沉降可以分别清除 77%和 22%的沙尘排放, 其中沙尘源区干沉降起主导作用, 远离源区的东北及西北太平洋, 湿沉降更加重要。沙尘大粒子主要通过重力干沉降移出, 而湿沉降对小粒子贡献超过 60%。重力干沉降全年(特别是春季)起主导作用, 对降水湿沉降在夏季作用显著增强, 总体来说, 沙尘总沉降速率逐年减小。东亚沙尘气溶胶通过 3 条输送带自西向东传输, 可以影响我国华北、华中和华南。对散度的研究表明, 气溶胶平流项对沙尘源区气溶胶辐散作用较大, 沙尘排放显著影响该地区沙尘的输送和 AOD; 而塔里木盆地西侧沙尘辐合中心是风场辐合辐散项导致的, 说明地形和风场对该地区沙尘输送和 AOD 很重要。

**关键词:** 沙尘气溶胶; 起沙量; 分布; 干湿沉降; 输送

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)03-0801-12

**Numerical study of the dust distribution, source and sink, and transport features over East Asia.** GUO Jun<sup>1,2</sup>, YIN Yan<sup>1,3\*</sup>, WANG Yong-wei<sup>1</sup>, KANG Han-qing<sup>1</sup>, XIAO Hui<sup>4</sup>, CHEN Kui<sup>1</sup>, HAO Jian<sup>1</sup> (1.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Jiangsu Climate Center, Nanjing 210008, China; 3.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4.Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China). *China Environmental Science*, 2017,37(3): 801~812

**Abstract:** The spatial and temporal distribution, production and deposition, and regional transport of mineral dust aerosol over East Asia were quantified by using the Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) model. Model results showed that the Taklamakan Desert, the Hexi Corridor, and the Hetao Area were the main dust source regions in China. The dust production was largest in spring, relatively small in summer and autumn, and reached its minimum value in winter. Moreover, the dust production was gradually decreased year by year. The annual mean of regional dust emission was predicted to be 581Tg/a. In general, the modeled dust aerosol optical depth (AOD) agreed well with the satellite observations spatially and temporally. Specifically, the high AOD in the Taklamakan Desert was notably influenced by the dust storm activities, in which AOD reached its peaks earlier in a year and kept longer compared with other sources. On the annual mean of regional basis, the dry and wet depositions could remove 77% and 22% of the total dust production, respectively. The dry deposition was the dominant dust removal process over dust sources, while the wet deposition was more important when dust was transported to northeastern China and the northwestern Pacific oceans. Furthermore, the removal process of coarse mode dust was mainly determined by gravitational dry deposition, in contrast, the wet deposition contributed to more than 60% of the removal process of accumulate mode dust. As the most important component, the gravitational dry deposition dominated the dust removal process throughout the year, especially in spring,

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91337101, 41590873, 41505052)

\* 责任作者, 教授, yinyan@nuist.edu.cn

while the wet deposition from convective precipitation could not be neglected in summer. Similar to dust production, the dust deposition also showed a decreasing trend over the simulation period. There were three major dust transport routes in East Asia, by which the dust aerosol could be transported from the dust source regions to northern, central, and southern China. In addition, the dust divergence region due to aerosol advection term was mainly located over the dust source regions, suggesting that the local heavy dust emission had great impacts on the dust transport and the high AOD there. On the other hand, the dust convergence in the western Tarim Basin induced by wind divergence/convergence term indicated that the wind and topography were important for the high dust AOD there.

**Key words:** dust aerosol; production; distribution; dry and wet depositions; transport

大气气溶胶是指大气与悬浮于其中的所有固态、液态粒子形成的多相体系。大气气溶胶的种类非常多,其中沙尘气溶胶几乎占据对流层大气气溶胶总量的一半,是对流层大气气溶胶的重要成分<sup>[1]</sup>。气溶胶不仅可以造成大气污染,影响人类居住环境,还能通过直接<sup>[1]</sup>、间接<sup>[2-3]</sup>及半直接效应<sup>[4]</sup>影响气候。首先,沙尘气溶胶同时具有散射和吸收特性,它可以通过散射和吸收太阳短波辐射,冷却地表,还可以通过吸收短波和长波辐射,加热大气,通过改变局地能量平衡影响大气动力结构,进而对天气气候产生重要影响<sup>[5-7]</sup>;其次,沙尘气溶胶还可以作为云凝结核和冰核,通过影响云微物理过程,影响云和降水的分布和强度<sup>[8]</sup>。近些年的研究还表明,东亚<sup>[7,9]</sup>及非洲<sup>[10-11]</sup>沙尘的远距离输送,会在高空产生热泵效应(EHP),使局地降水增加,雨带位置变化,但这方面的研究仍具有很大不确定性。因此,准确描述沙尘气溶胶的时空分布、演变规律及传输特征,对于研究沙尘辐射强迫,了解其对气候及环境的影响,具有重要的现实意义。

已有关于沙尘的研究,无论采用观测或模拟的方法,对其成因、时空分布特征,以及气候效应都取得了一些进展<sup>[12-14]</sup>。已有研究表明,东亚是沙尘气溶胶的重要源地,中国西北和蒙古沙漠地区是沙尘的重要源区,春季是东亚沙尘暴的多发季节<sup>[12-17]</sup>。对亚洲沙尘暴的研究表明,地表强风可以使大量沙尘粒子进入大气,导致下风方向严重的环境问题<sup>[15,18]</sup>。采用数值模拟的方法,Tegen等<sup>[19]</sup>、Ginoux等<sup>[20]</sup>在全球范围内计算了沙尘排放、光学厚度及浓度的时空分布特征。Zhang等<sup>[21]</sup>、Perry等<sup>[22]</sup>模拟结果表明,每年有800Tg的沙尘进入大气,其中20%在区域尺度上传

输,50%可以流出东亚大陆,跨太平洋输送。由于东亚地区地形复杂、土地利用多样以及人类活动剧烈,因而,已有观测和模拟的结果还具有很大的不确定性。

目前基于站点和卫星资料的观测研究仍然是东亚沙尘气溶胶研究的热点,但是仍存在一些问題。比如,站点观测的能见度是一种定性和半定量数据;卫星观测的气溶胶光学厚度(AOD)受到自身算法的限制,精度不高,时间序列较短;激光雷达观测虽然可以准确反映沙尘的垂直分布,但是站点空间分布稀疏<sup>[17]</sup>。因此数值模拟的方法仍然是研究东亚地区沙尘气溶胶的重要手段之一。目前关于全球沙尘气溶胶排放及分布的研究较多,但是东亚区域尺度上沙尘气溶胶时空分布、沉降及区域内部传输的研究还比较少。因此,本文利用全球大气化学气溶胶辐射传输模式GOCART(Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport)2000~2007年沙尘的模拟结果,重点探讨和建立了东亚沙尘气溶胶时空分布、源汇及区域内部传输特征,并且初步得到了不同影响因子(包括排放源和风场地形)对沙尘输送的影响。

## 1 模式、资料及方法介绍

### 1.1 模式介绍

GOCART模式是一个全球大气化学气溶胶辐射传输模式,可以模拟5种主要的大气气溶胶成分,包括黑碳、有机碳、硫酸盐、海盐和沙尘。模式中气溶胶模拟考虑了气溶胶及其前体物的排放、气相和液相化学过程、平流及湿对流、边界层混合、以及干沉降和湿沉降过程。其中,干沉降包含重力干沉降和湍流干沉降;湿沉降包含对

流性降水湿沉降和大尺度降水湿沉降。

模式中沙尘的排放采用了参数化<sup>[20]</sup>并对其改进了方法<sup>[23]</sup>.将沙尘粒子从 0.01~10 $\mu\text{m}$  分成 8 段(即 0.1~0.18,0.18~0.3,0.3~0.6,0.6~1,1~1.8, 1.8~3,3~6,6~10 $\mu\text{m}$ ,其中 0.01~1 $\mu\text{m}$  为积聚模态, 1~10 $\mu\text{m}$  为粗模态),地表起沙量是地表风速以及沙尘粒径比例等的函数:

$$F_p = C \cdot S \cdot s_p \cdot u^2(u - u_t) \quad \text{if } u > u_t \quad (1)$$

式中: $F_p$  是起沙量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $C$  是尺度因子,1  $\mu\text{g} \cdot \text{s}^2/\text{m}^5$ ;  $S$  是源函数; $s_p$  为粒径段  $p$  的比例; $u$  是地表风速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_t$  是临界风速(由粒子尺度和地表湿度决定).由方程(1)可知,沙尘排放主要受到地表风速、沙漠分布、地表植被覆盖状况、地表湿度以及沙尘粒径比例等因子的共同影响。

已有研究表明,沙尘排放及浓度分布与地形高度分布反相关.这主要与 GOCART 模式中起沙方案有关.如果盆地地形高度变化剧烈,那么在盆地的山谷和洼地中就会包含很多沉积物,产生较高的起沙量;如果盆地较为平坦,沉积物就会分布地比较均匀<sup>[20]</sup>.一般而言,沙尘排放较大的区域都具有地表高风速、低植被覆盖以及较干燥。

本研究中,模式水平分辨率 2°(纬度)×2.5°(经度),垂直分辨率 30 层,模式顶 0.01hPa.模式采用 Goddard Earth Observing System Data Assimilation System(GEOS-4, [ftp://ftp.as.harvard.edu/gcgrid/GEOS\\_4x5/GEOS\\_4\\_v4/](ftp://ftp.as.harvard.edu/gcgrid/GEOS_4x5/GEOS_4_v4/))同化的气象资料每 6h 驱动一次,模拟时段是 2000~2007 年,本文分析的是 GOCART8 年模拟结果.模式详细介绍参考已发表的文章<sup>[20,23]</sup>.通过对比该模式模拟结果与地面站点和卫星,Chin 等<sup>[23]</sup>研究表明 GOCART 可以模拟出全球大气气溶胶的排放、浓度以及 AOD 的空间分布及季节变化.由于 GOCART 在全球尺度上的评估工作已有很多,本文侧重利用其 8 年模拟结果,讨论了东亚地区沙尘气溶胶的分布、沉降及输送特征。

## 1.2 资料介绍

本文使用的卫星数据是 Multiangle Imaging Spectroradiometer(MISR)气溶胶光学厚度资料以及 Total Ozone Mapping Spectrometer(TOMS)和 Ozone Monitoring Instrument(OMI)气溶胶指数

(Aerosol Index, AI)资料.MISR 搭载在 Terra 卫星上,共有 4 个波段(446,555,672 及 867nm),9 个观测角度(0°,±26.1°,±45.6°,±60.0°,±70.5°),9d 就能覆盖全球.本文使用 MISR 全球 3 级 555nm 光学厚度产品,空间分辨率 0.5°(纬度)×0.5°(经度).由于 MISR 从 9 个不同角度观测地球,因此能获取丰富的地表反射信息,而且其气溶胶算法采用非均匀地表方法,不依赖于地表反射率的假设<sup>[24]</sup>.

TOMS 或 OMI 气溶胶指数 AI 定义为气溶胶辐射效应导致的 UV 波段光谱的改变<sup>[25]</sup>.当气溶胶指数为正时,表示存在吸收性气溶胶,因此 AI 可以用来近似诊断沙尘暴的发生<sup>[26]</sup>.在以往的研究中,AI 也被广泛用来验证模拟的沙尘 AOD 分布.本文选取的 TOMS AI 空间分辨率 1°(纬度)×1.25°(经度),OMI AI 空间分辨率 1°(纬度)×1°(经度).由于 TOMS 数据只到 2005 年(2000~2005,<ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/>),因此,本研究引入了 2006~2007 年的 OMI 气溶胶指数(2006~2007,<ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/>).以往研究表明,同时采用 2 种气溶胶指数是可行的<sup>[18,26]</sup>.

## 1.3 方法介绍

利用逐日风场数据和模拟的气溶胶浓度数据,可以分析东亚地区沙尘气溶胶的输送特征.各模式层纬向和经向沙尘传输通量可用下式得到

( $F_\lambda, F_\phi, \mu\text{g} \cdot \text{s}/\text{kg}$ ):

$$F_\lambda = 10^6 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \int_{p_1}^{p_2} u C dp \quad (2)$$

$$F_\phi = 10^6 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \int_{p_1}^{p_2} v C dp$$

式中: $g_0$ 是重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $p_1$ 和  $p_2$ 是模式层的界面气压,Pa; $u$ 和  $v$ 是各层水平方向速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $C$ 是沙尘气溶胶质量混合比, $\text{g}/\text{kg}$ .

进一步,可以计算得到沙尘气溶胶通量  $\bar{F}$  的散度, ( $\nabla \cdot \bar{F}, \text{ng} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot \text{m})$ ):

$$\nabla \cdot \bar{F} = 10^9 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \int_{p_1}^{p_2} \nabla \cdot C \bar{V} dp \quad (3)$$

$$= 10^9 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \left( \int_{p_1}^{p_2} \bar{V} \cdot \nabla C dp + \int_{p_1}^{p_2} C \nabla \cdot \bar{V} dp \right)$$

因此,散度在球坐标系下的方程可以简化为 2 部分:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{F} = & 10^9 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{r \cos \varphi} \left( u \frac{\partial C}{\partial \lambda} + v \frac{\partial C \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) d\varphi \\ & + 10^9 \frac{1}{g_0(p_1 - p_2)} \int_{p_1}^{p_2} \frac{C}{r \cos \varphi} \left( \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) d\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $r$  是地球半径, $m$ ; $\varphi$  是纬度; $\lambda$  是经度.方程(4) 右边第 1 项是气溶胶平流项,表示由于沙尘浓度空间分布不均匀导致的气溶胶输送和散度变化;第 2 项是风场辐合辐散项,表示由于风场和地形影响造成的气溶胶输送和散度变化.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沙源位置及起沙量

图 1 给出了东亚地区地形以及年平均起沙量分布.如图 1 所示,本文所选取的研究区域包含了整个中国大陆,囊括了主要的东亚沙尘源区.模式可以模拟出东亚地区 3 个主要的沙尘源地,包含了新疆的塔克拉玛干沙漠(区域 A,80°~95°E, 35°~42°N)、古尔班通古特沙漠(区域 C,80°~95°E, 42°~50°N),以及内蒙古西部的腾格里沙漠及其周边区域(区域 B,100°~110°E,35°~45°N).其他的沙尘源区,诸如昆仑山以南的青藏高原区域,蒙古国南部高原,内蒙古中东部沙漠(包含浑善达克沙地,科尔沁沙地等),以及巴尔科什湖南部的萨雷耶西克阿特劳沙漠,都能很好的模拟出来.总的来说,中国境内的沙源主要包括塔里木盆地、河西走廊以及河套地区,中国境外沙源主要位于蒙古国南部以及西亚北部地区<sup>[13-14,27]</sup>.

起沙量最大值位于新疆塔里木盆地,那里的塔克拉玛干沙漠是世界上最大的流动性沙漠之一,起沙量可以超过 1800mg/(m<sup>2</sup>·d).其次,在蒙古高原,特别是腾格里沙漠附近,由于受到干旱以及人类活动的影响,草场退化导致该地区沙漠化趋势日益严重,起沙中心超过 1000mg/(m<sup>2</sup>·d).另外,位于北疆的古尔班通古特沙漠附近区域,起沙强度中心也能超过 600mg/(m<sup>2</sup>·d).模式结果表明,沙尘排放较大的区域往往地表风速较高、植被覆盖稀疏、地表比较干旱,并且主要沙尘源区

都位于 40°N 附近,沙尘源地的分布与地形高度分布反相关.

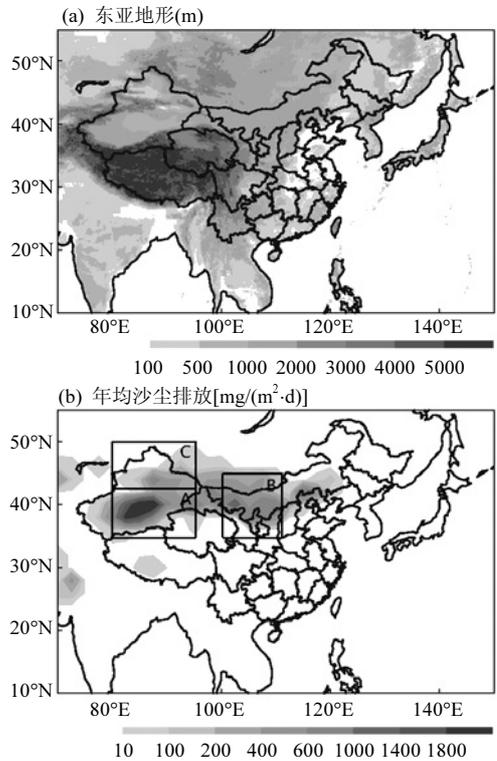


图 1 (a)模拟区域及地形分布和(b)东亚地区 2000~2007 年平均沙尘气溶胶排放量及 3 个主要沙漠的位置

Fig.1 (a) The model domain and distribution of terrain height in meters and (b) the predicted annual mean dust production during the period from 2000~2007 locations of three major deserts in East Asia  
A,塔克拉玛干沙漠;B,腾格里沙漠;C,古尔班通古特沙漠

东亚地区沙尘排放同样具有明显的年际(图 2a)和季节(图 2b)变化特征.如图 2a 所示,2000~2007 年间,沙尘的排放年际变化差异较大.2001 年和 2004 年排放量最大,分别达到 624.33Tg 和 615.82Tg;而 2003 年和 2005 年相对较小,为 504.30Tg 和 538.34Tg.Ginoux 等<sup>[20]</sup>指出,地表风速越大,湿度越小,越有利于沙尘排放量的增加;反之,沙尘排放量将减少.由于模拟时段内地表风速和地表湿度变化的影响,东亚地区沙尘排放量呈现逐年下降的趋势,递减率为 2.89Tg/a.并且,粗模态沙尘的年际减少趋势以及

减少的排放总量均明显大于细模态沙尘.图 2b 给出沙尘季节变化特征,东亚沙尘排放春季最大,夏季和秋季逐渐减少,冬季最弱.春季 4 月份排放的最大值可以超过 80Tg,而整个春季的起沙量占全年起沙量的 37.63%.春季起沙量较大主要是因为该季节风速较大,植被稀少,有利于

沙尘的形成;夏季降水增多,土壤湿度加大,植被覆盖改善,导致起沙量不断降低.从表 1 可以看出,东亚区域和年平均起沙量可以达到 581Tg/a,这与其他模式模拟的结果<sup>[28-32]</sup>较一致(46~736Tg/a),表明 GOCART 模式对东亚地区的沙尘具有很好的模拟能力.

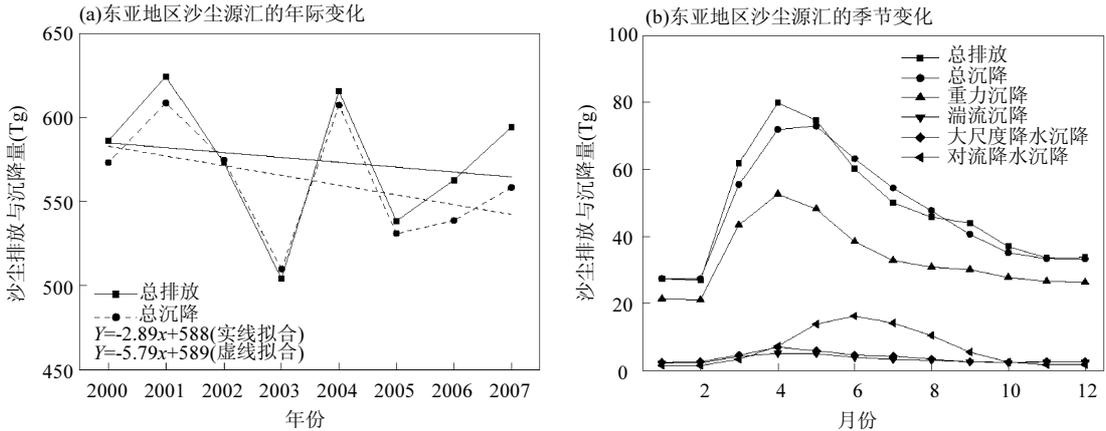


图 2 模拟的东亚地区沙尘排放和沉降(a)际年变化及(b)季节变化

Fig.2 The simulated (a) interannual and (b) seasonal variations of dust production and deposition in East Asia from GOCART model

表 1 不同模式模拟的东亚地区沙尘气溶胶起沙量、沉降量及柱含量

Table 1 The modeled dust emissions, depositions, and budget in this study and previous studies in East Asia

文献	起沙量(Tg/a)	干沉降(Tg/a)	湿沉降(Tg/a)	柱含量(Tg)
本文	581	445(77%)	130(22%)	4.6(1%)
Li 等 <sup>[28]</sup>				2.6
Pozzer 等 <sup>[29]</sup>	46	41(89%)	17(37%)	0.3(1%)
Yue 等 <sup>[30]</sup>	736	440(60%)	171(23%)	6.7(1%)
Ginoux 等 <sup>[31]</sup>	496	409(82%)	29(6%)	58(12%)
Zender 等 <sup>[32]</sup>	415			

注:括号内为占起沙量百分比.

2.2 沙尘气溶胶空间分布特征

图 3 进一步给出了东亚地区多年平均各季节 GOCART 模拟和 MISR 观测的 AOD 空间分布.将模拟的 AOD 结果与起沙分布对比表明,2 者具有很高的空间一致性.AOD 大值往往位于

起沙量较大的区域,也即 40°N 附近,大值中心包含了塔克拉玛干沙漠(春季大于 0.8)、古尔班通古特沙漠(春季大于 0.4)和广大内蒙古中东部沙区(春季大于 0.5).以上模拟结果与观测结果基本一致,说明模式可以较为真实反映沙尘区气溶胶高浓度分布特征.模拟和观测在部分地区也存在不一致,主要是因为模拟结果仅给出沙尘的 AOD,而 MISR 测量的是总 AOD,所以包含了其他污染气溶胶;其次,模式选取的网格精度较低,也限制了模式对地表特征的模拟;另外,卫星 AOD 反演算法到目前为止仍存在很大的不确定性.对比不同季节 AOD 分布可以发现,春季和夏季,中国境内沙尘高浓度主要分布在 120°E 以西的沙漠地区以及西北边境和青藏高原的西侧一线.秋季和冬季,随着大气环流的调整,以上 AOD 大值分布型也随之改变,AOD 中心显著减弱,且只出现在 120°E 以西的沙漠核心地带.以

上季节变化和空间分布特征,与熊洁等<sup>[17]</sup>, Zhang 等<sup>[18]</sup>,及 Sun 等<sup>[26]</sup>的模拟结果一致.全年来看,春季(3~5 月)是一年中 AOD 最大的季节,模拟的区域平均 AOD 可达 0.14,夏季次之(0.09),秋季(0.06)和冬季(0.05)都比春季小很多.MISR 的观测结果也表明,年均沙尘气溶胶浓度高值

主要出现在春季的塔克拉玛干沙漠及 40°N 沙尘传输带附近.这与春季是中国北方沙尘暴最为活跃的季节有关<sup>[13-14,18]</sup>.以上模拟和观测结果表明,中国境内沙尘气溶胶存在显著的空间及时间变化特征,模式可以很好模拟出东亚沙尘天气发生的季节和空间特征.

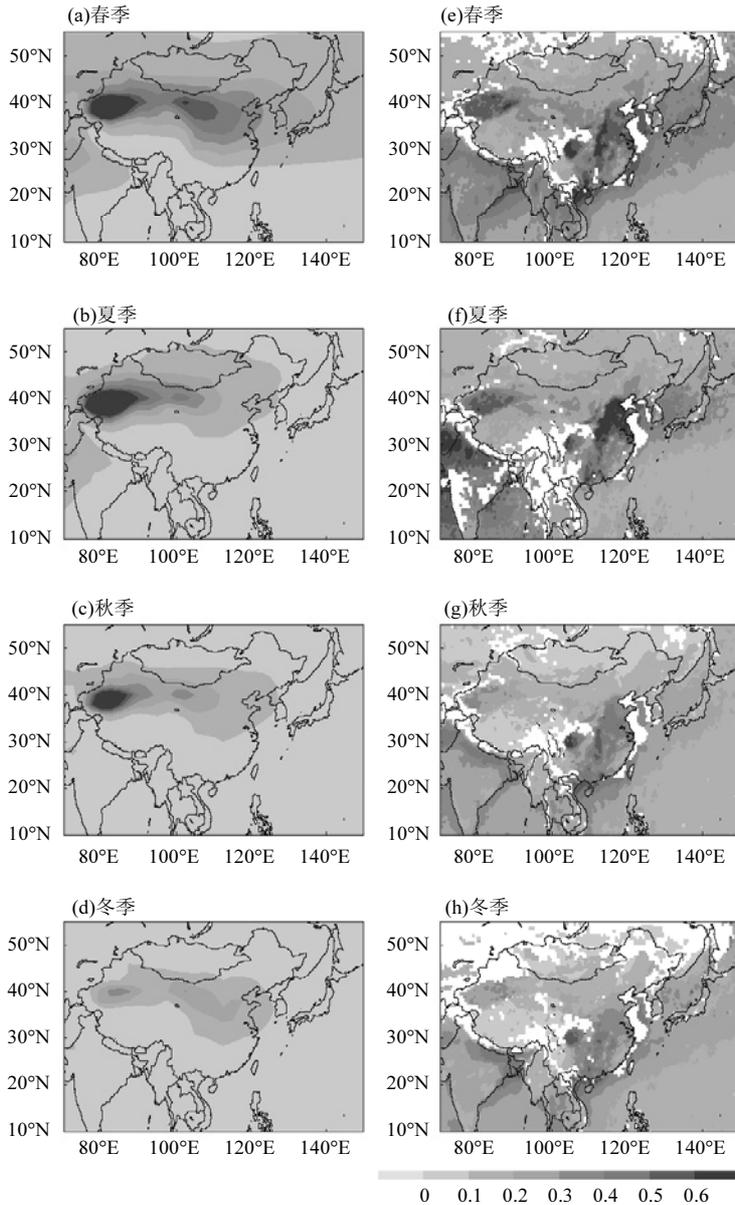


图3 (a~d)GOCART 模拟的沙尘 AOD 与(e~h)MISR 观测的总 AOD 分布的季节变化

Fig.3 Comparisons of (a~d) the modeled dust AOD from GOCART model and (e~h) the observed total AOD from MISR in different seasons

### 2.3 沙尘气溶胶时间变化特征

2.3.1 年际变化特征 图4给出了模拟和MISR观测的3个主要沙尘源地(图1b)AOD 随时间的变化.

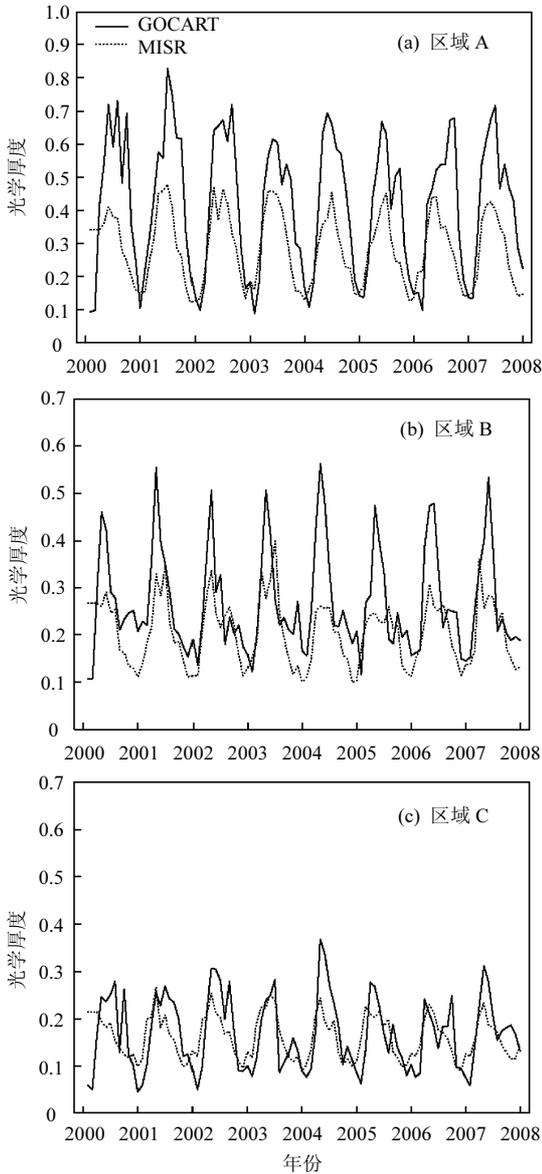
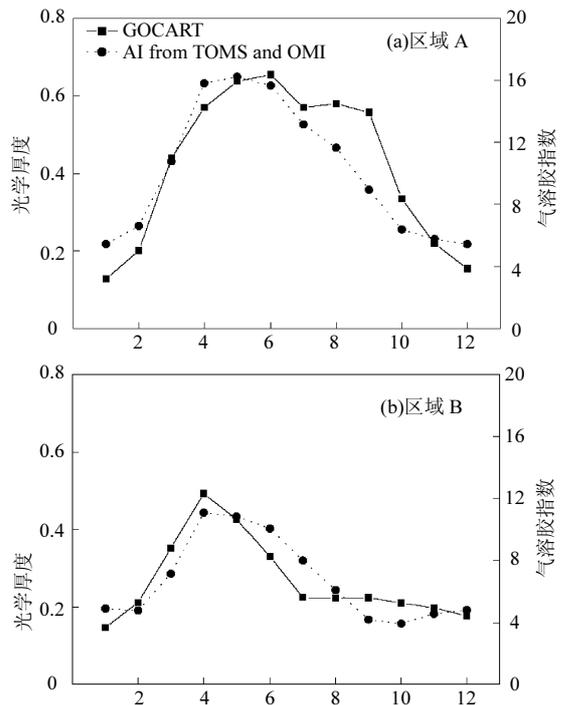


图4 GOCART 模拟和 MISR 观测的 3 个主要沙漠区域气溶胶 AOD 年际变化

Fig.4 Interannual comparisons between GOCART simulated and MISR observed mean AOD in three key desert regions delineated

如图 4 所示,沙尘气溶胶具有很强的年际变

化特征.各沙尘源区 AOD 随时间呈显著的年循环,并且在每年春季出现爆发性增长,在秋季和冬季急剧减少.春季 AOD 大值与春季起沙量急剧增加、中国北方不断发生的扬沙和沙尘暴有关.比较不同沙尘源区模拟的 AOD 随时间变化特征可以发现,沙尘 AOD 都是春季和夏季较大,秋季和冬季较小.特别地,模拟的塔克拉玛干沙漠 AOD 大值持续时间较其他 2 个主要沙漠长很多.比较相同季节不同沙源 AOD 可以发现,模拟和观测结果在塔克拉玛干沙漠差异较大,而在腾格里沙漠以及古尔班通古特沙漠,模式可以很好模拟出观测的沙尘 AOD 年际变化.将不同沙源进行对比可以发现,塔克拉玛干沙漠 AOD 季节变化幅度明显大于腾格里沙漠以及古尔班通古特沙漠.这主要是因为,塔克拉玛干沙漠所处的塔里木盆地面积广大,山谷和洼地包含很多沉积物,产生较高的起沙量<sup>[20]</sup>,导致起沙函数对环境气象因子(例如地表风速和湿度)的敏感程度也更大.综合来说,模拟和观测得到的 AOD 相关系数在塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠以及古尔班通古特沙漠分别可以达到 0.78,0.66,0.61.



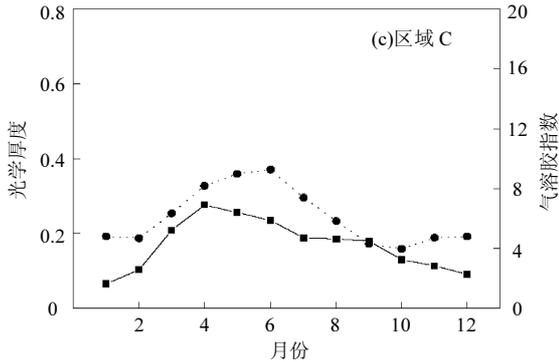


图5 GOCART模拟的AOD和TOMS/OMI观测的气溶胶指数在3个主要沙漠区域的季节变化特征

Fig.5 Seasonal comparisons between the GOCART simulated mean AOD and the TOMS/OMI observed aerosol index in three key desert regions

**2.3.2 季节变化特征** 图5给出了3个主要沙尘源地模拟的沙尘AOD以及TOMS/OMI观测的气溶胶指数季节变化。从图中可以看到,模拟的沙尘AOD季节变化特征与AI变化特征一致。在沙尘暴较活跃的季节,也就是AI较大的季节(4~7月),往往对应着沙尘高浓度和光学厚度大值。在3个沙尘源区,即塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠以及古尔班通古特沙漠,沙尘AOD和AI的相关性可以分别达到0.91,0.88,0.83。本文模拟结果和一些已有研究<sup>[13-14,18]</sup>都表明,塔克拉玛干沙漠是沙尘暴活动最为频繁的地区,相较其他沙尘源地,光学厚度和气溶胶指数大值出现时间较早,持续时间较长,相关性也更好;而中国北方地区,特别是腾格里沙漠附近,同样也是沙尘暴活跃的区域,但是该地区沙暴主要出现在春季(3~5月),并且随时间迅速减弱,沙暴的持续时间和对AOD的影响,弱于塔克拉玛干沙漠。

## 2.4 沙尘气溶胶的沉降及收支

**2.4.1 干沉降和湿沉降** 进入大气的沙尘气溶胶会通过干沉降和湿沉降2种过程移除<sup>[12,17,33]</sup>。本模式中,干沉降分为2部分,即重力干沉降和湍流干沉降;湿沉降则分为大尺度降水湿沉降和对流降水湿沉降。

模拟得到的东亚地区8年平均沙尘气溶胶沉降量分布如图6a和6b所示,沉降区域几乎包括了整个东亚大陆,高值中心与排放中心基本一

致。干沉降的高值出现在40°N附近,在塔克拉玛干沙漠出现干沉降大值中心,超过800mg/(m<sup>2</sup>·d)。湿沉降存在3个大值中心,分别位于新疆塔克拉玛干沙漠以西、腾格里沙漠附近的广大华北区域、以及印度西北部,这些大值中心的湿沉降量都超过30mg/(m<sup>2</sup>·d)。如图6c所示,在110°E以西沙尘源区,湿沉降与干沉降之比小于0.1,说明在沙尘排放源区,干沉降起主要作用。这主要是因为较大的沙尘粒子更容易降落到源区地面,通过重力干沉降清除。而较小的沙尘粒子,可以向东传输进入华北,因此,越远离沙尘源区,湿沉降与干沉降比值就越大,湿沉降的作用也就更明显。在中国东北、云南、日本及附近海域、中印半岛以及印度东部和南部,湿沉降和干沉降之比大于1,说明在这些区域湿沉降的贡献要大于干沉降。这一结果与Zhao等<sup>[33]</sup>的结论一致,表明东亚沙尘源区附近以干沉降为主,在沙尘远距离传输过程中湿沉降占主导地位。

如图2a和2b所示,沙尘总沉降及其各组分间的年际和季节变化特征与沙尘排放基本一致。如图2a所示,2001年和2004年总沉降最大,可以达到608.62和607.19Tg;2003年和2005年总沉降最小,分别为509.83和531.01Tg。总沉降在8a时间里呈现下降趋势,年递减率为5.79Tg/a,与该地区起沙量变化较少趋势一致,但是降低速度更快,说明东亚大气中的沙尘含量在逐年快速递增。沙尘沉降季节变化表明(图2b),春季大气总沙尘沉降量较大,其他季节逐渐减小,冬季最小。5月总沉降最大值可以达到72.87Tg,而2月最小值为27.31Tg。在所有沉降因子中,重力干沉降与总沉降的变化趋势一致,也是春季最大,是构成总沉降最重要的部分。对流降水湿沉降具有明显的季节变化,在夏季出现最大值,其对总沉降的贡献也不能忽略。相较于以上2种沉降,湍流干沉降和大尺度降水湿沉降对总沉降的影响相对较小。

**2.4.2 区域收支** 图6d给出了2000~2007年东亚地区沙尘气溶胶大气柱含量,它可以反映区域沙尘气溶胶的收支情况。由图6d可知,沙尘含量大值位于塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠及其下风区域,涵盖了40°N广大地区,从中国西北一直到朝

朝鲜半岛和日本.沙尘柱含量的中心位于新疆塔克拉玛干沙漠,极值可以超过  $1000\text{mg}/\text{m}^2$ .总体来说,如表 1 所示,干沉降和湿沉降可以分别清除 77% 和 22% 的沙尘气溶胶,只有约 1% 的沙尘排放可以驻留在大气中,对局地和下风方向的大气环境产生影响.表 2 进一步给出了各粒径段沙尘排放、沉

降及柱含量的统计特征.大气中有效半径大于  $1\mu\text{m}$  的沙尘粒子主要通过干清除过程(特别是重力清除过程)移出,而有效半径小于  $1\mu\text{m}$  的小粒子,湿清除的贡献超过 60%.沙尘不同粒径段对其大气柱含量也具有明显不同的贡献,区域年平均而言,大气中大约 75% 的沙尘集中在  $1\sim 3\mu\text{m}$  粒径段.

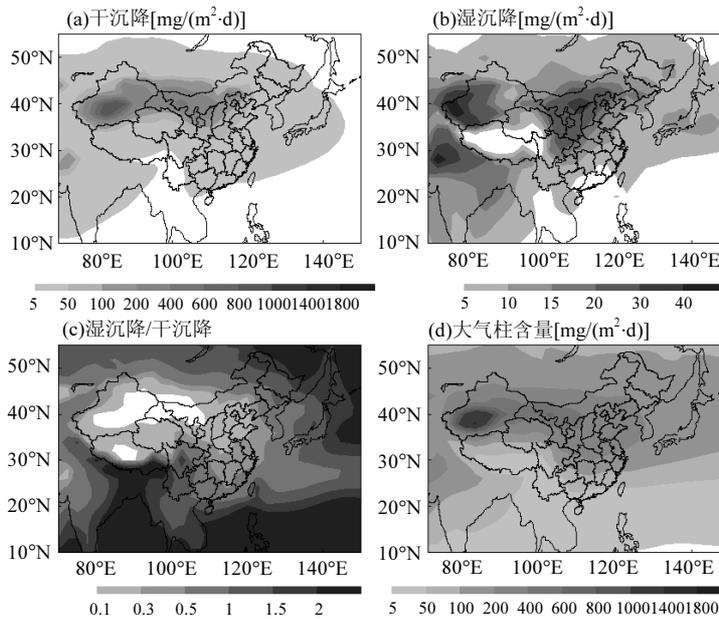


图 6 模拟的 2000~2007 年东亚地区平均沙尘气溶胶(a)干沉降、(b)湿沉降、(c)湿沉降和干沉降之比以及(d)柱含量  
Fig.6 The simulated (a) dry deposition, (b) wet deposition, (c) ratio of wet and dry depositions, and (d) column burden of dust aerosol averaged over the period 2000~2007in East Asia from GOCART model

表 2 模拟的东亚地区各粒径沙尘气溶胶起沙量、沉降量及柱含量

Table 2 The simulated production, depositions, and budget of different dust bins from GOCART in East Asia

有效半径( $\mu\text{m}$ )	起沙量(Tg/a)	湍流干沉降(Tg/a)	重力沉降(Tg/a)	大尺度湿沉降(Tg/a)	对流湿沉降(Tg/a)	柱含量(Tg)
0.1~0.18	0.33	0.07(21%)	0.04(12%)	0.07(21%)	0.13(39%)	0.00(0%)
0.18~0.3	2.93	0.63(22%)	0.33(11%)	0.64(22%)	1.19(41%)	0.03(1%)
0.3~0.6	8.47	1.81(21%)	0.95(11%)	1.83(22%)	3.43(40%)	0.08(1%)
0.6~1.0	24.48	5.23(21%)	2.74(11%)	5.30(22%)	9.90(40%)	0.24(1%)
1.0~1.8	118.05	17.21(15%)	39.64(34%)	19.80(17%)	36.67(31%)	2.04(2%)
1.8~3.0	132.81	10.62(8%)	83.52(63%)	13.11(10%)	23.52(18%)	1.44(1%)
3.0~6.0	143.96	3.46(2%)	130.18(90%)	4.37(3%)	7.17(5%)	0.55(0%)
6.0~10.0	150.36	0.85(1%)	148.02(98%)	0.87(1%)	1.57(1%)	0.17(0%)
0.1~10.0	581.39	39.88(7%)	405.41(70%)	45.99(8%)	83.58(14%)	4.60(1%)

注:括号内为占起沙量百分比.

## 2.5 区域输送

东亚地区沙尘气溶胶的远距离输送可以影

响局地降水和雨带的位置,从而对区域气候产生重要影响<sup>[7,9]</sup>.

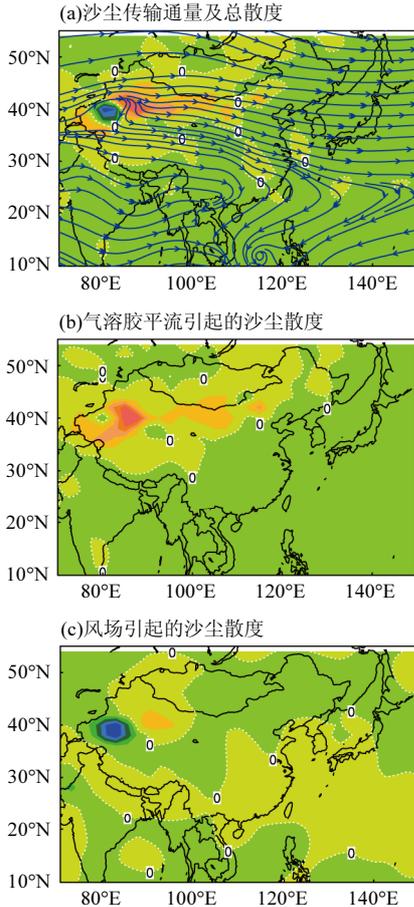


图7 模拟的2000~2007年东亚地区平均(a)沙尘气溶胶通量及总散度,以及(b)气溶胶平流和(c)风场对总散度的贡献

Fig.7 The predicted (a) dust aerosol flux divergence overlaid by column averaged transport streamline, and the dust flux divergence contributed by (b) aerosol advection term and (c) wind field divergence/convergence term from 2000~2007

图7a给出了东亚地区沙尘气溶胶整层水平通量流场分布.总体而言,东亚地区沙尘气溶胶呈现自西向东的环流输送特征,存在3个主要的沙尘输送带:1)位于40°N附近的沙尘输送带可以将源自塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠及蒙古高原的沙尘气溶胶向东输送至华北、朝鲜半岛及日本周边海域.吴润等<sup>[13-14]</sup>及Zhao等<sup>[33]</sup>指出该输送带对于我国北方及东北亚的沙尘天气具

有重要的影响,这一输送主要集中在对流层中高层5km左右<sup>[17]</sup>.2)位于30°~40°N之间的沙尘输送带,可以将青藏高原及西亚的沙尘向东南输送到华中和华南.3)30°N以南的沙尘输送带,将源自阿拉伯半岛的沙尘远距离输送至印度半岛及中印半岛.

东亚沙尘气溶胶主要包括2个辐散区:1)位于40°N附近的沙尘源区,从塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠向东,一直到蒙古高原南部、内蒙古中部的广大干旱和半干旱区;2)巴尔科什湖南部的萨雷耶西克阿特劳沙漠以及整个青藏高原.在除此以外的广大东亚大陆和海洋地区,都为沙尘辐合.特别是在新疆塔里木盆地西侧,青藏高原以北地区,存在一个沙尘气溶胶强辐合中心.通过比较图7b和7c发现,上游沙尘源地气溶胶辐散主要受气溶胶平流项影响,也就是强沙尘排放会导致源区沙尘向区域外输送.而塔里木盆地西侧沙尘辐合中心主要受风场辐合辐散项影响,也就是风场和地形对当地沙尘输送的作用更大.以上研究表明,在沙尘源区及40°N沙尘传输带,局地沙尘排放对当地沙尘输送及光学厚度大值影响较大.而在塔里木盆地西侧,地形和风场作用对该地区沙尘的输送和光学厚度很重要.

由于东亚地区受东亚夏季风显著影响,因此,沙尘输送还存在显著的季节变化特征.总体来说,东亚大陆地区春季沙尘输送强度明显大于夏季.春季沙尘源区沙尘的排放量较大,浓度散度起主导作用,使春季辐散区明显强度大于夏季;而夏季由于季风的爆发,降水清除作用的加强,以及沙尘排放的减少,导致浓度散度的作用受到抑制,辐散区强度和范围减小,辐合区强度增强.

### 3 结论

3.1 中国境内沙源主要位于塔克拉玛干沙漠、河西走廊及河套地区.年平均起沙量最大值出现在塔克拉玛干沙漠,中心超过1800mg/(m<sup>2</sup>·d).东亚沙尘排放具有明显的年际和季节变化.排放呈现逐年递减的趋势,递减率为2.89Tg/a.季节尺度上,春季排放最大,占全年总排放的37.63%,夏季和秋季排放逐渐降低,冬季最弱.区域年平均排放

为 581Tg/a.

**3.2 沙尘光学厚度时空分布特征与卫星观测结果**具有很好的-一致性.区域平均春季沙尘 AOD 最大(0.14),夏季次之(0.09),而秋季(0.06)和冬季(0.05)急剧减小.通过和 TOMS/OMI 气溶胶指数对比研究发现,塔克拉玛干沙漠 AOD 大值与沙尘暴活动密切相关,AOD 大值出现时间最早,持续时间也最长.

**3.3 东亚沙尘源区干沉降起主导作用,而远离源区的东北、日本及太平洋海域,湿沉降更加重要.**平均而言,干沉降和湿沉降可以分别清除 77% 和 22% 的沙尘排放.沙尘大粒子主要通过干沉降(特别是重力沉降)移出,而湿沉降对小粒子的贡献超过 60%.粒径范围 1~3 $\mu\text{m}$  的大粒子贡献了 75% 的沙尘柱含量.此外,沙尘沉降率以 5.79Tg/a 趋势逐年递减,季节尺度上,重力干沉降在全年(特别是春季)占主导地位,而对流降水湿沉降在夏季显著增强.

**3.4 东亚地区沙尘气溶胶通过 3 条输送带自西向东传输.**40°N 附近来自塔里木盆地的沙尘输送可以影响中国北方;30°~40°N 来自青藏高原的沙尘输送影响华中和华南;30°N 以南的沙尘输送影响印度半岛及中印半岛.沙尘源区气溶胶辐散是气溶胶平流项造成的,说明沙尘排放会显著影响该地区沙尘输送以及 AOD 大值;而塔里木盆地西侧沙尘辐合中心是风场辐合辐散项导致的,说明风场和地形对该地区沙尘输送和 AOD 大值很重要.沙尘输送呈现明显的季节变化特征,春季,沙尘输送强度较大,辐散区较强;夏季,沙尘辐散区强度和范围减小,辐合区强度增强,沙尘输送受到抑制.

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2013.
- [2] Albrecht B. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 1989,245:1227-1230.
- [3] Twomey S. Aerosols, clouds and radiation [J]. *Atmos Environ*, Part A, 1991,25:2435-2442.
- [4] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *J Geophys Res*, 1997,102(D6):6831-6864.
- [5] Lau K M, Kim M K, Kim K M. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau [J]. *Clim Dyn*, 2006,26:855-864.
- [6] Wu J, Fu C B, Han Z W, et al. Simulation of the direct effects of dust aerosol on climate in East Asia [J]. *Particology*, 2010, 8:301-307.
- [7] Guo J, Yin Y. Mineral dust impacts on regional precipitation and summer circulation in East Asia using a regional coupled climate system model [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120, doi:10.1002/2015JD023096.
- [8] 杨 磊,银 燕,杨绍忠,等.南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究 [J]. *大气科学*, 2013,37(5):983-993.
- [9] Gu Y, Xue Y, De Sales F, et al. A GCM investigation of dust aerosol impact on the regional climate of North Africa and South/East Asia [J]. *Clim Dyn*, 2015, doi:10.1007/s00382-015-2706-y.
- [10] Solmon F, Mallet M, Elguindi N, et al. Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(L24705), doi:10.1029/2008GL035900.
- [11] Lau K M, Kim K M, Sud Y C, et al. A GCM study of the response of the atmospheric water cycle of West Africa and the Atlantic to Saharan dust radiative forcing [J]. *Ann Geophys*, 2009,27:4023-4037.
- [12] 刘建慧,赵天良,韩永翔,等.全球沙尘气溶胶源汇分布及其变化特征的模拟分析 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(10):1741-1750.
- [13] 吴 润,蒋维楣,王卫国,等.我国春季大气沙尘气溶胶分布和短波辐射效应的数值模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2004, 34(1):116-125.
- [14] 吴 润,符淙斌,蒋维楣,等.东亚地区矿物气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 2005,48(6):1250-1260.
- [15] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modeling and monitoring [J]. *Glob Planet Change*, 2006,52:1-22.
- [16] Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, et al. Modeling mineral dust emissions from Chinese and Mogolian deserts [J]. *Glob Planet Change*, 2006,52:121-141.
- [17] 熊 洁,赵天良,韩永翔,等.1995-2004 年东亚沙尘气溶胶的模拟源汇分布及垂直结构 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(6):961-968.
- [18] Zhang D F, Zaakey A S, Gao X J, et al. Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model [J]. *Atmos Chem Phys*, 2009,9:1095-1110.
- [19] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport, and optical thickness [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99:22897-22914.

- [20] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Source and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model [J]. *J Geophys Res*, 2001,106(D17):20255–20273.
- [21] Zhang XY, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. *J Geophys Res*, 1997,102(D23):28041–28047.
- [22] Perry K D, Cliff S S, Jimenez-Cruz M P. Evidence for hygroscopic mineral dust particles from the Intercontinental Transport and Chemical Transformation Experiment [J]. *J Geophys Res*, 2004,109(D23),doi:10.1029/2004JD 004979.
- [23] Chin M, Ginoux P, Kinne S, et al. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements [J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59:461–483.
- [24] 吴序鹏,杨 军,车慧正,等.塔克拉玛干沙漠地区气溶胶光学厚度卫星遥感产品验证 [J]. *气候与环境研究*, 2012,17(2):149–159.
- [25] Ginoux P, Torres O. Empirical TOMS index for dust aerosol: Application to model validation and source characterization [J]. *J Geophys Res*, 2003,108(D17):4534.
- [26] Sun H, Pan Z, Liu X. Numerical simulation of spatial-temporal distribution of dust aerosol and its direct radiative effects on East Asian climate [J]. *J Geophys Res*, 2012,117(D13206),doi:10.1029/2011JD017219.
- [27] 黄 乾,姚素香,张耀存.区域气候模式对中国沙尘天气气候特征模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2012,32(1):188–197.
- [28] Li J W, Han Z W. A Modeling Study of Seasonal Variation of Atmospheric Aerosols over East Asia [J]. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29(1):101–117.
- [29] Pozzer A, de Meij A, Pringle K J, et al. Distributions and regional budgets of aerosols and their precursors simulated with the EMAC chemistry-climate model [J]. *Atmos Chem Phys*, 2012,12: 961–987.
- [30] Yue X, Wang H, Wang Z, et al. Simulation of dust aerosol radiative feedback using the Global Transport Model of Dust: 1. Dust cycle and validation [J]. *J Geophys Res*, 2009,114(D10202), doi:10.1029/2008JD010995.
- [31] Ginoux P, Prospero J M, Torres O, et al. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004,19:113–128.
- [32] Zender C S, Bian H, Newman D. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology [J]. *J Geophys Res*, 2003,108(D14):4416.
- [33] Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part I: mean climate and validation [J]. *J Clim*, 2006,19:88–103.

**作者简介:** 郭 俊(1986-),男,江苏南京人,博士,研究方向为大气成分与区域气候变化.发表论文 6 篇.