

# 基于 SCIAMACHY 卫星数据的中国对流层 SO<sub>2</sub> 时空分布研究

徐晓华, 徐光来 (安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽芜湖 241002)

**摘要** 利用 2004 年 1 月~2009 年 10 月的 SCIAMACHY 卫星对流层 SO<sub>2</sub> 垂直柱浓度数据产品, 选取了 4 个典型的 SO<sub>2</sub> 浓度高值区, 从空间分布、年际变化、季节变化、奥运会前后变化几个方面, 对我国对流层 SO<sub>2</sub> 的时空分布及变化趋势进行了分析, 并分析了造成这种分布特征的可能原因。结果表明, 我国对流层大气中 SO<sub>2</sub> 的分布及变化主要受人类活动的影响, 这种影响使得我国 SO<sub>2</sub> 的时空分布具有明显的地域性、季节性特征, 且显著受到人类硫排放控制措施的影响。

**关键词** 中国; SCIAMACHY; SO<sub>2</sub> 垂直柱浓度; 时空分布; 北京奥运会

**中图分类号** S164 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)32-12647-04

## Temporal-Spatial Distribution of Tropospheric SO<sub>2</sub> over China Using SCIAMACHY Satellite Observations

XU Xiao-hua et al (College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002)

**Abstract** The data products of monthly average tropospheric SO<sub>2</sub> vertical column densities from January 2004 to October 2009 over China are acquired from the SCIAMACHY instrument on ENVISAT. Selecting four typical SO<sub>2</sub> high concentration regions, the spatial-temporal distribution and variation trend of tropospheric SO<sub>2</sub> in China were analyzed from aspects of spatial distribution, annual variation, seasonal variation and variation before and after Olympic Games, the reasons for the distribution characteristics were analyzed. The results showed that human activities play a key role in the distribution and variation of tropospheric SO<sub>2</sub>. The influence results the temporal-spatial distribution of tropospheric SO<sub>2</sub> in China has a feature of regional, interannual and seasonal variety.

**Key words** China; SCIAMACHY; SO<sub>2</sub> vertical column densities; Temporal-spatial distribution; Beijing Olympic Games

随着我国经济的快速发展, 近年来向大气中排放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、气溶胶、CO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 等污染物不断增多<sup>[1]</sup>, 严重影响了空气质量, 大气中的 SO<sub>2</sub> 及其经化学变化生成的硫酸盐气溶胶是雾霾的重要贡献者之一, 同时, SO<sub>2</sub> 也是形成酸雨、酸雾的主要污染物<sup>[2]</sup>。SO<sub>2</sub> 的来源非常广泛, 主要分自然源和人为源两大类, 自然源来自于火山喷发和微生物的分解作用, 人为源则是大气中 SO<sub>2</sub> 的主要来源, 主要来自发电过程和工业生产中含硫化石燃料的燃烧等<sup>[3]</sup>。SO<sub>2</sub> 在大气中可以通过光化学反应生成硫酸盐粒子, 造成大气中的硫酸盐气溶胶大幅度增加, 硫酸盐气溶胶可远距离输送, 其辐射强迫效应能够影响全球气候<sup>[4]</sup>。SO<sub>2</sub> 酸沉降(包括干沉降和湿沉降)损害人类健康和生态环境, 会抑制植被生长<sup>[1]</sup>, 对生态敏感区的水生生物造成威胁<sup>[5]</sup>, 对人体呼吸系统造成危害<sup>[6]</sup>, 严重的甚至引起死亡<sup>[1]</sup>。SO<sub>2</sub> 排放的分布主要在北半球<sup>[7]</sup>, 我国东部和华中地区成为全球 SO<sub>2</sub> 严重污染区域。在欧洲和北美, 硫的排在 20 世纪 80 年代后期达到高峰, 由于采取了有效的硫排放控制措施, SO<sub>2</sub> 排放自 20 世纪 90 年代起大幅降低<sup>[8-11]</sup>。中国和中亚地区的硫排在过去的 20 年里则在一直不断增加, 这主要是由于这些区域持续快速的经济增长造成的。在亚洲, 用 RAINS-ASIA 模型预测的 SO<sub>2</sub> 的排放量仍将持续增加, 估计将从 1990 年的 34 Mt 增长至 2020 年的 110 Mt<sup>[12]</sup>。对我国地区来说, SO<sub>2</sub> 的排放量估计由 1995 年的 25.2 Mt 增长至 2020 年的 30.6 Mt<sup>[13]</sup>。

SO<sub>2</sub> 传统研究大多基于地基观测, 如 Chu 等利用地基观测数据研究了气象条件对兰州冬季 SO<sub>2</sub> 污染的影响<sup>[14]</sup>, Sun 等利用不同高度上的日 SO<sub>2</sub> 浓度地面监测数据分析了北京

市供暖时期 SO<sub>2</sub> 的浓度分布特征<sup>[15]</sup>, 胡刚等通过 1998~2004 年站点监测的大气污染物数据, 分析了黄山市大气 SO<sub>2</sub> 的季度及年度变化趋势<sup>[16]</sup>。传统监测方法虽然能获得局部低层大气的变化趋势, 但在大区域尺度的观测上却力不从心。遥感则具有大范围覆盖、时效性强、分辨率高等优点, 可获取全球范围内长时间序列的 SO<sub>2</sub> 浓度分布数据, 为进行大范围大气 SO<sub>2</sub> 等痕量气体的时空变化规律及趋势研究提供了可能。目前主要利用 TOMS、SCIAMACHY、OMI、GOME-2 等卫星数据来监测和估算全球 SO<sub>2</sub> 的浓度分布, 近年来已有不少学者利用这些卫星资料进行了对流层 SO<sub>2</sub> 柱浓度及时空分布变化的研究工作<sup>[1-2, 17-18]</sup>。如 Habib 等利用 TOMS 数据研究了 SO<sub>2</sub> 的空间、季节和年际变化<sup>[17]</sup>; Richter 等利用 SCIAMACHY 卫星观测数据分析对流层的 SO<sub>2</sub> 浓度分布, 能识别出火山喷发和人为排放的 SO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>。目前在我国区域利用卫星遥感数据分析 SO<sub>2</sub> 的分布、变化、来源及成因的研究相对较少, 如徐晓华利用 SCIAMACHY 传感器反演的 2004~2010 年对流层 SO<sub>2</sub> 数据产品, 结合气象、地形、土地覆盖、REAS 人类活动排放清单、人口密度和 GDP 等辅助数据, 较系统地分析了我国区域上空 SO<sub>2</sub> 垂直柱浓度的时空分布规律及主要影响因素, 并分析了对流层 SO<sub>2</sub> 与酸雨污染来源的关系<sup>[19]</sup>。中国是世界上最大的煤炭生产和消费国, 排放的 SO<sub>2</sub> 主要来源于燃煤。随着我国工业化进程的不断加快, 能源需求量仍在不断增加, 这使得我国已成为人类活动造成大气污染的典型区域, 引起全球政府和民间的关注。SO<sub>2</sub> 是衡量人为大气污染的一个重要风向标, 因此研究我国区域 SO<sub>2</sub> 分布及其变化对大气环境研究和空气质量控制具有重要指导意义。笔者利用 SCIAMACHY 卫星对流层 SO<sub>2</sub> 垂直柱浓度数据产品, 选取 4 个典型的 SO<sub>2</sub> 浓度高值区, 从空间分布、年际变化、季节变化、奥运会前后变化几个方面, 对我国对流层 SO<sub>2</sub> 的时空分布进行分析。

**基金项目** 国家自然科学基金青年项目(41301029); 安徽师范大学人才培养基金项目(160721253)。

**作者简介** 徐晓华(1980-), 女, 河南信阳人, 助教, 硕士, 从事环境遥感教学工作。

**收稿日期** 2013-10-08

## 1 资料与方法

**1.1 数据来源** 使用的对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度数据来源于荷兰皇家气象研究所提供的月平均全球  $\text{SO}_2$  数据产品 (<http://www.temis.nl>), 数据分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间范围为 2004 年 1 月~2009 年 10 月。下载的数据为 .hdf 格式, 通过 Matlab 编写代码提取了中国区域经纬度、时间及对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度等信息, 转换为 .shp 格式输出, 以便在 ArcGIS 中进行处理和分析。

**1.2 研究区域** 根据 2004~2008 年对流层  $\text{SO}_2$  的 5 年浓度分布图, 提取 4 个  $\text{SO}_2$  浓度高值区, 分别为区域 1 (包括北京、天津、山东、河北、河南、江苏、安徽部分地区)、区域 2 (包括四川东部、重庆和贵州部分地区) 及区域 3 (广州市到香港、澳门地区范围) 3 个  $\text{SO}_2$  浓度高值区; 由于区域 1 的  $\text{SO}_2$  浓度最高、范围最大, 从中又提取出一个极高值区域 4 (包括天津、河北南部、山西东南部、山东及河南北部部分地区) (图 1)。这 4 个区域同时又是人口集中、经济活动强度极大的地区, 研究这 4 个区域的  $\text{SO}_2$  浓度分布及时空变化趋势具有重要的意义。

**1.3 数据处理方法** 根据所获取数据得到的我国  $\text{SO}_2$  的浓度分布图, 在 ArcGIS 中建立了 4 个区域的 .shp 面文件作为掩膜, 将获得的 .shp 文件转成栅格, 裁剪出 4 个区域 2004 年 1 月~2009 年 10 月的  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度图层。用 merge 工具得到 2004~2008 年的  $\text{SO}_2$  平均柱浓度及年平均和月平均的  $\text{SO}_2$  柱浓度。利用 Excel 和 SigmaPlot 工具对数据进行统计分析和图表分析。

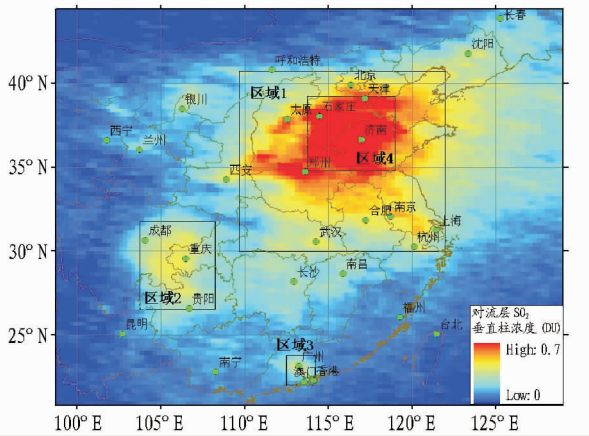


图 1 2004~2008 年我国对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度分布及 4 个典型研究区域

## 2 结果与分析

### 2.1 我国地区 $\text{SO}_2$ 垂直柱浓度空间分布特征

**2.1.1 空间分布** 从图 1 可以看出, 我国对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度空间分布极不平衡, 东部工农业发达区域的  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度明显高于西部地区, 华北区的  $\text{SO}_2$  浓度最高、范围最广, 北至辽宁, 南至湖北, 西至陕西, 东至江苏、上海, 均是  $\text{SO}_2$  浓度高值区 (区域 1)。其中最大值在河北、天津、山东、河南等地 (区域 4), 最高值达 1.19 DU (2007 年), 而西部绝大部分地区浓度值在 0.10 DU 以下。人类工业活动集中、经济发

达的长江三角洲和珠江三角洲地区  $\text{SO}_2$  的浓度值远低于河北、天津、山东和河南地区。另外, 四川盆地地区 (区域 2) 的浓度也相对较高, 最高值在 2006 年达 0.60 DU。珠三角地区 (区域 3) 在  $\text{SO}_2$  浓度值较低的南方略显突出, 但其浓度值远低于其他经济发展相对较快的地区, 其最高值在 2004 年达 0.55 DU。

**2.1.2 原因分析** 总体来看, 我国区域内对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度分布与经济发展有较好的一致性, 说明对流层  $\text{SO}_2$  浓度与人类工农业活动密切相关, 其高值区在华北区的河北、天津、山东、河南等地较为集中。原因可能有: ①该区人口高度聚集、工农业发达且是主要的煤炭产区和消费区<sup>[20]</sup>; ②由于冬季集中采暖, 燃煤量增大, 排放  $\text{SO}_2$  增多<sup>[1]</sup>; ③北方地区降水较少, 湿沉降去除  $\text{SO}_2$  的效果较差。四川盆地地区包括西南地区 2 个重要的大城市 (成都和重庆), 人口密集、工农业生产集中、四周山地环绕, 这种独特的地形条件不利于  $\text{SO}_2$  在大气中的传输和扩散, 形成一个独立于其他地区的浓度高值区。珠三角位于我国南部, 是最发达的工业区之一, 其工业以轻工业为主, 燃煤少, 政府部分采取了一些节能减排措施, 再加上常年降雨较多, 湿沉降作用去除  $\text{SO}_2$  效果好, 且气象条件有利于  $\text{SO}_2$  在大气中的扩散, 可能是形成该区  $\text{SO}_2$  浓度较低的重要原因。

### 2.2 我国 4 个典型区域 $\text{SO}_2$ 垂直柱浓度的时间变化特征

**2.2.1 年际变化** 从图 2 可以看出, 4 个典型区域的  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度 2004~2008 年间出现了先上升后下降的趋势; 区域 1 与区域 4 的变化趋势具有高度的一致性, 区域 4 是区域 1 中提取的浓度极高值区, 两者的相关系数达 0.974, 在 2007 年达到最大浓度值, 区域 1 年均值为 0.59 DU, 区域 4 年均值达 0.89 DU; 同时, 5 年来的最高值也出现在 2007 年, 在 2008 年则开始下降, 这与 2008 年北京奥运会采取的严格的空气质量保障措施是分不开的。区域 2 和区域 3 在 2004~2008 年间变化比较缓和; 区域 2 的变化范围在 0.28~0.37 DU, 在 2006 年达最大值, 随后呈缓慢下降趋势, 这可能得益于过去几年采取的节能减排措施; 区域 3 的  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度在 2004~2006 年一直呈平稳状态, 在 2006 年达 0.29 DU 之后下降, 下降趋势明显。总体来看, 2008 年我国地区的  $\text{SO}_2$  排放相对于 2007 年呈显著下降趋势, 其中区域 1 下降 15.6%、区域 2 下降 18.3%、区域 3 下降 32.9%、区域 4 下降 18.4%, 可见区域 3 下降趋势最显著, 相对于 2006 年来说下降幅度达 47.4%。这可能与香港特区政府环境保护署于 2006 年 11 月推出的旨在通过改善生产工艺流程, 降低能耗和废气排放, 从而显著改善珠三角地区空气质量及烟雾问题的“清洁生产技术支持试验项目”<sup>[21]</sup> 有关。

**2.2.2 季节变化** 由 4 个典型区域  $\text{SO}_2$  柱浓度在 2004~2008 年季节变化趋势 (图 3) 可见, 季节变化呈现 2 种类型, 区域 1、2、4 的  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度呈冬季高、夏季低的季节特征, 而区域 3 正好相反, 呈冬季低、夏季高的季节特征。区域 1、4 大部分属于北方, 冬天能源消耗大,  $\text{SO}_2$  排放多,  $\text{SO}_2$  浓度最大值出现在 1 月份, 在 2、3、4 和 9、11、12 月份也出现了较

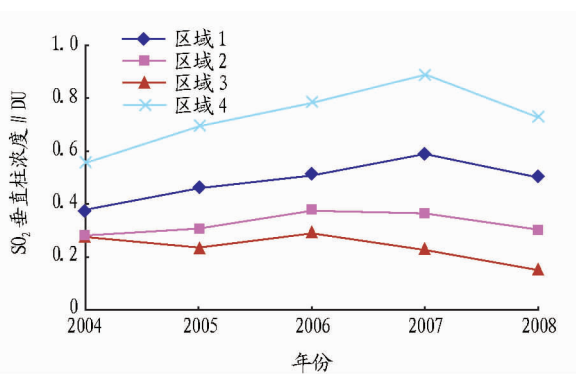


图2 2004~2008年4个典型区域对流层SO<sub>2</sub>垂直柱浓度的年际变化

大值,在6、7、8月份出现低值;区域2主要位于四川盆地,SO<sub>2</sub>垂直柱浓度最大值出现在1月份,在2、3、11、12月份也出现了较大值,5、6、7、9、10月份值较低;而区域3的季节变化趋势与其他地区相反,其最大值出现在8月份,在6、7、10月份也出现了较大值,其最小值出现在1月份,2、3、4、5、11、12月份的值也较小,这种夏季高、冬季低的季节分布特征与车汶蔚等在考虑了周边区域影响的情况下对珠海市SO<sub>2</sub>污染地面监测分析结果<sup>[22]</sup>相反,但若仅考虑当地污染源排放和气候条件的影响,珠海市夏季的污染物监测浓度应该高于冬季的污染物监测浓度。但珠江市不能代表整个珠三角地区,珠三角地区SO<sub>2</sub>柱浓度最高的区域在广州市,区域3的季节变化特征主要受广州市及其周围的SO<sub>2</sub>垂直柱浓度变化的影响。但造成这种季节分布结果的原因还有待进一步研究。

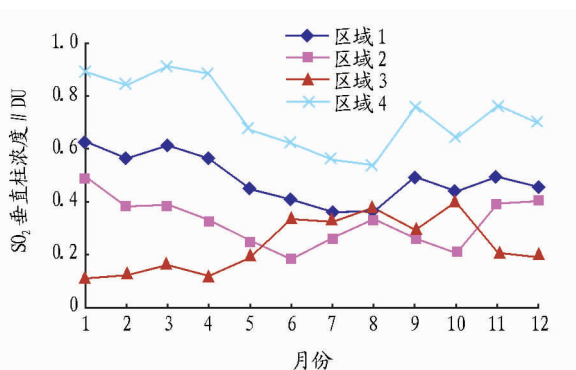


图3 2004~2008年4个典型区域月平均SO<sub>2</sub>垂直柱浓度季节分布

**2.2.3 北京奥运会前后的变化。**通过对2008年8月北京奥运会前后北京(图4)及华北地区SO<sub>2</sub>垂直柱浓度的分析比较(图5)可以看出,2007年SO<sub>2</sub>垂直柱浓度最高,奥运会期间及之后SO<sub>2</sub>柱浓度值显著下降;2008年7月~2009年10月,区域1的SO<sub>2</sub>垂直柱浓度一直保持较低,最大值为2009年3月的0.44 DU,远小于奥运会之前2008年2月的0.91 DU;2008年7月~2009年10月,区域1的SO<sub>2</sub>垂直柱浓度月平均值为0.34 DU,而2004年1月~2008年6月的月平均浓度为0.50 DU,说明奥运会期间及之后的SO<sub>2</sub>垂直柱浓度明显低于2008年6月之前浓度值。北京市区的范围选取,包括与北京市城区最邻近的区和郊县(图4),是北京市

SO<sub>2</sub>柱浓度最大、空气污染最严重的地区。从图5可以看出,2008年7月之后,SO<sub>2</sub>垂直柱浓度有明显下降,但在2009年9和10月又有一个回升,这与区域1不同;2004年1月~2008年6月北京地区的SO<sub>2</sub>月均垂直柱浓度为0.51 DU,而2008年7月~2009年10月SO<sub>2</sub>月均垂直柱浓度仅有0.33 DU,较区域1奥运前后的变化对比更为明显。

造成奥运前后SO<sub>2</sub>浓度变化的原因应主要归因于政府部门采取的严格的空气质量保障措施<sup>[23]</sup>,北京及周边地区的高排放工厂被要求达标排放,部分企业被要求减产、停产,以减少污染物排放,以及部分大型企业采用电厂脱硫除尘及其他清洁生产工艺等措施<sup>[21-22]</sup>,很大程度上减少了北京及周边地区的SO<sub>2</sub>及其他污染物的排放。另外,周边省份一些高排放企业的停产、限产等奥运空气质量保障措施对降低大气污染物的浓度也产生了一定的效果,但在2009年下半年,北京市大气中SO<sub>2</sub>的浓度又有所回升。

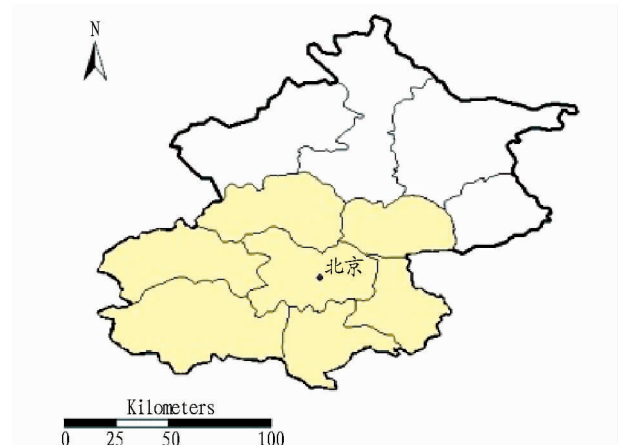


图4 北京地区范围(北京城区及周围区、县)

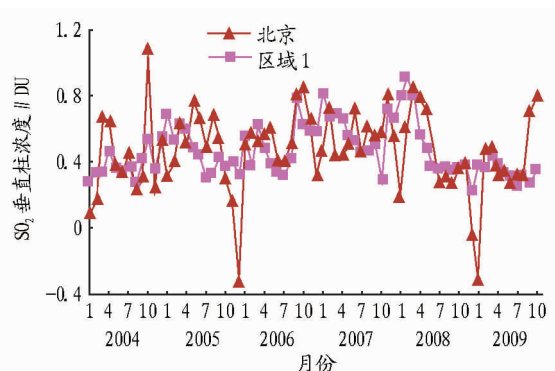


图5 2004年1月~2009年10月北京和区域1的对流层月平均SO<sub>2</sub>垂直柱浓度变化

### 3 结论

(1)利用 SCIAMACHY 对流层SO<sub>2</sub>垂直柱浓度数据分析了我国大气对流层SO<sub>2</sub>的时空分布及变化趋势,表明我国对流层大气中SO<sub>2</sub>的分布及变化主要受人类活动的影响,这种影响使得我国SO<sub>2</sub>的时空分布具有明显的地域性、季节性特征,且显著受到硫排放控制措施的影响。

(2)我国对流层SO<sub>2</sub>垂直柱浓度空间分布极不平衡,东部工农业发达区域的SO<sub>2</sub>垂直柱浓度明显高于西部地区,最

大值在河北、天津、山东、河南等地,与因为当地是主要的煤炭产区和消费区,冬季集中采暖及气候条件等有关;四川盆地  $\text{SO}_2$  较高的原因可能是其特殊的地形条件;我国南方地区的  $\text{SO}_2$  浓度相对较小,可能因为南方煤炭消耗较少,气象条件有利于  $\text{SO}_2$  扩散,湿沉降去除  $\text{SO}_2$  及空气质量管理政策的有效实施等。

(3)我国对流层  $\text{SO}_2$  垂直柱浓度 2004~2008 年间出现了先上升后下降的趋势。北方地区在 2007 年达最高值,2008 年后开始下降;四川盆地和珠三角地区  $\text{SO}_2$  柱浓度年变化幅度较小,在 2006 年达最大值后开始下降;珠三角地区下降趋势更为显著。

(4)我国对流层  $\text{SO}_2$  的季节变化呈现 2 种类型,广大华北地区及四川盆地呈冬季高、夏季低的季节特征,而珠三角地区正好相反,呈冬季低、夏季高的季节特征。

(5)2008 年 8 月北京奥运会前后北京及华北地区对流层  $\text{SO}_2$  柱浓度变化显著。2008 年 7 月~2009 年 10 月  $\text{SO}_2$  的平均值显著低于 2004 年 1 月~2008 年 6 月的  $\text{SO}_2$  平均浓度值,这与奥运会期间实施的严格的空气质量保障措施密切相关。

#### 参考文献

- [1] GEORGOULIAS A K, BALIS D, KOUKOULI M E, et al. A study of the total atmospheric sulfur dioxide load using ground-based measurements and the satellite derived Sulfur Dioxide Index[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(9): 1693-1701.
- [2] RICHTER A, WITTROCK F, BURROWS J P.  $\text{SO}_2$  Measurements with SCIAMACHY[C]//Proc. Atmospheric Science Conference, 8-12 May 006, ESRIN, Frascati, ESA publication SP-628, 2006.
- [3] REDDY M S, VENKATARAMAN C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: I - Fossil fuel combustion[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(4): 677-697.
- [4] DICKERSON R R, LI C, LI Z, et al. Aircraft observations of dust and pollutants over northeast China: Insight into the meteorological mechanisms of transport[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1-13.
- [5] PARK S U, IN H J, KIM S W, et al. Estimation of sulfur deposition in South Korea[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(20): 3259-3269.
- [6] PANDEY J S, KUMAR R, DEVOTTA S. Health risks of  $\text{NO}_2$ , SPM and  $\text{SO}_2$

in Delhi (India) [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(36): 6868-6874.

- [7] ANDRES R J, KASGNOC A D. A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 1998, 103(D19): 25251-25261.
- [8] SMITH S J, ANDRES R, CONCEPTION E, et al. Historical sulfur dioxide emissions 1850-2000: Methods and results [M]. Richland, WA (US): PNNL-14537, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2004.
- [9] STERN D I. Global sulfur emissions from 1850 to 2000[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(2): 163-175.
- [10] STERN D I. Reversal of the trend in global anthropogenic sulfur emissions [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(2): 207-220.
- [11] VESTRENG V, MYHRE G, FAGERLI H, et al. Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(13): 3663-3681.
- [12] FOELL W, GREEN C, AMANN M, et al. Energy use, emissions, and air pollution reduction strategies in Asia [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1995, 85(4): 2277-2282.
- [13] STREETS D G, WALDHOFF S T. Present and future emissions of air pollutants in China:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , and CO [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(3): 363-374.
- [14] CHU P C, CHEN Y, LU S. Atmospheric effects on winter  $\text{SO}_2$  pollution in Lanzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 89(4): 365-373.
- [15] SUN Y, WANG Y, ZHANG C. Measurement of the vertical profile of atmospheric  $\text{SO}_2$  during the heating period in Beijing on days of high air pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(2): 468-472.
- [16] 胡刚, 陈保平, 胡和兵. 安徽省黄山市 1998-2004 年大气中  $\text{SO}_2$  浓度变化分析 [J]. *合肥学院学报: 自然科学版*, 2011, 21(2): 82-85.
- [17] HABIB G, VENKATARAMAN C, CHIAPPELLO I, et al. Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: Relationship to regional meteorology and emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(11): 1909-1921.
- [18] MARTIN R V. Satellite remote sensing of surface air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(34): 7823-7843.
- [19] 徐晓华. 基于卫星遥感数据的中国对流层  $\text{SO}_2$  时空变化特征及其对酸雨形成的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [20] BENKOVITZ C M, TREVOR SCHOLTZ M, PACYNA J, et al. Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 29.
- [21] 万军明. 中国香港清洁生产伙伴计划对珠江三角洲地区节能减排效果的探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(8): 93-95, 100.
- [22] 车汶蔚, 郑君瑜, 邵英贤, 等. 珠海市大气污染时空分布特征及成因分析 [J]. *中国环境监测*, 2008, 24(5): 82-87.
- [23] 余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运期间北京地区卫星监测  $\text{NO}_2$  柱浓度的变化 [J]. *科学通报*, 2009, 54(3): 299-304.

(上接第 12641 页)

发区域,在植被覆盖率低的地方扬沙天气明显比植被覆盖率高的地方多。

(4)大风天气与扬沙天气发生时如不做好防护措施极易形成风灾与沙灾,对农业生产与人们的日常生活危害极大。春季大风发生较多可造成蔬菜大棚受损、温室农作物受灾、牲畜圈舍倒塌,棉花地膜损毁;夏季大风天气引起的干热风对小麦的产量影响极大。扬沙天气则会埋压农田、村庄、工厂、铁路、公路、水源等形成沙瓣、沙堆和沙丘。因此在河南省内进行植树造林、水土保持、小流域综合治理,以提高地表植被的覆盖率,减少沙地荒山的面积,从而减少了沙源,可以有效地防止扬沙天气和大风灾害的产生。

#### 参考文献

- [1] 姬兴杰, 朱业玉, 顾万龙, 等. 河南省大风日数时空分布及对沙尘天气的影响 [J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(1): 31-37.
- [2] 付光轩, 刘军臣, 刘和平. 近 40 年河南沙尘暴、扬沙和浮尘气候特征分析 [J]. *河南气象*, 2002(1): 22-24.
- [3] 梁钰, 布业林, 贺哲, 等. 用 T213 产品制作河南省沙尘天气短期预报 [C]//推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会 2004 年年会论文集(下册). 北京: 气象出版社, 2004.
- [4] 竹磊磊, 常军, 张善强. 河南夏季干旱气候特征分析 [J]. *气象与环境科学*, 2012, 35(1): 49-55.
- [5] HUANG F X, GAO Q. Climate control on dust storm occurrence in Maowusu Desert, Inner Mongolia, North China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(1): 14-21.
- [6] 张锦明, 郭丽萍, 张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对 DEM 插值误差的影响 [J]. *测绘科学技术学报*, 2012, 29(1): 51-56.