

DOI: 10.5846/stxb201903220542

王青青, 巨天珍, 王培玉, 温飞, 石焱, 马成, 常锋. 兰州市 SO₂ 时空动态分布特征及其与城市生态系统的关系. 生态学报, 2020, 40(8): 2577–2588.
Wang Q Q, Ju T Z, Wang P Y, Wen F, Shi Y, Ma C, Chang F. Spatial and temporal dynamic distribution characteristics of SO₂ in Lanzhou City and its relation with urban ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): 2577–2588.

兰州市 SO₂ 时空动态分布特征及其与城市生态系统的关系

王青青¹, 巨天珍^{1,*}, 王培玉¹, 温飞², 石焱³, 马成⁴, 常锋⁴

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省环境科学设计研究院, 兰州 730030

3 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

4 张掖市生态环境局, 张掖 734000

摘要: 强化城市大气污染物多尺度监测手段, 辨识污染物时空演变规律及其与城市生态系统各要素间的相互关系, 可为城市大气环境质量综合管控提供科学依据。利用 OMI、EOS/MODIS 卫星影像及其他统计类数据, 在分析了兰州市 2006—2016 年对流层 SO₂ 柱浓度的时空分布特征基础上, 进一步探讨了 NDVI、工业总产值、汽车保有量等城市自然经济社会生态要素的结构变化与 SO₂ 浓度变化的关系。结果表明: 1) 兰州市对流层 SO₂ 空间分布不均, 呈现出以河谷低海拔区域分布为中心, 向西北、东南山地两侧递减的“倒 U”形格局; 2) 近 10 年内, 兰州市大气 SO₂ 柱浓度值在 0.033—0.25(多布森单位) 之间, 总体呈下降趋势, 年均降幅为 14%, 降速为 0.02(多布森单位)/a; 3) 兰州市大气 SO₂ 柱浓度变化特征与城市工业生产和交通因素关系密切, 又受地形、季节风向等气象气候条件制约; 4) 兰州市 NDVI 指数与大气 SO₂ 柱浓度值相关性明显, 兰州市植被覆盖度较低, 植被指数为 0.09—0.66, 对 SO₂ 净化能力有限。综合以上结果, 本研究认为, 通过调控城市社会、经济、自然生态系统结构, 并适当采用基因工程等科学技术来增加地表植被覆盖量, 是下一步兰州市大气环境质量管理的重要举措之一。

关键词: OMI; 对流层; SO₂ 柱浓度; 时空特征; NDVI; 兰州市

Spatial and temporal dynamic distribution characteristics of SO₂ in Lanzhou City and its relation with urban ecosystem

WANG Qingqing¹, JU Tianzhen^{1,*}, WANG Peiyu¹, WEN Fei², SHI Yao³, MA Cheng⁴, CHANG Feng⁴

1 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Research Institute of Environmental Science and Design, Lanzhou 730030, China

3 Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

4 Zhangye Ecological Environment Bureau, Zhangye 734000, China

Abstract: Strengthen the methods of multi-scale monitoring for urban air pollutants, identified the temporal and spatial development of pollutants and their relationships with the elements of urban ecosystem can provide a scientific basis for comprehensive management and control of urban air quality. This research analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of SO₂ column concentration in the troposphere of Lanzhou City from 2006 to 2016, based on OMI, EOS/MODIS satellite images, and other statistical data. The paper further discussed the relationship between the SO₂ concentration and urban structural changes of natural, economic, and social elements, such as NDVI, industrial production, car parc. The results showed that 1) the spatial distribution of SO₂ presented an inhomogeneous characteristic in

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500907); 甘肃省重点研发计划(17YF1FA120); 兰州市科技计划(2017RC69)

收稿日期: 2019-03-22; **网络出版日期:** 2019-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jujutz@163.com

<http://www.ecologica.cn>

the troposphere in Lanzhou city, which showed an inverted U-shaped pattern with the low elevation of the valley as the center and decreased on both sides of the northwest and southeast mountain areas. 2) In the past 10 years, the concentration of SO₂ column in Lanzhou was between 0.033—0.25 Dobson unit. It showed the downward trend with an average annual decline of 14%, and with the declining rate of 0.02 Dobson unit/a. 3) The characteristics of atmospheric SO₂ column concentration change of Lanzhou city were closely related to urban industrial production and traffic factors, and also restricted by the meteorological and climatic conditions such as topography and seasonal wind direction. 4) The NDVI index of Lanzhou city was significantly correlated with the concentration of atmospheric SO₂ column. Lanzhou city had a low vegetation coverage, with the vegetation index of 0.09—0.66. It had a limited ability to purify SO₂. Based on the above results, we consider that it is one of the important measures for Lanzhou's atmospheric environmental quality management to increase the surface vegetation coverage by adjusting the structure of urban social, economic, and natural ecosystems, and using appropriate science and technology such as genetic engineering.

Key Words: OMI; troposphere; SO₂ column concentration; spatiotemporal characteristics; NDVI; Lanzhou City

大气污染对气候变化和区域生态健康的影响日益加剧,如发生在我国的雾霾、酸雨、和光化学烟雾^[1-3]等不仅会影响人类的身体健康还会导致整个生态系统紊乱,多年来大气环境污染一直都是社会高度关注和急需解决的环境问题^[4]。随着我国大气污染防治工作的深入,当前工程减排的空间日益缩小,那么从技术和监管方面如何提升和持续保障区域与城市大气环境质量,将是未来我国大气环境管理需要解决的重点问题。另外,除人类各种社会经济活动外,植被、气象等自然要素也是城市生态系统的主体,在区域物质和能量循环中起到重大作用^[5],辨识大气污染物时空演变规律及其与城市生态系统各要素间的相互关系,也可为城市大气环境质量综合管控提供科学依据^[6]。我国二氧化硫(SO₂)排放体量大,在大气污染中一直是国家的约束性指标之一。卫星遥感监测以其空间覆盖范围大、时间周期长、观测空间连续和可实时快捷的获得区域 SO₂数据等优势特点,弥补地面站点监测在空间覆盖小和数据获取时间长等方面的不足^[7-8],在阐明大气污染和气象要素的交互影响中发挥重要作用,而结合城市植被覆盖、经济产值、社会发展指数等数据更能进一步的研究城市生态系统对 SO₂浓度变化的影响^[9-10]。

国外多位学者如 Khokhar 等^[11]利用 GOME、Carn 等^[12]和 Prata 等^[13]AIRS 数据反演了高精度的 SO₂柱浓度,用以研究火山爆发轨迹和污染源演变规律。多位学者通过设计算法反演污染源及其污染物分布,如 Lee 等^[14]基于 SCIAMACHY 发展了一种权函数算法、Krotkov 等^[15]基于 OMI 数据反演了 SO₂柱浓度,赵军等^[16]开发了大气边界层 SO₂数据总量的获取方法和 SO₂离散面状分布模式。Li 等^[17]利用 OMI 卫星观测数据,得出在 2008 年奥运会期间内蒙古、陕西和山西等地的火电厂及其附近 SO₂的浓度比以往同期有着显著的下降,从而证明燃煤电厂脱硫政策能有效降低 SO₂的人为排放量。王刚等^[18]利用卫星反演 SO₂的 BRD 算法得出中国 SO₂浓度高值地区主要是华北、华东以及四川盆地。Zhang 等^[19]用 SCIAMACHY 卫星传感器,评估了中国地区 2004—2009 年人为活动排放 SO₂含量,西部呈逐年增加的变化趋势,东部呈逐年下降的变化趋势。姜杰^[20]通过 2005—2010 年卫星(OMI)遥感数据,监测了中国大气 SO₂浓度,认为西部地区季节变化幅度不大,但其变化趋势与东部地区相反,表现为夏季浓度高,冬季浓度比较低。李兵等^[21]利用 OMI 数据得出 2006—2013 年甘肃省天水市大气 SO₂柱浓度明显增加与人为活动、自然条件和外域大气传输的关系。王彦^[22]解译遥感数据指出甘肃省白银市 2011 年到 2013 年大气边界层 SO₂浓度的时空分布并估算了 SO₂的排放总量。张斌才^[23]利用 OMI 传感器结合遥感图像处理技术和地理信息系统分析所得的大气边界层(PBL) SO₂数据产品指出,兰(州)白(银)金(昌)地区 SO₂季节差异大,冬季 SO₂柱浓度最高,夏季最低,以及污染源的移动规律。巨天珍等^[24]利用 OMISO₂数据解译了甘肃省兰州市城区 2009—2010 年采暖期和非采暖期 SO₂空间分布情况。

兰州市曾经发生光化学污染事件^[25],2013 年是兰州步入空气质量改善的转折期与加速期,如今的兰州与曾经全国大气环境质量倒数第一形象相差甚远,为了检验治理效果,本文基于 2006—2016 年共 11 期遥感

数据对兰州市全境对流层 SO₂柱浓度的时空变化特征及影响因素进行了回顾性的分析研究,并对兰州市大气 SO₂的净化途径,以及 NDVI、工业总产值、汽车保有量等城市自然经济社会生态要素的结构变化与城市 SO₂浓度变化的关系进行了探讨。

1 研究区概况

兰州市(北纬 36°07′,东经 103°82′)位于中国西北部,甘肃省中部,为甘肃省省会。地处黄土高原河谷地带,市区位于盆地内,两山夹一河(图 1),明显的盆地地形使得该区大气层结稳定,形成逆温层,加之风速较小,静风率较高,冬季稳定类天气占 70%以上,静风率达 80%,不利于大气污染物的湍流扩散。又因常年干旱少雨,年均降雨量不足 300 毫米,蒸发量较高,植被覆盖率低,沙尘暴和浮尘天气容易形成和波及,加剧了兰州市大气污染。作为老工业基地,兰州的工业结构以能源、石油化工、有色冶金等原材料上游工业为主,重化工业占整个工业的比重近 80%,能源结构单一,80%的能耗以煤为主。近年来机动车年均增幅超过 10%,而且每天过境车辆超过 11 万辆,目前全市机动车拥有量达到 90 万辆,机动车低速或怠速行驶,尾气排放也成为了主要污染物之一。

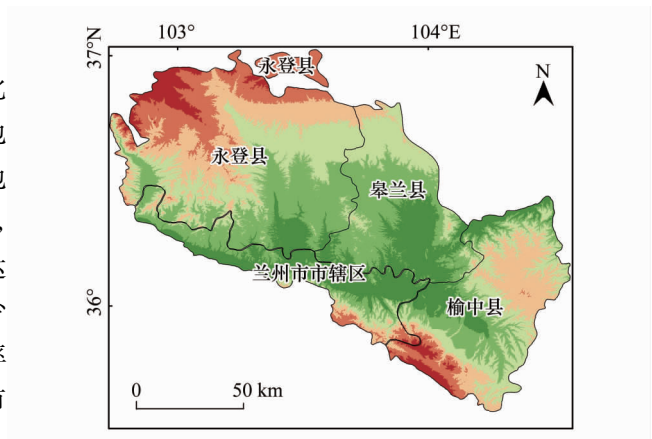


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 传感器及数据格式

研究所采用的 SO₂的数据产品来自于美国国家航天局 Aura 卫星上搭载的 OMI 传感器,OMI 传感器于 2004 年 7 月升空^[26-27],是继 GOME 和 SCIAMACHY 后的新一代大气成分探测传感器^[28-29],用于 O₃、NO₂、SO₂、HCHO、BrO 和 OClO 等组分的光谱反演,其轨道扫描幅宽为 2600 km,空间分辨率 13 km×24 km,有 3 个通道,波长覆盖范围 270—500 nm,平均光谱分辨率为 0.5 nm,每天覆盖全球一次。OMI 能够以较高的空间及时间分辨率获取大气污染的空间分布的动态变化。

2.2 研究方法

本文选取的 SO₂数据是 2006—2016 年日 OMI 数据产品,OMISO₂产品是以 HDF-EOS 条带格式存储,用 VISA 软件对研究区的柱量数据读入、读出、过滤和提取。为保证研究区边界地区的插值精度,实际数据处理时将提取边界扩大 0.5°,再用 HDF-view 软件将所选取的“Lat”、“Lon”、“SO₂-column”值粘贴出来。利用 ArcGIS10.0 软件地统计模块中的克里金插值法,对处理后的数据进行插值,再使用地图代数工具进行栅格计算,得到并绘制出兰州市 2006—2016 年 SO₂的时空分布图。兰州市植被数据(NDVI)来自于美国国家航空航天 NASA 的 EOS/MODIS 数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>),选取 2006—2016 年的 MOD13Q1 数据产品,时间分辨率为 31 d,空间分辨率为 1000 m。并使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具将下载的 MODIS-NDVI 数据进行格式转换、重投影等,得到并绘制出兰州市植被覆盖度(NDVI)时空分布图。

3 结果与分析

3.1 11 年兰州市对流层 SO₂柱浓度空间变化特征

3.1.1 兰州市对流层 SO₂柱浓度值的空间分布

图 2 为兰州市 2006—2016 年 11 年对流层 SO₂柱浓度多年平均值空间分布图。为研究需要,将兰州市

SO₂柱浓度值分为八个等级(多布森单位),依次为:一级(0—0.06)、二级(0.06—0.12)、三级(0.12—0.18)、四级(0.18—0.24)、五级(0.24—0.30)、六级(0.30—0.36)、七级(0.36—0.42)、八级(0.42—0.48)。由图2结合图1兰州市高程分布可知,兰州市对流层SO₂空间分布的梯度明显,呈现出以河谷低海拔(皋兰县)为中心的高浓度分布,向西北、东南两侧较高海拔SO₂浓度递减的带状规律分布,即兰州市SO₂空间呈倒“U”字型分布。其中,七级、八级(高值区)主要分布在皋兰县和永登县的东南部,占总面积的13.5%;六级(较高值区)主要分布在兰州市市辖区的西固区、安宁区、城关区和七里河区的西北部地区,占总面积的20.3%;三级、四级(中值区)主要分布在各个县的过渡地带,分别占总面积的9.4%、21.5%和28.1%。而一级和二级(低值区)主要分布在高海拔的区域,如永登县的西北部、榆中县的东南部和东部地区,分别占总面积的2.2%、4.9%。近11年的SO₂分布模式对兰州市SO₂空气质量的预测预报将提供参考。

3.1.2 兰州市对流层SO₂柱浓度年际空间分布

通过对兰州市2006年至2016年逐年的OMI反演的对流层SO₂柱浓度数据进行栅格计算,为方便说明问题,将柱浓度值也划分为八个等级(多布森单位),分别为:一级(0—0.06)、二级(0.06—0.12)、三级(0.12—0.18)、四级(0.18—0.24)、五级(0.24—0.30)、六级(0.30—0.36)、七级(0.36—0.42)和八级(0.42—0.48),绘制成SO₂柱浓度的逐年平均值空间分布图(图3),从空间分布来看,兰州市SO₂柱浓度年际分布动态趋势明显。从2006年到2010年兰州市“十一五”期间,SO₂高值区以面状红色分布,具有从中部河谷低海拔区域向着东西两侧高海拔山地逐渐低值化扩散分布的趋势,2010年减排效果最为明显;从2011年到2015年“十二五”期间,SO₂在2011年皋兰县离散面状分布向永登县西南半部、红古区扩散,2012年除榆中县西南部、永登县中北部以外,SO₂中值区的面状分布扩大,2013—2014年在波动中缓慢收缩减少,2015年中值区扩大,污染加重;2016年主要污染区域位于永登县全境和红古区部分地段即兰州市西北半部中高海拔区域,与“十一五”和“十二五”污染区集中在低海拔的规律不同。此变化和2010年兰州市政府与国家环境科学院达成合作框架协议,即兰州大气污染及防治对策研究项目启动有关,环境保护政府部门协同相关企业做到了“全天候、全过程、全方位”的监管,因而取得了从2011年至2016年间兰州市对流层SO₂在波动下降的重要成果。

3.1.3 兰州市SO₂季节空间分布

图4为11年间兰州市对流层SO₂季节空间分布图,季节分布明显不均,呈冬高夏低的特点,具有冬季>春季>秋季>夏季的分布规律。冬季均值为0.24(多布森),有明显的高值区,主要分布在皋兰县的中部和永登县的中东部等低海拔地区。中值区分布在永登县中部大部分中高海拔、兰州市市区和榆中县的西部中海拔区域。低值区主要分布在榆中县高海拔的东南部。冬季SO₂分布与采暖期和冬季盛行风有关。春季0.14(多布森),无明显的高值区,中值区分布在河谷低海拔的皋兰县中大部区域,及其周边高海拔的永登县东部、榆中县西北部、和兰州市城关区北部。低值区主要分布在永登县西部山地和榆中东南部山地;秋季0.11(多布森),兰州市中值区呈面状离散收缩,分布在永登中部、皋兰局部低海拔地区,兰州市区除东南部外,西南半部大部分地区为低值区;夏季0.065(多布森)低值的SO₂污染物向西北扩散,没有中高值的SO₂污染,这主要与我国夏季盛行东风有关。

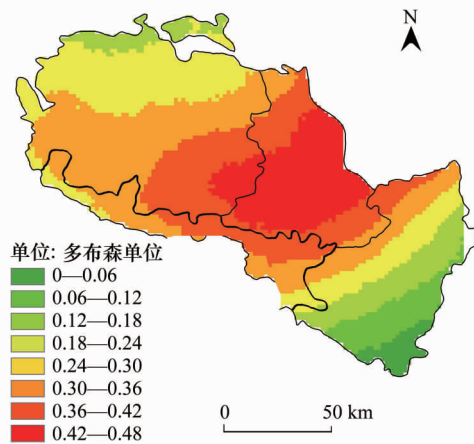


图2 对流层SO₂柱浓度多年平均值空间分布图

Fig.2 Tropospheric SO₂ column concentration multi-year average spatial distribution map

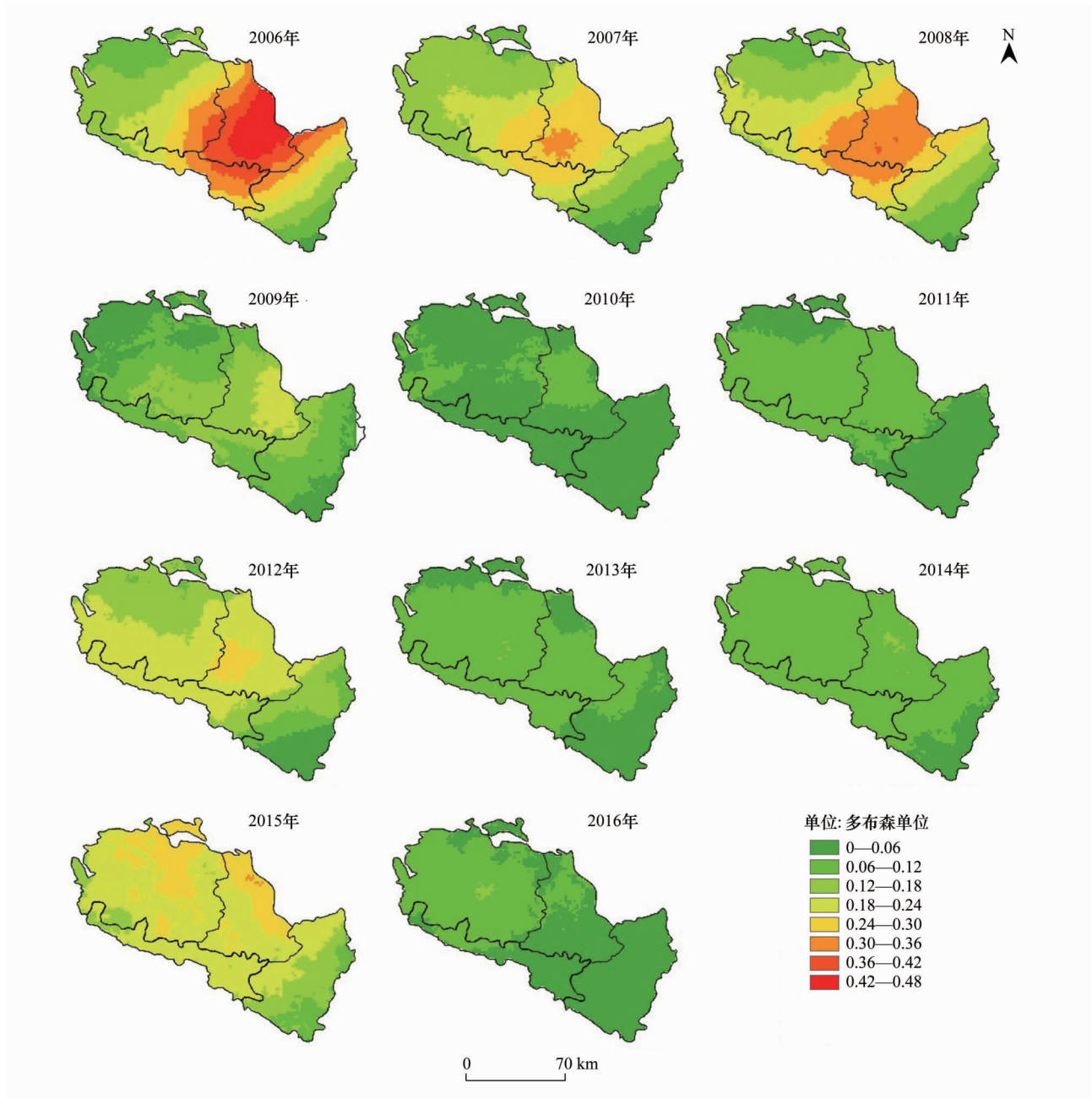


图3 对流层 SO₂柱浓度年平均空间分布图

Fig.3 Tropospheric SO₂ column concentration annual average spatial distribution map

3.2 11 年兰州市对流层 SO₂柱浓度时间变化特征

3.2.1 兰州市对流层 SO₂柱浓度年际分布

图 5 为遥感数据与地面实测数据的相关性分析图,地面 SO₂数据来自中华人民共和国环境保护部发布的 2006—2016 年空气质量年报,与遥感数据 SO₂柱浓度的相关性系数约为 0.61,说明两数据强相关,可以利用卫星数据反映兰州区域大气 SO₂的污染状况。图 6 表示兰州市 2006—2016 年 SO₂柱浓度年际变化图,11 年来兰州市年均 SO₂柱浓度年均值处于不断波动状态,但总体呈现下降趋势,其中 2008 年和 2012 年有两次小的回升。SO₂ 柱浓度值介于 0.03—0.25(多布森)之间变化范围,浓度值的降幅为 14%,下降速度为 0.02(多布森)。降低的主要原因是当地政府一直重视 SO₂大气污染的治理,确定了减排、压煤、除尘、控车、增容等重点治污工作,聚焦关键过程的管理与控制,实施联动化、科学化、目标化、工程化、法制化管理等方面,把工业排

<http://www.ecologica.cn>

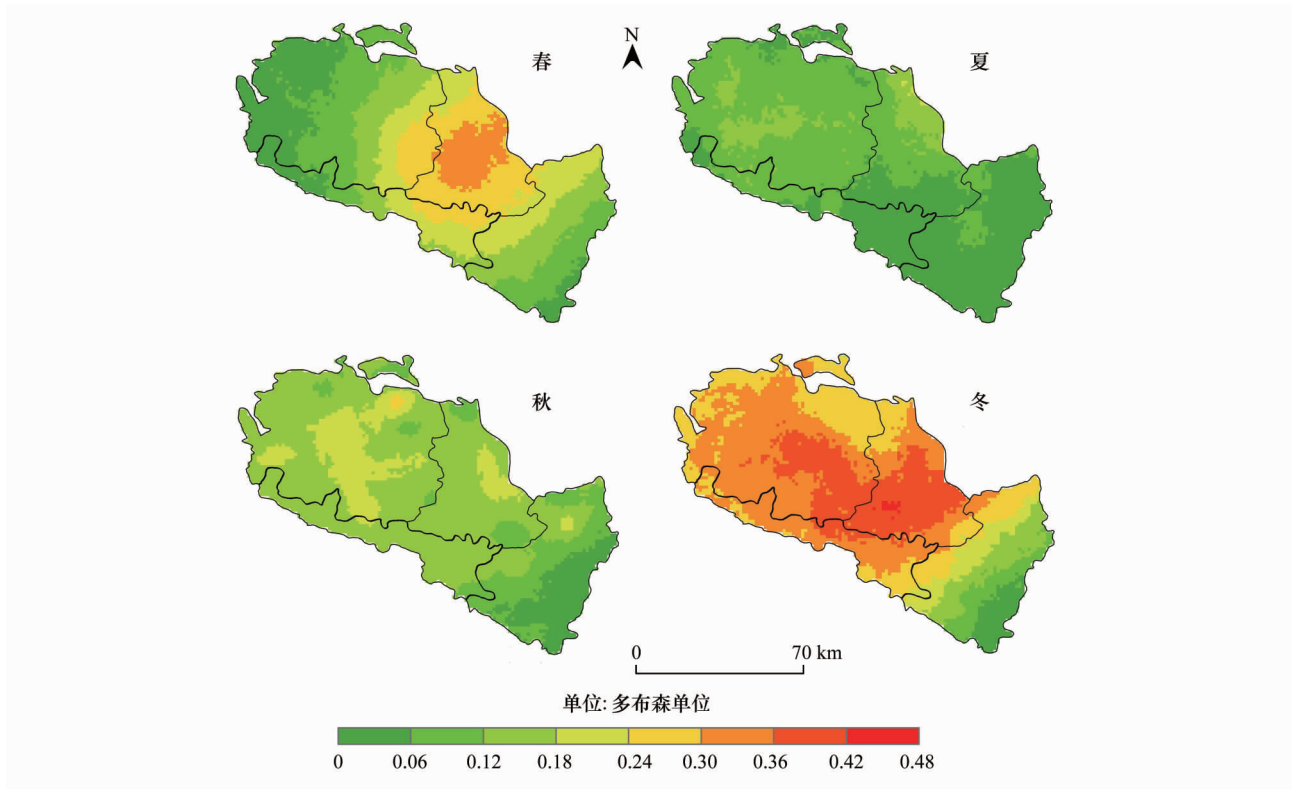


图 4 对流层 SO₂ 柱浓度季节空间分布图

Fig.4 Seasonal spatial distribution of tropospheric SO₂ Concentration

污、二次扬尘污染、机动车尾气污染和生产燃煤污染作为大气污染防治的重中之重,实施全过程、全员、全网格的实时监管,取得了良好的结果。兰州市大气污染得到明显的控制也说明 SO₂ 污染与经济特征的密切关系在强有力的环境管理下可以被打破。

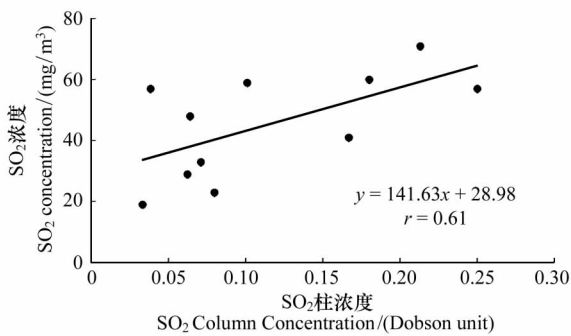


图 5 SO₂ 柱浓度值与地面监测值趋势图

Fig.5 Comparison of remote sensing SO₂ column concentration with ground monitoring value

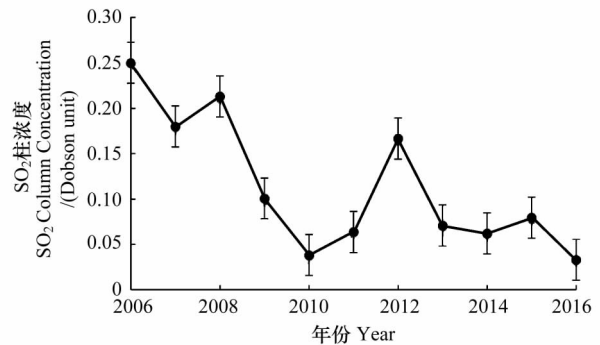


图 6 2006—2016 年 SO₂ 柱浓度年际变化趋势图

Fig.6 Annual mean value change of SO₂ column concentration during 2006—2016

3.2.2 兰州市对流层 SO₂ 柱浓度季节变化特征

图 7 为 2006—2016 年兰州市不同季节(春季:3—5 月、夏季:6—8 月、秋季:9—11 月、冬季:12—2 月) SO₂ 柱浓度分布图。由图 7 可以看出,兰州市 SO₂ 柱浓度始终表现为冬季高于其他 3 个季节,11 年季节均值由大到小依次为:冬季(0.24 多布森) > 春季(0.14 多布森) > 秋季(0.11 多布森) > 夏季(0.065 多布森)。2006—

2016 年,兰州市 SO₂ 在冬季值为 0.065—0.5 多布森,最高值出现于 2007 年,最低值出现于 2014 年,11 年来冬季 SO₂ 下降速度为 0.03 多布森;春季 SO₂ 柱浓度的变化范围为 0.035—0.26 多布森,2008 年出现最大值,2016 年达到最小值,十一年 SO₂ 柱浓度/(多布森)春季的下降速度为 0.008 多布森;秋季的 SO₂ 柱浓度总体上略呈下降趋势,秋季最大值出现于 2006 年,为 0.33 多布森,最小值出现于 2014 年,为 0.03 多布森,11 年秋季 SO₂ 下降速度为 0.013 多布森;夏季最高值出现于 2006 年,为 0.18 多布森,最低值出现于 2016 年,为 0.035 多布森,11 年间夏季兰州市 SO₂ 呈下降速度为 0.012 多布森。综合图 6 和图 7 可见,2008 年 SO₂ 的升高与春、冬季节持续较高的排放有关,2012 年 SO₂ 的提升也来源于冬季的较高排放,可见重视冬季 SO₂ 排放的环境管理、净化和减排是关键。

3.3 兰州市对流层 SO₂ 柱浓度与城市生态系统关系

3.3.1 城市自然生态系统要素分析

对照图 1 兰州市数字高程模型 (DEM) 和图 2 兰州市 SO₂ 空间分布图,可以看出兰州市两山夹一河的特殊地理地貌与 SO₂ 沿河谷高值区向东西两侧递减分布的空间格局一一对应。这种分布与气象条件如各县区的风向(图 8) 密切相关。气候因素对区域大气运动起到了重要作用。通过统计气象局网站上兰州市市辖区(城区)、皋兰县、榆中县以及永登县的风向数据绘制出图 8,即兰州市(县区) 风向频率玫瑰图。由图可知,兰州市城区主导风向为东北风,其次为东风;皋兰县、榆中县和永登县的主导风向分别为北风、东南风和北风。兰州市城区为某一风向时,其所在区域大范围风向未必和城区一致。据赵敬国等学者研究^[30-31],当兰州市区为东北风时,其郊区主要为西北风和西南风,这是因为兰州市区处于山谷盆地,东西长,南北狭窄,风在山谷中间形成回旋,改变了风向。可见风向尤其是冬季风向及气候地形等因素的综合作用导致了兰州市大气 SO₂ “倒 U 型”空间分布格局。

本文使用遥感数据生成的植被覆盖指数 (NDVI) 产品反映暴露在 SO₂ 下兰州市植被覆盖情况。NDVI 在反映一个地区植被覆盖度方面有优势,过去只能利用植物群落学的样方调查法得到调查区样地的数据,植被类型不同覆盖度的调查方法不同,不同类型的覆盖度无法统一计算,尤其是大尺度下的植被覆盖度的计算问题。采用遥感方法计算很容易就解决了此类问题,植被数据与大气遥感数据之间也可建立对比关系,暴露在 SO₂ 下的植被叶面可见伤害率增长速度为不暴露的 0.33—1.0 倍^[32]。如图 9 为兰州市 2008—2016 年 NDVI 多年均值分布图(2006—2007 年无 NDVI 数据),分别选择三个在植被分布和大气污染方面具有特色的典型代表如皋兰县、榆中县和兰州市植被覆盖分布图,分别比较三个地段植被覆盖度的可以看出,榆中县植被覆盖度最高,皋兰县植被覆盖度最低,兰州市城区植被覆盖度较高。

如图 10 表示 SO₂ 与 NDVI 的季节分布图,夏秋季节 NDVI 较高,SO₂ 柱浓度较低;冬季 NDVI 较低,SO₂ 柱浓度较高,由此可见在兰州市 SO₂ 与植被覆盖度呈负相关,这与浙江省大气 SO₂ 与植被关系相似^[33]。多项研究^[34-35]表明,一方面植被对 SO₂ 有较强的滞留和吸附作用,另一方面利用植物体内 SO₂ 含量可以监测周围环境中大气中 SO₂ 的浓度。兰州市四季中大气 SO₂ 与四季植被之间也反映了这样规律。

兰州地区自然植被为干草原,植被覆盖度低。随着兰州市经济发展,城市绿化环境建设步伐加快,兰州市政府成立兰州市南北两山指挥部,各县也加大投资建设园林城市。自 2010 年以来兰州市平均气温逐年升高,加之灌溉条件的改善和绿化力度的加大,植被覆盖度也持续增加。作者建议,创新思路,利用基因工程技术,

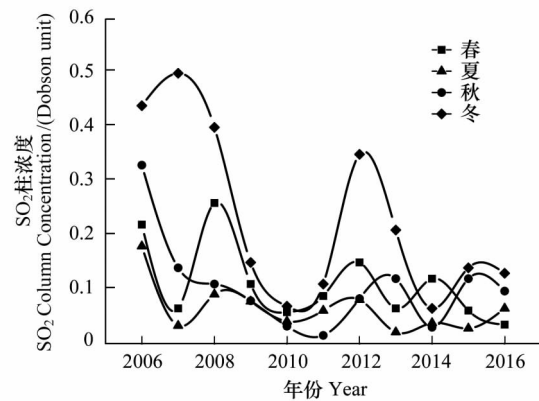


图 7 2006—2016 年 SO₂ 垂直柱浓度季节变化特征图

Fig.7 Seasonal variation of SO₂ vertical column concentration, 2006—2016

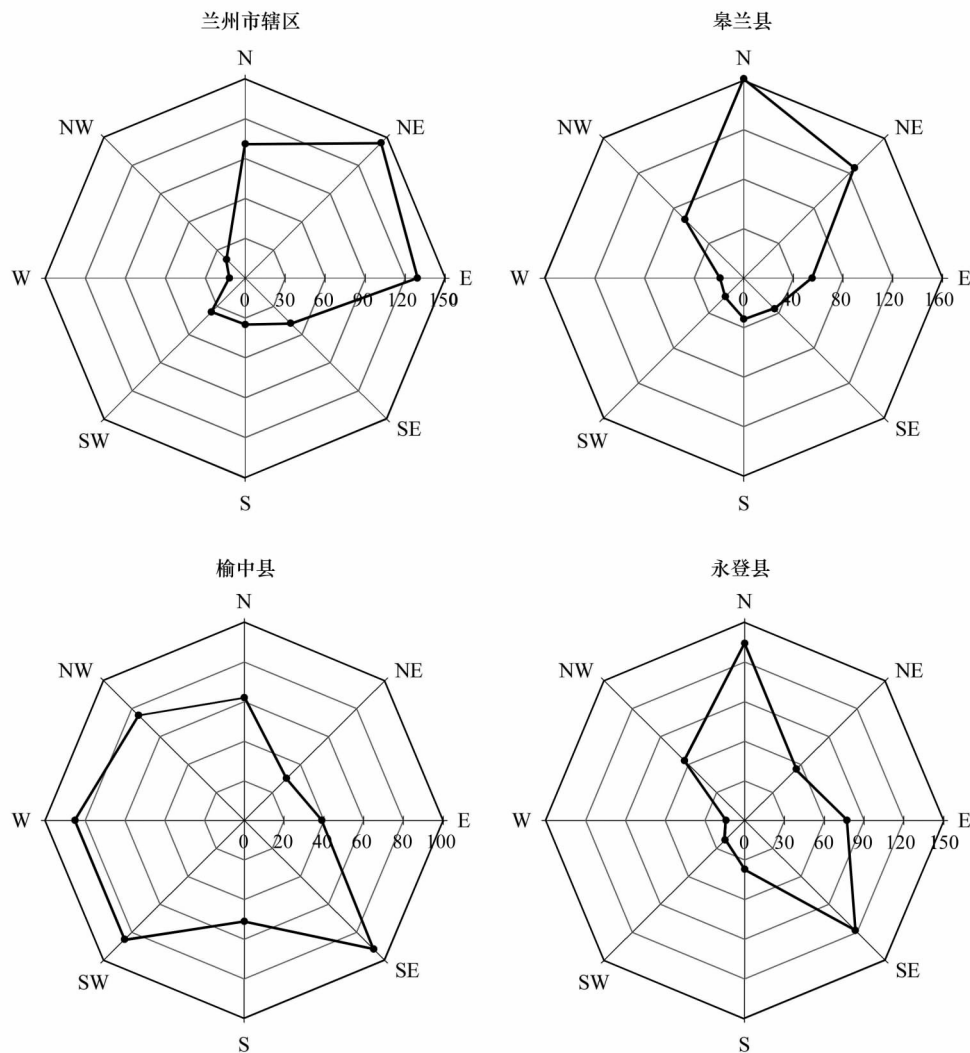


图 8 兰州市及各县风向频率图

Fig.8 Lanzhou City area and county wind direction

研究将抗冻基因载入兰州市阔叶树种或常绿针叶树中, 培植抗冻藤本、灌木和草本植物, 在空旷地、建筑物不同侧面通过布满立体植被覆盖量, 来增加冬季兰州市植被体量, 加大吸收污染物质的力度^[36-37], 以此作为“十三五”甚至“十四五”期间兰州市污染减排的途径之一。

3.3.2 城市社会经济生态系统要素分析

选取兰州市 2006 年至 2016 年的生产总值和工业产值两个指标进行分析(图 11), 生产总值以及工业产值与对流层 SO_2 柱浓度量呈显著相关, 相关系数分别为 0.69、0.68, 证明兰州市对流层 SO_2 柱浓度中工业排放占据较大的比重, 原因主要是兰州市经济发展以重工业为主^[38], 长期依赖高能耗、高污染、高排放行业的发展且能源供应以大量消耗煤炭的火力发电为主。

选取兰州市 2006 年至 2016 年的汽油产量、汽车保有量为主要因素, 探究能源消耗对对流层 SO_2 柱浓度的影响。图 12 表明, 两个影响因素与对流层 SO_2 柱浓度值均呈相关关系, 这说明能源消耗和汽车保有量的增加会加大大气中 SO_2 柱浓度值。

兰州市由过去的“污染名城”到现在的空气质量达标城市, 据报道其治理经验总结为“重点遏制、难点突破、整体改善、逐步好转”, 以上的遥感监测结果也说明了经济发展污染增加的规律^[39-42] 在兰州市并没有

出现。

4 结论

基于卫星的遥感监测在反映污染物的长时间和大尺度空间分布及污染源动态方面有绝对优势,这是地面监测无法替代的技术手段。对于全方位掌握污染物的发生发展规律、与影响因素之间的关系对制定和调整未来大气污染的防治意义重大。

(1) 从空间上看,兰州市 2006—2016 年对流层 SO₂ 柱浓度的空间分布梯度明显,呈倒“U”字型。形成以河谷盆地高浓度的 SO₂ 柱浓度为中心,向东西两侧山地的低浓度呈阶梯状递减的分布格局。首次绘制的兰州市 SO₂ 空间分布图,对今后 SO₂ 研究和政府管理提供空间参考。

(2) 从时间上看,兰州市 SO₂ 柱浓度在“十一五”期间逐年小幅均匀降低,“十二五”期间在波动中下降,以 2015 年 SO₂ 升高为结尾,在“十三五”又下降的时间分布格局。与地面观测数据的变化趋势相似,SO₂ 柱浓度值变化范围在 0.033—0.25(多布森)之间,11 年来浓度值的年均降幅为 14%,年均下降速度为 0.02(多布森)。兰州市 SO₂ 量值始终表现为冬季高于其他 3 个季节,11 年间由大到小为:冬季(0.24(多布森))>春季(0.14(多布森))>秋季(0.11(多布森))>夏季(0.065(多布森))。

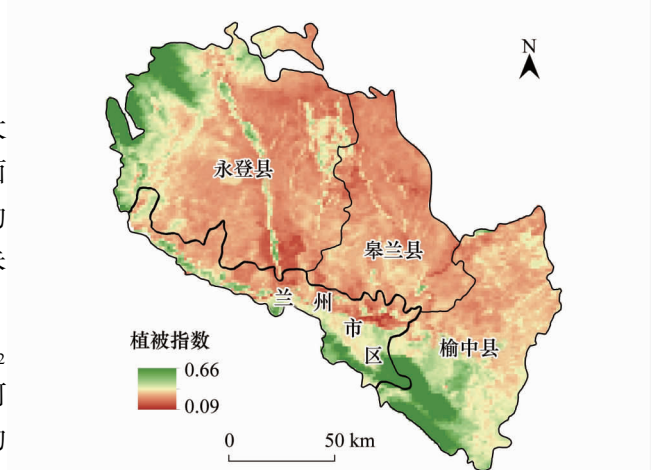


图 9 兰州市 2008—2016 年 NDVI 多年均值分布图和 SO₂ 与 NDVI 分布图

Fig.9 Distribution of NDVI, distribution of SO₂ and NDVI from 2008 to 2016 in Lanzhou City

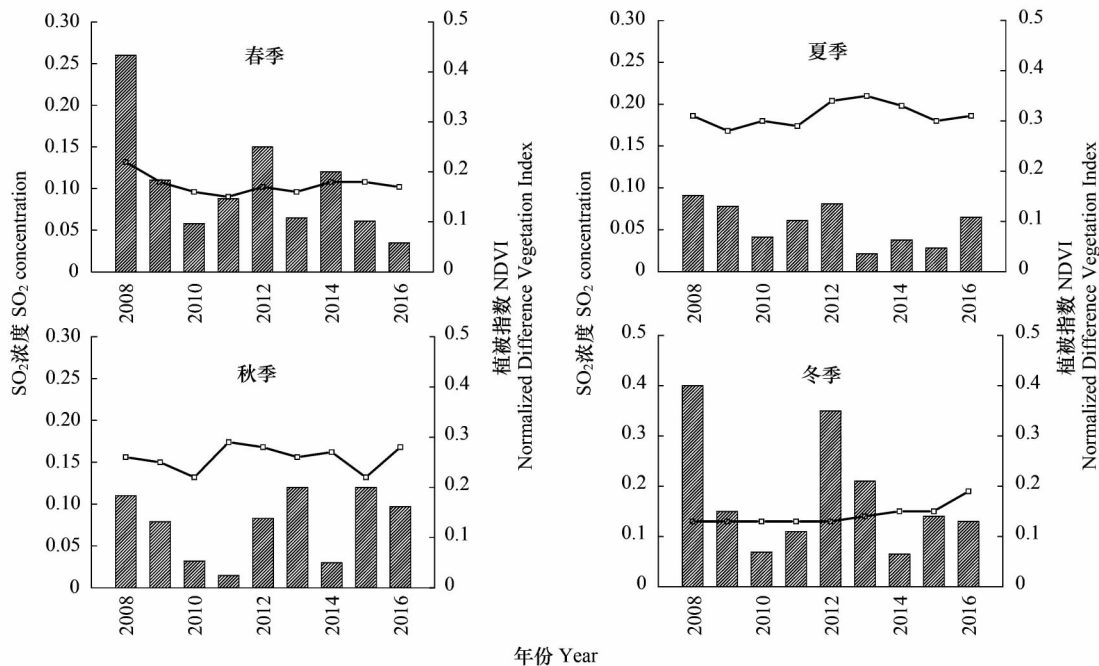
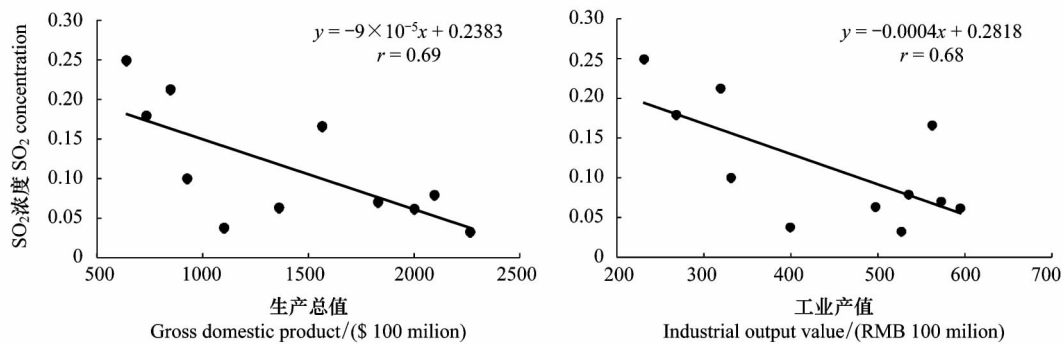
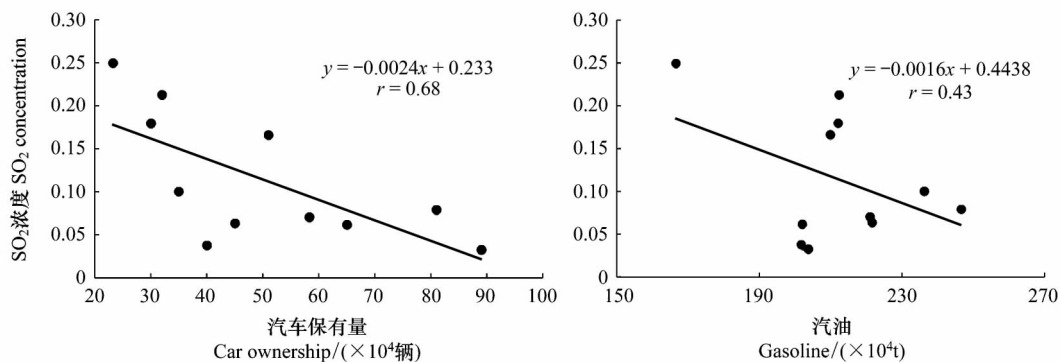


图 10 兰州市 2008—2016 年 SO₂ 与 NDVI 四季对比图

Fig.10 Seasonal map of SO₂ and NDVI in Lanzhou City from 2008 to 2016

(3) 从城市自然生态系统要素上看,地形、气候特征和植被覆盖度影响着兰州市 SO₂ 柱浓度分布,在海拔

图 11 经济发展与对流层 SO₂ 柱浓度的相关性Fig.11 Correlation between economic development and tropospheric SO₂ column concentration图 12 能源消耗与对流层 SO₂ 柱浓度的相关性Fig.12 Correlation between energy consumption and tropospheric SO₂ column concentration

较低、植被覆盖度低和人类活动频繁的区域,SO₂柱浓度偏高;在地势较高、植被覆盖度高和人类活动较少的区域,SO₂柱浓度偏低。

(4) 从城市社会经济生态系统要素上看,兰州市 SO₂柱浓度的时空变化受到多方面因素的复合影响,其中最主要的因素为人类活动,提取生产总值、工业产值、能源消耗和汽车保有量四个指标与兰州市 SO₂柱浓度做相关性分析,结果表明,生产总值、工业产值、汽油产量和机动车保有量与对流层 SO₂柱浓度呈显著相关,相关系数分别为 0.69、0.68、0.43 和 0.68。这说明 SO₂体量的减少与工业减排和兰州市政府大力度有效治理和针对性的监管措施息息相关。

(5) 开展跨学科的研究,全面提升治污手段。植被体量和大气 SO₂的净化有密切的关系,在严格控制区域 SO₂排放总量基础上,通过调控城市社会、经济、自然生态系统结构,并适当采用基因工程等科学技术,利用各种地表空间增加兰州市植被覆盖量,是下一步城市环境质量管理的重要举措之一。

参考文献(References):

- [1] He H, Li C, Loughner C P, Li Z Q, Krotkov N A, Yang K, Wang L, Zheng Y F, Bao X D, Zhao G Q, Dickerson R R. SO₂ over central China: measurements, numerical simulations and the tropospheric sulfur budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117 (D16): D00K37.
- [2] 高健, 张岳狮, 王淑兰, 柴发合, 陈义珍. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探. *环境科学研究*, 2012, 25(11): 1201-1207.
- [3] 魏欣, 毕晓辉, 董海燕, 陈魁, 孙韧, 冯银厂. 天津市夏季灰霾与非灰霾天气下颗粒物污染特征与来源解析. *环境科学研究*, 2012, 25 (11): 1193-1198.

- [4] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 李伟峰. 城市规模对大气污染物 NO₂ 和 PM_{2.5} 浓度的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 5049-5057.
- [5] Fishman J, Bowman K W, Burrows J P, Richter A, Chance K V, Edwards D P, Martin R V, Morris G A, Pierce R B, Ziemke J R, Al-Saadi J A, Creilson J K, Schaack T K, Thompson A M. Remote sensing of tropospheric pollution from space. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(6): 805-821.
- [6] 周伟奇, 王坤, 虞文娟, 李伟峰, 韩立建, 钱雨果. 城市与区域生态关联研究进展. 生态学报, 2017, 37(15): 5238-5245.
- [7] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [8] Martin R V. Satellite remote sensing of surface air quality. Atmospheric Environment, 2008, 42(34): 7823-7843.
- [9] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 郑晓欣. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析. 生态学报, 2016, 36(24): 7897-7907.
- [10] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): 788-797.
- [11] Carn S A, Strow L L, De Souza-Machado S, Edmonds Y, Hannon S. Quantifying tropospheric volcanic emissions with AIRS: The 2002 eruption of Mt. Etna (Italy). Geophysical Research Letters, 2005, 32(2): L02301.
- [12] Lee C, Richter A, Weber M, Burrows J P. SO₂ retrieval from SCIAMACHY using the weighting function DOAS (WFOAS) technique: comparison with standard DOAS retrieval. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(20): 6137-6145.
- [13] Prata A J, Bernardo C. Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from atmospheric infrared sounder data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D20): D20204.
- [14] Khokha M F, Frankenberg C, Van Roozendaal M, Beirle S, Kühl S, Richter A, Platt U, Wagner T. Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996-2002. Advances in Space Research, 2005, 36(5): 879-887.
- [15] Krotkov N A, Carn S A, Krueger A J, Bhartia P K, Yang K. Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1259-1266.
- [16] 赵军, 张斌才, 樊洁平, 师银芳. 基于 OMI 数据的兰州及附近地区大气边界层 SO₂ 量值变化初步分析. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 808-813.
- [17] 王刚, 张鹏, 王维和, 张兴赢, 张文建. 卫星遥感测量大气二氧化硫的新进展//第 26 届中国气象学会年会论文集. 杭州: 中国气象学会, 2009.
- [18] Li C, Zhang Q, Krotkov N A, Streets D G, He K B, Tsay S C, Gleason J F. Recent large reduction in sulfur dioxide emissions from Chinese power plants observed by the Ozone monitoring instrument. Geophysical Research Letters, 2010, 37(8): L08807.
- [19] Zhang X Y, Van Geffen J, Liao H, Zhang P, Lou S J. Spatiotemporal variations of tropospheric SO₂ over China by SCIAMACHY observations during 2004-2009. Atmospheric Environment, 2012, 60: 237-246.
- [20] 姜杰. 基于 OMI 卫星数据和数值模拟的中国大气 SO₂ 浓度监测与排放量估算 [D]. 南京师范大学, 2012.
- [21] 李兵, 巨天珍, 张斌才, 葛建团, 张俊峰, 唐红梅. 天水市大气 SO₂ 浓度时空变化特征的卫星遥感监测与影响分析. 中国环境监测, 2016, 32(2): 134-140.
- [22] 王彦. 基于 OMI 数据的白银市 SO₂ 浓度时空分布特征. 中国农学通报, 2017, 33(4): 131-135.
- [23] 张斌才. 大气边界层 SO₂ 空间分布的 OMI 数据分析——以兰(州)白(银)金(昌)地区为例 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2009.
- [24] 巨天珍, 师贺雄, 王彦, 葛建团, 张斌才, 林郁, 李磊. 基于 OMI 卫星遥感数据的兰州市 SO₂ 空间分布分析. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 154-157.
- [25] 陈长和, 黄建国, 任阵海, 彭贤安. 兰州西固工业区夏季光化学烟雾污染的气象条件. 环境科学学报, 1986, 6(3): 334-342.
- [26] Levelt P F, Van Den Oord G H J, Dobber M R, Malkki A, Visser H, De Vries J, Stammes P, Lundell J O V, Saari H. The ozone monitoring instrument. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1093-1101.
- [27] Morris G A, Komhyr W D, Hirokawa J, Flynn J, Lefer B, Krotkov N, Ngan F. Balloon sounding technique for measuring SO₂ plumes. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(8): 1318-1330.
- [28] Curci G, Palmer P I, Kurosu T P, Chance K, Visconti G. Estimating European volatile organic compound emissions using satellite observations of formaldehyde from the Ozone Monitoring Instrument. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(23): 11501-11517.
- [29] Wenig M O, Cede A M, Bucsela E J, Celarier E A, Boersma K F, Veefkind J P, Brinksma E J, Gleason J F, Herman J R. Validation of OMI tropospheric NO₂ column densities using direct-Sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D16): D16S45.
- [30] 赵敬国, 王式功, 王嘉媛, 闭建荣, 史晋森, 王天河, 张天宇. 兰州市空气污染与气象条件关系分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 491-496, 503-503.
- [31] 赵敬国, 王式功, 张天宇, 余世旺, 胡钰玲, 朱哲, 尚可政. 兰州市大气重污染气象成因分析. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1547-1555.

- [32] 曹洪法. 我国大气污染及其对植物的影响. 生态学报, 1990, 10(1): 7-12.
- [33] 郭微. 基于遥感的浙江省大气 SO₂ 时空动态与下垫面关系研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2010.
- [34] 张德强, 褚国伟, 余清发, 刘世忠, 陆耀东, 胡羨聪, 薛克娜, 孔国辉. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 336-340.
- [35] 刘佩琪, 邓志华, 陈奇伯. 城市园林对大气颗粒物的消减与大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度变化. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 13-18.
- [36] 黄会一, 张有标, 张春兴, 王育英. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究. 生态学报, 1981, 1(4): 335-344.
- [37] 文璐. 绿化植物对二氧化硫吸收能力及其生理特性分析. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 141-146, 152-152.
- [38] 郝吉明, 王丽涛, 李林, 胡京南, 余学春. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, 35(S1): 115-122.
- [39] 张江峪, 巨天珍, 陈雪萍, 刘宏庆, 裴洁, 咸龙, 王培玉. 宁夏近 10 年甲醛柱浓度时空分布及其影响因素. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1214-1222.
- [40] 王爽, 巨天珍, 咸龙, 谢顺涛, 赵欣鑫, 张斌才. 京津冀对流层甲醛的时空演变特征及其影响因素. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1297-1305.
- [41] 谢顺涛, 巨天珍, 张惠娥. 基于 OMI 数据的兰州地区对流层甲醛时空变化研究. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4253-4261.
- [42] 魏伟, 邵蕾, 郭美琪. 长江中游城市群工业二氧化硫排放的时空演化分析. 环境保护, 2018, 46(9): 58-62.