

引用格式: Kang Chongyang, Zhao Jun, Song Guofu, *et al.* Spatial Distribution of Atmospheric Boundary Layer SO₂ in Monsoon Region of China based on OMI/OMPS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 233-244. [康重阳, 赵军, 宋国富, 等. 基于 OMI/OMPS 中国季风区大气边界层 SO₂ 时空格局分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 233-244.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0233

基于 OMI/OMPS 中国季风区大气边界层 SO₂ 时空格局分析

康重阳^{1,2}, 赵 军¹, 宋国富³, 包山虎⁴

(1. 西北师范大学 地理与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 陇东学院 历史与地理学院, 甘肃 庆阳 745000;

3. 西藏自治区生态环境遥感监测中心, 西藏 拉萨 850000;

4. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 为研究季风对大气边界层 SO₂ 变化的影响, 利用 2005~2014 年 OMI SO₂、2015~2017 年 OMPS NMSO₂ 遥感数据, 选取中国季风区为研究对象, 分析大气边界层 SO₂ 时空分布特征, 并选取 4 座典型城市, 通过相关性分析和 HYSPLIT 后向轨迹模拟。结果表明: 中国季风区 PBL SO₂ 空间上呈现异质性, 冬、夏季风变迁对于季风区大气边界层 SO₂ 柱浓度变化影响明显; 温度和气压是影响大气边界层 SO₂ 柱浓度的主要气象因子, 其次是地域性气象条件; 冬季气流对日 SO₂ 柱浓度升高影响较大, 四川盆地及来自印度半岛、孟加拉湾的西南气流对重庆市 SO₂ 柱浓度升高效果显著, 银川市 SO₂ 受蒙古高原偏北气流及天山北部西北气流影响, 天津市和杭州市受华北平原及蒙古高原地区气流的作用。

关键词: SO₂ 柱浓度; 季风区; HYSPLIT 模型; 气流

中图分类号: TP79 **文献标志码:** **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0233-12

1 引言

我国地处亚欧大陆东部, 西部有高耸的青藏高原, 东部和东南部濒临太平洋, 西南接近印度洋^[1], 特殊的地理位置使得我国大部分区域盛行季风气候: 冬季盛行来自蒙古高原的干冷冬季风, 夏季盛行来自印度洋和太平洋的暖湿夏季风以及同时我国幅员广阔, 冬、夏季风到达各地区的时间有先后之别, 冬、夏季风的强、弱、进、退, 导致季风区诸多气象要素的季节性变化, 如降水、温度、大气湿度、云量、风力风向和逆温层高度等, 这些气象要素均会影响到大气边界层(PBL) SO₂ 的干、湿沉降、光化学反应等。

SO₂ 是大气中最常见的污染物之一, 是雾霾的

主要前体物, 大气中的 SO₂ 经过气相和液相反应, 形成硫酸盐气溶胶^[2], 硫酸盐气溶胶是大气气溶胶中重要的组成部分, 尤其是直径小于 2.5 μm 的气溶胶^[3]。有研究表明^[4-5], 胡焕庸线(黑河—腾冲线)以东、长江以北地区 AOD 远高于全国平均水平; 同时, SO₂ 也是酸雨的主要前体物, 据中国 2012~2014 年中国环境状况公报, 我国酸雨区主要集中分布在长江沿线及以南地区, 酸雨区分别占全国总面积的 12.2%、10.6%, 其中最主要的阴离子为 SO₄²⁻, SO₂ 是大气中硫酸根粒子的主要来源, 湿沉降导致长江以南出现大面积酸雨区。

季风对生物迁移、文化形成、地域性建筑构造、气象要素变化方面已有较多的研究, 如包云轩等^[6-10]

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2019-12-20

作者简介: 康重阳(1983—), 男, 甘肃宁县人, 硕士研究生, 主要从事环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: kang06115@163.com。

通讯作者: 赵 军(1963—), 男, 山西河津人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn。

分别研究了季风气候对我国飞虱迁徙、文化形成、建筑设计、雨水同位素和降水等方面的影响。PBL SO₂浓度时空变化研究,Calkins等^[11]应用OMI数据,研究了2006~2015年气象条件对华北平原地区SO₂的影响;赵军等^[12]利用OMISO₂数据分析了兰州及周边地区SO₂时空变化;康重阳等^[13-14]使用OMISO₂、OMPS NMSO₂数据分别在全球范围内、中国季风区和非季风区SO₂时空变化特征及影响因素方面进行了研究;肖钟湧等^[15-17]利用OMISO₂数据,分析了中国区域、渤海海域、渭河流域上空大气SO₂浓度时空变化特征。SO₂季节性变化已被众多学者验证,然而却较少有学者从季风对SO₂影响方面进行研究。季风对大气中SO₂的影响主要体现在两个方面,一方面为物理过程,主要体现在季风对大气中SO₂的扩散作用,风力大小、风向以及地形对SO₂的扩散能力有差别,在扩散过程中,大气中SO₂分子数总量不发生变化,浓度得到稀释;另一方面是化学过程,季风变化影响了降水、大气湿度和云量等气象要素,进而影响到日照时数、地表接受太阳辐射等,这些要素对大气中SO₂氧化、沉降、光化学反应等有很大程度影响。PBL SO₂伴随大气湿度、降水和光照等变化,化学性质也发生变化,尤其在季风区表现更为突出。

本文使用2005~2014年OMISO₂L2V003及2015~2017年OMPS NMSO₂L2 V1.1逐日产品,以0.125°网格进行普通克里金插值,完成中国季风区年均、月均SO₂柱浓度空间分布图,揭示中国季风区PBL SO₂柱浓度空间分布特征及变异格局,参照中国气候区划^[18],将季风区划分温带季风区、亚热带季风区、热带季风区、高原山地季风区,分别判别季风对不同区域SO₂的影响程度,在受季风影响较大的两个区域:温带季风区和亚热带季风区,分别选择两个代表性城市,与2012~2014年气象因子进行敏感因子相关性分析,并使用HYSPLIT在线模型,对2012年1月,日SO₂柱浓度大于月均值的对应日期,进行56 h^[19]后向轨迹模拟,判别造成4座典型城市日SO₂柱浓度大于月均值的主要气流来源,这对于提升大气质量预测、评价具有重要的意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源

臭氧监测仪(OMI)传感器是荷兰、芬兰与NASA联合研发,于2004年7月15日搭载在EOS/

Aura卫星上发射升空,是一颗太阳同步近极轨卫星,OMI传感器光谱范围为270~500 nm,波普分辨率为0.5 nm,是近紫外—可见光波段的高光谱传感器,星下点空间分辨率为13 km×24 km,视场角114°,扫描宽幅2 600 km,实现1d全球覆盖,用于大气成分探测,例如臭氧、气溶胶、云、NO₂、SO₂、HCHO、BrO、OCIO及其他衡量气体^[20-28]。

臭氧成像探测仪(OMPS)作为OMI传感器的继承者,搭载于美国新一代对地观测卫星Suomi NPP之上,2011年8月28日发射,2012年1月开始采集数据,赤道过境时间为13:30,比前代传感器OMI早10~15 min。主要目的是用于监测全球范围内平流层O₃分布及变化,延续了1970年对全球平流层O₃时空分布与变化特征以来长期监测,同时也监测如SO₂、NO₂、气溶胶光学厚度、云量等地球物理量^[25]。

SO₂来源于NASA官网(<http://mirador.gsfc.nasa.gov>)GES DISC数据库,OMISO₂数据提供4种不同高度SO₂垂直柱密度,分别是PBL、TRL、TRM、STL,分别对应大气柱重心高度为0.9、3、8以及18 km,OMPS传感器NMSO₂产品提供5种不同高度的SO₂垂直柱密度,较OMI多出TRU SO₂数据,对应大气柱重心高度13 km。单位为DU(1DU = 2.69·10¹⁶ mol/cm²);本文使用OMISO₂L2V003_PBL、OMPS_NPP NMSO₂ PCA L2数据,该数据反映的是对应空气柱高度低于2 km,重心高度0.9 km的PBL SO₂柱浓度^[20-28],主要用于近地表大气SO₂污染研究。数据经PCA反演算法产生,借助VISAN、Python软件,选用官方推荐的云层参数0.3为阈值^[20-28],对研究区域数据进行过滤,剔除云对数据的影响,获取SO₂垂直柱浓度。

气象数据来源于中国气象数据中心,国家气象科学数据共享服务平台的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),该数据包含了中国824个基准、基本气象站1951年1月以来本站的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风速风向和日照时数等要素。

行政区界线数据获取自国家基础地理信息中心1:100万全国基础地理数据库和基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站(<http://bzdt.nasg.gov.cn/>),下载审图号为GS(2016)2885号标准地图制作,底图无修改。

2.2 研究方法

2.2.1 反演算法

新一代PBL SO₂反演算法基于主成分分析法,

以无SO₂污染地区测量得到的O₃吸收、地表反射率、仪器噪声、Ring效应等相关结果为基础,结合辐射传输模拟的SO₂雅可比矩阵建立线性反演关系式,直接获得大气中SO₂垂直柱总量。PCA的标准瞬时视场(IFOV)标准差(sigma),在无污染的太平洋赤道地区约为0.5DU,为前代算法——波段残差算法(BRD)的一半;其次,使用雅可比行列式代替了先前算法中的空气质量系数(AMF),在相同条件下,提高了数据的准确性^[20-28]。

2.2.2 数据提取及处理

(1)逐日数据剔除及提取:剔除云参数(Cloud-Fraction) > 0.3、太阳高度角 > 70°、SO₂柱浓度 < 0 DU的数据,提取中国季风区域内经、纬度及对应的SO₂柱浓度。

(2)对产生的数据转成点矢量文件,并进行Albers投影转换,再以0.125°网格做普通克里金插值。

(3)在时间尺度上,获取PBL SO₂年均柱总量和月均柱浓度,并在空间上完成SO₂年均、月均空间分布图。

2.2.3 HYSPLIT 模型

即拉格朗日混合单粒子轨道模型,由美国NOAA空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发,主要用于计算气团轨迹、大气污染物输送扩散轨迹的专业模型,有单机版和在线模拟两种形式。本文使用HYSPLIT在线后向轨迹模拟,用于完成代表城市SO₂来源及产生日高SO₂柱浓度的原因分析^[29-30]。

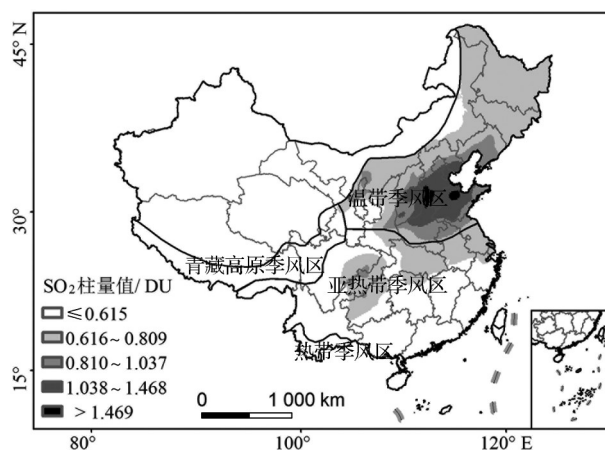
2.2.4 研究区概况

本文借鉴姜江等^[31]和邓先瑞^[7]季风区和非季风区分界线作为标准,选取“大兴安岭—阴山—贺兰山—巴颜喀拉山—冈底斯山”一线作为分界线,该线东部为季风区,是本文的研究区域。我国季风强盛,季风区面积广阔,冬季大陆季风盛行,气候寒冷而干燥;夏季海洋季风占据主导地位,气候湿热多雨,季风强弱影响气温、降水量等诸多因素。

3 结果与分析

3.1 季风区PBL SO₂空间分布

季风区PBL SO₂空间分布以长江为界,一级柱浓度区域主要分布在长江以南地区,二级及以上柱浓度区域分布在长江以北,四、五级柱浓度区域集中在华北地区。参考康重阳等的^[13]分级标准,中国季风区PBL SO₂空间分布,如图1,五级柱浓度区域主要分布在山东北部和河北西南部,SO₂年均柱浓



审图号:GS(2016)2885

图1 中国季风区PBL SO₂空间分布

Fig.1 The spatial distribution of SO₂ in china's monsoon region

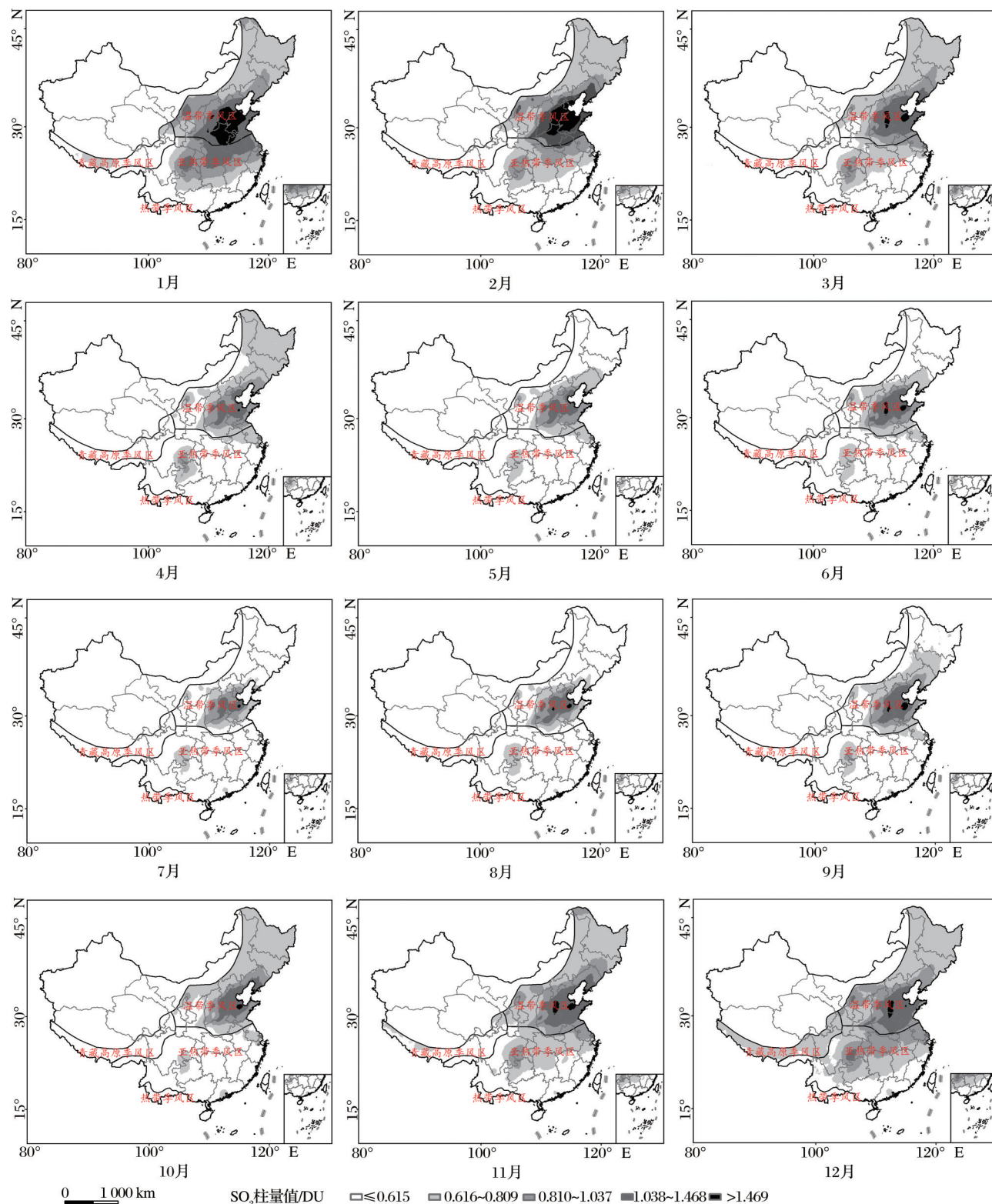
度 > 1.468 DU,约占季风区总栅格数的1%,河北省西南地区的邯郸、邢台市钢铁产业和电力产业发达,造成巨大的SO₂排放^[32],其次靠近太行山脉,较强的逆温层导致SO₂扩散困难,在该区域形成高柱浓度区域;山东北部的济南、淄博、潍坊石油化工产业为主,莱芜钢铁产业发达,高排放是导致该区域形成五级SO₂柱浓度的主要原因。四级区域环绕五级柱浓度区域,涵盖华北平原大部、山西中部及东部,华北平原地区人口密集,产业结构不合理,巨大电力消耗及高耗能产业集聚,导致煤炭、石化能源消耗量增加,大气污染加剧^[33];山西是煤炭之乡,煤炭储量大,分布广,高耗能造成东部地区SO₂柱浓度偏高,山西中部受低地形影响,不利于SO₂扩散,形成四级SO₂柱浓度区域;一级柱浓度区域包含长江以南、藏南、横断山脉及甘肃南部区域,长江以南绝大部分地区,李翰等^[34]研究发现,西南地区年平均相对湿度为66.44%,SO₂易溶于水,较高的相对湿度和降水利于SO₂的沉降发生,形成一级柱浓度区域。

3.2 不同季风区PBL SO₂年内空间变化

PBL SO₂易受温度、降水、太阳辐射和相对湿度等气象要素影响。高由禧等^[35-37]研究表明,季风强弱会对降水分布、强度、日照时长、风力有一定影响。季风变化会对季风区众多气象要素产生影响,从而影响到大气中SO₂寿命、沉降速度及浓度值,所以有必要将我国季风区进行分区研究,本文借鉴周淑贞^[18]研究成果,将季风区划分为温带季风区、亚热带季风区、热带季风区和高原山地季风区,分别进行研究。

夏季风利于温带季风区 SO_2 柱浓度的降低,一、二、三级区域栅格数随季风变化明显,四、五级柱浓度区域栅格数基本不受夏季风影响。如图2和图3,

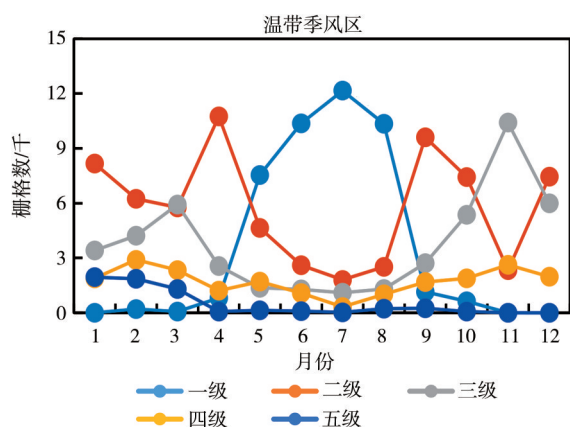
一级 SO_2 柱浓度栅格数于7月份达到最大,约占温带季风区总栅格数的80%,6、8月份次之,约为68.6%,四、五级柱浓度区域主要集中在华北平原、



审图号:GS(2016)2885

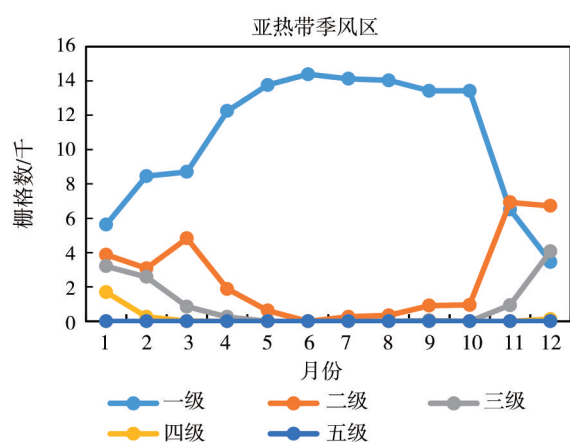
图2 2005~2017年 SO_2 年内变化趋势图

Fig.2 The spatial variation of average SO_2 in monsoon region from 2005 to 2017

图3 温带季风区SO₂分级栅格数年内变化Fig.3 Raster number variation of different PBL SO₂ in temperate monsoon region

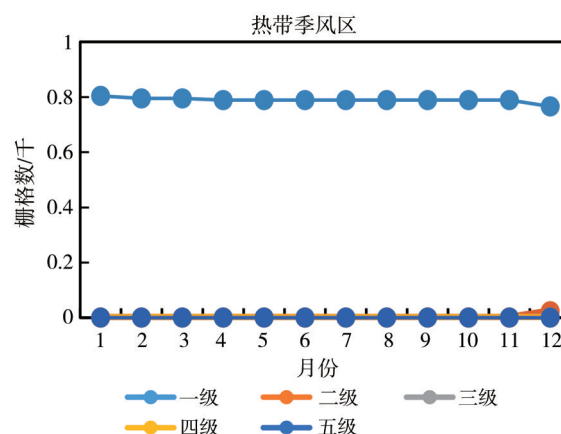
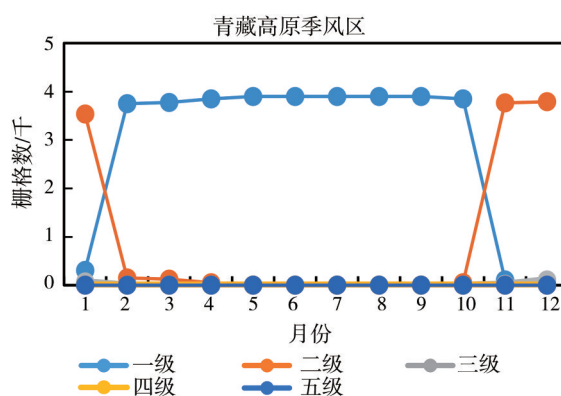
宁夏北部地区。温带季风区降水主要集中在春、夏季,约占全年总降水的70%以上^[38],降水集中、夏季高温有利于SO₂沉降发生,同时夏季风从地势较低的海面吹向陆地,热空气上升,抬升逆温层,减弱逆温层强度,有利于SO₂扩散。1月、2月和12月,四、五级柱浓度区域约占温带季风区的20%,于2月份达到最大,高达30%。冬季平均气温较低,降水稀少,日照时间较短不利于大气中SO₂的沉降发生,冬季盛行西北风,华北平原北部内蒙古高原,西部黄土高原,地势较高,不利于地势低洼的华北平原地区SO₂扩散。

冬季风导致亚热带季风区SO₂柱浓度的升高。如图2和图4,1月、11月和12月,一级柱浓度区域约

图4 亚热带季风区SO₂分级栅格数年内变化Fig.4 Raster number variation of different PBL SO₂ in subtropical monsoon region

占亚热带季风区的50%以下,12月最小,约为亚热带季风区的20%;5~9月一级柱浓度区域基本涵盖整个亚热带季风区,约为亚热带季风区的95%以

上。三、四级柱浓度区域主要出现在冬季,集中在重庆市的西南部。冬季受蒙古高原及华北平

图5 热带季风区SO₂分级栅格数年内变化Fig.5 Raster number variation of different PBL SO₂ in tropical monsoon region图6 青藏高原季风区SO₂分级栅格数年内变化Fig.6 Raster number variation of different PBL SO₂ in Tibetan plateau monsoon region

原风力扩散、中纬环流圈地面指向低纬风速风量的影响,导致该区域出现大面积的二、三级柱浓度区域,距离华北平原距离近的区域SO₂柱浓度偏高。

热带季风区SO₂柱浓度区域不受季风影响,一级柱浓度区域占据整个热带季风区,年内无变化。云南、海南省第三产业在国民经济中比重较高,约40%以上^[40-41],第二产业所占比重较小,SO₂排放量较低;同时,热带季风区年平均气温20℃~28℃,年降水量1500~2000mm,气候特点冬季温暖湿润,夏季炎热潮湿^[38],利于大气中SO₂的沉降发生。

青藏高原季风区位于青藏高原南部,SO₂柱浓度年内变化季节性特征明显,一、二级柱浓度区域相互变化,1月、11月和12月出现基本涵盖整个区域的二级柱浓度区域,年内其他月份均为一级柱浓度区域,青藏高原地势高耸,人类活动较少涉足,人

为 SO_2 排放偏低,同时,较高的地势减少了扩散对该区域 PBL SO_2 柱浓度的影响。

3.3 季风区 PBL SO_2 敏感因子分析

东亚地区主要受来自南亚的西南气流、西太平洋副高南侧的东南气流以及中高纬度的偏北气流的影响^[36],这 3 支气流受气压强弱变化,季节性影响我国季风区。由于温带季风区、亚热带季风区所处的地理位置不同,气温、降水、所受季风及强度不同,直接或间接地影响到大气中 SO_2 浓度、干、湿沉降及扩散等。热带季风区、青藏高原季风区受季风影响较小,因此本文在温带季风区内选取天津市和银川市,在亚热带季风区选取重庆市和杭州市,用以分析不同季风区大气 SO_2 随季风变化趋势及气象因素的相关性。

如表 1 所示,除天津市外,月均气温与大气边界层月均 SO_2 柱浓度高度负相关,通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验。温带季风区冬季 SO_2 柱浓度明显偏高的主要原因:①冬季气候寒冷干燥,采暖排放导致 PBL SO_2 明显升高,其次冬季大气逆温层高度低、强度高于其他季节,不利于大气中 SO_2 的扩散和沉降;②我国位于北半球,冬季太阳照射我国的时间较短,不利于 SO_2 光化学反应的发生,延长了大气中 SO_2 的寿命,产生 SO_2 的堆积现象。天津市是我国 SO_2 主要的污染区,据统计,2012 年华北地区 SO_2 平均排放强度为 $67.81 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$,天津市排放强度最大^[42],工业、经济发达,人口密集,大气条件复杂,PBL SO_2 与温度相关性较低,温度对于天津市 SO_2 的影响较其他 3 座城市略差。月均气压与 PBL 月均 SO_2 柱浓度呈现高度正相关,银川、重庆、杭州的相关系数均通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验,相关系数方面,杭州市>重庆>银川>天津,天津市 SO_2 本地排放明显高于其他 3 座城市。

温带季风区的银川市,光化学反应是 SO_2 柱浓度降低的有效途径。银川市月均降水、月均日照时数、月均风速、月均极大风速与 PBL SO_2 柱浓度呈现负相关,月均日照时数与 SO_2 柱浓度相关性更高,光化学反应成为银川市 SO_2 柱浓度的降低的主要方式。如表 1,2005~2017 年银川市年均日照时数为 $8.19 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,而天津市为 $7.38 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,每年 4~9 月份,银川市的日照时数高达 9 h 以上,日照时数长有利于大气中 SO_2 光化学反应的发生。

同处温带季风区,同纬度的天津市,干沉降对 SO_2 的降低效果明显高于其他气象要素。如表 1 所

表 1 典型城市 SO_2 与月均气象数据的相关性

Table 1 The correlation between SO_2 and monthly average meteorological data in typical cities

气象数据	温带季风区		亚热带季风区	
	天津	银川	重庆	杭州
月均相对湿度	-0.35	-0.022	0.034	0.086
月均温度	-0.43	-0.67*	-0.69*	-0.71*
月均气压	0.42	0.57*	0.64*	0.72*
月均降水	-0.37	-0.31	-0.58*	-0.23
月均平均风速	0.09	-0.19	-0.15	-0.2
月均最大风速	0.09	-0.25	-0.19	-0.42
月均极大风速	0.065	-0.31	-0.18	-0.43
月均日照时数	-0.07	-0.59*	-0.29	-0.37

注:*代表相关系数通过 $\alpha=0.001$ 显著性水平检验

示,天津市受大气结构影响, SO_2 柱浓度与月均气压正相关,与月均相对湿度、月均温、月均降水呈现负相关,但均未构成明显的相关性,一方面,受本地及相近的唐山等地 SO_2 排放影响较大;另一方面,冬季受大陆冷高压控制,大气层结稳定,近地表风速较小, SO_2 扩散缓慢,产生 SO_2 堆积现象,导致天津市 SO_2 柱浓度偏高;相对湿度与 SO_2 柱浓度呈负相关,较其他气象要素相关程度高,复杂的大气结构有利于天津市 SO_2 干沉降的发生。

亚热带季风区西部的重庆市,湿沉降对 SO_2 的降低较其他 3 座城市明显。如表 1 所示,重庆市月均降水对 SO_2 柱浓度的降低较风速、日照时数明显偏高,并通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验。2005~2017 年重庆市年平均降水量为 $1\,265.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;雨季时长方面,重庆市受东南季风影响较长^[43],冬季降水少,所占比例不足年降水量 7%,其他季节降水较多。从 4 月份开始进入雨季,10 月份结束,雨季长达 7 个月,降水强度,重庆市以小雨、中雨、大于为主,小雨的年平均降水日数最多,占年平均总降水日数的 32.9%^[44],频繁小雨对大气中 SO_2 的湿沉降效果显著。

同处亚热带季风区的杭州市,最大、极大风速对 SO_2 柱浓度降低较温度以外的气象条件偏高,湿沉降较同纬度的重庆市明显偏低。杭州市 SO_2 柱浓度的升高,主要受冬季风扩散影响,冬季是杭州市 SO_2 柱浓度最高的季节,而杭州市的降水主要集中在 5~9 月,约占全年总降水量的 57.2%^[45],11~2 月降水量偏少,平均 66 mm,冬季降水较少,对大气中 SO_2 柱浓度的降低效果有限;月均极大风速为 $7.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较同纬度的重庆市高出 $4.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,春、夏季最大,来自于太平洋的东南季风带来暖湿气

流,有利于逆温层的抬升、强度的减弱,PBL SO₂扩散高于其他季节。

3.4 典型城市后向轨迹分析

为研究不同高度大气气团对典型城市 PBL SO₂ 的传输和扩散状况,及 SO₂ 在大气中的移动轨迹,据 Krotkov 等^[23] 研究中的 PBL SO₂ 剖面图,PBL SO₂ 主要分布在垂直于地表 1 000 m 的范围内,本文分别在距地面 100、500 和 1 000 m 高度,使用 HYSPLIT 在线模型,对 2012 年 1 月典型城市日 SO₂ 柱浓度大于月均值的对应日期做 56 h 后向轨迹模拟,并选择具有代表性的日期,展示后向轨迹路线。

长江以北温带季风区的天津市受华北平原和天津市东部的唐山市 SO₂ 贡献明显,银川市受西北和偏北气流影响。天津市 2012 年 1 月共计 8 d SO₂ 柱浓度超过月均 SO₂ 柱浓度,分别对这 8 d 逐日做后向轨迹模拟,如表 2 和图 7,来自内蒙古高原及华北

平原的气流在 1 000、500 m 的高度上增加天津市 SO₂ 柱浓度,100 m 的高度上,东北、西北及来自华北平原的气流增加天津市 SO₂ 柱浓度。华北平原 SO₂ 随风扩散,及西北气流经渤海湾北部进入天津市,是天津市日 SO₂ 柱浓度升高的主要原因;银川市 2012 年 1 月共计 12 d SO₂ 柱浓度超过月均 SO₂ 柱浓度,如表 3 和图 8,西北、偏北气流经内蒙古乌海市,在 3 种不同高度对银川市 SO₂ 柱浓度升高明显,偏西气流在 100 m 的高度上对银川市 SO₂ 柱浓度的贡献度高。

表 2 天津市 2012 年 1 月份后向轨迹气流
Table 2 Trajectory airflow of Tianjin in January 2012

距地高度/m	蒙古高原	东北	华北平原
1 000	5	0	3
500	4	1	3
100	4	2	2

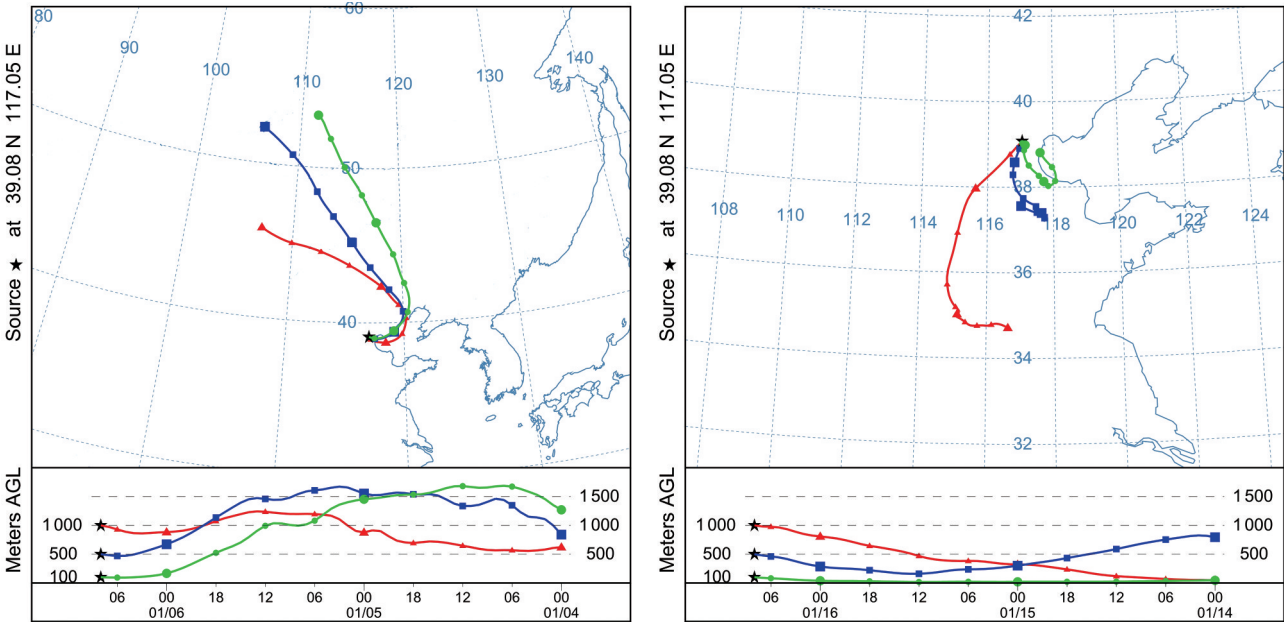


图 7 天津市 1 月 6 日和 16 日后向轨迹图
Fig.7 Back trajectory of Tianjin at 6th and 16th in January

表 3 银川市 2012 年 1 月份后向轨迹气流
Table 3 Trajectory airflow of Yinchuan in January 2012

距地高度/m	西北	偏北	偏西
1 000	9	2	1
500	9	1	2
100	7	1	4

长江以南亚热带季风区的重庆市受四川盆地内部及印度半岛、孟加拉湾西南气流影响较大,杭州市受蒙古高原及华北平原 SO₂ 扩散贡献。重庆市 2012 年 1 月份共计有 6 d,日 SO₂ 柱浓度大于月均

值,如表 4 和图 9,主要来源于四川盆地内部,四川盆地以石化燃料为主的能源结构,导致本地 SO₂ 排放较高;特殊的地理位置及地形,导致该地区大气层结稳定、逆温静风现象,SO₂ 扩散困难;其次,冬季来

表 4 重庆市 2012 年 1 月份后向轨迹气流
Table 4 Trajectory airflow of Chongqing in January 2012

距地高度/m	西南	四川盆地内部	其他
1 000	2	3	2
500	2	3	2
100	2	5	0

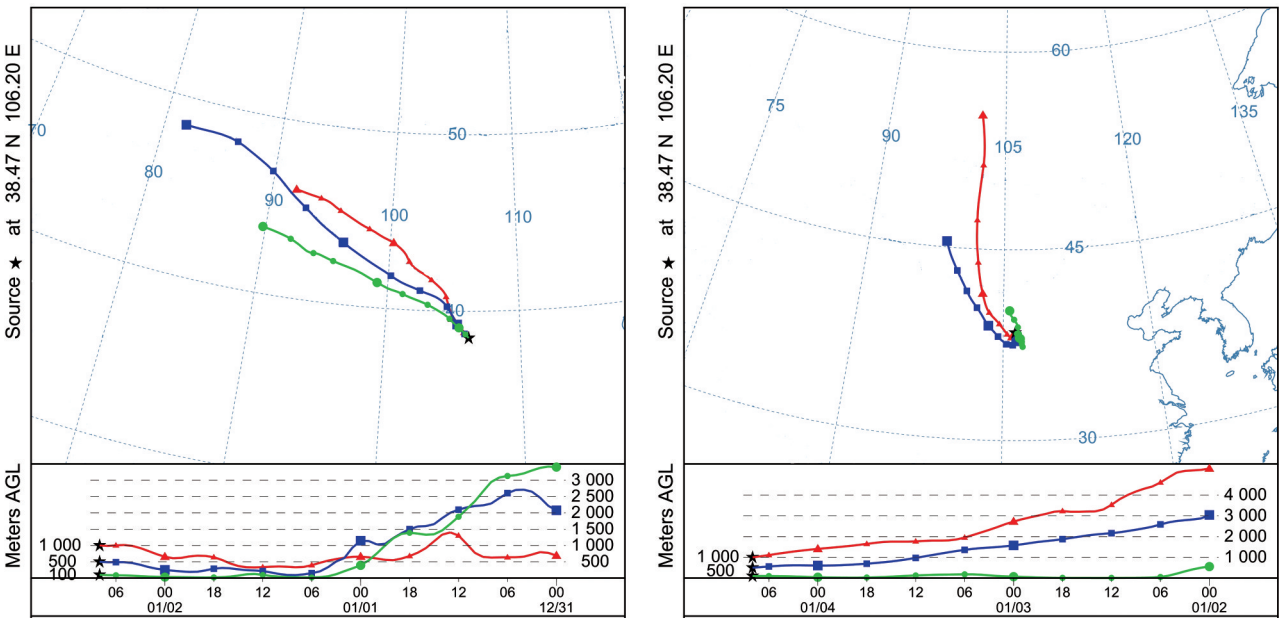


图 8 银川市 1 月 2 日和 4 日后向轨迹图

Fig.8 Back trajectory of Yinchuan at 2th and 4th in January

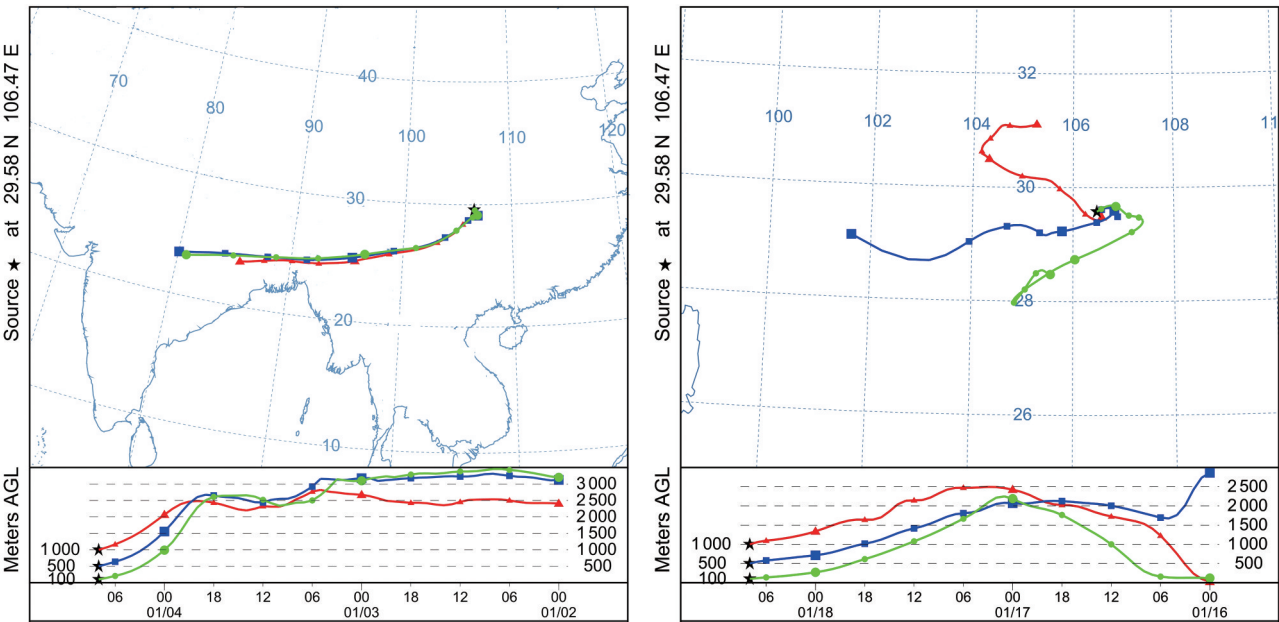


图 9 重庆市 2012 年 1 月 4 日和 18 日后向轨迹图

Fig.9 Back trajectory of Chongqing at 4th and 18th in January

自印度和孟加拉湾的西南暖气流翻越青藏高原后,在四川盆地下沉,导致四川盆地逆温层高度下降, SO_2 扩散更加困难,造成日 SO_2 柱浓度大于月均值,伴随南亚经济的快速发展,未来南亚工业排放 SO_2 将会对我国西南地区产生较大程度的影响。杭州市 2012 年 1 月份,共计有 8 d 日 SO_2 柱浓度大于月均值,如表 5 和图 10,来自蒙古高原及华北平原的偏北气流携带 SO_2 导致杭州市日 SO_2 柱浓度升高,不同垂直高度上对杭州 SO_2 的贡献有所不同,1 000 m 的

表 5 杭州市 2012 年 1 月 9 天后向轨迹气流方向

Table 5 Trajectory airflow of Hangzhou in January 2012

距地高度/m	华北平原	蒙古高原	其他
1 000	3	4	1
500	5	3	0
100	7	1	0

高度上,来自蒙古高原的气流是主因,蒙古高原地势高, SO_2 伴随强气流南下、下沉,空气柱密度增加, SO_2 柱浓度升高;500、100 m 的高度上,华北平原的

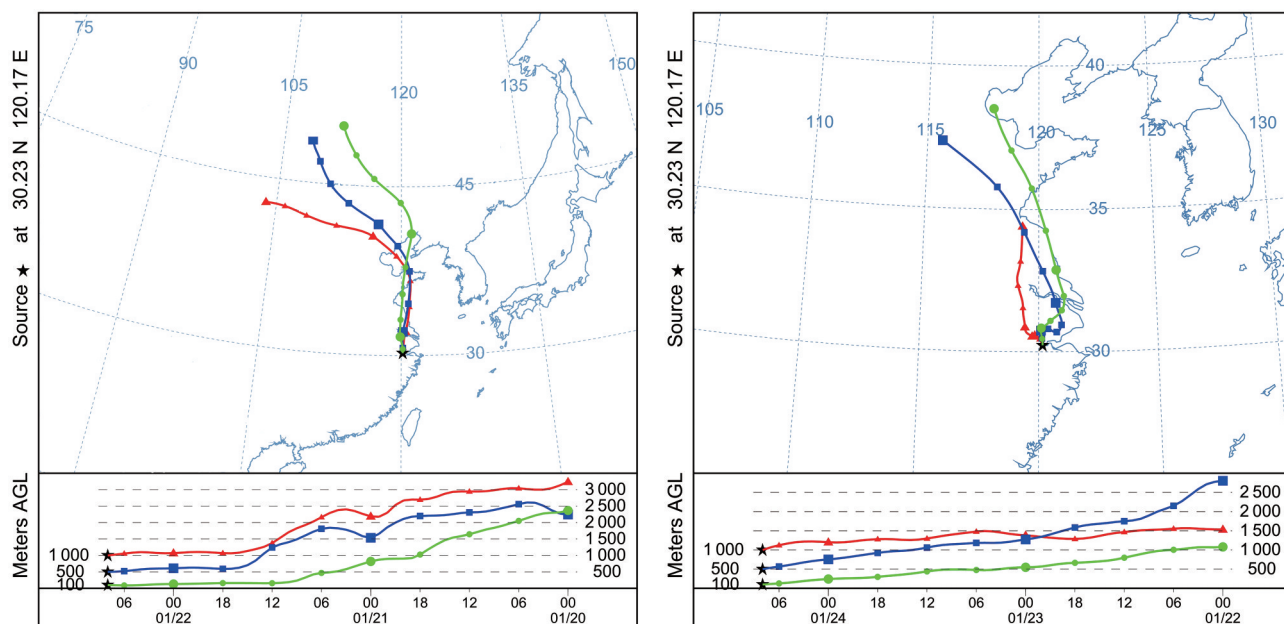


图 10 杭州市 1 月 22 日和 24 日后向轨迹图

Fig.10 Back trajectory of Hangzhou at 22th and 24th in January

SO₂扩散是主因,华北平原是我国 SO₂高浓度区域, SO₂随风向南扩散,导致杭州市日 SO₂柱浓度升高。

4 结 语

(1)中国季风区 SO₂分布呈现空间异质性。以长江为界,长江以北地区 SO₂柱浓度高于长江以南地区,五级柱浓度区域主要集中在山东北部和河北南部地区,一级柱浓度区域分布在长江以南;亚热带季风区、青藏高原季风区 SO₂柱浓度分区面积变化受冬季风影响,一、二级柱浓度面积相互转化明显;夏季风对温带季风区 SO₂柱浓度降低效果显著,一级区域面积变化随夏季风进、退同步。

(2)温度和气压是影响我国季风区 PBL SO₂柱浓度的两个主要因素,其次是地域气象条件。代表性城市中除天津市外,其余城市 PBL SO₂柱浓度与气温呈现高度负相关,而与气压高度正相关,通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验。冬季采暖排放,较低逆温层下 SO₂堆积,及随气流远程输送是我国季风区 SO₂柱浓度较高的主要原因;亚热带季风区的重庆市,湿沉降是 SO₂柱浓度降低的有效途径,杭州市 SO₂以外外部输送为主。温带季风区的银川市,光化学反应有效降低 SO₂浓度;天津市大气结构复杂,未与气象要素呈现高度相关性,干沉降效果明显。

(3)气流对日 SO₂升高影响方面,银川市受偏北、西北气流影响,天津市和杭州市以华北平原和蒙古高原气流输入为主。一方面冷气流下沉导致

地势低洼处的逆温层增强,SO₂扩散困难,另一方面,空气中携带上风向处 SO₂伴随冷空气下沉,增加空气柱中 SO₂密度。重庆市主要受四川盆地本地 SO₂排放扩散,来自印度、孟加拉湾的西南暖湿气流翻越青藏高原,绝热下沉,导致逆温层高度降低,强度增强,SO₂扩散困难。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Baozhen, Song Zhengshan. Research on the Atmospheric Circulation in East Asia in Summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1979, 3(3): 219-226. [朱抱真, 宋正山. 关于夏季东亚大气环流的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3): 219-226.]
- [2] Takemura T, Nozawa T, Emori S, *et al.* Simulation of Climate Response to Aerosol Direct and Indirect Effects with Aerosol Transport-radiation Model[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(D2): 169-190.
- [3] Han Xiaokun, Guo Qingjun, Fu Pingqing, *et al.* Sulfur Isotopic Composition of Sulfate in Atmospheric Aerosols in Beijing and Its Tracing Research[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(Sup.1): 376. [韩晓昆, 郭庆军, 傅平青, 等. 北京大气气溶胶中硫酸盐的硫同位素组成及其示踪研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(增刊 1): 376.]
- [4] Zhang Lianglin, Pan Jinghu, Zhang Dahong. Spatio-temporal Distribution Characteristics of Aerosol Optical Depths in China based on MODIS Data [J]. Journal of Environmental Science, 2018, 38(11): 211-219. [张亮林, 潘竞虎, 张大弘. 基于 MODIS 数据的中国气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 211-219.]

- [5] Wang Yinpei, Yu Xin, Xie Guangqi. Spatial Distribution and Temporal Variation of Aerosol Optical Depth over China in the Past 15 Years [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2): 426-434. [王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 中国近15年气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(2): 426-434.]
- [6] Bao Yunxuan, Huang Jinying, Xie Xiaojin, *et al.* Influence of Monsoon's Advancing, Retreating and Conversion on Migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 33(16): 4864-4877. [包云轩, 黄金颖, 谢晓金, 等. 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4864-4877.]
- [7] Deng Xianrui. Formation of Monsoon and the Monsoon Culture in the Yangtze Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5): 419-422. [邓先瑞. 季风形成与长江流域的季风文化[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(5): 419-422.]
- [8] Wei Keqin, Lin Ruifen. The Influence of Monsoon Climate on the Isotopic Composition of Precipitation in China [J]. *Geochemistry*, 1994, 23(1): 33-41. [卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 1994, 23(1): 33-41.]
- [9] Zhu Zhenglu, Dong Chenggen, Zheng Junming, *et al.* The Winter Wind Impact to the Building Structure at Various Height on Xiamen Area [J]. *Fujian Construction Science and Technology*, 2015(6): 16-18. [朱正路, 董成根, 郑俊明, 等. 厦门地区冬季风对建筑不同高度的影响[J]. *福建建设科技*, 2015(6): 16-18.]
- [10] Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. Moisture Transport in Asian Summer Monsoon Region and Its Relationship with Summer Precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(1): 59-70. [周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. *气象学报*, 2008, 66(1): 59-70.]
- [11] Calkins C, Ge C, Wang J, *et al.* Effects of Meteorological Conditions on Sulfur Dioxide Air Pollution in the North China Plain during Winters of 2006~2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 147(10): 296-309.
- [12] Zhao Jun, Zhang Bincai, Fan Jieping, *et al.* The Analysis of SO₂ Value Changes in the Atmospheric Boundary Layer over Lanzhou and Surrounding Areas based on OMI Products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 808-813. [赵军, 张斌才, 樊洁平, 等. 基于OMI数据的兰州及附近地区PBL SO₂量值变化初步分析[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(6): 808-813.]
- [13] Kang Chongyang, Zhao Jun, Song Guofu, *et al.* Study on Special Pattern of SO₂ in China's Atmospheric Boundary Layer based on OMI Data [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2): 435-443. [康重阳, 赵军, 宋国富, 等. 基于OMI数据中国PBL SO₂空间格局[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(2): 435-443.]
- [14] Kang Chongyang, Zhao Jun, Song Guofu. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Global Atmospheric Boundary Layer SO₂ based on Remote Sensing Data from 2005 to 2017 [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4033-4042. [康重阳, 赵军, 宋国富. 2005~2017年全球大气边界层SO₂时空变化[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4033-4042.]
- [15] Xiao Zhongyong, Zhao Bowei, Chen Yawen, *et al.* Trend of Temporal and Spatial Variation of Planetary Boundary Layer SO₂ over China from 2005 to 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(10): 23-29. [肖钟湧, 赵伯维, 陈雅文, 等. 2005~2016年中国大气边界层SO₂的时空变化趋势[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(10): 23-29.]
- [16] Jiang Jie, Zha Yong, Chen Yuqiang, *et al.* Study on the Concentration and Transport Characteristics of Sulfur Dioxide over the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanica Sinica*, 2011, 33(6): 73-78. [姜杰, 查勇, 陈晓强, 等. 渤海大气二氧化硫浓度分布及陆源输送研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 73-78.]
- [17] Wei Wei, Wang Lijuan, Jin Zehui, *et al.* The Spatio-temporal Distribution Characteristics of Atmospheric SO₂ in Fenwei Plain based on OMI Data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12): 102-109. [卫玮, 王黎娟, 靳泽辉, 等. 基于OMI数据汾渭平原大气SO₂时空分布特征分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(12): 102-109.]
- [18] Zhou Shuzhen. *Meteorology and Climatology Third Edition* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. [周淑贞. *气象学与气候学(第三版)* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.]
- [19] Lee C, Martin R V, Van Donkelaar A, *et al.* SO₂ Emissions and Lifetimes: Estimates from Inverse Modeling Using In-situ and Global, Space-based (SCIAMACHY and OMI) Observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D6): 161-165.
- [20] Krotkov N A, Carn S A, Krueger A J, *et al.* Band Residual Difference Algorithm for Retrieval of SO₂ from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1259-1266.
- [21] Yang K, Krotkov N A, Krueger A J, *et al.* Retrieval of Large Volcanic SO₂ Columns from the Aura Ozone Monitoring Instrument: Comparison and Limitations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D24): 1-14.
- [22] Li C, Joiner J, Krotkov N A, *et al.* A Fast and Sensitive New Satellite SO₂ Retrieval Algorithm based on Principal Component Analysis: Application to the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6314-6318.
- [23] Krotkov N A, McClure B, Dickerson R R, *et al.* Validation of SO₂ Retrievals from the Ozone Monitoring Instrument over NE China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D16): 16-40.
- [24] Theys N, De Smedt I, Gent J, *et al.* Sulfur Dioxide Vertical Column DOAS Retrievals from the Ozone Monitoring Instrument: Global Observations and Comparison to Ground-based and Satellite Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(6): 2470-2491.
- [25] Zhang Y, Li C, Krotkov N A, *et al.* Continuation of Long-term Global SO₂ Pollution Monitoring from OMI to OMPS

- [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(4): 1-21.
- [26] Sangeethaa S K, Sivakumar V, Gebreslasie M. Long-range Transport of SO₂ over South Africa: A Case Study of the Calbuco Volcanic Rupture in April 2015[J]. Atmospheric Environment 2018, 185: 78-90.
- [27] Krotkov N A, McIlinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI Observations of Regional SO₂ and NO₂ Pollution Changes from 2005 to 2015[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(7): 4605-4629.
- [28] Lu Z, Streets D G, Foy B D, *et al.* OMI Observations of Interannual Increase in SO₂ Emissions from Indian Coal-fired Power Plants during 2005~2012[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(24): 3993-4000.
- [29] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 Modeling System[C]//National Oceanic & Atmospheric Administration Technical Memorandum ERL 1997: 197-199.
- [30] Draxler R R, Hess G D. An Overview of the HYSPLIT_4 Modelling System for Trajectories, Dispersion and Deposition[J], Australian Meteorological Magazine, 1998, 47: 295-308.
- [31] Jiang Jiang, Jiang Darbang, Lin Yihua. Monsoon Area and Precipitation over China for 1961~2009[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(4): 722-730.[姜江, 姜大膀, 林一骅. 1961~2009年中国季风区范围和季风降水变化[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 722-730.]
- [32] Zhao Bin. The Research of Air Pollution Source Emission for the North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2007.[赵斌. 华北地区大气污染源排放状况研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.]
- [33] Zhang Peng. Analysis on the Characteristics and Correlation of Population Distribution and Industrial Distribution in Beijing, Tianjin and Hebei [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017.[张鹏. 京津冀人口分布与产业布局的特征及关联分析[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.]
- [34] Li Han, Han Lin, Jia Zhijun, *et al.* the Changes of the Average Relative Humidity in Southwest China[J]. Plateau Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 42-47.[李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42-47.]
- [35] Gao Youxi. Several Issues of the East Asian Monsoon [M]. Beijing: Science Press, 1962.[高由禧. 东亚季风的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1962.]
- [36] Qiu Baojian. Division of Climate Zone in the Monsoon Region of Western China[J]. Tropical Geography, 1982, 2(4): 1-7.[丘宝剑. 我国西部季风区的气候带划分[J]. 热带地理, 1982, 2(4): 1-7.]
- [37] Qiao Yunting, Chen Lieting, Zhang Qingyun. The Definition of East Asian Monsoon Indices and Their Relationship to Climate in China[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(1): 69-82.[乔云亭, 陈烈庭, 张庆云. 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 69-82.]
- [38] Chen Jian, Lu Dinghuang. Division of Monsoon Climate Regions in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1981(4): 1-8.[陈健, 陆鼎煌. 中国季风气候区域的划分[J]. 北京林业大学学报, 1981(4): 1-8.]
- [39] Wu Guanghe. Physical Geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.[伍光和. 自然地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [40] Zhu Yingqiu, Yang Xia, Li Jing, *et al.* An analysis of the Relationship between Tourism Expansion and Tertiary Industry Growth of Yunnan Province: A Research based on Data Analysis from 2000 to 2014 [J]. Tourism Research, 2016, 8(5): 36-42.[朱颖秋, 杨霞, 李婧, 等. 旅游业发展与第三产业增长关系研究——基于云南省2000~2014年的数据分析[J]. 旅游研究, 2016, 8(5): 36-42.]
- [41] Zhu Jianfang. Research on the Status Quo of the Development of the Third Industry in Hainan Province [J]. Economic Forum, 2017, 560(3): 47-50.[朱建房. 海南省第三产业发展现状研究[J]. 经济论坛, 2017, 560(3): 47-50.]
- [42] Zhang Yinlong. The Analysis of Industrial Structure and Zone Joint Prevention Under the Air Pollution in North China[D]. Zhengzhou: Journal of Henan University, 2015.[张银龙. 华北地区大气污染下的产业结构分析及区域联防机制研究[D]. 郑州: 河南大学, 2015.]
- [43] Chen Zhong, Chen Huafang, Wang Jianli, *et al.* Temporal and Spatial Distribution of Precipitation in Chongqing [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2003, 28(4): 644-649.[陈忠, 陈华芳, 王建力, 等. 重庆市降水量的时空变化[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, 28(4): 644-649.]
- [44] Zhang Qianqian, Li Yan, Wang Zhifu, Dong Xinning. Precipitation Characteristics in Chongqing during 1961~2012[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2016, 8(3): 215-225.[张倩倩, 李艳, 王志福, 董新宁. 1961~2012年重庆市的降水特征分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(3): 215-225.]
- [45] Lu Xiaoming, Lu Baohong, Deng Shan. Variation and Forecast Prediction in Hangzhou over the Past 63 Years [J]. Water Power, 2015, 41(11): 17-20.[陆小明, 陆宝宏, 邓山. 近63年杭州市降水特征分析及趋势预测[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 17-20.]

Spatial Distribution of Atmospheric Boundary Layer SO₂ in Monsoon Region of China based on OMI/OMPS

Kang Chongyang^{1,2}, Zhao Jun¹, Song Guofu³, Bao Shanhu⁴

(1. College of geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. History and Geography department, Long Dong College, Qingyang, 745000, China;

3. Tibet Autonomous Region Remote Sensing Monitoring Center, Lhasa 850000, China;

4. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: The monsoon has obvious influences on biological migration, cultural formation, regional architectural structure, and changes in meteorological elements, but lacks study on the impact of the PBL SO₂. In this paper, we make a study on the temporal and spatial distribution characteristics of the PBL SO₂ in Chinese monsoon region by OMI SO₂ from 2005 to 2014 and OMPS NMSO₂ from 2015 to 2017 in order to identify the influence of monsoon on PBL SO₂ in different regions. Four typical cities were selected to do correlation analysis, and HYSPLIT model was run for backward Trajectory simulation by the corresponding date of daily SO₂ columns are greater than the monthly average in January 2012. The results show that china's PBL SO₂ is spatial heterogeneity; the change of winter and summer monsoon has obvious influence on the PBL SO₂, temperature and pressure are the main factors affecting the concentration of the PBL SO₂. Regional meteorological conditions have large differences in the dry and wet deposition, photochemical reaction and wind diffusion of SO₂; the winter airflow has a greater impact on the increase of the SO₂, internal discharge in the Sichuan Basin, and southwesterly airflow which comes from the Indian Peninsula and the Bay of Bengal has a significant effect on the increase of SO₂ in Chongqing. Yinchuan is affected by the airflow that comes from the Mongolian Plateau or the Tianshan Mountains; Tianjin and Hangzhou are influenced by airflow come from the North China Plain or the Mongolian Plateau.

Key words: SO₂ column; Monsoon region; HYSPLIT model; Airflow