

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2024.01.007

基于 OMI 及地面监测的贵州省污染气体浓度 时空差异研究

谷晓平¹, 李光一^{1*}, 陈远航², 廖瑶¹

(1 贵州省生态气象和卫星遥感中心, 贵州 贵阳 550002;

2 贵州楚云环保科技有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 贵州省属于典型的喀斯特山区, 受地势和气候影响, 省内不同区域污染气体浓度具有明显的时空差异。因此, 利用交互式数据语言 (IDL) + 遥感图像处理平台 ENVI、地理信息系统软件 ArcGIS 等, 基于臭氧层监测仪 (OMI) 的 L3 V003 柱浓度数据和地面环境监测站数据, 从时间和空间两个方面在区域尺度上评估分析了贵州省 3 种主要污染气体的浓度变化差异和时空演变特征。结果表明: (1) 2019 年, 贵州省二氧化氮 (NO₂)、二氧化硫 (SO₂)、臭氧 (O₃) 柱浓度较 2005 年呈下降趋势, 且两种方法监测的 NO₂、SO₂ 季节特征均表现为“秋冬高、春夏低”, 受太阳辐射和天气过程影响, 两种方法监测的 O₃ 均表现为“春夏高、秋冬低”的季节特征; (2) 对比分析表明, 遥感方法反演的 NO₂ 柱浓度极大值和 SO₂ 柱浓度极小值较地面监测结果在时间上存在滞后性, 但滞后时间较短, 没有出现跨季节差异, 总体上空间差异性大于时间差异性, 且 SO₂ 夏季空间差异性大于冬季; (3) 自然界平流层中含有大量臭氧, 且夏季贵州雷雨天气较多, 在天气过程发生时, 高层氧气极易被大量分解并生成 O₃, 由于大气垂直输送较为活跃, 使得平流层 O₃ 稳定性降低, 对近地面浓度影响较大, 因此遥感反演的 O₃ 浓度与地面监测结果在时间和空间上均有明显差异性。

关键词: 臭氧层监测仪; 地面监测; 污染气体; 时空差异; 遥感

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2024)01-085-013

Temporal-spatial difference of pollutant gases in Guizhou Province based on OMI and ground data

GU Xiaoping¹, LI Guangyi^{1*}, CHEN Yuanhang², LIAO Yao¹

(1 Guizhou Ecological Meteorology & Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China;

2 Guizhou Chuyun Environmental Protection Technology Co., Ltd, Guiyang 550081, China)

Abstract: Guizhou Province of China belongs to a typical karst mountainous area, and due to the influence of terrain and climate, there are obvious spatial and temporal differences in the concentration of polluting gases in different regions of the province. Therefore, based on L3 V003 column amount data from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and the ground environmental monitoring station data, the spatio-temporal differences in the concentration changes and the spatiotemporal evolution characteristics of the three main pollutants in Guizhou Province were analyzed and evaluated at the regional scale, using

基金项目: 贵州省高层次人才(百层次人才)(黔科合平台人才[2016]4026), 山地生态气象遥感应用系统 (FY-3(03)-AS-12.13), 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般273, 黔科合基础-ZK[2021]一般193)

作者简介: 谷晓平(1968-), 女, 贵州贵阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态遥感方面的研究。E-mail: 16114331@qq.com

收稿日期: 2022-05-11; **修改日期:** 2022-07-20

*通信作者。E-mail: 849157067@qq.com

interactive data language (IDL) plus the remote sensing image processing platform ENVI, geographic information system software ArcGIS, etc. The results show that: (1) The NO_2 , SO_2 and O_3 column amount in Guizhou Province in 2019 show a downward trend compared to 2005. The seasonal characteristics of NO_2 and SO_2 concentration monitored by the two methods both show high in autumn and winter, and low in spring and summer. While due to the influence of solar radiation and weather processes, O_3 concentration monitored by the two methods show the same seasonal characteristics of "high in spring and summer, low in autumn and winter". (2) Both the maximum NO_2 column amount and the minimum SO_2 column amount monitored by remote sensing have a lag in time compared to ground monitoring results, but the lag time is short and there is no cross seasonal difference. Overall, their spatial differences are greater than temporal differences, and the spatial differences of SO_2 concentration in summer are greater than in winter. (3) The stratosphere contains a lot of ozone in nature, and there are more thunderstorms in Guizhou Province in summer, so when the weather process occurs, oxygen in the high atmosphere is easily decomposed to generate O_3 in large quantities. Due to the active vertical atmospheric transport, the stability of stratospheric O_3 is reduced, which has a greater impact on the near-surface O_3 concentration. Therefore, the O_3 column amount monitored by remote sensing and the ground monitoring results are significantly different in time and space.

Key words: ozone monitoring instrument; ground monitoring; polluted gas; spatio-temporal difference; remote sensing

0 引言

中国用三十年时间走完了发达国家一百年走过的工业化道路,在经济发展的同时也带来了环境污染问题。其中,大气污染物主要有 NO_2 、 SO_2 、 O_3 等。 NO_2 不仅是重要的污染气体之一,还是对流层臭氧和二次无机气溶胶的重要前体物^[1-3]。 SO_2 作为酸雨的主要成分,对生态环境可造成严重污染。 O_3 作为大气中不可缺少的气体,其总量和时空分布变化也会直接影响人类生存环境,同时对生态环境造成负面影响。

受传统观测资料的数据精度限制,诸多学者基于臭氧监测仪 (OMI) 长时间观测序列产品对污染气体开展了时空分析^[4,5]。巨天珍等^[6]通过 OMI 数据反演了对流层 SO_2 柱浓度,并结合遥感图像处理技术和地理信息系统分析方法,重点分析了兰州市采暖期和非采暖期的 SO_2 空间分布情况,发现两个时期近地面的 SO_2 高值区域并不相同。李锐等^[7]利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和 OMI 研究了 NO_2 、 SO_2 柱积分浓度对气溶胶光学厚度 (AOD) 的影响,其结果对大气污染模式评估提供了参考。郭云飞等^[8]基于 OMI 观测数据分析了我国三大城市群对流层内 O_3 的时空分布特征及其演变趋势。张兴赢等^[9]在分析大气成分遥感探测应用中提到 OMI 能够提供更加精细的大气痕量气体含量分布,除可以监测大气 O_3 含量外,同时还能提供 NO_2 、 SO_2 及气溶胶的信息。

贵州作为典型的喀斯特地貌区,具有“天无三日晴,地无三尺平”之说,其独特的地理位置和气候特点使得污染气体浓度具有区域差异。因此,本文基于 OMI 长时间序列监测数据对贵州主要污染气体 (即 NO_2 、 SO_2 、 O_3) 开展了柱浓度时空特征分析,并与地面监测数据进行比对,综合分析贵州主要污染气体的时空演变特征。

1 数据与方法

污染气体数据来源于搭载在EOS-Aura卫星上OMI传感器观测的数据,下载地址为<https://disc.gsfc.nasa.gov/>。OMI^[10]由荷兰、芬兰、NASA合作制造,通过观测地球大气和地表的后向散色辐射来达到观测目的,其有可见光(350~500 nm)、紫外-1(207~314 nm)、紫外-2(306~380 nm)三个通道,能接收到波长范围为270~500 nm的电磁波,平均光谱分辨率为0.5 nm,轨道扫描宽度为2600 km,空间分辨率为13 km × 24 km,时间分辨率1天,过贵州省境内的时间大约为北京时间13:45。

OMI有Level-0、Level-1、Level-2、Level-3共4个等级的产品数据。本研究使用的为Level-3的污染气体数据,即:OMNO2d(NO₂)、OMSO2e(SO₂)和OMDOAO3e(O₃),数据格式为HDF-EOS。基于交互式数据语言(IDL)+遥感图像处理平台ENVI技术将原始数据影像通过投影转换、大气校正等批处理后提取NO₂、SO₂和O₃的柱浓度值、经纬度,且在提取柱浓度时剔除异常值和无效值,再利用地理位置查找表进行几何校正,将柱浓度值与经纬度对应后利用地理信息系统软件ArcGIS可视化^[11],从而对三种污染气体分别进行年、季、月的时空分析。

为进一步探究近地面污染气体月浓度变化趋势,基于2015—2019年贵州省9个中心城市(贵阳、六盘水、遵义、毕节、安顺、铜仁、黔东南、黔南、黔西南)共计33个国控环境空气质量自动监测站的逐月数据,计算了2015—2019年间9个城市的NO₂、SO₂和O₃月均浓度,从时间和空间两个维度分析3种污染气体的浓度变化差异,综合评估贵州主要污染气体的时空演变特征。

2 污染气体时空分布特征

2.1 年际变化

根据OMI L3 V003产品分析统计得到贵州省NO₂、SO₂、O₃时空分布图,如图1所示。由图1(a)可知,全省NO₂柱浓度总体变化呈现出先升后降的趋势特征,主要在0.10~0.32 DU(Dobson unit,多布森单位)之间。2010年,全省NO₂柱浓度较2005年呈现上升趋势,柱浓度为0.20~0.32 DU的区域明显增加,主要出现在遵义、毕节和六盘水等地,特别是遵义局地NO₂柱浓度达到全省最高。2015年,全省NO₂柱浓度总体降低,各城市基本不超过0.2 DU,但遵义地区NO₂柱浓度仍然偏高。由于2015—2019年间全省积极开展大气污染防治,全省NO₂得到有效控制,至2019年全省NO₂柱浓度最大值不超过0.26 DU。

由[图1(b)]可知,2005年和2010年,贵州省SO₂柱浓度总体偏高,高浓度区域主要集中在西部、北部和中部,特别是遵义、贵阳、毕节的SO₂柱浓度高达0.85 DU以上。至2015年,全省SO₂柱浓度大幅降低,最大值低于0.65 DU,特别是遵义地区降低明显。结合2019年来看,全省SO₂柱浓度基本保持较低水平,且2015年与2019年年际差异不大。

从2005、2010、2015、2019年贵州省O₃柱浓度的四年变化来看[图1(c)],其值主要维持在250~290 DU之间,时间上呈先升后降的变化特征,空间上表现为“北高南低”“东高西低”的分布特征。其中,2010年全省O₃柱浓度较2005年有所上升,黔北地区较为明显,而黔西南地区O₃柱浓度变化较小。至2015年,全省O₃柱浓度总体高于2010年。此后,O₃柱浓度又开始逐渐降低,至2019年,O₃柱浓度总量显著低于2015年,特别是六盘水、毕节、黔西南等西部一带O₃柱浓度明显降低,且2019年全省O₃柱浓度主要在250~280 DU之

间,空间差异较小。

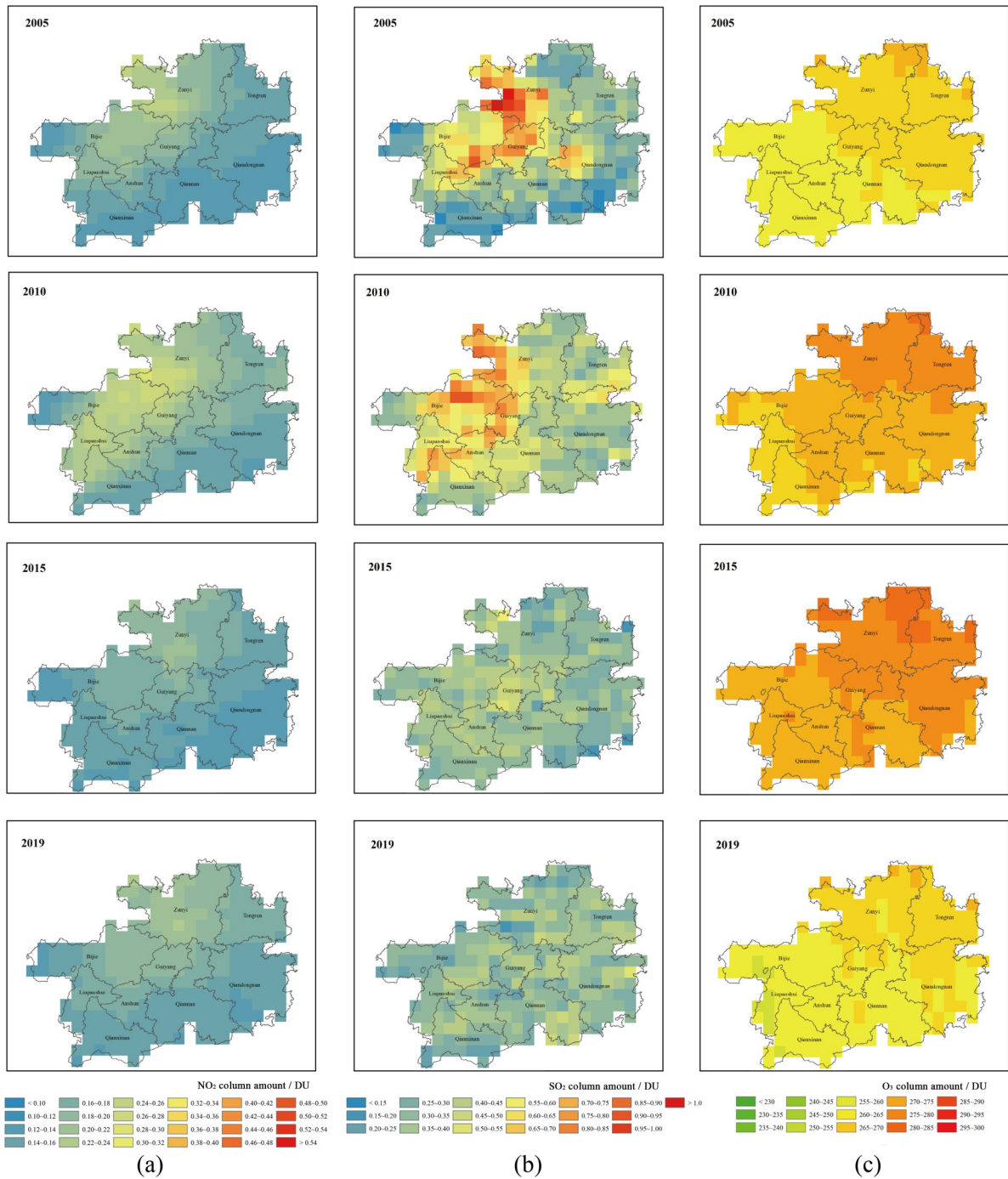


图 1 基于 OMI 的贵州省 2005、2010、2015、2019 年 NO_2 (a)、 SO_2 (b)、 O_3 (c) 柱浓度年分布特征

Fig. 1 Annual distribution characteristics of NO_2 (a), SO_2 (b), O_3 (c) column amount based on OMI in Guizhou, China, in 2005, 2010, 2015 and 2019

2.2 季节分布特征

通过计算 2005、2010、2015、2019 年贵州省 NO_2 、 SO_2 、 O_3 柱浓度季节平均值, 得到其季节分布特征, 如图 2 所示。其中, NO_2 柱浓度在春、夏、秋三季空间分布差异不大, 基本保持较低水平, 但在冬季空间分布差异明

显, 以遵义西部最为显著 [图 2 (a)]。SO₂ 柱浓度表现为“春夏低、秋冬高”的季节特征 [图 2 (b)], 夏季在春季基础上有所降低后, 随着天气变冷, 温度降低, 至冬季全省柱浓度有所回升, 空间上也均表现为“西北高、东南低”的分布特征, 但总体上四季变化率较小。O₃ 柱浓度季节特征表现为“春夏高、秋冬低” [图 2 (c)], 且春夏季与秋冬季之间 O₃ 柱浓度范围差异较大, 但春季与夏季之间 O₃ 柱浓度变化较小, 两季维持在 270~290 DU 之间, 空间分布四季均表现为“东北高、西南低”; 秋季, O₃ 柱浓度快速下降后, 在冬季达到最低, 最大值不超过 265 DU, 明显低于春夏两季。

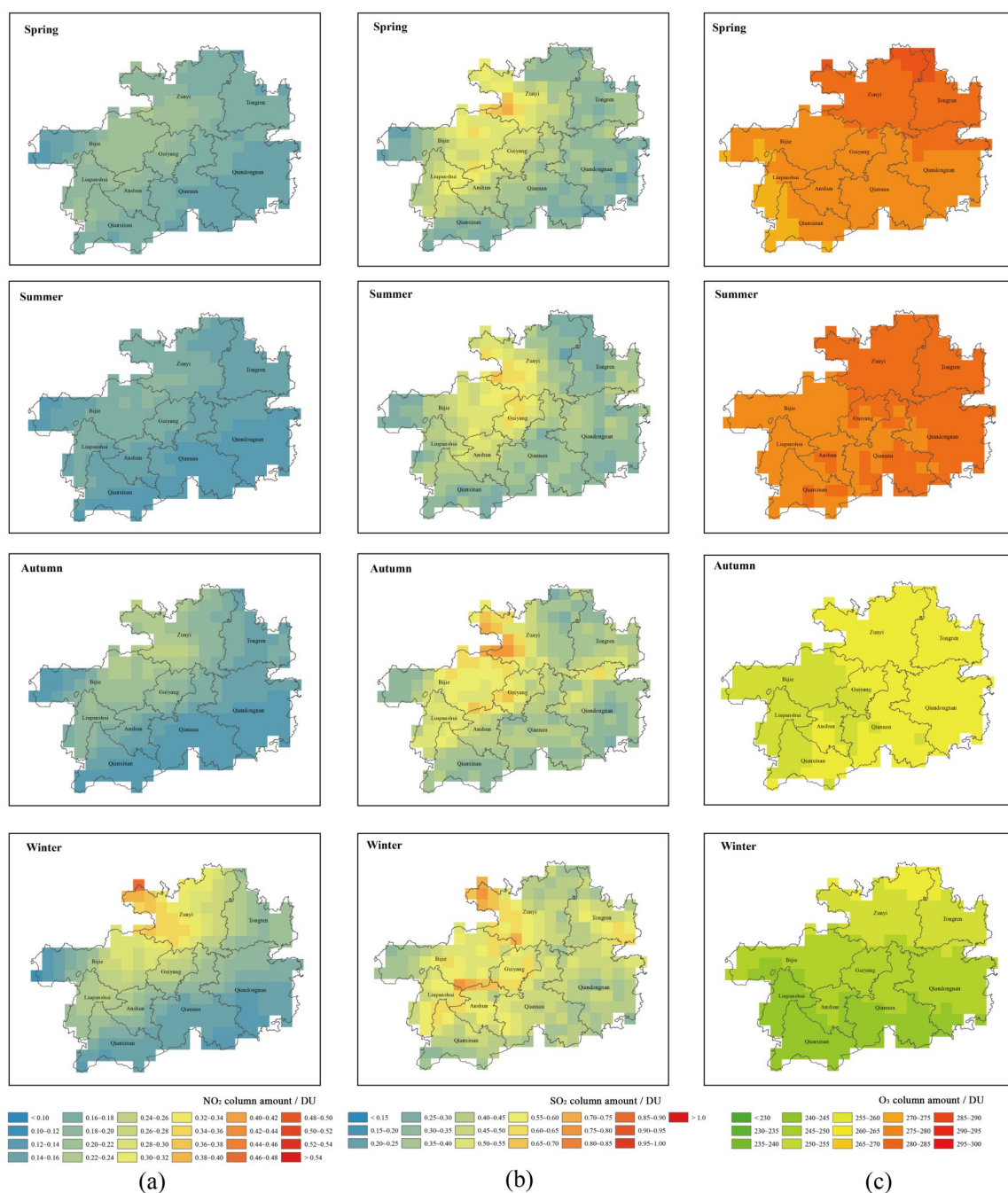


图 2 基于 OMI 的贵州省 NO₂ (a)、SO₂ (b)、O₃ (c) 柱浓度季分布特征

Fig. 2 Seasonal distribution characteristics of NO₂ (a), SO₂ (b), O₃ (c) column amount based on OMI in Guizhou, China

2.3 月分布特征及与地面数据比对

2.3.1 NO₂

通过计算 2005、2010、2015、2019 年逐月 OMI 数据反演的 NO₂ 柱浓度均值, 可得到 1—12 月 NO₂ 柱浓度的时空分布, 如图 3 所示。由图可知, 12 月到次年 2 月是 NO₂ 污染高发期, 高值区主要集中在靠近四川盆地的贵州北部及西北部, 以遵义最为显著。其中, 1 月 NO₂ 柱浓度最高, 其次是 2 月, 这与冬季采暖期间大量化石燃料燃烧量增加以及准静止锋的影响有关; 3—11 月全省 NO₂ 柱浓度呈现明显下降趋势, 其中 7—9 月遵义和毕节地区 NO₂ 柱浓度最大值也不超过 0.26 DU, 而黔东南、黔南、黔西南全年保持低水平。

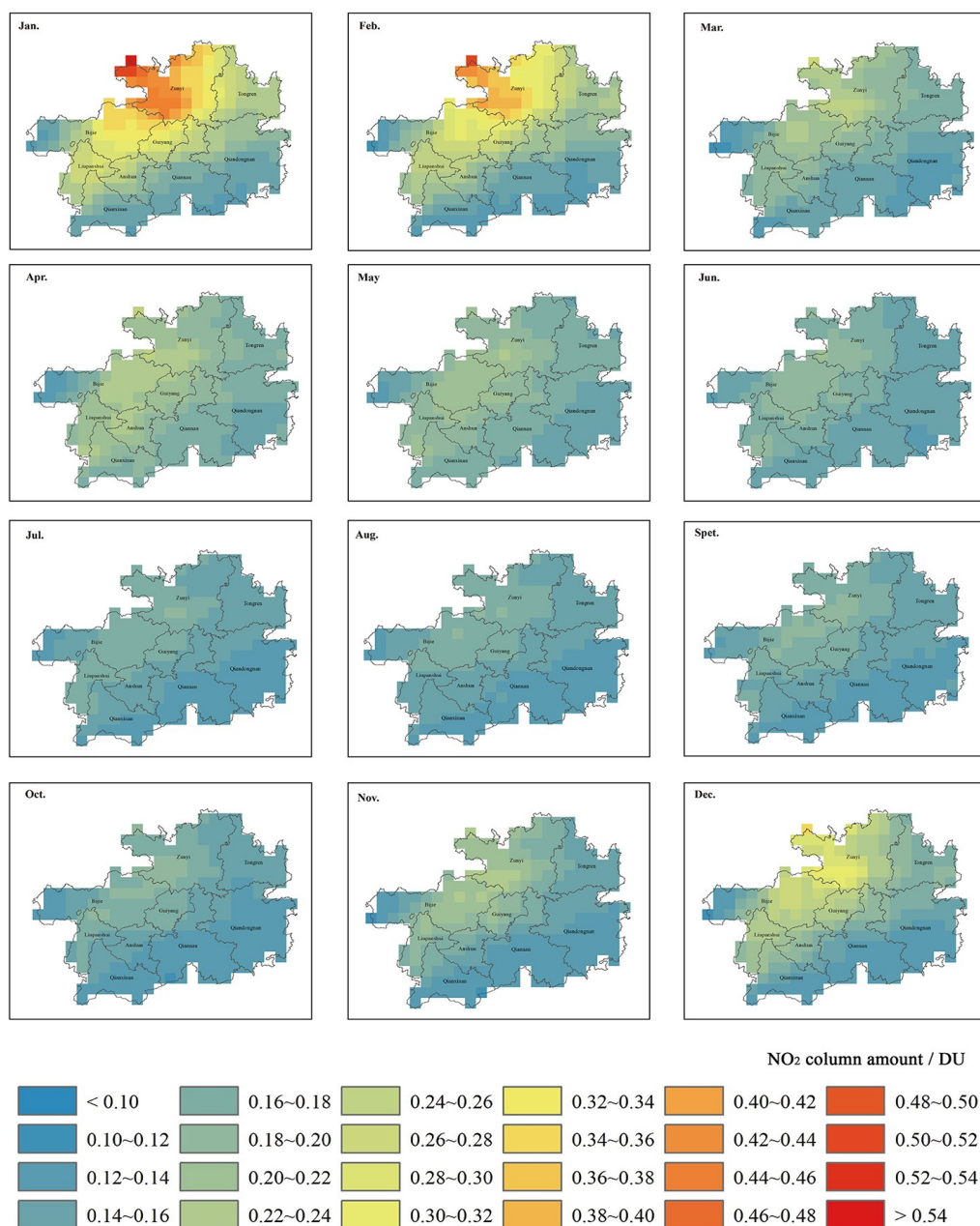


图 3 基于 OMI 的贵州省 2005、2010、2015、2019 年 NO₂ 柱浓度月均值分布特征

Fig. 3 Monthly mean distribution characteristics of NO₂ column amount in Guizhou based on OMI in the four years of 2005, 2010, 2015 and 2019

基于 2015—2019 年贵州省环境监测站的逐月数据, 计算得到 NO₂ 月均浓度分布情况, 结果如图 4 所示。NO₂ 月浓度全年呈先降后升变化趋势, 在冬季达到最高, 与 OMI 反演的 NO₂ 柱浓度时间变化特征一致。12 月到次年 3 月为 NO₂ 排放的高发期, 以遵义最为显著, 其月浓度最大值约为 35 μg/m³, 7 月全省 NO₂ 月浓度最小。从各城市 NO₂ 月浓度水平来看, 遵义、贵阳一直位居全省前 2 位, 全年均值分别为 26 μg/m³、27 μg/m³; 安顺市全年变化差异较大, 12 月 NO₂ 月浓度值虽超过 22 μg/m³, 但 7 月仅 9 μg/m³, 且月均浓度不足 15 μg/m³, 为全省最低。

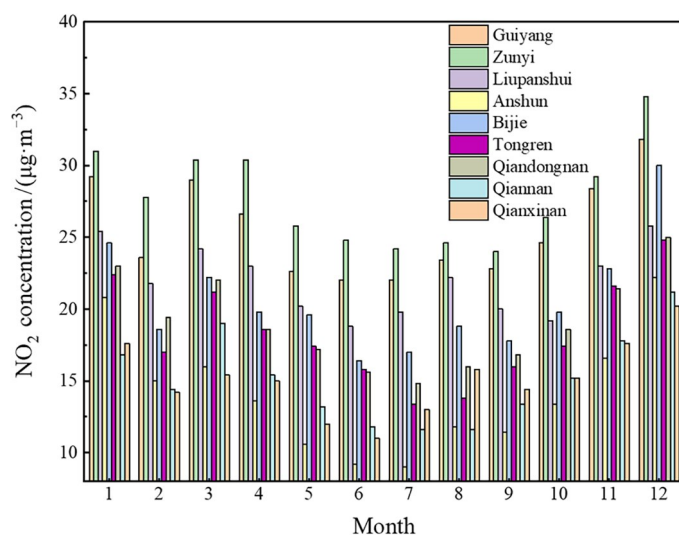


图 4 2015—2019 年间基于地面监测站的贵州省 NO₂ 月均浓度统计

Fig. 4 Monthly average concentration statistics of NO₂ in Guizhou based on ground monitoring stations from 2015 to 2019

表 1—3 给出了两种方法监测的污染气体月浓度时空差异, 其中月均浓度空间差异性中, 高浓度的两个城市按浓度由大到小排序, 低浓度的两个城市按浓度由小到大排序 (下同)。由表 1 可知, 遥感方法监测的 NO₂ 月浓度最大值出现时间较地面监测方法滞后 1 个月, 虽在不同月份, 但均在冬季。此外, 两种方法监测的 NO₂ 浓度最小值所在月份均为 7 月, 时间差异较小。从空间差异上看, 两种方法监测的 NO₂ 月浓度最大的城市保持一致, 均在遵义; 遥感反演的 NO₂ 月浓度最小的城市在黔东南, 而地面监测在安顺, 存在明显的“东-西”空间差异。因此, 遥感反演的 NO₂ 柱浓度与地面站点监测的浓度值空间差异性大于时间差异性。

表 1 两种方法监测的 NO₂ 月浓度时空差异

Table 1 Temporal and spatial differences in monthly NO₂ concentration monitored by two methods

Methods	Temporal difference		Spatial difference	
	Peak concentration month	Minimum concentration month	Cities with high monthly concentration	Cities with low monthly concentration
Remote sensing	January	July	Zunyi, Bijie	Qiandongnan, Qiannan
Ground monitoring	December	July	Zunyi, Guiyang	Anshun, Qiannan

2.3.2 SO₂

图 5 为基于 2005、2010、2015、2019 年逐月 OMI 数据反演的 SO₂ 柱浓度均值。由图可知, SO₂ 柱浓度均值较高的月份主要在 1、2、7、12 月。其中, 1、2、12 月 SO₂ 柱浓度全省总体偏高, 而 7 月由于天气系统的稳定, 不利于 SO₂ 扩散, 导致贵州省中部地区特别是贵阳城区 SO₂ 柱浓度偏高。12 月至次年 2 月, 受冬季取暖影

响,化石燃料燃烧量增加,植物光合作用减少,全省SO₂柱浓度达全年最高。8月全省SO₂柱浓度总体偏低,最高值不足0.65 DU。3—11月,黔东南和黔西南地区SO₂柱浓度均保持低值水平。



图5 基于OMI的贵州省2005、2010、2015、2019年SO₂柱浓度月均值分布特征

Fig. 5 Monthly mean distribution characteristics of SO₂ column amount in Guizhou based on OMI in the four years of 2005, 2010, 2015 and 2019

基于2015—2019年贵州省环境监测站的逐月数据,计算得到SO₂月均浓度分布情况,结果如图6所示。由图可知,12月至次年2月受冬季化石燃料等燃烧影响,SO₂月浓度值总体偏高,5—7月有所降低。9个城

市中, 安顺 SO₂ 月浓度全年维持首位, 平均每月达 21 μg/m³, 其余城市均不超过 14 μg/m³; 铜仁市 SO₂ 月浓度最高不超过 11 μg/m³, 平均每月为 9 μg/m³。

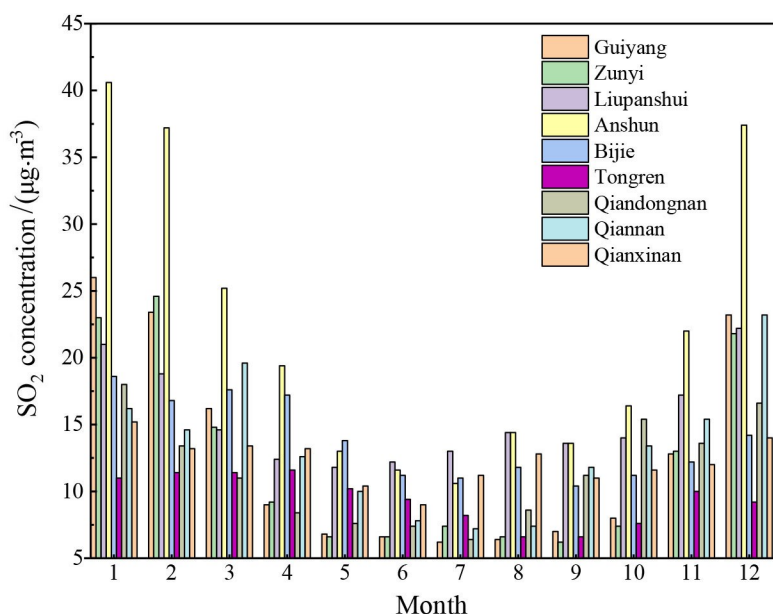


图 6 2015—2019 年间基于地面监测站的贵州省 SO₂ 月均浓度统计

Fig. 6 Monthly average concentration statistics of SO₂ in Guizhou based on ground monitoring stations from 2015 to 2019

通过图 5 与图 6 对比发现, 遥感反演的夏季 SO₂ 柱浓度与地面监测的结果差异较大。7 月贵阳及遵义西南部的 SO₂ 柱浓度达到最大值, 部分区域超过 0.9 DU, 8 月 SO₂ 柱浓度又显著降低。而地面监测的 7 月 SO₂ 浓度最大值在六盘水, 贵阳和遵义却低于全省平均, 分别只有 6 μg/m³ 和 7 μg/m³。此外, 遥感反演的 8 月 SO₂ 柱浓度为全年最低, 而遵义和贵阳相对较高, 虽同期地面监测的 SO₂ 月浓度也较低, 但遵义和贵阳总体属于低值区, 与遥感反演结果空间差异最大。冬季, 安顺、六盘水、毕节三市交界地区以及贵阳、遵义等地的 SO₂ 柱浓度较高, 且地面监测显示, 冬季安顺、贵阳、遵义、六盘水的 SO₂ 柱浓度都相对较高, 与遥感反演的空间位置差异较小。因此, 遥感反演的 SO₂ 月柱浓度与地面监测的 SO₂ 月浓度夏季空间差异性大于冬季。

由表 2 可知, 从时间分布上看, 两种方法监测的 SO₂ 月浓度均呈现“冬高夏低”的季节特征。SO₂ 浓度最大值均在 1 月; 浓度最小值所在月份时间差异较小, 遥感较地面监测方法滞后 1 个月, 但均在夏季。从空间分布上看, 遥感反演的 SO₂ 柱浓度高值区主要在贵阳、遵义, 而地面监测显示, SO₂ 月浓度高值区主要集中在贵州西部的安顺、六盘水一带; 低浓度区的空间位置保持一致, 铜仁最低, 其次是黔东南。综合来看, 两种方法的空间差异性大于时间差异性。

表 2 两种方法监测的 SO₂ 月浓度时空差异

Table 2 Temporal and spatial differences in monthly NO₂ concentrations monitored by two methods

Methods	Temporal difference		Spatial difference	
	Peak concentration month	Minimum concentration month	Cities with high monthly concentration	Cities with low monthly concentration
Remote Sensing	January	August	Guiyang, Zunyi	Tongren, Qiandongnan
Ground monitoring	January	July	Anshun, Liupanshui	Tongren, Qiandongnan

2.3.3 O₃

通过计算 2005、2010、2015、2019 年逐月 OMI 数据反演的 O₃ 柱浓度均值, 可得到 1—12 月 O₃ 柱浓度的时空分布, 如图 7 所示。由图可知, O₃ 柱浓度全年呈先升后降的变化趋势。12 月至次年 2 月, O₃ 柱浓度全省总体偏低, 90% 以上区域 O₃ 柱浓度不超过 250 DU, 最大值也低于 260 DU。6 月 O₃ 柱浓度达到最大值, 即 295 DU, 5 月次之。从全年来看, 1—6 月 O₃ 柱浓度持续上升, 其中 3 月和 4 月浓度变化差异较为显著; 5—9 月全省 O₃ 柱浓度保持较高水平且逐月变化差异较小, 其浓度区间主要在 270~295 DU, 各区域差异较小; 10—12 月 O₃ 柱浓度又逐渐降低, 12 月 O₃ 柱浓度最大值不超过 265 DU。

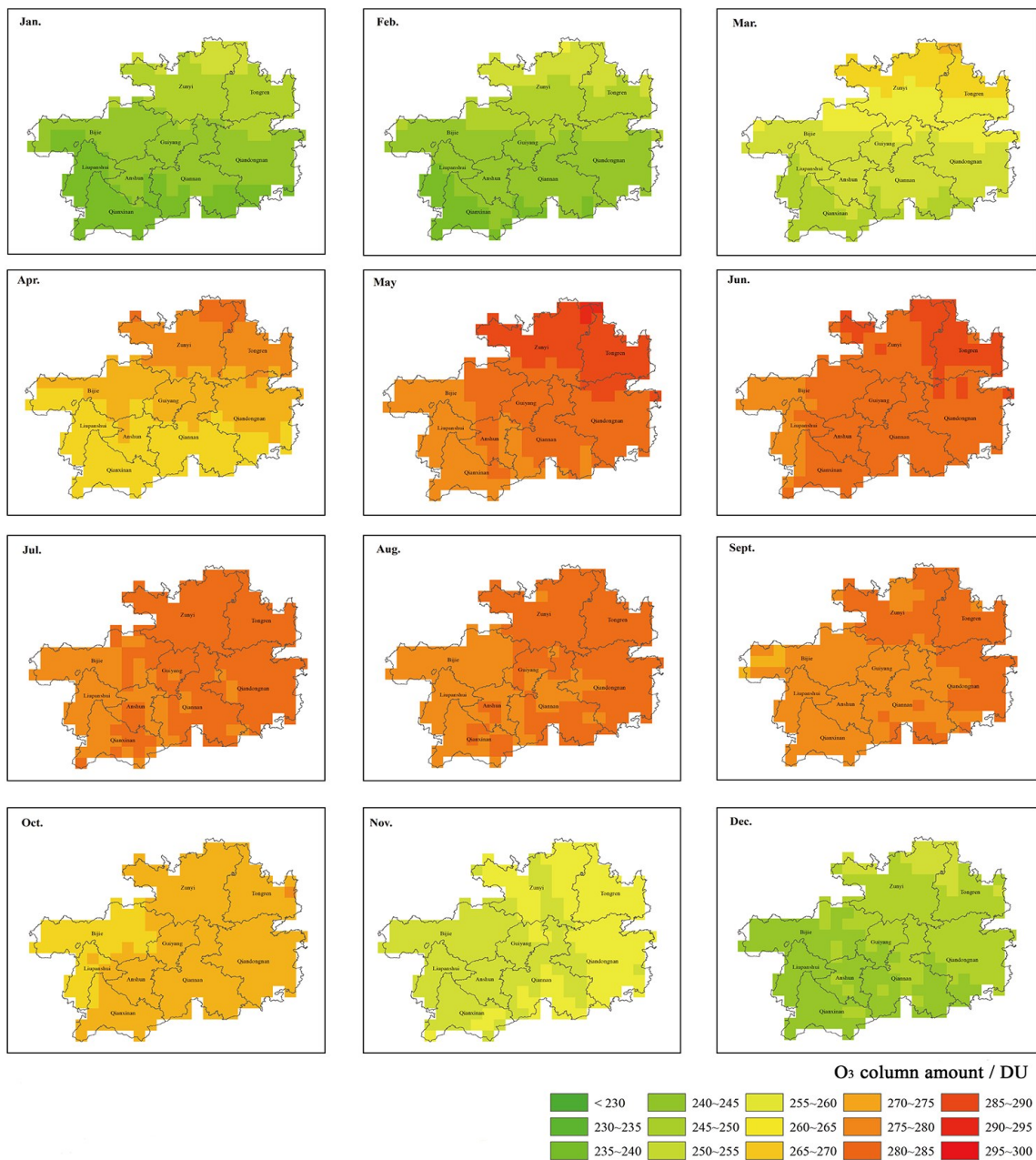


图 7 基于 OMI 的贵州省 2005、2010、2015、2019 年 O₃ 柱浓度月均值分布特征

Fig. 7 Monthly mean distribution characteristics of O₃ column amount in Guizhou based on OMI in the four years of 2005, 2010, 2015 and 2019

图 8 为基于 2015—2019 年贵州省环境监测站的逐月数据计算得到的 O₃ 月均浓度分布情况。由图可知, 地面监测的 O₃ 月浓度呈先增后减变化趋势。由于 4—9 月贵州全省日照相对充足, 人为排放的氮氧化物和挥发性有机物极易转化为 O₃, 而冬季阴雨天气较多, 日照不足, O₃ 不易形成, 因此春夏季全省 O₃ 月浓度较高, 4 月各城市月浓度值基本达到最高水平, 平均 117 μg/m³, 秋冬季浓度较低, 1 月达到最低, 仅 74 μg/m³。从城市分布来看, 贵州中西部即贵阳、安顺、毕节市 O₃ 浓度偏高, 平均每月浓度值超过 100 μg/m³; 夏季遵义 O₃ 浓度最高, 但冬季 11 月至次年 1 月 O₃ 月浓度较低; 六盘水、黔东南全年保持低浓度水平。

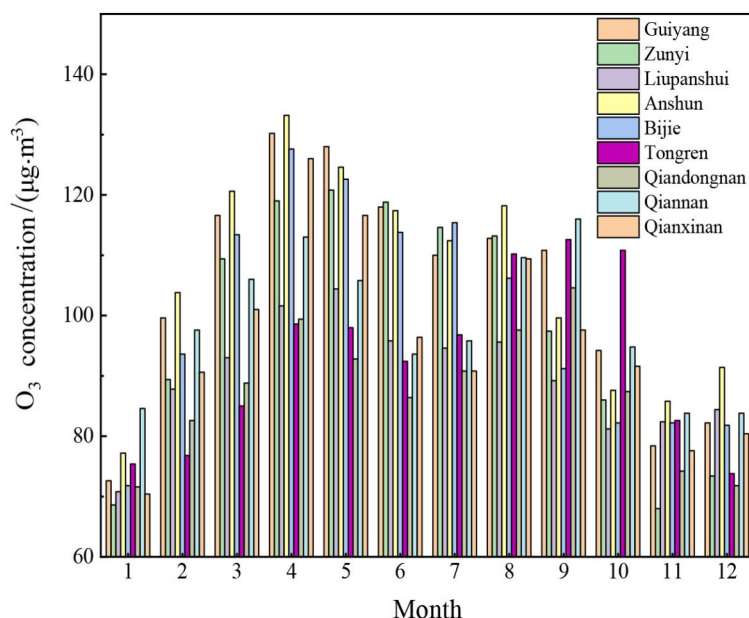


图 8 2015—2019 年间基于地面监测站的贵州省 O₃ 月均浓度统计

Fig. 8 Monthly average concentration statistics of O₃ in Guizhou based on ground monitoring stations from 2015 to 2019

对比图 7 与图 8 可发现, O₃ 月浓度均呈“先增后减”的变化趋势, 季节特征均表现为“春夏高、秋冬低”。由表 3 可知, 受贵州夏季阴雨天气过程影响, 遥感反演的 O₃ 柱浓度最大值在时间上比地面监测结果滞后 2 个月, 但最小值所在时间均在冬季 1 月。此外, 基于遥感反演的 O₃ 柱浓度最大值在遵义, 铜仁次之, 最小值在黔西南, 六盘水次之; 而地面监测的 O₃ 月浓度最大值在安顺, 贵阳次之, 最小值在六盘水, 其次是黔东南。由于 O₃ 受天气影响较大, 在夏季雷暴过程发生时, 高层氧气极易分解生成 O₃, 也使得平流层 O₃ 浓度稳定性降低, 垂直传输较为活跃, 对近地面 O₃ 浓度影响较大, 导致时间和空间上均有明显差异。

表 3 两种方法监测的 O₃ 月浓度时空差异

Table 3 Temporal and spatial differences in monthly O₃ concentrations monitored by two methods

Methods	Temporal difference		Spatial difference	
	Peak concentration month	Minimum concentration month	Cities with high monthly concentration	Cities with low monthly concentration
Remote sensing	June	January	Zunyi, Tongren	Qianxinan, Liupanshui
Ground monitoring	April	January	Anshun, Guiyang	Liupanshui, Qiandongnan

2.4 讨论

根据卫星遥感反演结果和地面站点监测数据分析, 贵州省近几年空气质量总体较好, 空气污染主要出

现在冬季,由于大气底层有逆温层出现,大气输送能力较差,NO₂、SO₂浓度相对较高。而春夏季贵州空气较为清洁,NO₂、SO₂浓度偏低,但受温度和太阳辐射影响,光化学反应强烈^[12],O₃浓度春、夏季相对较高。

贵州属于典型的喀斯特地貌,受地形和下垫面差异的影响,天气多变,十里不同天,故基于遥感反演的污染气体浓度与地面监测结果具有明显的时空差异。由于SO₂、NO₂基本是人为源排放,因此遥感反演的SO₂、NO₂柱浓度与地面监测的浓度数据时间变化趋势基本保持一致,但空间差异明显。遥感反演的O₃柱浓度包括自然界中平流层的O₃,而地面监测的O₃浓度主要来自于人为排放的污染物的二次生成,且夏季大气层稳定性降低,当天气过程发生时,高层氧气又极易分解产生O₃,使得遥感反演的O₃柱浓度在夏季与地面监测数据时空差异最大,而冬季大气层相对稳定,二者的时空差异相对较小。

此外,地面监测数据为贵州省9个中心城市共计33个国控环境空气质量自动监测点位数据统计得到的综合结果,该数据在时间上综合了多年平均状况,在空间上由于33个国控站点的空间位置不同,具有区域差异性,基本能代表区域内实际的污染气体月浓度水平。但受天气影响,地面站测量仪器具有一定误差,且无法做到高精度、空间连续、全覆盖的特点。为避免数据单一的局限性,在以后的深入研究中可引入多种数据源,并增加空气污染物种类如CO、PM_{2.5}、PM₁₀等的综合分析。此外,OMI数据反演的是O₃柱浓度,与地面监测结果差异较大,可进一步将柱浓度反演到近地面,并与相同时间点的地面监测数据开展卫星数据的验证工作。同时,在分析不同大气层污染气体浓度差异时,气象条件势必会对污染气体浓度造成影响,在极端天气过程发生时,大气层稳定性降低,因此在以后的研究中可引入气象要素进行综合分析。

3 结 论

通过分析,2019年贵州省NO₂、SO₂、O₃的柱浓度较2005年总体呈下降趋势。两种方法监测的NO₂、SO₂季节特征均表现为“秋冬高、春夏低”,受太阳辐射和气温影响,两种方法监测的O₃浓度表现为“春夏高、秋冬低”的季节特征。对比分析,遥感方法反演的NO₂柱浓度极大值和SO₂柱浓度极小值较地面监测结果在时间上存在滞后性,但滞后时间较短,没有出现跨季节差异,总体上空间差异性大于时间差异性,且SO₂夏季空间差异性大于冬季。而O₃无论是时间和空间上均有明显差异,这是由于地面监测的O₃浓度基本为人为排放,且贵州夏季雷雨天气较多,在天气过程发生时,高层氧气极易被大量分解并生成O₃,由于垂直输送较为活跃,使得平流层O₃浓度稳定性降低,对近地面浓度影响较大,而遥感反演的O₃柱浓度包括自然界中平流层的O₃,因此两种方法监测的O₃浓度时空差异较大。

参考文献:

- [1] Zhou W, Wang X S, Zhang Y H, *et al.* Current status of nitrogen oxides related pollution in China and integrated control strategy [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(2): 323-330.
周 维, 王雪松, 张远航, 等. 我国NO_x污染状况与环境效应及综合控制策略 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2008, 44(2): 323-330.
- [2] He X, Lin Z S. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model [J].

- Environmental Science*, 2017, 38(1): 22-32.
- 贺祥,林振山.基于GAM模型分析影响因素交互作用对PM_{2.5}浓度变化的影响[J].环境科学,2017,38(1):22-32.
- [3] Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Different air pollution situations of O₃ and PM_{2.5} during summer in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3): 807-815.
- 王占山,张大伟,李云婷,等.北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究[J].环境科学,2016,37(3):807-815.
- [4] Li L, Shi R H, Chen Y Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics of NO₂ in China and the anthropogenic influences analysis based on OMI data [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 688-694.
- 李龙,施润和,陈圆圆,等.基于OMI数据的中国NO₂时空分布与人类影响分析[J].地球信息科学学报,2013,15(5):688-694.
- [5] Wang S C, Huo Y F, Mu X, *et al.* Estimating ground-level NO₂ over China by using extreme gradient boosting and deep learning method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(10): 298-308.
- 王思晨,霍彦峰,穆溪,等.基于极端梯度提升树和深度学习方法估算中国地表NO₂浓度[J].环境科学学报,2023,43(10):298-308.
- [6] Ju T Z, Shi H X, Wang Y, *et al.* Analysis of the spatial distribution of SO₂ in Lanzhou City using OMI satellite remote sensing data [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(4): 154-157.
- 巨天珍,师贺雄,王彦,等.基于OMI卫星遥感数据的兰州市SO₂空间分布分析[J].安全与环境学报,2012,12(4):154-157.
- [7] Li R, Li J W, Liu Z J, *et al.* Satellite observational study on correlations among aerosol optical depth, NO₂ and SO₂ over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(22): 2524-2535.
- 李锐,李俊伟,刘之杰,等.卫星遥感研究中国气溶胶光学厚度、NO₂和SO₂的相关性[J].科学通报,2016,61(22):2524-2535
- [8] Guo Y F, Bao Y X, Liu D Y. Spatial-temporal variations of tropospheric ozone over typical urban agglomerations in China based on satellite and surface observations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(3): 719-730.
- 郭云飞,包云轩,刘端阳.基于卫星和地面观测的中国典型城市群对流层内臭氧时空变化特征[J].环境科学研究,2022,35(3):719-730.
- [9] Zhang X Y, Zhou M Q, Wang W H, *et al.* Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its' applications [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(17): 13-22.
- 张兴赢,周敏强,王维和,等.全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望[J].科技导报,2015,33(17):13-22.
- [10] Levelt P F, Hilsenrath E, Leppelmeier G W, *et al.* Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1199-1208.
- [11] 邓书斌,于强,骆知萌,等. ENVI下基于GLT的风云三号气象卫星几何校正研究[J]. 遥感信息, 2009(2): 98-99.
- [12] Wang T, Chen M P, Zhou M P, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of air pollutants in Wuxi City [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, 37(12): 74-78.
- 王涛,陈梦平,周梦翩,等.无锡市大气污染物污染特征及影响因素研究[J].环境污染与防治,2015,37(12):74-78.