# 基于卫星观测的四川省臭氧分布特征分析

# 曹杨<sup>1,2,3</sup>赵晓莉<sup>1</sup>成翔<sup>11</sup>

(1. 四川省气象灾害防御技术中心,成都 610072;

2. 中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081;

3. 中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225)

【摘 要】: 基于卫星观测数据的大气臭氧监测具有覆盖范围广,空间分辨率高等优势,能有效弥补地面臭氧监测站分布不均匀的缺陷。利用 2011~2019 年 FY-3B 卫星观测反演的臭氧总量日产品,及同时期 AURA 卫星观测获得的对流层臭氧柱含量数据,统计分析四川省臭氧总量和对流层臭氧柱含量的时空变化规律。研究表明:(1)四川省臭氧总量空间分布呈东北高西南低特征,近9年整体呈上升趋势,最高值出现在 2018 年,春季最高,秋季最低;(2)臭氧总量纬向偏差基本为负值,且川西高原和攀西地区总是小于盆地地区,年际变化呈下降趋势,表明与同纬度区域差异增大,冬季>秋季>春季>夏季;(3)四川盆地对流层臭氧柱含量明显高于攀西地区和川西高原,年际变化呈缓慢上升趋势,季节变化为夏季>春季>秋季>冬季,不同区域极值出现月份略有差异,表现为随纬度降低,月均值极大值出现时间提前。对区域大气臭氧时空变化规律的分析,可为区域大气臭氧污染防治提供科学依据。

【关键词】: 臭氧总量 纬向偏差 对流层臭氧

### 【中图分类号】:X51【文献标识码】:A【文章编号】:1001-3644(2022)03-0104-09

## 前言

臭氧是大气中重要的微量气体,约90%集中在平流层,10%左右分布在对流层<sup>[1,2]</sup>。臭氧能强烈吸收太阳紫外辐射,保护地球上的生命不受其伤害,同时臭氧也是一种温室气体,通过强烈吸收太阳紫外辐射和地气系统的部分长波辐射加热大气<sup>[3,4,5]</sup>。臭氧总量的改变将影响大气热力性质和大气环流,对全球气候变化有重要影响。近地面臭氧是光化学烟雾的主要成分,影响人类和动植物健康。

卫星是监测全球大气臭氧变化的重要手段,具有覆盖范围广、受天气变化影响小等优点。搭载在美国NIMBUS-7和EarthProbe、苏联 Meteor3卫星上的臭氧总量绘图仪 TOMS 是最早应用于大气臭氧总量监测的卫星业务仪器<sup>[6]</sup>。20世纪 90年代开始,欧洲搭载于 ERS-2卫星的臭氧探测器 GOME 和搭载于环境 1号(ENVISAT-1)卫星的大气制图扫描成像吸收光谱仪 SCIAMACHY 利用大气成 分差分吸收光谱法反演大气臭氧总量<sup>[7,8]</sup>。2004年7月,美国的 AURA 卫星搭载的臭氧监测仪 OMI 延续 TOMS 系列仪器的工作<sup>[9]</sup>, 对大气臭氧总量进行监测。2007年,搭载于美国和欧洲合作发射的 MetOp 系列卫星上的 GOME-2光谱仪同样利用紫外波段的散射

**基金项目:**中国气象局大气化学重点开放实验室开放课题(2020B05);四川省气象局软科学研究课题(SC2021-03);成都市科技厅项目(2018-ZM01-00037-SN)

<sup>&</sup>quot;作者简介: 曹杨(1989-), 女, 四川资中人, 毕业于中国科学院大气物理研究所大气物理学与大气环境专业, 博士, 高级工程师, 从事环境气象与服务研究。

辐射反演臭氧信息<sup>[10]</sup>。2011年11月,美国发射的对地观测卫星 Suomi-NPP 搭载的臭氧绘图仪和廓线仪套件 OMPS 继续对臭氧进 行监测<sup>[11]</sup>。中国 FY-3系列成功搭载了自主研制的紫外臭氧总量探测仪 TOU 和紫外臭氧垂直探测仪 SBUS,分别探测大气中的臭氧 总量和臭氧垂直廓线<sup>[12,13]</sup>,包括 FY-3A(2008~2018年)、FY-3B(2010~2020年)和 FY-3C(2013~至今)。众多研究应用 TOMS、OMI 分析中国地区臭氧总量分布特征及变化趋势<sup>[14,15]</sup>,也有一些研究对中国的 FY-3A 早期监测结果进行分析,并与国外同类产品进行 了定性比较<sup>[16,17,18]</sup>。本文利用 2011~2019年 FY-3B 卫星搭载的 TOU 观测反演的臭氧总量日产品数据,分析四川省臭氧总量空间 分布和时间变化特征,计算纬向偏差,分析与同纬度地区的差异,以及利用同时期 OMI 和 MLS 联合观测获得的对流层臭氧柱含 量数据,分析四川省对流层臭氧空间分布和时间变化特征,以期为区域臭氧污染防治提供参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 材料介绍

臭氧总量数据为 FY-3B 卫星搭载的 TOU 观测反演的臭氧总量日产品,其反演方法是基于通道对算法,即臭氧吸收有明显差异的一对通道其紫外后向散射强度的差与臭氧总量之间存在密切关系,这种算法类似于 TOMSV7 和 TOMSV8<sup>[19]</sup>。产品空间分辨率为 0.5°×0.5°,时间序列为 2011 年 1 月 1 日~2019 年 12 月 31 日。臭氧总量是指像元覆盖范围内整层大气臭氧柱含量,单位为 DU,1DU=2.69×10<sup>16</sup> cm<sup>-1</sup>,相当于在标准大气状态下 10<sup>-3</sup> cm 的臭氧层厚度。对流层臭氧柱含量数据来源于 Ziemke 等<sup>[20]</sup>计算的对流 层臭氧柱浓度逐月数据集,以 OMI 观测反演的臭氧总量及微波临边探测器 MLS 探测的平流层臭氧柱浓度为基础,计算差值得到。产品空间分辨率为 1°×1.25°,时间序列为 2011 年 1 月~2019 年 12 月。

### 1.2 方法介绍

以臭氧总量和对流层臭氧柱含量产品为基础,在每个网格点上提取有效值像元计算年、季、月均值,其中,季节划分 3~5 月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12~次年2月为冬季。臭氧总量还要计算所有网格点的纬向偏差,定义为该纬度像 元值与同纬度整个纬圈平均值的差,反映与同纬度地区的差异。四川省地形分布如图1所示,阿坝州和甘孜州合称为川西高原, 凉山州和攀枝花市合称为攀西地区,其余17市合称为四川盆地。



图1四川省地形分布图

# 2 结果与分析

### 2.1 臭氧总量空间分布特征

四川省臭氧总量分布呈东北高西南低特征(见图 2a),符合臭氧在中高纬度基本呈纬向分布,等值线在陆地上发生弯曲,自 西向东略向低纬度地区倾斜的分布特征,这主要是因为低纬度大气臭氧随着大气环流向高纬度输送。全省臭氧总量累计年均值 分布范围为 266.0~298.9DU,最大值位于广元市,最小值位于甘孜州西南部,最大值与最小值相差 32.9DU,平均值为 283.5DU, 明显高于臭氧空洞标准值(220DU)。四川省大部分地区臭氧总量纬向偏差为负值,说明四川省臭氧总量低于同纬度其他地区。川 西高原和攀西地区臭氧总量纬向偏差基本小于-10DU,盆地西部沿山地区臭氧总量纬向偏差介于-10~-5DU 之间,盆地大部分地 区臭氧总量纬向偏差分布在-5~0DU 范围(见图 2b)。整体来说,四川盆地臭氧总量大于川西高原和攀西地区。可能原因:一是四 川盆地臭氧前体物排放高于川西高原和攀西地区,更易破坏臭氧层;二是地形影响,川西高原和攀西地区高程较高,缩短了臭氧 柱,使得臭氧总量减小;三是青藏高原大地形对大气的热力和动力作用,使得青藏高原上空存在明显的臭氧低值中心<sup>[21]</sup>,川西高 原和攀西地区位于青藏高原东部边缘位置,易受此因素影响。另外一个可能原因是,西风气流经过青藏高原地形产生的绕流和爬 坡作用,使得气流中携带的高纬度高含量和高空高含量臭氧大气在青藏高原东部边缘较低地形处汇合和下沉,而四川盆地作为 临近青藏高原东部边缘地区的典型低洼地形区域,被周围高大地形环绕,西风气流在此处的下沉和汇合作用比周围其他区域更 明显<sup>[22]</sup>。

根据 2011~2019 年四川省臭氧总量多年平均值统计,将四川省 21 市州分为臭氧总量高值区、次高值区和低值区进行分析。 位于高值区的有广元、巴中、达州、南充、广安、遂宁、绵阳、德阳、资阳、成都,位于次高值区的有内江、眉山、自贡、乐山、 宜宾、泸州、阿坝、雅安,位于低值区的有甘孜、凉山和攀枝花。



图 2 2011~2019 年四川省臭氧总量(a)及纬向偏差(b)多年平均值空间分布图

### 2.2 臭氧总量时间分布特征

### 2.2.1 年际变化

全省和各区域臭氧总量年均值变化趋势基本一致,2015和2018年四川省臭氧总量较高,年平均值分别为290.7DU和291.1DU, 最低值出现在2013年(277.4DU)(见图3a)。结合各年平均值与2011年的比值看,2015、2018、2019年的比值大于1的,其余年 份均小于1(见图3b)。整体来看,近9年四川省臭氧总量整体呈上升趋势,这可能与城市规模扩大、汽车持有量迅速增加等因素 有关,也会受臭氧层恢复等因素影响。此外,臭氧总量的周期性变化也是对太阳活动长期变化的响应<sup>[23]</sup>。2011~2019年四川省 臭氧总量纬向偏差年均值基本为负值,四川盆地显著大于川西高原和攀西地区(见图3c)。整体来看,全省和各区域臭氧总量纬 向偏差年际变化呈下降趋势,说明四川省臭氧总量小于同纬度其他地区的平均值,与同纬度其他地区的差异在增大。



图 3 2011~2019 年四川省臭氧总量年均值变化趋势(a)及与 2011 年的比值(b)、纬向偏差年际变化趋势图(c)

2.2.2 季节变化

图 4 为 2011~2019 年四川省臭氧总量及其纬向偏差的多年季节均值空间分布图。四川省臭氧总量季节分布仍然表现为东北 高西南低的特征,且四川省臭氧总量季节变化趋势明显,各区域变化趋势基本一致,为春季>夏季>冬季>秋季。全省臭氧总量变 化范围夏季最小,冬季最大,冬春季全省臭氧总量及其变化梯度大于夏秋季,主要是因为冬春季极向环流强度大于夏秋季,低纬 度地区光化学反应生成的臭氧被大气环流输送到高纬度地区。除冬季的四川盆地外,四川省臭氧总量纬向偏差平均值在四季均 为负值,变化趋势为冬季>秋季>春季>夏季,即夏季四川省臭氧总量与同纬度其他地区的差异最大,冬季差异最小,各区域的季 节变化趋势与全省平均值相同。这种季节变化趋势主要受青藏高原大地形影响,与青藏高原热力变化是一致的。春夏季节青藏高 原较强的热力抬升作用有利于对流层低层含低浓度臭氧的空气向高层输送,稀释高层空气中的臭氧含量,导致臭氧总量减少,从 而影响靠近青藏高原东部边缘区域的川西高原和攀西地区,出现臭氧总量纬向偏差明显低值区。

2.2.3月变化

全省及各区域臭氧总量及其纬向偏差月变化趋势比较一致,整体来看,臭氧总量月变化具有明显的正弦曲线特征,表现为 1~4月呈上升趋势,4~10月呈下降趋势,10~12月又逐渐增大。高值主要集中在3、4、5月份,最大值(302.200)出现在4月, 最小值(269.000)出现在10月(见图 5a)。臭氧总量纬向偏差月变化趋势与臭氧总量大体相反,最小值出现在5月,最大值出现 在12月(见图 5b),该月变化趋势与高原臭氧总量低值中心的出现有关,高原臭氧总量低值中心的存在造成高原地区臭氧总量比 同纬度其他地区低。结合季节变化趋势看,春季(3、4、5月)高原热力抬升作用开始增强,出现低值中心,纬向偏差值明显降低, 秋冬季高原低值中心明显减弱,纬向偏差值回升。

2.3 对流层臭氧含量分布特征

图 6 为 2011~2019 年四川省对流层臭氧柱含量空间分布 (a) 及年际变化 (b) 图。四川盆地对流层臭氧柱含量明显高于攀西地 区和川西高原 (见图 6a),这可能与整层大气臭氧含量的分布特征有关,受平流层臭氧输入影响。此外,臭氧的生成主要受太阳 辐射和臭氧前体物影响,一方面,臭氧前体物的排放情况会影响其分布,如 NO<sub>2</sub> 受人为活动影响显著,一般高值区都是出现在人 口密度较大以及工农业活动水平较高的区域<sup>[24]</sup>;另一方面,气温的变化能较好地反映太阳辐射强度的变化,太阳辐射增强时气温 升高,有利于大气光化学反应发生,从而导致臭氧浓度增大。四川省气温分布特征表现为东高西低,与对流层臭氧柱含量空间分 布特征一致。从图中还可以看到,2011~2019 年,四川省对流层臭氧柱含量呈缓慢上升趋势,其中川西高原为显著的上升趋势, 攀西地区为微弱的上升趋势,四川盆地呈波动变化,表现为 W 型,两个低值出现在 2014 年 (38.1DU)和 2017 年 (38.6DU) (见图 6b)。

4



图 4 2011~2019 年四川省臭氧总量(a1、b1、c1、d1)及其纬向偏差(a2、b2、c2、d2)的多年(a)春季(b)夏季(c)秋季(d)冬季均值空间分布图



图 5 2011~2019年四川省臭氧总量(a)及其纬向偏差(b)的多年月均值变化趋势图



图 6 2011~2019 年四川省对流层臭氧柱含量空间分布 (a) 及年际变化 (b)

图 7 为 2011~2019 年四川省对流层臭氧柱含量每年季节均值,最大值出现在夏季(37.8DU),其次为春季(35.3DU),最小值 出现在冬季(27.8DU)。分区域看,四川盆地和川西高原的季节变化趋势相同,均为夏季>春季>秋季>冬季,攀西地区略有差异, 为春季>夏季>秋季>冬季,这可能是因为低纬度地区的气温和日照强度高值出现时间相对于高纬度地区提前。四川盆地对流层臭 氧柱含量年际变化在春季、夏季和秋季变化幅度较小,冬季呈 W 型变化,低值分别出现在 2014 年和 2017 年,与全年的年际变 化趋势基本一致,表明四川盆地全年的年际变化趋势主要受冬季影响。攀西地区的年际变化在夏季和秋季波动较小,春季为上升 趋势,冬季与四川盆地变化趋势相同,为 W 型变化。川西高原在四季的年际变化均呈上升趋势。

四川盆地和川西高原的月平均对流层臭氧柱含量最高值出现在 6 月,分别为 47.4DU 和 35.4DU,攀西地区出现在 5 月,为 39.4DU。对流层臭氧柱含量月均值的低值一般出现在 1~2 月,其中四川盆地和川西高原出现在 2 月,攀西地区出现在 1 月(见 图 8a)。对流层臭氧柱含量月均值的最大值和最小值出现月份相较于整层大气臭氧含量推迟 1~2 个月,可能与对流层臭氧柱含 量受大气环流、气温、日照以及臭氧前体物的排放等因素影响有关。结合四川盆地代表城市的月变化可见(见图 8b),对流层臭 氧柱含量在纬度分布上有一定的规律,即随着纬度的降低,对流层臭氧柱含量月均值高值出现的时间提前,这可能受气温和日照 强度等气象条件的变化趋势影响。



图 7 2011~2019 年四川省对流层臭氧柱含量每年季节均值时间序列图



图 8 2011~2019 年四川省各区域(a) 及四川盆地代表城市(b) 对流层臭氧柱含量月变化趋势图

## 3 结论

本文利用 2011~2019 年 FY-3B 和 AURA 卫星观测反演获得的臭氧总量和对流层臭氧柱含量数据,分析四川省臭氧总量和对流层臭氧柱含量的空间分布和时间变化特征,得出以下结论。

3.1 四川省臭氧总量分布呈东北高西南低特征,年际变化整体呈上升趋势,最高值出现在 2018 年;春季最高,秋季最低,最 大值出现在 4 月,最小值出现在 10 月;由于冬春季极向环流强度大于夏秋季,低纬度地区光化学反应生成的臭氧被大气环流输 送到高纬度地区,冬春季臭氧总量及其变化梯度大于夏秋季。 3.2四川省臭氧总量纬向偏差反映了与同纬度区域的差异,受青藏高原上空臭氧亏损影响,四川省臭氧总量纬向偏差为负值, 且川西高原和攀西地区小于四川盆地;年际变化呈下降趋势,说明四川省臭氧总量小于同纬度其他地区的平均值,与同纬度其他 地区的差异在增大;季节变化趋势为冬季>秋季>春季>夏季,最小值出现在5月,最大值出现在12月,主要是因为春夏季节青藏 高原较强的热力抬升作用导致高原上空臭氧总量显著减少,使得与同纬度区域的差异增大。

3.3 受平流层臭氧输入、太阳辐射和臭氧前体物等因素影响,四川盆地对流层臭氧柱含量明显高于攀西地区和川西高 原;2011~2019年,四川省对流层臭氧柱含量呈缓慢上升趋势;季节变化为夏季>春季>秋季>冬季,最大值出现在 5~6月,最小 值出现在 1~2月,不同区域极值出现月份略有差异,表现为随纬度降低,月均值极大值出现时间提前。

以上研究表明,基于卫星观测数据的大气臭氧监测具有覆盖范围广,空间分辨率高等优势,能有效弥补地面臭氧监测站分布 不均匀的缺陷,通过对区域大气臭氧时空分布特征进行分析,可为区域臭氧污染防治和治理提供科学依据。

#### 参考文献:

[1]王卫国, 樊雯璇, 吴涧, 等. 全球平流层-对流层之间臭氧通量的时空演变研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6):1595-1607.

[2] 王跃启, 江洪, 肖钟湧, 等. 基于 OMI 数据的中国臭氧总量时空动态信息提取[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6):177-180.

[3]DELWORTH T L, ZENG F. Regional rainfall decline in Australia attributed to anthropogenic greenhouse gases and ozone levels[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(8):583-587.

[4]BAI K, CHANG N B, GAO W. Quantification of relative contribution of Antarctic ozone depletion to increased austral extratropical precipitation during 1979-2013[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2016, 121(4): 1459-1474.

[5]ZHANG Y, COOPER O R, GAUDEL A, et al. Tropospheric ozone change from 1980 to 2010 dominated by equatorward redistribution of emissions[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(12):875-879.

[6]MCPETERS R, HOLLANDSWORTH S, FLYNN L, et al.Longterm ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus7/meteor3 TOMS version7 record[J].Geophysical Research Letters, 1996, 23 (25):3699-3702.

[7]BURROWS J P, WEBER M, BUCHWITZ M, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2):151-175.

[8]NOEL S, BOVENSMANN H, WUTTLE M W, et al. Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY[J]. Advances in Space Research, 2002, 29(11):1819-1824.

[9]VEEFKIND J P, DEHAAN J F, BRINKSMA E, et al. Total ozone from the ozone monitoring instrument(OMI)using the DOAS technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5):1239-1244.

[10]MIJLING B, TUINDER O N E, VAN OSS R F, et al. Improving ozone profile retrieval from spaceborne UV backscatter

spectrometers using convergence behaviour diagnostics[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3:1555-1568.

[11]PAN C, FLYNN L E, BUSS R, et al. Performance monitoring of the SNPP ozone mapping and profiler suite's sensor data records[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(5):1763-1770.

[12]WANG Y, WANG Y, WANG W, et al. FY-3 satellite ultraviolet total ozone unit[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1):84-89.

[13]WANG W,ZHANG X,AN X,et al.Analysis for retrieval and validation results of FY-3 total ozone unit(TOU)[J].Chinese Science Bulletin, 2010, 66(26):3037-3043.

[14] 杜君平,朱玉霞,刘锐,等. 基于 OMI 数据的中国臭氧总量时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2014, 30 (2):191-196.

[15]张娟,刘志红,向卫国,等.四川省上空臭氧时空变化特征[J].四川环境,2017,36(6):45-52.

[16]WANG W, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Introduction to the FY-3A total ozone unit:Instrument, performance and results[J].International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(17):4749-4758.

[17]WANG W,LYNN L E,ZHANG X,et al.Cross-calibration of the total ozone unit(TOU) with the ozone monitoring instrument(OMI) and SBUV2 for environmental applications[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12):4943-4955.

[18] 刘利,郑向东,陈树,等.风云-3A卫星 TOU 臭氧总量地基对比验证分析[J]. 空间科学学报,2015,35(6):696-706.

[19]王维和,张兴赢,安兴琴,等.风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析[J].科学通报, 2010,55(17):1726-1733.

[20]Ziemke J R, Chandra S, Bhartia P K. Two New Methods for Deriving Tropospheric Column Ozone from TOMS Measurements:Assimilated UARS MLS/HALOE and Convectivecloud Differential Techniques[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103 (D17):22115-22127.

[21]周秀骥,罗超,李维亮,等.中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心[J].科学通报,1995,40(15):1396-1398.

[22]赵川鸿,赵鹏国,周筠珺.西南地区臭氧空间分布及变化趋势[J]. 气象科学,2018,38(2):149-156.

[23]吴统文, 瞿章. 臭氧总量对太阳活动长期变化的响应[J]. 高原气象, 1994, 13 (2):94-99.

[24]肖钟湧, 江洪. 四川盆地大气 NO2 特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11):1782-1788.