

文章编号: 2096-1618(2017)02-0147-05

# 气溶胶指数与臭氧总量的相关性初步研究

赵富强<sup>1</sup>, 王维和<sup>2</sup>, 邓小波<sup>1</sup>, 杨 阳<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 3. 航天天绘科技有限公司四川分公司, 四川 成都 610101)

**摘要:**吸收性气溶胶指数( absorbing aerosol index, AAI) 是一种定性反映对紫外线具有吸收作用的气溶胶即吸收性气溶胶的存在与空间分布特征的重要参数。吸收性气溶胶指数和臭氧总量均通过星载仪器观测紫外后向辐射反演得到, 由于臭氧在吸收性气溶胶指数的反演通道也存在弱的吸收作用, 因此臭氧总量和气溶胶可能存在相关性。为了研究气溶胶指数与臭氧总量的关系, 采用 2013、2014 年风云三号气象卫星紫外臭氧总量探测器(FY-3/TOU)的臭氧总量和吸收性气溶胶指数数据, 分析了青藏高原区域吸收性气溶胶指数与臭氧总量空间分布特征的关系。分析结果表明, 高原上空吸收性气溶胶指数与臭氧总量之间存在正相关关系。

**关键词:**信号与信息处理; 气象卫星遥感; 臭氧; 气溶胶指数; 相关性

**中图分类号:** TP301.6

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.02.007

## 0 引言

气溶胶是大气中重要微量成分。平流层气溶胶分布于整个地球上空, 其物理化学性质及尺度分布是计算气溶胶辐射传输性质的重要参数。对流层溶胶包含大气中绝大部分水汽和自然及人为的大部分颗粒物。一些自然过程比如沙尘暴、生物燃烧、火山喷发及人为过程如化石燃料燃烧过程会产生大量的吸收性气溶胶。吸收性气溶胶是地气系统的重要成分之一<sup>[1]</sup>。高原上空平流层-对流层交换对周围地区甚至全球的气候都会有比较显著影响<sup>[2]</sup>。

青藏高原是世界海拔最高、中国最大的高原, 因此被称为“世界屋脊”。由于青藏高原的隆起, 对亚洲的大气环流形势造成影响, 引起平流层、对流层气溶胶辐射平衡的改变。高原的大部分地区较好地保留了原有的生态特征和气象要素。因此可以认为高原地区的气溶胶浓度及成分基本可以代表北半球大气成分的本底情况<sup>[3]</sup>。因此研究青藏高原地区的气溶胶的含量和时空分布特征具有重要意义。

由于气溶胶分布广泛并且随着大气环流长距离迁移, 为了实现大范围观测多采用卫星观测。美国航空航天局(NASA)研制出臭氧总量测绘光谱仪(total ozone mapping spectrometer, TOMS)用于反演大气臭氧总量。并且定义了吸收性气溶胶指数( absorbing aerosol index, AAI)<sup>[4]</sup>, 用于评估吸收性气溶胶对臭氧总量

反演的影响, 作为反应吸收性气溶胶吸收紫外线程度的定性参数。气溶胶指数产品是紫外后向散射型臭氧仪器的吸收性气溶胶定性产品, 也是用于探测大气中对紫外有吸收作用的气溶胶的定性产品。研究吸收性气溶胶指数与臭氧总量的关系有重要作用。

Hegg<sup>[5]</sup>按气溶胶质粒源和出现的地理位置分成9类, 分别为远陆、沙漠、海洋、对流层中上层(背景)、极地、云过程、生物、平流层气溶胶和生物质燃烧。早在1997年 Heraman<sup>[6]</sup>利用 TOMS AI 研究全球吸收性气溶胶分布源, 这些分布源包括生物燃烧、沙尘暴等, 研究发现能够提供一部分吸收性气溶胶的空间分布信息<sup>[7]</sup>。紫外遥感特别是星载紫外遥感在中国起步较晚, 气溶胶指数的应用则多利用国外的卫星产品监测气溶胶特别是沙尘气溶胶的时空变化。陈斌等<sup>[8]</sup>利用 AERONET 观测资料对东亚地区吸收性气溶胶识别及其光学特征分析。中国于2008年发射的第二代极轨气象卫星风云三号A星首次搭载了紫外臭氧总量探测器(TOU)<sup>[9-10]</sup>, 其原理类似于 TOMS 仪器。FY-3/TOU 从2008年发射至今, 成功连续监测了南极地区臭氧洞发生发展的过程, 2011年春季, 在世界上率先监测了北极地区臭氧低值过程<sup>[11]</sup>。FY-3/TOU 的 AAI 指数产品可用于大气污染过程的吸收性气溶胶和沙尘暴的监测<sup>[12-13]</sup>。

与 TOU 不同的是, 如表1所示在 FY-3/TOU 反演通道中, 317 nm, 331 nm 和 360 nm 常用于反演大气臭氧总量, 331 nm 和 360 nm 用于反演吸收性气溶胶指数。而 TOMS 仪器反演 AAI 通道则是 340 nm 和 380 nm。气溶胶指数是监测吸收性气溶胶空间分布的

定性产品,但由于臭氧对331 nm通道反射率计算的影响,会对气溶胶指数的分布产生影响,评估臭氧对气溶胶指数反演的影响对提高气溶胶指数对环境污染的监测准确度非常重要。

表 1 FY-3B/TOU 光谱参数

通道	实测中心波长/nm	实测带宽/nm
1	308.780	1.153
2	312.719	1.138
3	317.730	1.171
4	322.516	1.162
5	331.434	1.152
6	360.271	1.156

基于风云三号气象卫星紫外臭氧总量探测仪探测数据开发的吸收性气溶胶指数(AAI)与大气中对紫外线有吸收作用的气溶胶(简称吸收性气溶胶)有关,能够定性反应吸收性气溶胶的存在和空间分布特征,主要用于大气污染、沙尘暴等过程的监测。考虑影响紫外吸收性气溶胶指数反演的因素,重点研究臭氧含量的变化对紫外吸收性气溶胶(AAI)反演的影响。研究二者之间的关系可以为卫星反演气溶胶进行订正,提高预测的准确性。

1 气溶胶指数与臭氧总量反演算法介绍

1.1 气溶胶指数反演简介

首先从反演算法了解反演气溶胶指数与反演臭氧总量的区别。吸收性气溶胶指数(AI或AAI)来源于残差 $r$ 。残差的定义是一个跟波长有关的函数。

$$r_{\lambda} = -100 \left\{ \lg \left( \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} \right)^{\text{Meas}} - \lg \left( \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} \right)^{\text{Ray}} \right\}$$

其中, $I$ 是波长为大气顶部的辐亮度,上标为Means符号代表TOU测得的含有气溶胶的真实大气的辐亮度,上标为Ray表示仅由分子表面反射和吸收的纯净大气瑞利散射辐亮度。气溶胶指数也叫吸收性气溶胶指数。因为气溶胶对光的作用除了散射,还有吸收作用,吸收系数就是描述气溶胶吸收性的一种参数。吸收性气溶胶指数(AI或AAI)是衡量紫外(窗区)通道含有气溶胶粒子的大气后向散射强度与纯分子大气条件下瑞利散射后向散射亮度差别的物理量,以FY/TOU的331 nm和360 nm反演气溶胶指数为例,具体定义如下:

$$AI = 100 \left\{ \lg \left[ \frac{I_{360}^{\text{Meas}}}{I_{331}^{\text{Meas}}} \right] - \lg \left[ \frac{I_{360}^{\text{Calc}}}{I_{331}^{\text{Calc}}} \right] \right\}$$

其中:

$I_{331}^{\text{Meas}}, I_{360}^{\text{Meas}}$  分别为331 nm和360 nm窗区通道卫星仪器测得的后向散射辐亮度测量值;

$I_{331}^{\text{Calc}}, I_{360}^{\text{Calc}}$  分别为331 nm和360 nm窗区通道纯分子瑞利散射大气后向散射理论计算值;

吸收性气溶胶指数的反演有4个步骤:

- (1)利用317 nm通道和331 nm通道计算臭氧总量;
- (2)利用331 nm通道计算下垫面反射率和有效云量;
- (3)计算360 nm通道Rayleigh散射辐亮度;
- (4)计算紫外气溶胶指数AI(AAI)。

1.2 臭氧总量反演算法简介

利用卫星对臭氧进行观测有4种方法。这4种方法为紫外辐射后向散射法、掩星法、临边发射法和临边散射法。TOU采用紫外辐射后向散射法。目前对太阳紫外辐射的估算采用模式计算,即由辐射传输方程求解。紫外波段的辐射传输方程如下:

$$I_m(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0, R) = I_a(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi, \Omega, P_0) + I_s(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi, \Omega, P_0, R)$$

其中: $I_a$ 为大气贡献; $I_s$ 为表面反射贡献; $\lambda$ 为波长; $\theta$ 为卫星天顶角; $\theta_0$ 为太阳天顶角; $\varphi$ 为相对方位角; $\Omega$ 为臭氧总量; $P_0$ 为表面气压; $R$ 为表面等效反射率。

$$I_s(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0, R) = \frac{RT(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0)}{1 - RS_b(\lambda, \Omega, P_0)}$$

$T(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0) = I_d(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0)f(\lambda, \theta, \Omega, P_0)$   
 $S_b$ 是大气球反射率; $I_d$ 是到达 $P_0$ 处的直射漫射辐射; $f$ 是表面方向反射比(卫星观测方向)。

在实际资料处理中使用后向散射辐射亮度 $I$ 与太阳辐照度 $F$ 之比的以10为底的对数并乘以-100,并定义为 $N$ 值:

$$N = -100 \lg(I/F)$$

目前反演臭氧总量的仪器大多采用通道对算法。通道对利用两个通道对臭氧吸收量的不同反演臭氧总量。高光谱紫外仪器AURA/OMI如TOMS V7<sup>[14]</sup>和TOMS V8<sup>[15]</sup>均采取这种算法,FY-3/TOU采用的方法类似于TOMS V7算法。表1是TOU通道,通道3和通道5作为对紫外吸收有明显差异的通道对用于反演臭氧总量,由于通道6对臭氧的吸收比较微弱,可用于计算下垫面的反射特性以及等效辐射云量。通道3和通道5则用于反演臭氧总量。这两个通道的后向散射辐亮度均会受到吸收性气溶胶的影响,因此利用这两个通道反演臭氧总量时可能需要考虑气溶胶的影响。

2 采用的技术路线

采用的研究路线如图 1 所示,首先转换卫星格式,提取上述数据中的大气辐亮度、太阳辐照度、经纬度、天顶角、太阳方位角、太阳天顶角等气象信息作为反演数据,进一步处理。按照反演算法计算出青藏高原选定区域的每天的臭氧总量平均值和气溶胶指数平均值,计算每个月的平均值,得出相对臭氧总量和相对气溶胶指数,进行线性拟合,分析研究。

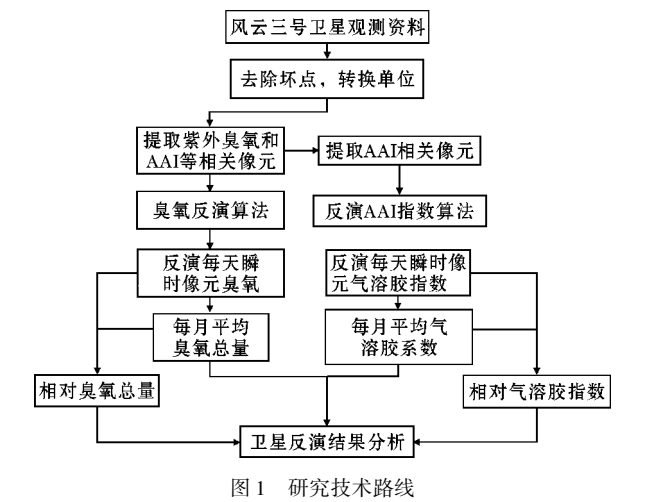


图 1 研究技术路线

3 风云三号卫星反演臭氧和气溶胶指数的结果分析

为研究吸收性气溶胶指数与臭氧总量的关系,对青藏高原地区(30°N~40°N,75°E~90°E)的 FY-3B/TOU 臭氧总量和吸收性气溶胶指数数据进行分析。选取该地区进行分析的出发点是为排除除臭氧总量之外的其他因素如水汽对吸收性气溶胶指数可能的影响,同时由于该地区臭氧总量变化幅度较大,夏季因臭氧谷而使得该区域臭氧总量的时空变化幅度大于10%<sup>[14]</sup>。

图 2 和图 3 分别为青藏高原地区 2013 年和 2014 年 3~5 月 FY3-3B/TOU 月平均吸收性气溶胶指数和臭氧总量的关系。从图 2 和图 3 的结果可以看到,当臭氧总量不变时,吸收性气溶胶指数存在很大变化,这反映吸收性气溶胶含量的变化,同时也可以看到,随着臭氧总量的增加,气溶胶指数也在不断增加,二者的相关系数  $R$  最小可达 0.61,最大可达 0.92。(图中给出的是相关系数的平方)。这足以表明,除了吸收性气溶胶浓度本身,臭氧对吸收性气溶胶指数的影响不可忽略。

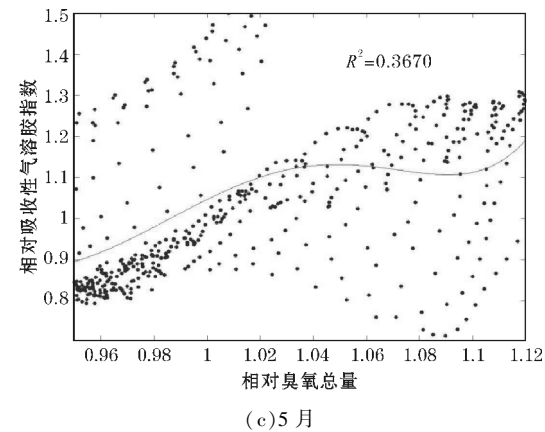
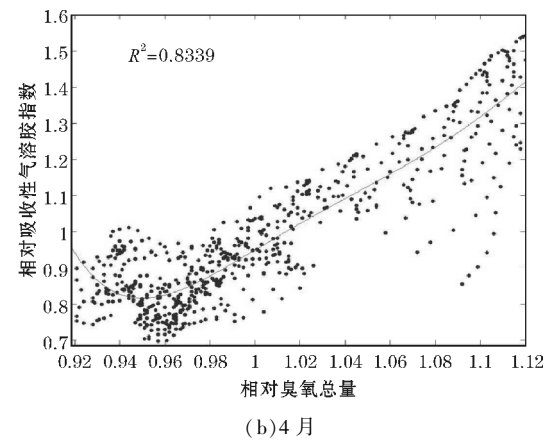
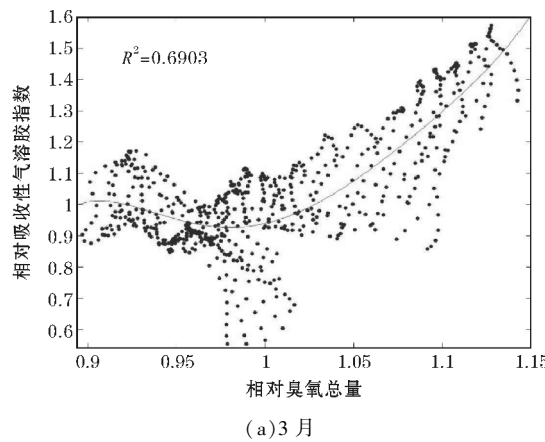
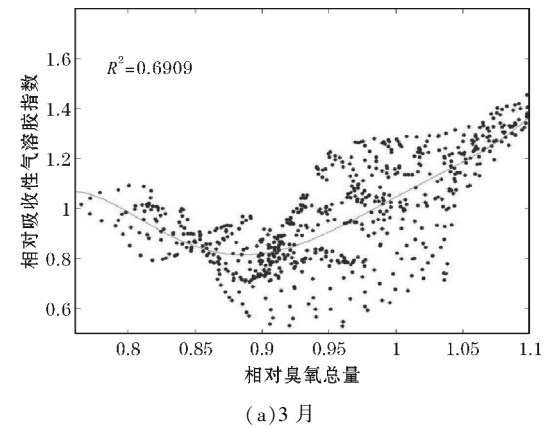


图 2 2013 年 3~5 月青藏高原地区 AAI 与臭氧总量关系





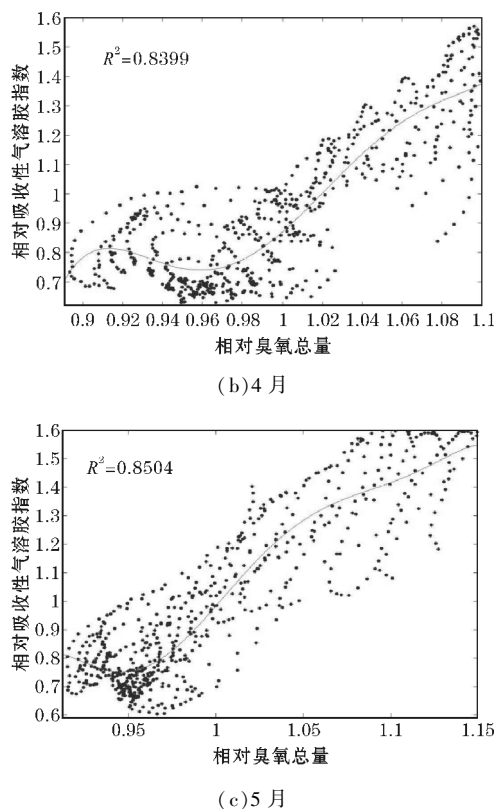


图3 2014年3-5月青藏高原地区AAI与臭氧总量关系

## 4 结论与讨论

利用风云三号气象卫星反演出的臭氧总量和气溶胶指数真实反演数据,采用多项式拟合方式研究二者的相关性得到下面的结论:

(1)吸收性气溶胶指数随着臭氧变化存在一定的正相关关系。其中4、5月相关性最大,这与春季臭氧总量变化比较大相一致。

(2)风云三号气象卫星在青藏高原北部地区的吸收性气溶胶指数和臭氧总量数据对比分析结果表明,吸收性气溶胶指数的确对臭氧总量的依赖关系是存在的,表明331 nm通道臭氧对紫外线的弱吸收作用,考察气溶胶指数时需要考虑臭氧总量的影响进行订正。

基于卫星数据研究了青藏高原地区2013-2014年臭氧与气溶胶指数的关系,发现二者存在正相关关系。考虑到地形、纬度等因素,研究其他地区的臭氧与气溶胶指数关系及其他类型气溶胶是否存在此关系是下一步的研究方向。

## 参考文献:

[1] H Gadhavi, A Jayaraman. Absorbing aerosols: contribution of biomass burning and implications for

radiative forcing[J]. Annales Geophysicae, 2010, 28:103-111.

[2] 陈洪滨,卞建春,吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望[J]. 大气科学, 2006, (5):813-820.

[3] 刘煜,李维亮,周秀骥. 青藏高原臭氧变化趋势的预测[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2001, S1:308-311.

[4] Wang, WeiHe, Zhang, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU) [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (26):3037-3043.

[5] Hegg D A. WMO/TD[J]. 1991, 439(25).

[6] Herman J R, P K Bhartia, O Torres et al. , Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(27):16911-16922.

[7] 李晓静,刘玉洁,邱红,等. 利用MODIS资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5):580-591.

[8] 陈斌,黄建平. S6:大气成分与天气、气候变化利用AERONET观测资料对东亚地区吸收性气溶胶识别及其光学特征分析[A]. 大气成分委员会、中国气象科学研究院. 第31届中国气象学会年会S6大气成分与天气、气候变化[C]. 大气成分委员会、中国气象科学研究院, 2014.

[9] Wang, WeiHe, Zhang, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU) [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (26):3037-3043.

[10] Wang W, Zhang X, Wang Y, et al. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit instrument, performance and results[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 32(17):4749-4758.

[11] 王维和,张艳,李晓静,等. 2011年春季北极臭氧异常低值监测和特性分析[J]. 极地研究, 23 (4):310-317.

[12] Wang W, Zhang X, Wang Y, et al. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit instrument, performance and results[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 32(17):4749-4758.

[13] Zhang X, Wang L, Wang W, et al. Long-term trend and spatiotemporal variations of haze over China by satellite observations from 1979 to 2013 [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119:362-

373.

变化与青藏高原低值中心[J]. 科学通报, 1995,15:1396-1398.

[14] 周秀骥,罗超,李维亮,等. 中国地区臭氧总量

A Preliminary Study on the Relationship between Aerosol Index and Total Ozone

ZHAO Fu-qiang<sup>1</sup>, WANG Wei-he<sup>2</sup>, DENG Xiao-bo<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>3</sup>  
(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. Aerospace Days Drawing Technology Co., Ltd. Sichuan branch, Chengdu 610101, China)

**Abstract:** Absorbing aerosol index (AAI) is an important parameter that qualitatively reflects the existence and spatial distribution of absorbing aerosols. The inversion of the aerosol index and the ozone are all obtained by the ultraviolet back radiation of the spacecraft, and the absorbable aerosols and ozone have different degrees of absorption of the UV rays. The total amount of ozone and absorbing aerosol index may be relevant due to the weak absorption of ozone in AAI retrieval channel. In order to study the relationship between the absorbing aerosol index and the total amount of ozone, the total amount of ozone and absorbing aerosol index data of FY-3 / TOU for Tibet plateau were analyzed from 2013 to 2014. The results show that there is a positive correlation between the aerobic index and the total amount of ozone above the plateau.

**Keywords:** signal and information processing; meteorological satellite remote sensing; ozone; absorbing aerosol index; relativity