



移动扫码阅读

胡海涛,刘绥华.卫星遥感监测遵义市大气质量状况研究[J].能源环境保护,2021,35(1):78-87.

HU Haitao, LIU Suihua. Study on monitoring atmospheric quality of Zunyi City by satellite remote sensing[J].
Energy Environmental Protection, 2021, 35(1):78-87.

卫星遥感监测遵义市大气质量状况研究

胡海涛^{1,2}, 刘绥华^{1,2,*}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州师范大学 山地资源与环境遥感重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为了解遵义市大气质量空间分布状况,采用 MODIS L1B 1 km 遥感影像数据,基于 6S 大气辐射传输模型构建查找表,利用暗像元法反演了遵义市 AOD(气溶胶光学厚度)分布,并将反演结果与 NASA 公布的 MOD04_3K 气溶胶产品及地面观测空气质量数据进行对比。结果表明:反演的遵义市 AOD 结果与 NASA 公布的 MOD04_3K 气溶胶产品相关性为 0.73,与地面观测的 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀ 相关性分别为 0.70、0.70、0.61,反演结果与验证数据具有较好的一致性,AOD 反演结果具有较高准确性;遵义市 AOD 分布呈现西南部较高,东北部较低的格局,遵义市全域 AOD 均值为 0.23,红花岗区 AOD 均值最高(0.51),赤水市 AOD 值最低(0.12)。

关键词:大气污染;遥感反演;气溶胶光学厚度;6S 大气辐射传输模型;暗像元法

中图分类号:X513

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)01-0078-10

Study on monitoring atmospheric quality of Zunyi City by satellite remote sensing

HU Haitao^{1,2}, LIU Suihua^{1,2,*}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Mountain Resources and Environmental Remote Sensing,
Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the spatial distribution of atmospheric quality in Zunyi City, MODIS L1B 1 km data was used to construct lookup tables based on 6S atmospheric radiation transmission model. Then dark pixel method was used to invert the distribution of aerosol optical depth (AOD) in Zunyi City, and the inversion results were compared with the MOD04_3K aerosol products and surface air quality data published by NASA. The results show that the AOD inversion results of Zunyi City have a correlation coefficient of 0.743 with MOD04_3K aerosol products published by NASA, and have correlation coefficients of 0.70, 0.70 and 0.61 with AQI, PM_{2.5}, and PM₁₀ observed on the ground, respectively. The inversion results have a good consistency with the verification data, so the accuracy of AOD inversion results is high. The distribution pattern of AOD in Zunyi City is high in the southwest and low in the northeast. The average AOD in Zunyi City is 0.23. The maximum average value is 0.51 which appears in Honghuagang District. The minimum average value is 0.12 which appears in Chishui City.

Key Words: Atmospheric pollution; Remote sensing inversion; Aerosol optical depth; 6S atmospheric radiation transmission model; Dark pixel method

收稿日期:2020-12-13;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2014]2127号);喀斯特山地生态环境保护与资源利用协同创新中心

第一作者简介:胡海涛(1995-),女,贵州毕节人,硕士在读,主要研究方向为地理信息与遥感应用。E-mail:2543022853@qq.com

通讯作者简介:刘绥华(1977-),男,湖南邵阳人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地理信息系统与遥感研究。E-mail:lsh23h@163.com

0 引言

空气污染与大众生活息息相关,全球变化与可持续发展更是全人类面临的共同挑战,对生态脆弱、发展中国家和地区而言,空气污染带来的挑战更为显著。因此,深入了解空气污染的分布与成因,对提高人们的生活质量和科学发展方针的制定具有指导意义。气溶胶是空气污染物的主要成分,对全球气候变化、人类身体健康也产生重要影响^[1-2]。

近地面空气质量的监测通常是利用地面站点进行监测。地面监测受自然因素和经济因素影响较大,监测站点的修建多分布于城市地区,站点分布受地形地势影响极大,呈现出覆盖范围与分布密度极不均匀的特点,而其获取的数据质量也不完全统一,这对空气污染的时空分布及其精细研究带来很大的挑战。而卫星遥感因其长时间宏观实时观测的特点,可获取时空连续、质量均一的空气质量数据,弥补了地面站点监测的缺点^[3-4]。遥感监测气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 是通过计算气溶胶颗粒对太阳光的削弱强度来进行的,AOD 值越高,大气越浑浊,空气质量越差,反之亦然^[3,5]。

贵州生态脆弱,近年来发展迅速,其面临空气污染带来的挑战尤为严峻。遵义市作为贵州省第二大城市,近年来经济发展紧随贵州省会城市贵阳之后,且二者差距在不断缩小,其发展速度快、发展潜力大。正确处理遵义市大气保护与经济发展之间的关系对遵义市及其周边城市的可持续发展尤为重要。由于贵州无地面气溶胶监测站点,因此利用遥感手段对遵义市大气状况进行监测变得十分必要。在遥感气溶胶的诸多方法中,暗像元法发展成熟,适用于植被覆盖良好地区,且在植物生长季的反演效果更好,遵义市 2018 年森林覆盖率达 59.62%,夏季植被覆盖良好,适用暗像元法遥感大气气溶胶,以期了解遵义市夏季大气环境状况提供参考。

目前,郑胡飞^[6]等研究了遵义市大气颗粒物在不同时间尺度上的变化及其浓度变化与气象因子之间的相关关系;学者孙哲^[7]等研究了遵义市 PM₁₀ 中污染元素的种类、来源、季节性变化特征及其存在的生态风险,但对遵义市大气气溶胶的空间分布及其主要成因研究比较缺乏。本文将借助 6S 大气辐射传输模型,利用暗像元法,对遵义市

大气气溶胶进行反演,分析遵义市大气气溶胶空间分布特征及其成因,探究利用遥感手段监测遵义市大气环境状况是否可行。

1 研究区概况

遵义市是贵州省第二大城市,位于贵州省北部,地理位置在北纬 27°8′~29°12′、东经 105°36′~108°13′。2018 年森林覆盖率达 59.62%,全市土地总面积 30 762 km²,2018 年城镇化率达 53%,地区生产总值 3 000.23 亿元,居全省第二。遵义市年平均气温 12.6~13.1 ℃,气候属亚热带季风气候,阴雨天气居多,在连续的阴雨天气之后转晴,造成的逆温现象会导致大气污染物不易扩散。根据 2018 年遵义市环境状况公报显示,遵义市中心城区空气质量较 2017 年有所好转,但其降尘比 2017 年增加 0.35 t/(km²·月)。近年来,遵义市的主要大气污染物由原来的 SO₂ 转变为了 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等可吸入颗粒物^[6]。已有研究^[8-10]表明,气溶胶光学厚度与空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等颗粒污染物具有高度相关性,故可通过遥感大气气溶胶来了解区域空间大气质量状况。

2 数据与方法

2.1 实验数据

2.1.1 MODIS L1B 遥感实验数据

MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 两颗太阳同步极轨卫星上的重要传感器。MODIS 的观测带宽为 2 330 km×10 km,每隔 1~2 天就可完成一次全球观测,可对地球、大气和太阳辐射进行综合观测并获取信息。它的探测器测量了 0.405 到 14.385 米之间的 36 个光谱波段,并获得了三种空间分辨率 250 米(1~2 波段)、500 米(3~7 波段)和 1 000 米(8~36 波段)的数据,可用于地方至全球的海洋、陆地及大气特征进程和趋势研究,观测数据自发布起便可免费获取。

因云量对遥感影像质量的限制较大,云量的多少直接影响到气溶胶反演结果的准确度,故在下载影像时应尽量选择云量少或晴朗天气获取的影像数据,再经过预处理和云检测之后,筛选出符合反演实验要求的影像数据。本文根据 2018 年夏季至 2019 年夏季遵义历史天气情况,基于 NASA 官网数据下载平台,下载筛选了遵义市 2018 年 06 月 06 日、08 月 25 日、2019 年 06 月 03 日、08 月 16 日、09 月 27 日和 28 日符合实验要求

的 terra MOD02 1KM L1B 影像数据,影像行列号为 h27 * 06,本次实验所获取的影像信息如表 1 所示。

表 1 实验获取的 MODIS 影像信息

Table 1 MODIS image information used in the experiment

日期	天气	云量	影像名称
2018 年 06 月 06 日	晴	较少	MOD021KM.A2018157.0345.061.2018157153636
2018 年 08 月 25 日	晴	少	MOD021KM.A2018237.0345.061.2018237133550
2019 年 06 月 03 日	晴	较少	MOD021KM.A2019154.0420.061.2019154131840
2019 年 08 月 16 日	晴	极少	MOD021KM.A2019228.0320.061.2019228132201
2019 年 09 月 27 日	晴	少	MOD021KM.A2019270.0355.061.2019275041112
2019 年 09 月 28 日	晴	极少	MOD021KM.A2019271.0300.061.2019271131920

2.1.2 气溶胶光学厚度反演结果验证数据

Remer^[11]等人通过研究发现,MOD04_3K 气溶胶产品与地面观测站点 AERONET 的数据具有较高一致性,其标准陆地气溶胶产品与 AERONET 站点数据的相关性为 0.8,海洋气溶胶产品与 AERONET 站点数据的相关性为 0.92。此外,国内外有相关研究^[12-14]表明,MOD04_3K 气溶胶产品误差居于合理误差范围之内,故 MOD04_3K 气溶胶产品可作为气溶胶反演结果的验证手段之一。本文基于 LAADS(美国航空航天宇航局数据存储网站接口)网站平台获取同一研究区相对应时期

的 MOD04_3K 气溶胶产品,用于验证使用 MOD02 1 km 数据反演 AOD 的准确性。本文获取的 MOD04_3K 气溶胶产品数据信息如表 2 所示。

此外,为验证利用反演 AOD 表征大气空气质量的可行性,本文将遵义市地面空气质量站点监测的 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 AQI(空气质量指数)数据与反演 AOD 做相关性分析,从而验证基于遥感手段反演的 AOD 监测大气空气质量的可行性。本文空气质量数据来自全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)。

表 2 实验获取的 MOD04_3K 气溶胶产品数据信息

Table 2 Data information of MOD04_3K aerosol products used in the experiment

日期	天气	云量	影像名称
2018 年 06 月 06 日	晴	较少	MOD04_3K.A2018157.0345.061.2018158200405
2018 年 08 月 25 日	晴	少	MOD04_3K.A2018237.0345.061.2018237134047
2019 年 06 月 03 日	晴	较少	MOD04_3K.A2019154.0420.061.2019154132631
2019 年 08 月 16 日	晴	极少	MOD04_3K.A2019228.0320.061.2019228134156
2019 年 09 月 27 日	晴	少	MOD04_3K.A2019270.0355.061.2019275042843
2019 年 09 月 28 日	晴	极少	MOD04_3K.A2019271.0300.061.2019275180819

2.2 反演方法

2.2.1 基本原理

陆地上空气溶胶卫星遥感发展于大气上界观测表观反射率。假设陆地表面是均匀朗伯表面,大气垂直均匀变化,卫星测量值可用等效反射率^[15],即用表观反射率 ρ^* 表示:

$$\rho^* = \pi L / (\mu_s E_s) \quad (1)$$

式中, $\mu_s = \cos \theta_s$, θ_s 是太阳天顶角, E_s 是大气顶部的太阳辐射通量密度, L 是卫星测量的辐亮度。

在卫星观测的目标表面为均匀朗伯体表面的假设条件下,不考虑气体吸收,则卫星观测的表观反射率 ρ^* 为:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \rho / (1 - \rho_s) * T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (2)$$

式中, θ_s 是太阳天顶角; θ_v 为卫星天顶角; φ 是相对方位角,可由卫星方位角 φ_v 和太阳方位角 φ_s 计算得到; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 为大气气溶胶和大气分子散射产生的反射率, $\rho / (1 - \rho_s) * T(\theta_s) T(\theta_v)$ 为地表和大气共同产生的反射率, $T(\theta_v)$ 和 $T(\theta_s)$ 分别为向上和向下整层大气透射率(漫射+直射); ρ 为地表反射率; S 为大气的球面反照率。 $T(\theta_v)$, $T(\theta_s)$ 和 S 取决于单次散射比 ω_0 、气溶胶光学厚度 τ 和气溶胶散射相函数 P ^[15]。

由式(2)可以看出,当地表反射率很小时($\rho < 0.06$),卫星观测反射率主要取决于大气贡献项

(方程式右边第 1 项),但地表反射率很大时,地表的贡献(方程式右边第 2 项)将成为主要贡献项^[16]。在大气气溶胶反演过程中通常需要设置不同的观测几何状况和气溶胶模式,利用大气辐射传输模型(如 6S 大气辐射传输模型)计算 AOD 与大气下界的球面反照率 S 、大气的等效反射率 ρ^* 以及大气透过率乘积 $T(\theta_s)T(\theta_v)$ 三个参数间的映射关系,进而根据公式(1)和(2)建立查找表^[17]。卫星反演气溶胶的实质就是从卫星接收到的信号中,将地表反射率噪声去除,获取大气气溶胶信息的过程^[18]。

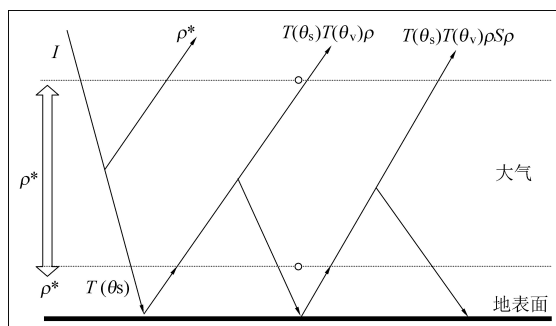


图 1 大气—地表系统双向反射比贡献

Fig.1 Bidirectional reflection contribution of the atmospheric-surface system

2.2.2 暗像元法

本次实验采用的是发展成熟、使用广泛的暗像元法。大量研究表明在天气状况比较理想的条件下(即大气当中的云量较少时),在暗目标上空卫星传感器所观测到的地物反射率随着气溶胶光学厚度的增加而增加,利用这种单调性可以通过地物的反射率推算出气溶胶光学厚度,这种算法就被称作暗像元法 DDV (Dense Dark Vegetation)^[19]。暗像元法最早是由 Kaufman 和 Sendra 在 1988 年提出的,其基本原理^[20]为:根据绿色植被在理想天气状况下其中红外波段对大气气溶胶的不敏感性,使得其表观反射率可近似等于其地表反射率,而中红外波段与红、蓝波段的地表反射率之间具有良好的线性关系,且红、蓝波段对大气气溶胶异常敏感,其反射率随气溶胶浓度的升高而升高,基于以上关系,可由中红外波段的表观反射率推算出红、蓝波段的地表反射率,然后从红、蓝波段的表观反射率中去除红、蓝波段的地表贡献,根据大气辐射传输模型获取大气参数,经计算得到气溶胶光学厚度。

3 气溶胶反演与验证

3.1 气溶胶反演

(1) 数据预处理

本次实验数据预处理包括 MODIS L1B 数据的预处理和 MOD04_3K 数据的预处理。

本文选取的 HDF 格式的 MODIS L1B 1 km 数据,在 ENVI5.3 中打开时已默认自动进行辐射校正,故本文用于实验的 MODIS 数据预处理包括几何校正、去除蝴蝶结效应、波段合成、波段计算及研究区裁剪等操作。

MOD04_3K 数据的预处理包括:几何校正、波段计算、研究区裁剪。

(2) 查找表构建

本次实验使用的查找表文件是利用 IDL8.5 直接调用 Fortran 语言的 6S 源程序,循环执行 6S 可执行文件所得,在构建气溶胶查找表文件前需先在 6S 源代码中对 6S 模型参数进行相应的设置,利用含参数的 6S 辐射传输模型,反演某一种模式下气溶胶的参数,然后插值建立 AOD 查找表,使用查找表反查得到 AOD^[21]。

(3) 气溶胶反演

利用根据遵义市历史天气和影像云检测结果筛选出的遵义市 2018 年 06 月 06 日、08 月 25 日、2019 年 06 月 03 日、08 月 16 日、09 月 27 日和 28 日共六期影像数据,利用 ENVI 扩展的气溶胶反演工具 modis_aerosol_inversion,输入云检测掩膜文件、角度合成数据文件、查找表,计算输出 6 期遵义市 AOD 空间分布结果。

3.2 结果验证与分析

3.2.1 气溶胶反演结果验证

将 MOD04_3K 气溶胶产品的背景值进行忽略后输出,将 MODIS L1B 1 km 反演的 AOD 结果进行异常值处理,再将 MODIS L1B 1 km 反演的 AOD 与 MOD04_3K 的 AOD 空间分布进行对比,反演成果与 NASA 发布的相应时间的 MOD04_3K 气溶胶产品的对比如图 2 所示。

由图 2 可以看出,基于暗像元法反演的遵义市夏季 AOD 与 NASA 官网提供的 AOD 在空间分布上具有较高一致性,高值区与低值区的分布基本相符,某些区域出入较大的原因可能是因为二者在云检测与云去除算法设置上有所不同,此外,分辨率不同可能也是造成差异的原因之一。

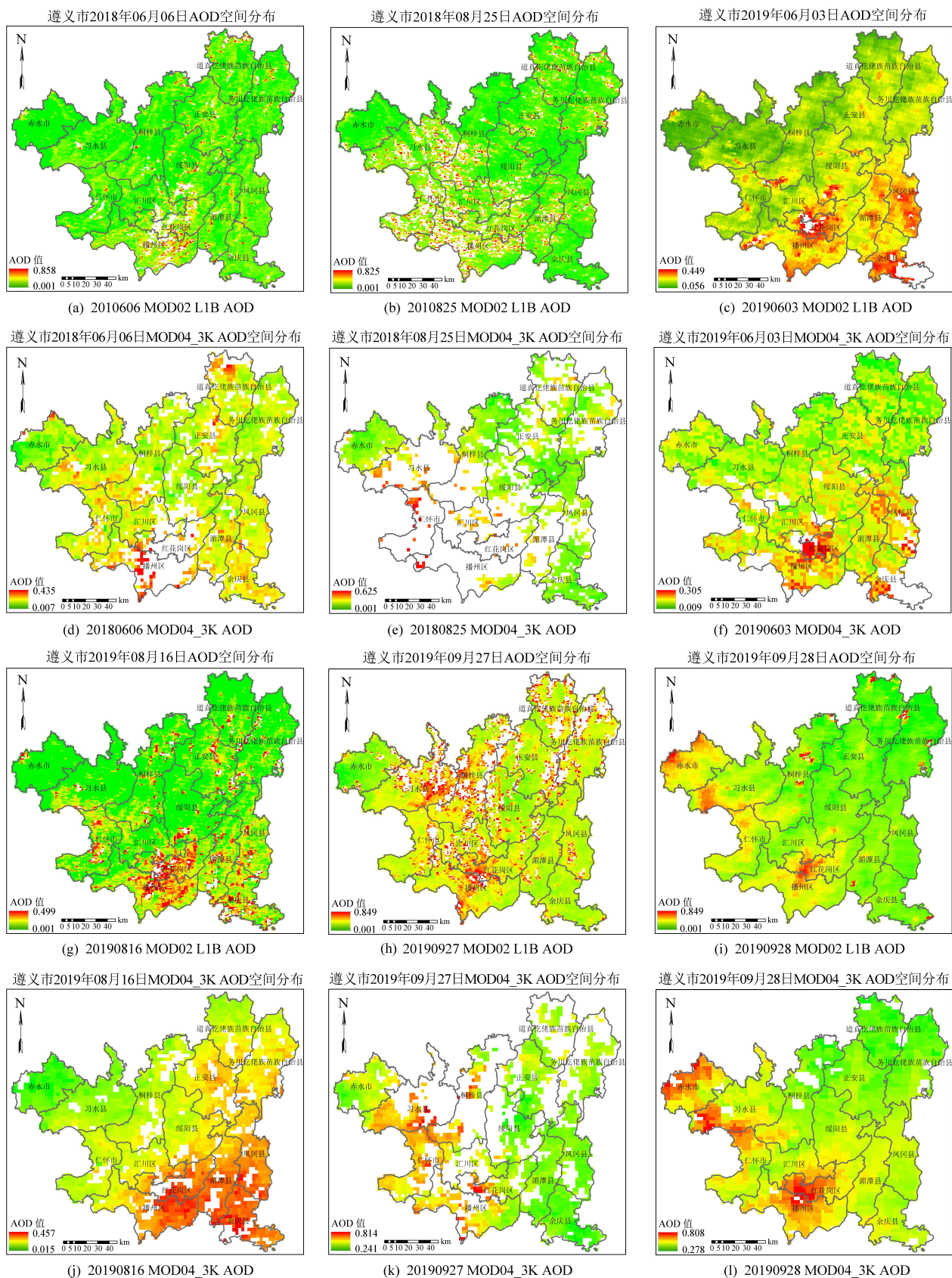


图 2 遵义市 MODIS L1B 反演 AOD 结果与 MOD04_3K AOD 对比

Fig.2 Comparison of inversion results of MODIS L1B and MOD04_3K AOD in Zunyi City

为进一步验证反演结果的准确性,将分辨率

为 1 km 的反演结果重采样为 3 km,从 MOD02

L1B 重采样结果与同时期 MOD04_3K 影像上随机选取 66 组 AOD 数据(实验共有 6 期 AOD 反演数据,每期随机选取 11 组,验证数据共 66 组),如表 3 所示,计算二者的相关性。

表 3 MODIS L1B 反演结果与 MOD04_3K AOD 数据对比
Table 3 Comparison of inversion results of MODIS L1B and MOD04_3K AOD in Zunyi City

MODIS L1B AOD	MOD04_3K AOD	MODIS L1B AOD	MOD04_3K AOD
0.173 8	0.216 0	0.050 6	0.317 0
0.169 0	0.163 0	0.000 1	0.029 0
0.198 6	0.241 0	0.119 3	0.183 0
0.273 1	0.181 0	0.124 1	0.224 0
0.044 0	0.058 0	0.118 4	0.233 0
0.191 0	0.152 0	0.197 6	0.234 0
0.036 4	0.185 0	0.228 2	0.354 0
0.115 6	0.158 0	0.264 5	0.355 0
0.029 7	0.144 0	0.311 3	0.493 0
0.183 4	0.221 0	0.316 0	0.542 0
0.446 9	0.314 0	0.435 4	0.554 0
0.090 7	0.166 0	0.431 6	0.493 0
0.354 3	0.322 0	1.055 2	0.439 0
0.205 3	0.362 0	0.322 7	0.439 0
0.220 6	0.385 0	1.124 0	1.650 0
0.317 1	0.392 0	0.937 7	1.020 0
0.141 3	0.309 0	0.623 4	0.723 0
0.227 3	0.254 0	0.374 3	0.649 0
0.130 8	0.234 0	0.346 6	0.580 0
0.270 3	0.361 0	0.218 6	0.620 0
0.380 1	0.111 0	0.246 3	0.577 0
0.490 8	0.305 0	0.304 6	0.566 0
0.257 8	0.150 0	0.220 6	0.564 0
0.110 7	0.019 0	0.298 9	0.507 0
0.201 5	0.098 0	0.238 7	0.559 0
0.156 6	0.880 0	0.271 2	0.549 0
0.114 5	0.940 0	0.319 9	0.649 0
0.167 1	0.110 0	0.589 7	0.657 0
0.155 6	0.110 0	0.644 6	0.676 0
0.118 4	0.040 0	0.699 8	0.890 0
0.093 5	0.282 0	0.677 8	0.877 0
0.058 2	0.218 0	0.567 8	0.657 0
0.000 1	0.165 0	0.607 3	0.801 0

从表 3 可以看出,MOD04_3K 的 AOD 值大部分比 MOD02 反演的 AOD 值稍高,个别值差距较

大,原因可能是暗像元的确定、反演窗口使用的阵列像素大小、云检测算法中阈值设置、地表反射率的计算值不同等原因所致,此外,反演误差也可能是导致二者 AOD 值差距较大的原因,具体原因需进一步研究分析或查阅相关研究文献方可确定。

图 3 是 MOD02 反演的 AOD 与 MOD04_3K AOD 的随机样本散点图。

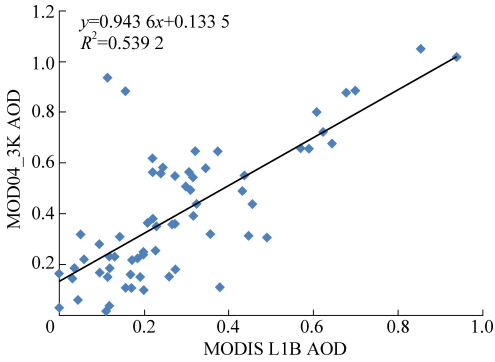


图 3 MODIS L1B AOD 与 MOD04_3K AOD 相关性
Fig.3 Correlation between MODIS L1B AOD and MOD04_3K AOD

从图 3 可以看出,随机样本的 AOD 值主要集中在 0~0.5 之间,一定程度上说明遵义市整体 AOD 值较低,空气质量较好;MOD02 AOD 与 MOD04_3K AOD 的线性方程为 $y = 0.943\ 6x + 0.133\ 5$,相关系数 R 为 0.734($R^2 = 0.539\ 2$),查表可知 MODIS L1B 反演结果与 MOD04_3K 气溶胶产品相关性在 0.01 的置信水平下显著相关(双尾),且二者相关性较强。此外,将随机样本导入 SPSS 中进行 F 检验,结果如表 4 示,MODIS L1B 反演结果与 MOD04_3K 气溶胶产品的线性关系在 $F_0(1,64) = 13.518$,大于 $F(1,60) = 7.08$,表明二者线性关系在 $\alpha = 0.01$ 的临界值下显著。由此说明气溶胶反演结果可行。

表 4 MODIS L1B 反演的 AOD 的 F 检验结果
Table 4 F-test results of MODIS L1B inversion results

	平方和	df	平均值平方	F	显著性
群组之间	2.663	59	0.45	13.518	0.002
在群组内	0.020	6	0.003	—	—
总计	2.683	65	—	—	—

3.2.2 反演 AOD 与 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 AQI 的相关性分析

为探究遥感技术用于大气监测的可行性,将反演结果与地面监测数据(PM_{2.5}、PM₁₀ 和 AQI)进行对比分析,通过分析 AOD 与地面观测数据的变化趋势与相关性来验证遥感技术用于大气监测的

可行性。从全国城市空气质量实时发布平台获取 2018 年 06 月 06 日、08 月 25 日、2019 年 06 月 03 日、08 月 16 日、09 月 27 日和 28 日上午 11 时遵义市 5 个国控点的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 AQI 共三个指标的监测数据。为避免量纲值之间差别的影响,将遵义市 AOD 均值、AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 进行百分比归一化处理,利用 SPSS 软件数据分析功能,计算 6 期 AOD 与 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 之间的相关性。如表 5 所示,AOD 反演结果与 AQI 相关系数为 0.70,与

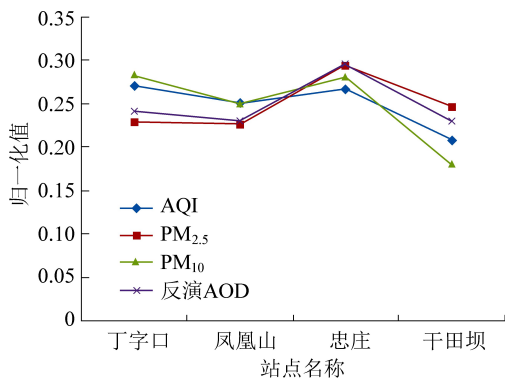
$PM_{2.5}$ 相关系数为 0.70,与 PM_{10} 相关系数为 0.61,其中,AOD 与 $PM_{2.5}$ 、AQI 相关性最强,相关系数为 0.70。统计结果显示,AOD 反演结果与地面实测数据 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 在 0.01 的置信水平下显著相关(双尾),从图 4 可以看出,AOD 走势变化与 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 走势变化基本相符,遥感反演具有可行性,AOD 反演结果可用以表征大气环境空气质量状况。

表 5 反演的 AOD 与地面监测的 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 之间的相关性

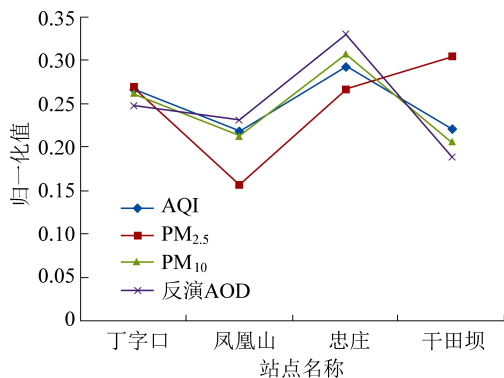
Table 5 Correlations between AOD inversed and AQI, $PM_{2.5}$ and PM_{10} monitored on the ground

		AQI	$PM_{2.5}$	PM_{10}	反演 AOD
AQI	皮尔森(Pearson)相关	1	0.628 * *	0.882 * *	0.702 * *
	显著性(双尾)	—	0.000	0.000	0.000
	N	28	28	28	28
$PM_{2.5}$	皮尔森(Pearson)相关	0.628 * *	1	0.496 * *	0.699 * *
	显著性(双尾)	0.000	—	0.007	0.000
	N	28	28	28	28
PM_{10}	皮尔森(Pearson)相关	0.882 * *	0.496 * *	1	0.610 * *
	显著性(双尾)	0.000	0.007	—	0.001
	N	28	28	28	28
反演 AOD	皮尔森(Pearson)相关	0.702 * *	0.699 * *	0.610 * *	1
	显著性(双尾)	0.000	0.000	0.001	—
	N	28	28	28	28

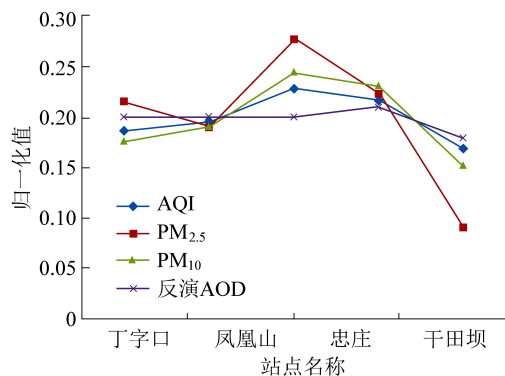
* * 相关性在 0.01 的置信水平下显著(双尾)。



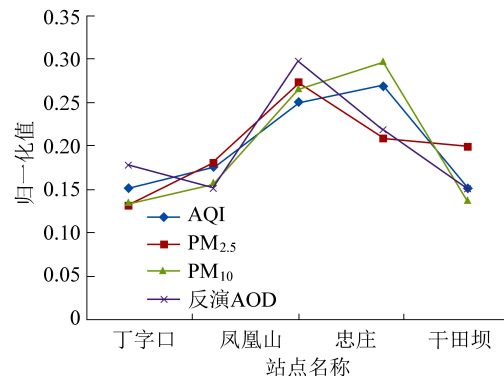
(a) 2018-06-06



(b) 2018-08-25



(c) 2019-06-03



(d) 2019-08-16

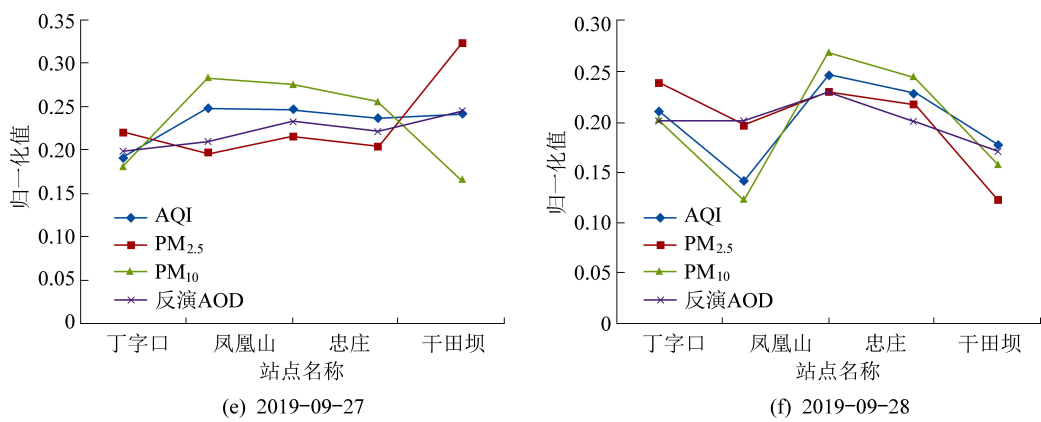


图 4 遵义市 AOD 反演结果与 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 AQI 的归一化值趋势比较

Fig.4 Trend comparison between AOD inversion results and PM_{2.5}, PM₁₀ and AQI normalized values in Zunyi City

3.2.3 遵义市 AOD 空间分布特征及影响因素分析

为降低反演 AOD 空间分布分析的误差,本文选取反演结果较为完整的日期进行分析。运用 ENVI 扩展工具 Zonal Statistics 对研究区进行分区统计,分别计算遵义市 2018 年 06 月 06 日、2019 年 06 月 03 日、08 月 16 日、09 月 28 日各县级行政区 AOD 均值,再求取各县级行政区 2018 年 06 月 06 日、2019 年 06 月 03 日、08 月 16 日、09 月 28 日共 4 天的 AOD 平均值,如图 5 所示,红花岗区 AOD 均值最大,为 0.51,赤水市 AOD 均值最小,为 0.12,AOD 均值由大到小排序依次为:红花岗区>播州区>仁怀市>汇川区>习水县>湄潭县>桐梓县>余庆县>道真仡佬族苗族>凤冈县>务川仡佬族苗族>绥阳县>正安县>赤水市,遵义市气溶胶光学厚度空间分布呈西南部较高,东北部较低的分布格局。

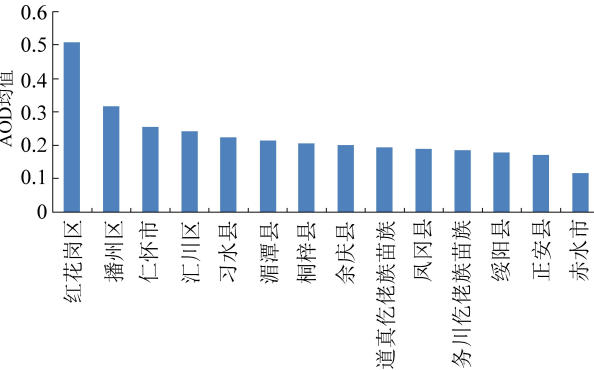


图 5 遵义市各行政区 AOD 均值排序
Fig.5 The average AOD ranking of each administrative regions of Zunyi City

基于遥感反演的遵义市 AOD 空间分布(图 2)与各县级区域 4 期 AOD 综合均值排序结果(图 5),结合遵义市各区(县)的实际发展现状,对遵义市 AOD 空间分布差异进行综合分析。

(1)红花岗区、播州区、仁怀市、汇川区 AOD 值相对较高。红花岗区、播州区和汇川区是遵义市辖区,仁怀市位于遵义市辖区附近,是国酒茅台的故乡,其工业经济十分强大。这些区域建设用地占比较高,地表植被覆盖度相对较低,交通线路交集,车流量较大,人类活动较为频繁,人类生产生活过程中产生的烟雾和粉尘对 AOD 影响显著,此外,城区扩建及新修、改建、扩建交通道路等工程也增加了气溶胶物质浓度。

(2)习水县、湄潭县、桐梓县和余庆县 AOD 相对市中心较低。这些区域相对远离市中心,处于城区向郊区的过渡地带,其人口、车流逐渐降低,植被覆盖度相对市中心较高,人类活动强度显著减弱,所以 AOD 水平相对市中心较低。

(3)绥阳县、正安县、凤岗县、道真、务川和赤水市 AOD 水平较低。这些区域处于遵义市边缘,建设用地占比低,植被覆盖程度高,人口少且分布分散,人类活动对自然环境干扰程度低,除城区与部分工业园区局部 AOD 值稍高,其余区域 AOD 均维持在较低水平,大气空气质量优良。

(4)根据遵义市 2019 年政府报告,遵义市 2019 年上半年各县市 GDP 排名由高到低为:仁怀市>红花岗区>汇川区>播州区>习水县>桐梓县>赤水市>绥阳县>湄潭县>正安县>余庆县>凤冈县>务川>道真,整体看来,遵义市 AOD 空间分布与遵义市经济发展关系密切,经济发展越好、交通越发达、人口越集聚、工业越发达的区域 AOD 值越高。此外,AOD 值高低也与地区地形地貌、大气环流、风向等自然地理条件关系密切。整体看来,遵义市辖区 AOD 值最高,以遵义市辖区为中心向外辐射,一定范围内,AOD 值随着距遵义市辖区距离的增加而降低;此外,AOD 值较高区域分布于遵义

市西南部,即遵义市辖区和仁怀市区域,其余的较高值多分布于各县市中心城区和工业园区分布处;遵义市全域 AOD 平均值为 0.23,平均值较低,整体空气质量较好,但局部高值区应当引起相关政府部门重视,在经济发展的同时做好环境保护,合理规划安排,在各个环节做好气溶胶物质的减排工作,避免气溶胶物质大量排放与聚集,污染环境和危害人体健康安全。

4 讨论

(1)基于遥感手段反演的 AOD 与 NASA 公开向全球发布的 MOD04_3K 气溶胶产品具有较好的一致性,但 MOD04_3K 气溶胶产品在小尺度上的准确性还需进一步验证。

(2)遥感的 AOD 与地面空气质量相关指标之间具有显著相关性,符合理论事实,说明遥感提取的 AOD 具有一定可靠性,可作为监测大气环境质量状况的手段之一。

(3)1 km 的 AOD 空间分辨率对于小尺度区域研究来说精度不够,特别是针对贵州山区来说,地貌复杂,地形起伏较大,其空间异质性更强,更高的空间分辨率可描述更为详细的细节信息,所以下一步的研究应向更高空间分辨率及降低地表噪声方向进行。

(4)因暗像元法要求在研究区域内有足够多的浓密植被,因此不适用于植被覆盖较少的城市地区。

(5)本文去云处理的原理是根据云的高反射率特点,阈值的大小是根据研究经验来进行设置的,所以经验模型带来的误差是不可避免的。

(6)对于入射光源来说,山区因有了地形的影响,所以它对太阳的直射光线会有遮挡,产生阴影,而且太阳在起伏地表上的照射与起伏地表间存在一个夹角,导致其跟水平地表的辐射又不相同;此外,因为地形的影响,天空的散射就不再是水平地表面的半球的 2π 空间了,而是一部分;再者,因为地形的影响,地表辐射还多加了一个量,就是周围环境给像元的一个反射。对于遥感来说,地形的起伏还会造成遥感观测盲区,这些都是反演误差产生的原因。

5 结论

运用遥感反演手段,基于 6S 大气辐射传输模型,运用浓密植被法,反演了 6 期遵义市夏季 AOD

空间分布,并对遵义市 AOD 空间分布差异因素作了简要分析,结果表明:

(1)遥感手段反演的 AOD 结果与 NASA 公布的 MOD04_3K 气溶胶产品相关性在 0.01 的置信水平下为 0.734,与地面观测的 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 相关性在 0.01 的置信水平下分别为 0.70、0.70、0.60,反演结果与验证通过双尾相关性检验,且二者相关性显著,故遥感反演可作为快速获取遵义市大气环境质量信息的有效方式,为宏观、实时、快速、低成本监测遵义市大气环境提供监测手段。

(2)暗像元法可以较好地反演出遵义市大气气溶胶的空间分布状况,气溶胶光学厚度空间分布呈现西南部较高,东北部较低的分布格局,遵义市全域 AOD 均值为 0.23,AOD 均值最高的区域是红花岗区,AOD 值为 0.51,最低的是赤水市,AOD 值为 0.12,遵义市全域大气空气质量良好。

(3)结合遵义市各区域经济发展状况来看,遵义市气溶胶光学厚度值与区域经济发展状况关系密切,一般来讲,经济发展越好的区域,其 AOD 值越高。

参考文献

- [1] He J L, Zha Y, Zhang J H, et al. Retrieval of aerosol optical thickness from HJ-1CCD data based on MODIS-derived surface reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36 (3): 882-898.
- [2] Berg L K, Fast J D, Barnard J C, et al. The two-column aerosol project: Phase I - overview and impact of elevated aerosol layers on aerosol optical depth [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121 (1): 336-361.
- [3] 吴健生,王茜.基于 AOD 数据反演地面 $PM_{2.5}$ 浓度研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (8): 68-76.
- [4] 宋善海,刘绥华,王堃,等.贵阳市 AOD 遥感反演及其与土地利用类型的耦合关系 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36 (6): 59-67.
- [5] XIA X, CHEN H, LI Z, et al. Significant reduction of surface solar irradiance induced by aerosols in a suburban region in northeastern China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112 (D22): 928-935.
- [6] 郑胡飞,曾勇,张光红.遵义市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染水平时间分布及其与气象条件的关系研究 [J]. 环境科学与管理, 2017, 42 (6): 149-152.
- [7] 孙哲,李金娟,郭兴强,等.遵义市 PM_{10} 中元素污染特征、来源与生态风险评价 [J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26 (3): 25-29.
- [8] 李成才,毛节泰,刘启汉,等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005 (S1): 177-186.

- [9] Wang J, Christopher A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ mass: Implications for air quality studies [J]. *Geophys Reslett*, 2003, 30: 1-4.
- [10] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度 [J]. *大气科学*, 2005 (3): 335-342.
- [11] Remer L A, Mattoo S, Levy R C, et al. MODIS 3 km aerosol product: Algorithm and global perspective [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2013, 6 (1): 69-112.
- [12] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 2003 (5): 869-880+951-953.
- [13] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. *应用气象学报*, 2002 (S1): 127-135.
- [14] 张莹, 孙照渤. 中国中东部 MODIS 与 MISR 气溶胶光学厚度的对比验证: 第 27 届中国气象学会年会大气物理学与大气环境分会场论文集 [C]. 北京: 中国气象学会, 2010.
- [15] 李晓静, 刘玉洁, 邱红. 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.
- [16] 刘玉洁, 杨忠东. 《MODIS 遥感信息处理原理与算法》[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 84-109.
- [17] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 12-13.
- [18] 田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空空间分辨率气溶胶光学厚度反演 [J]. *遥感学报*, 2018, 22 (1): 5163.
- [19] 刘佳雨. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 16-18.
- [20] 葛邦宇, 杨磊库, 陈兴峰, 等. 暗目标法的 Himawari-8 静止卫星数据气溶胶反演 [J]. *遥感学报*, 2018, 22 (1): 38-50.
- [21] 薛慧. 基于 MODIS 影像的包头市气溶胶光学厚度的反演建模研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017: 23-24.