

Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法

苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 朱德海*, 黄健熙, 王鹏新

中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083

摘要 Sentinel-2 卫星是全球环境与安全监测系统“哥白尼计划”中的第二颗卫星, 其影像具有高时空分辨率, 是未来遥感应用的重要数据源。采用大气校正简化模型(SMAC)、6S 模型和 Sen2cor 方法对 Sentinel-2 卫星影像进行大气校正, 将上层大气表观反射率转换为地表反射率, 并结合实测地物的光谱数据进行分析。Sentinel-2 卫星影像经过大气校正后, 影像光谱曲线与地面实测光谱曲线的变化趋势一致, 具有较高的拟合度。三种模型大气校正的结果具有较强的相关性和较高的精度, 其中 Sen2cor 方法精度最高, 决定系数(R^2)为 0.8196, 均方根误差(E_{rmse})为 0.0388, 其次为 6S 模型和 SMAC。从归一化植被指数(NDVI)的分析可以看出, SMAC 计算的 NDVI 值与实测值的相关性最高, R^2 为 0.6389, E_{rmse} 为 0.093, 其次为 6S 模型和 Sen2cor 方法。结果表明这三种方法的大气校正精度较高, Sentinel-2 卫星影像经过校正后影像质量明显得到提高, 增加了可用性。

关键词 遥感; 大气校正; 地表反射率; Sentinel-2 卫星影像; 大气校正简化模型; 6S 模型; Sen2cor 方法

中图分类号 P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0128001

Atmospheric Correction Method for Sentinel-2 Satellite Imagery

Su Wei, Zhang Mingzheng, Jiang Kunping, Zhu Dehai, Huang Jianxi, Wang Pengxin

College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract Sentinel-2 is the second satellite of the world's environmental and safety monitoring system 'Copernicus plan', and it is an important data source for future remote sensing applications with high temporal-spatial resolution image. The simplified model for atmospheric correction (SMAC), 6S model and Sen2cor method are used to carry out atmospheric correction for Sentinel-2 satellite imagery. The upper atmospheric apparent reflectance is converted to surface reflectance, and analysis combining with measured spectral data of ground objects is carried out. After the atmospheric correction of Sentinel-2 satellite image, the spectral curves of the image and measured objects have the same change tendency with a high fitting degree. The atmospheric correction results of three models have strong correlation and high precision. The accuracy of Sen2cor method is the highest, whose determination coefficient (R^2) is 0.8196, and root-mean-square error (E_{rmse}) is 0.0388, followed by 6S model and SMAC. From the analysis of normalized differential vegetation index (NDVI), we find that NDVI values calculated by SMAC have the highest correlation with measured values, whose R^2 is 0.6389, and E_{rmse} is 0.093, followed by 6S model and Sen2cor method. Results show that the atmospheric correction accuracy of three methods is high. When the sentinel-2 satellite imagery is corrected, the image quality is improved obviously, and the availability is increased.

Key words remote sensing; atmospheric correction; surface reflectance; Sentinel-2 satellite imagery; simplified model for atmospheric correction; 6S model; Sen2cor method

OCIS codes 280.4788; 010.1290; 010.5620

1 引 言

光学卫星影像是遥感应用的重要数据源之一。随着国内外航天技术的不断发展, 可用的卫星影像种类不断增加, 时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率

也在不断提高, 为遥感数据的定量化应用提供了基础。Sentinel-2 影像是新一代多光谱影像, 共有 13 个光谱波段, 其中包括 3 个红边波段, 是植被长势监测的理想数据源, 在全球环境变化、农作物生长监测、森林监测、灾害应急与救援等方面具有重要意义^[1]。

收稿日期: 2017-04-27; 收到修改稿日期: 2017-08-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41371327, 41671433)

作者简介: 苏伟(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事农业遥感方面的研究。E-mail: suwei@cau.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhudehai@263.net

在太阳-大气-目标-大气-传感器的辐射传输过程中,由于大气分子、气溶胶的散射以及臭氧、水汽等气体的吸收,卫星接收的信号不能准确地反映地表物理特征,从而造成影像的清晰度和对比度下降以及反射率、辐亮度等相关物理量出现偏差,降低了卫星影像的质量和可用性^[2]。大气校正的目的是通过一定的手段消除或减少大气分子、气溶胶的散射和臭氧、水汽等气体吸收对地物反射率的影响^[3],是进行地表参数定量分析的前提。

大气校正的方法主要有经验线性法、物理模型法和介于经验方法和物理模型之间的半经验物理模型法。经验线性法是基于影像统计量或地面实测的实验方法,包括直方图调整法、暗物体扣除法、固定目标法等^[4],其优点是简单、易于操作,缺点是依赖各种假设或实测数据,对影像的要求较高,容易出现过度校正。基于大气辐射传输模型的理论方法即物理模型法,如 6S 模型、FLAASH 模型、MORTRAN 模型、ACTOR 模型,以数学、物理学为基础,通过研究太阳辐射在大气介质中的传输过程,得到大气介质的吸收和散射特性。相比经验线性法,基于大气辐射传输模型法具有明确的物理意义,精度更高,是目前使用最广泛的大气校正方法。介于经验方法和物理模型之间的半经验物理模型法,如大气校正简化模型(SMAC),采用半经验公式代替复杂的物理过程,兼具经验方法和物理模型的优点。

目前,国内外已有多位学者对卫星影像的大气校正方法进行了研究。Adlergolden 等^[5-6]基于 MODTRAN4 模型分别对 AVIRIS 短波光谱影像及 HJ-1 卫星 CCD 数据进行大气校正,得到了较好的效果。Tachiiri 等^[7-8]利用 6S 模型分别对 NOAA/AVHRR 数据和 GF-1 数据进行了大气校正研究,并计算了影像的归一化植被指数(NDVI)值。彭妮娜等^[9]基于同步 MODIS 影像和 6S 辐射传输模型对 QuickBird-2 卫星海岸带影像进行大气校正,同时考虑了混浊水域上空气溶胶光学特性和高分辨率影像临近像元效应,得到了理想的结果。Fuyi 等^[10]分别利用 ACTOR2、ACTOR3 及 FLAASH 模型对 Landsat 5 TM 影像进行大气校正研究,结合实测值分析,得出 ACTOR3 精度高于另外两种模型的结论。Proud 等^[11]对比了 6S 模型与 SMAC 两种大气校正模型,发现 SMAC 具有较高的精度。宋晓宇等^[12]基于 AVIRIS 数据评价了大气校正模块 FLAASH,认为在大气条件较好的情况下,FLAASH 模型反演天底点垂直观测获取的影像地

表反射率更准确。周莉等^[13]采用 6S 模型与近红外波段离水反射率模型相结合的方法,通过神经网络模拟大气辐射传输过程,实现了可见光波段的大气校正,结果表明该方法在太湖有较好的适用性。

本文以农作物生长过程监测为应用目标,以 Sentinel-2 卫星影像的大气上层表观反射率(TOA)产品为数据源,研究基于 SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法的 Sentinel-2 卫星影像大气校正,主要内容包括: Sentinel-2 卫星影像概况及应用潜力分析; SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法原理介绍; 基于 SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法的 Sentinel-2 卫星影像大气校正结果分析及精度评价。

2 数据源

2.1 Sentinel-2 卫星影像概况及应用潜力分析

Sentinel-2 环境监测卫星是欧盟委员会(EC)和欧洲航天局(ESA)共同倡议的全球环境与安全监测系统“哥白尼计划”中的第二颗卫星。Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 分别于 2015 年 6 月和 2017 年 3 月成功发射。Sentinel-2 卫星的主要任务是对全球陆地表面进行高分辨率多光谱成像。该卫星的轨道高度为 786 km,观测幅宽为 290 km,使用寿命为 7.25 a,单星重访周期为 10 天,A/B 双星重访周期为 5 天。卫星上搭载了一个采用推扫式成像模式的多光谱成像仪(MSI),且包含一个光瞳直径为 150 mm 的望远镜,该望远镜的结构和反射镜利用碳化硅材料制成,可减少光学系统的热变形^[14]。该卫星影像共有 13 个波段,空间分辨率分别为 10, 20, 60 m,各波段空间分辨率的详细情况如表 1 所示。

目前能够免费获取并用于植被定量监测的卫星影像多数可覆盖 4 个光谱波段,即蓝、绿、红、近红外波段,但许多种植物有着自身特殊的光谱,是这 4 个光谱波段无法表征的^[15-16]。例如,葡萄冠层的光谱颜色很特殊,水稻植株在稻田中时常被水的颜色波段所掩盖。因此,仅有 4 个光谱波段无法充分反映植被冠层情况。Sentinel-2 卫星影像除了具有蓝、绿、红、近红外这 4 个光谱波段外,还具有 3 个植被红边波段(表 1)。红边波段是指绿色植物在红波段与近红外波段之间反射率增加最快的波段,也是一阶导数光谱在该区间内的拐点。红边波段往往与植被覆盖度和叶面积指数密切相关,植被覆盖度越高,叶面积指数越大,红边斜率也就越大,相应的植被生长状态越好,红边位置会出现红移;反之,则红边位置会出现蓝移^[17]。红边波段还对植被冠层的叶绿

表 1 Sentinel-2 影像波段
Table 1 Bands of Sentinel-2 imagery

Sentinel-2 imagery band	Central wavelength /nm	Band width /nm	Resolution /m
Band 1-Coastal aerosol	443	20	60
Band 2-Blue	490	65	10
Band 3-Green	560	35	10
Band 4-Red	665	30	10
Band 5-Vegetation red edge	705	15	20
Band 6-Vegetation red edge	740	15	20
Band 7-Vegetation red edge	783	20	20
Band 8-NIR	842	115	10
Band 8a-Narrow NIR	865	20	20
Band 9-Water vapour	945	20	60
Band 10-SWIR-cirrus	1375	30	60
Band 11-SWIR	1610	90	20
Band 12-SWIR	2190	180	20

素和氮含量非常敏感,这对于植被定量遥感监测具有重要意义。此外,Sentinel-2 卫星影像与 Landsat 8 OLI、SPOT5 有相似波段,在有自己独特波段和分辨率的基础上,结合其他卫星影像,进一步提高了该卫星影像的可用性。

Sentinel-2 卫星提供的数据产品为 Level-1C,它是经过辐射校正和几何校正的大气上层表现反射率,每幅 Level-1C 产品由一景 100 km² 的正射影像(UTM/WGS84)构成,影像的地图坐标经过数字高程模型(DEM)进行纠正,包括陆地、水、云掩模等数据。目前可以从官方网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)免费下载 Level-1C 数据产品。

2.2 研究区概况和数据获取

Sentinel-2 卫星影像获取时间为 2017 年 3 月 29 日 11:16,影像地理范围为 115°30'E—117°30'E 和 39°30'N—40°00'N,具体地理位置如图 1(a)所示。该影像位于北京市,影像获取时天气晴朗,该地理范围内的地形主要为平原和山地,土地利用类型有农田、林地、居民点、道路和水域。图 1(b)~(d)分别为野外实验地点不同分辨率的局部放大图,图 1(b)为真彩色合成,图 1(c)、(d)为假彩色合成。由图可见,10 m 分辨率的影像地物更清晰,内容也更加丰富;20 m 分辨率的影像主要是红边波段,对于植被的长势参数非常敏感,在结合 10 m 分辨率影像的基础上有广阔的应用前景;60 m 分辨率影像较前两者而言分辨率较低,主要用于提供气溶胶、水

体和云等方面的信息。

野外实测数据采集时间为 2017 年 3 月 31 日 11:00—12:00,天气情况与 2017 年 3 月 29 日基本一致。使用的探测仪器为美国 Spectra Vista 生产的 SVC HR1024i 便携式地物光谱仪,其探测波长范围为 340~2510 nm,可实时获取地物辐照度及反射率曲线。SVC HR1024i 便携式地物光谱仪镜头视场角为 4°,当在离地面 1.5 m 的位置进行测量时,可视地物的面积约为 0.008 m²,认为光谱仪的观测对象为单一地物。实验地点在中国农业大学上庄实验站,实验对象包括 4 种地物:冬小麦、裸土、水泥路和油菜地,每两个点之间的距离大于 15 m,共计 39 个点,其分布情况如图 1 所示。2017 年 3 月 31 日,北方植物刚开始返青,冬小麦与油菜地的植被覆盖度不高,此时卫星影像的像元为植被与土壤的混合像元。为了解决混合像元问题,在测量地物光谱的同时,利用相机拍摄了该点的照片,并裁剪出 0.5 m×0.5 m 的覆盖范围。利用判断条件(绿波段的 DN 值大于红波段和蓝波段)将照片分为植被和土壤,如图 2 所示,通过计算植被覆盖度,得到混合像元中植被与土壤所占的比例。在冬小麦和油菜地中,植株的种植密度及长势基本一致,可以认为该影像像元大小内的植被长势均匀,即通过照片计算的覆盖度与像元范围内的覆盖度一致。经过计算,冬小麦的植被覆盖度为 0.5~0.65,油菜地的植被覆盖度为 0.4 左右。

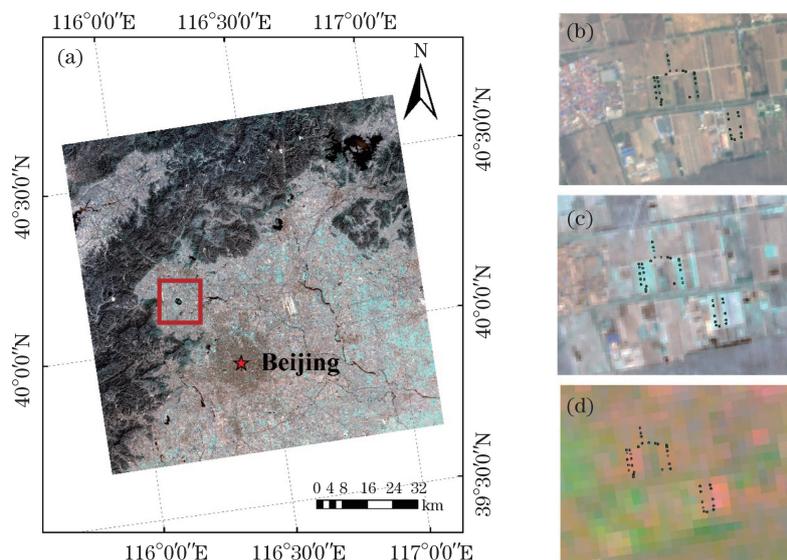


图 1 研究区位置及影像概况。(a)研究区位置;(b)分辨率为 10 m,RGB 通道为波段 2,3,4;
 (c)分辨率为 20 m,RGB 通道为波段 5,7,12;(d)分辨率为 60 m,RGB 通道为波段 1,9,10
 Fig. 1 Location and image situation of study area. (a) Location of study area; (b) resolution is 10 m,
 and RGB channels are band 2, 3 and 4; (c) resolution is 20 m, and RGB channels are band 5, 7 and 12;
 (d) resolution is 60 m, and RGB channels are band 1, 9 and 10

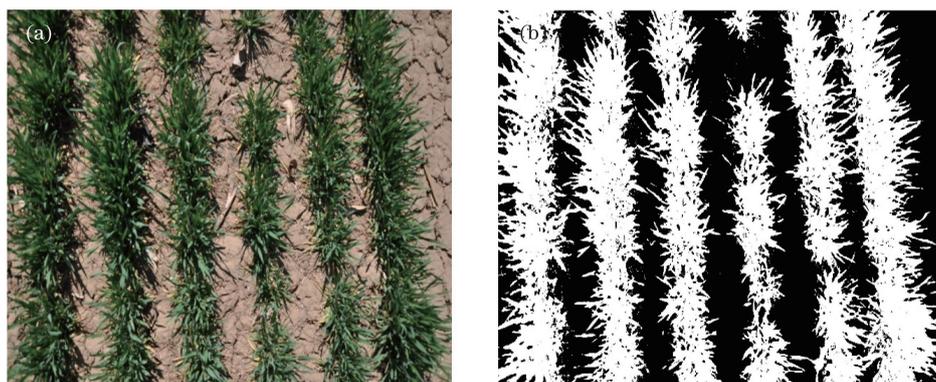


图 2 图像分割。(a)实地拍摄照片;(b)图像分割结果(植被为白色,土壤为黑色)
 Fig. 2 Image segmentation. (a) Photo taken in the fieldwork;
 (b) image segmentation result (vegetation is white, and soil is black)

3 大气校正方法

3.1 SMAC 原理

大气校正简化模型(SMAC)是 Rahman 和 Dedieu^[18]提出的,其以 5S(Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型为基础,采用各个波段的系数方程及半经验模型来描述太阳辐射在穿越大气过程中大气介质的吸收和散射作用。SMAC 的主要优点包括:1)不依赖于查找表,计算速度快;2)模型易迁移到其他辐射传输模型中;3)有正向和逆向两个过程,即大气上层表观反射率(TOA)与大气下层表观反射率(BOA)可以相互计

算。当前 SMAC 支持的卫星包括 Sentinel-2、Landsat 系列 MODIS、SPOT 等 20 余种常用卫星影像。该模型同时考虑到大气介质的吸收和散射以及表观反射率的空间关系。在给定太阳天顶角、卫星天顶角、太阳-卫星相对方位角、传感器光谱响应函数和大气特性的情况下,SMAC 可以实现 TOA 与 BOA 的相互计算。上述参数中,太阳和卫星的几何关系如图 3 所示,其中 θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为卫星天顶角, n 为地面法线, $\Delta\phi$ 为太阳-卫星的相对方位角。

假设大气下层表观反射率为 ρ_{BOA} 的目标物体为均一的朗伯表面,在标准大气压下,则卫星接收到目标物的大气上层表观反射率可表示为

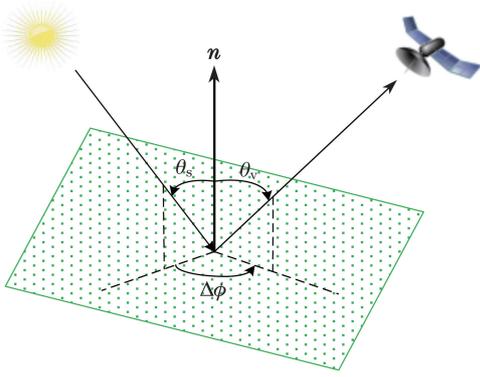


图 3 太阳与卫星的几何关系

Fig. 3 Geometric relationship between sun and satellite

$$\rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + [\exp(-\tau/\mu_s) + td(\theta_s)] \times \frac{\rho_{\text{BOA}} \exp(-\tau/\mu_v) + \rho_c td(\theta_v)}{1 - \rho_c S} \right\}, \quad (1)$$

式中 $\mu_s = \cos \theta_s$, $\mu_v = \cos \theta_v$, t_g 为大气介质总透射率 (向上和向下), ρ_a 为大气反射率, τ 为大气光学厚度, $\exp(-\tau/\mu_s)$, $\exp(-\tau/\mu_v)$ 为直接大气透射率, $td(\theta_s)$, $td(\theta_v)$ 为大气散射透射率, ρ_c 为目标物的背景反射率, S 为大气球形反照率, $1 - \rho_c S$ 考虑了陆地表面与大气之间的多次散射。从严格意义上来说, 该方程只对单波段光谱有效, 为了表达清晰, 省略了波长信息^[19]。

为了降低算法的复杂性并提高计算效率, (1) 式可简化为

$$\rho_{\text{BOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = \frac{\rho'_s}{t_g(\theta_s, \theta_v) T(\theta_s) T(\theta_v) + S \rho'_s}, \quad (2)$$

式中 $T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$ 表示向下或向上的整层大气透射率, ρ'_s 可表示为

$$\rho'_s = \rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) - t_g(\theta_s, \theta_v) \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi). \quad (3)$$

在大气传输情况下, 大气介质总透射率 t_g 可表示为

$$t_g(\theta_s, \theta_v) = \exp[a(mU)^n], \quad (4)$$

式中 $m = 1/\mu_s + 1/\mu_v$, U 为大气垂直积分吸收量, a , n 为根据 6S 模型数据分析特定光谱带得到的系数, 这些系数可以从存储的系数表中查到。大气透射率 $T(\theta_s)$ ($\theta = \theta_s$ 或 θ_v) 同样可以通过预设系数进行简化, 可表示为

$$T(\theta_s) = a_0 + a_1 \frac{\tau_{550}}{\mu_s} + \frac{a_2}{1 + \mu_s}, \quad (5)$$

式中 a_0 , a_1 , a_2 为根据 6S 模型数据分析特定光谱

带得到的系数, τ_{550} 为波长在 550 nm 处的气溶胶光学厚度^[10]。

SMAC 输入参数包括系数及太阳与卫星的几何参数, 系数可以从 SAMC 的系数表中获取, 影像的太阳天顶角为 34.39° , 太阳方位角为 155.01° , 各波段的卫星天顶角和卫星方位角可从影像的头文件中获取, 如表 2 所示。

表 2 Sentinel-2 影像各波段角度信息

Table 2 Angle information of each band of Sentinel-2 imagery

Band	Zenith angle of satellite / ($^\circ$)	Azimuth angle of satellite / ($^\circ$)
Band 2	7.62	284.83
Band 3	7.65	284.91
Band 4	7.69	284.95
Band 5	7.71	284.99
Band 6	7.74	285.05
Band 7	7.77	285.09
Band 8	7.63	284.87
Band 8a	7.80	285.14

当参数输入后, 经过 SMAC 计算得到三个系数 x_a , x_b 和 x_c , 从而得到地表反射率 ρ_{BOA} , 即

$$y = \rho_{\text{TOA}} - x_a, \quad (6)$$

$$\rho_{\text{BOA}} = \frac{y}{x_b + yx_c}. \quad (7)$$

3.2 6S 模型原理

6S 模型是 5S 模型的改进版本, 加入了最新的散射计算方法, 太阳光谱波段的散射计算精度有所提高。6S 模型可以模拟平面观测, 考虑到较高的目标及非朗伯表面的边界条件, 将新的气体 (甲烷、二氧化氮和一氧化碳) 集成到气体传输计算当中, 使得瑞利散射和气溶胶散射效应的计算精度得到显著提高^[20]。

假设地球表面为均匀的朗伯表面, 在大气垂直均匀变化的条件下, 基于 6S 模型卫星传感器测得的大气上层表观反射率定义为

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\pi L_\lambda d^2}{\mu_s E_s}, \quad (8)$$

式中 L_λ 为传感器观测到的随波长变化的大气上层辐亮度, 具有方向性, 与方位角、观测角有关; d 为日地相对距离, 可以根据日期查找; E_s 为大气上层的太阳辐射通量密度, 可以从 Sentinel-2 卫星影像的头文件中获取; μ_s 为太阳天顶角的余弦值。

6S 模型的参数除了包括太阳与卫星的几何参数 (表 2) 外, 还包括大气模式、气溶胶模式等参数,

其中大气模式为中纬度冬季(MLW),气溶胶模式包括大陆型气溶胶模式。气溶胶厚度使用能见度模式,默认为40 km,海拔高度为 0.175 km,卫星高度为 786 km,光谱响应函数利用各波段的上下限及高斯函数进行模拟得到。当参数输入后,经过 6S 模型计算得到三个将表观辐亮度值转换为地表反射率的转换系数 x_a, x_b, x_c ,再通过 L_λ 计算得到 ρ_{BOA} ,即

$$y = L_\lambda x_a - x_b, \quad (9)$$

$$\rho_{BOA} = \frac{y}{1 + yx_c}. \quad (10)$$

3.3 Sen2cor 方法原理

Sen2cor 是欧洲航天局(ESA)官方提供的 Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法^[21],其目的是将大气上层表观反射率转化为大气下层地表反射率。该算法的核心是大气辐射传输模型 libRadtran^[22]。libRadtran 是用于计算地球大气辐射传输的软件包,该算法运用离散纵标法计算地球大气、太阳以及热辐射传输,包含平面、二流、多流、伪球面和球面等不同计算模块^[23],适用于各种大气条件,包括太阳

和部分地球光谱的辐射、辐照度和光化通量。辐射方程可以表示为

$$\frac{dL}{\beta ds} = -L + J, \quad (11)$$

式中 L 为位置 (x, y, z) 的辐亮度; β 为体积消光系数; J 为源函数,可定义为

$$J = \frac{\omega}{4\pi} \int p(\Omega, \Omega') L d\Omega' + (1 - \omega) B(T), \quad (12)$$

式中 ω 为单次散射反照率, $p(\Omega, \Omega')$ 为从方向 Ω' 到 Ω 的相位函数, $B(T)$ 为普朗克函数。当波长小于 400 nm 时,通常忽略普朗克常数。

Sen2cor 将 libRadtran 代码生成的大气校正查找表集成在程序中,缩短了程序运行的时间并简化了操作流程。该查找表包含了各种大气条件、太阳角度、地形、4 种基本气溶胶类型(农村、城市、沙漠和海洋)以及 6 种不同的臭氧含量等,存储的反射率的光谱分辨率为 0.6 nm,随后利用滤波函数对光谱进行重采样,得到特定通道的反射率,查找表结构如表 3 所示。

表 3 Sen2cor 查找表结构

Table 3 Lookup table structure of Sen2cor

Parameter	Range	Increment/grid points
Zenith angle of sun /($^\circ$)	0-70	10
Zenith angle of viewing /($^\circ$)	0-10	10
Relative azimuth /($^\circ$)	0-180	30
Average elevation /km	0-2.5	0.5
Visibility /km	5-120	5, 7, 10, 15, 23, 40, 80, 120
Water vapor content in summer /cm	0.4-5.5	0.4, 1.0, 2.0, 2.9, 4.0, 5.0
Water vapor content in winter /cm	0.2-1.5	0.2, 0.4, 0.8, 1.1

三种模型的基本原理都是辐射传输理论,但 SMAC 基于经验的简化 5S 模型,6S 模型则严格遵循辐射传输模型。相对于 5S 模型,6S 模型考虑了地面目标的海拔高度、非朗伯平面的情况和新的吸收气体种类,虽然运算速度低于 SMAC,但精度较高。Sen2cor 基于 libRadtran 代码生成的查找表进行大气校正,并利用 Python 编译的可移植代码,提供用户命令行和集成软件两种模式,与 SMAC 和 6S 模型相比,其优点是普适性好,不需要人为输入复杂的参数,操作简单,缺点是需占用计算机的大量内存,计算速度慢。

4 结果分析

为了初步分析三种大气校正方法的结果,选取 10 m 分辨率(B2, B3, B4, B8)及 20 m 分辨率(B5,

B6, B7, B8a) 8 个波段,并选择冬小麦、裸土、水泥路和油菜地 4 种地物的像元实测值、大气上层表观反射率及三种模型的校正结果进行分析。其中冬小麦和油菜地为混合像元,首先通过第 2.2 节的方法计算植被覆盖度,得到混合像元中植被与土壤的比例,并结合实测地物光谱计算出混合光谱,结果如图 4 所示。

由图 4 可见, Sentinel-2 卫星影像经过三种大气模型校正后,其光谱曲线与实测地物的光谱曲线的变化趋势一致,有较高的拟合度,蓝波段 Band 2 经大气校正后相比于大气上层表观反射率 TOA 明显下降,红边、近红外波段明显上升。在冬小麦和油菜地的光谱曲线中, Band 2 的三种大气校正结果高于实测地物的反射率,误差较大。Sen2cor 方法与 SMAC 的误差约为 0.04, 6S 模型的误差约为 0.06;

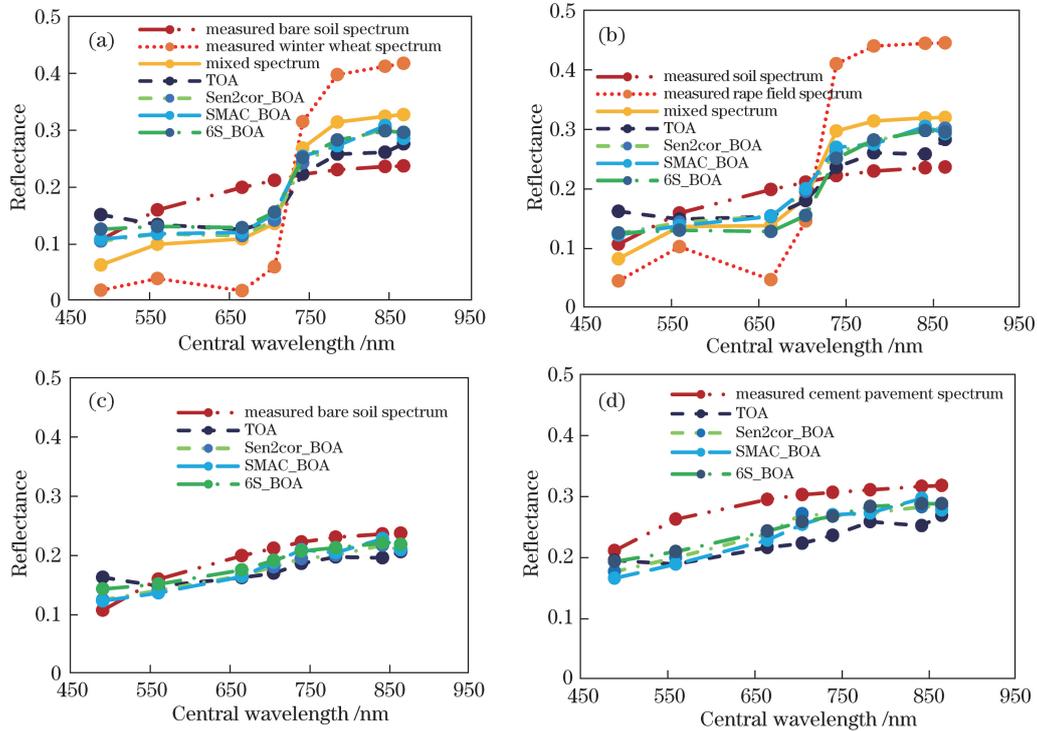


图 4 各类地物大气校正前后的反射光谱曲线。(a)冬小麦;(b)油菜地;(c)裸土;(d)水泥路面
Fig. 4 Reflectance spectral curves of different ground objects before and after atmospheric correction.

(a) Winter wheat; (b) rape field; (c) bare soil; (d) cement pavement

Band 3~Band 5 的大气校正结果与实测值拟合效果较好,误差均小于 0.02;在大于 705 nm 的 Band 6~Band 8a 波段中,实测地物的反射率高于三种大气校正结果,误差范围为 0.01~0.04。在土壤光谱曲线中,大气校正结果相比于大气上层表观 Band 2 反射率明显下降,Band 4~Band 8a 波段的反射率明显增加,Band 2 的三种大气校正结果高于实测地物的反射率,其余波段的实测地物反射率均高于三种大气校正结果,误差在 0.02 左右。在水泥路的光谱曲线中,大气校正结果相比于大气上层表观反射率除了 Band 2 明显下降,其余波段反射率明显增加,而且实测地物的反射率均高于大气校正结果。从图 4(d)中可以看出,绿波段 Band 3、红波段 Band 4 和红边波段 Band 5 的误差较大,三种大气校正结果的误差范围为 0.04~0.07,其余波段的误差较小,误差范围为 0.02~0.04。图 4 中的结果表明,4 种地物

大气校正的精度从高到低依次为土壤、植被(冬小麦和油菜地)、水泥路,其误差可能源于混合像元、气溶胶类型和测量误差。

SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法都是基于大气辐射传输理论的机理模型,只是计算方法不同。为了验证三种模型的一致性,对其结果分别进行回归分析,图 5 和表 4 分别为三种大气校正结果之间的相关性分析和回归分析。由图 5 可见,用三种方法校正同一影像时,结果具有很强的相关性。由表 4 可见,6S 模型与 Sen2cor 方法的决定系数 R^2 最高(0.997),均方根误差 E_{rmse} 最小(0.0031);SMAC 与 Sen2cor 方法的决定系数 R^2 为 0.9906,均方根误差 E_{rmse} 为 0.006;6S 模型与 SMAC 的决定系数 R^2 为 0.9874,均方根误差 E_{rmse} 为 0.0063。三种结果的检验 P 值均小于 0.0001,可信度在 99.99% 以上。结果表明三种模型具有较好的一致性。

表 4 Sen2cor 方法,6S 模型和 SMAC 之间的回归分析

Table 4 Regression analysis of Sen2cor method, 6S model and SMAC

Atmospheric correction model	Regression equation	R^2	E_{rmse}	P	Reliability /%
6S-SMAC	$y = 1.0904x - 0.0259$	0.9874	0.0063	< 0.0001	99.99
6S-Sen2cor	$y = 1.0792x - 0.0256$	0.9970	0.0031	< 0.0001	99.99
SMAC-Sen2cor	$y = 0.9804x + 0.0019$	0.9906	0.0060	< 0.0001	99.99

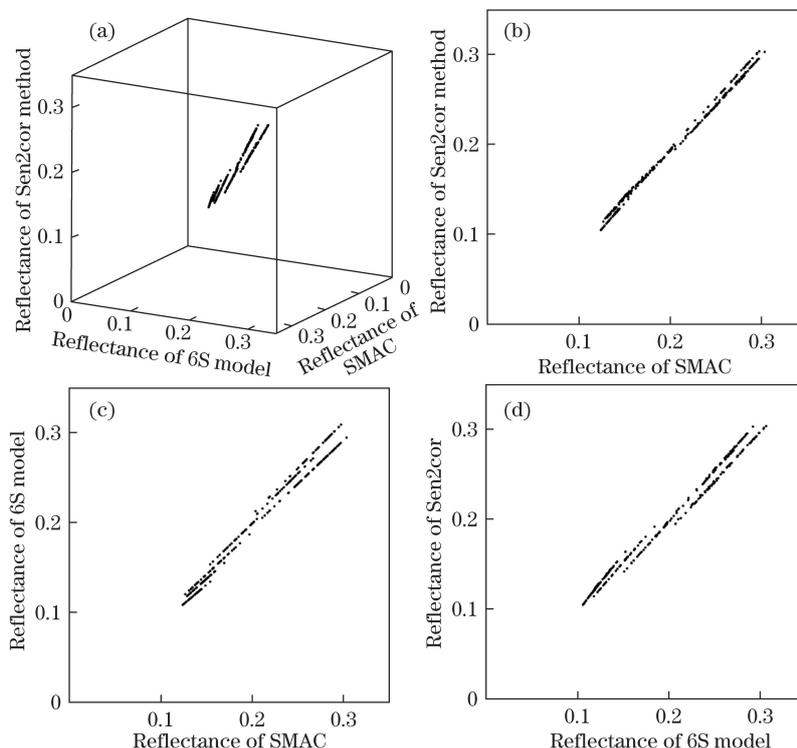


图 5 基于 Sen2cor,6S 模型和 SMAC 的大气校正结果相关性分析。(a) SMAC, 6S 与 Sen2cor 的反射率结果; (b) SMAC 与 Sen2cor 的反射率结果; (c) SMAC 与 6S 的反射率结果; (d) 6S 与 Sen2cor 的反射率结果

Fig. 5 Correlation analysis of atmospheric correction results of Sen2cor, 6S model and SMAC.
 (a) Result of reflectance by SMAC, 6S and Sen2cor; (b) result of reflectance by SMAC and Sen2cor;
 (c) result of reflectance by SMAC and 6S; (d) result of reflectance by 6S and Sen2cor

为了定量分析 SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法大气校正的精度,将野外 39 个实测地物的光谱数据与大气校正结果提取出 Band 2~Band 8a 范围的反射率进行回归分析,结果如图 6 和表 5 所示。由图 6 可见,三种模型均与实测值有较强的相关性,且数据整体较集中。当反射率为 0.2 时,数据相对离散,可能的原因是此时为红边波段,即光谱曲线中变化率最大的波段,误差可能较大。从拟合的趋势线可以看出,Sen2cor 方法的大气校正效果优于 6S 模型和 SMAC。从表 5 可以得出,Sen2cor 方法与实测数据的决定系数 R^2 最高(0.8196),均方根误差 E_{rmse} 最小(0.0388);SMAC 与实测数据的决定系数 R^2 最小(0.8137),均方根误差 E_{rmse} 为 0.0395。

三种结果的检验 P 值均小于 0.0001,可信度在 99.99% 以上。

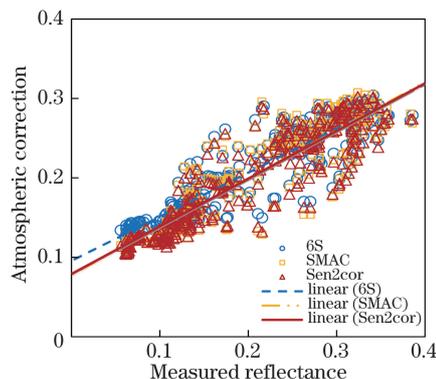


图 6 反射率大气校正结果与实测值的相关性分析
 Fig. 6 Correlation analysis between atmospheric correction results and measured values of reflectance

表 5 反射率大气校正结果与实测值的回归分析

Table 5 Regression analysis between atmospheric correction results and measured values of reflectance

Atmospheric correction model	Regression equation	R^2	E_{rmse}	P	Reliability / %
Sen2cor	$y=0.6005x+0.0773$	0.8196	0.0388	<0.0001	99.99
6S	$y=0.5549x+0.0957$	0.8176	0.0391	<0.0001	99.99
SMAC	$y=0.6072x+0.0780$	0.8131	0.0395	<0.0001	99.99

植被定量遥感是卫星影像最普遍的应用之一。植被指数是常用的参数,其通常是由两个或两个以上的波段计算得到。大气校正的目的是让卫星影像的光谱趋近于地表真实光谱,所以植被指数也用来检测大气校正效果^[24]。本研究选用归一化植被指数(NDVI)作为指标,对大气校正后影像上的 NDVI 值及实测值进行分析,NDVI 值可表示为

$$f_{ndvi} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}, \quad (13)$$

式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{red} 分别表示近红外波段和红光的反射率,结果如图 7 所示。其中 SMAC 的 NDVI 值最大,其次为 Sen2cor 方法和 6S 模型。表 6 为 Sentinel-2 影像 NDVI 与实测 NDVI 值的回归分析,由表可知,SMAC 计算的 NDVI 值与实测值的相关性最高,决定系数

R^2 为 0.6389,均方根误差 E_{rmse} 为 0.093。三种结果的检验 P 值均小于 0.0001,可信度在 99.99% 以上。

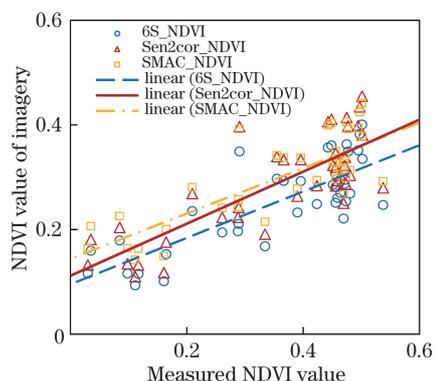


图 7 Sentinel-2 影像 NDVI 与实测 NDVI 值的相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis between NDVI from Sentinel-2 imagery and measured NDVI value

表 6 Sentinel-2 影像 NDVI 与实测 NDVI 值的回归分析

Table 6 Regression analysis between NDVI from Sentinel-2 imagery and measured NDVI value

Atmospheric correction model	Regression equation	R^2	E_{rmse}	P value	Reliability / %
Sen2cor	$y = 0.4975x + 0.1110$	0.6389	0.093	< 0.0001	99.99
6S	$y = 0.4432x + 0.0955$	0.6467	0.092	< 0.0001	99.99
SMAC	$y = 0.4334x + 0.1441$	0.6473	0.091	< 0.0001	99.99

5 结 论

在对 Sentinel-2 卫星影像和大气校正理论研究的基础上,基于 SMAC、6S 模型和 Sen2cor 方法对 Sentinel-2 卫星影像进行了大气校正,并结合实测地物光谱对其精度进行了分析。结果表明,影像光谱曲线与实测地物的光谱曲线的变化趋势一致,二者具有较高的拟合度。从三者之间的相关性分析得出,三种模型具有较好的相关性和一致性,其中 6S 模型与 Sen2cor 方法的决定系数 R^2 最高,SMAC 与 Sen2cor 方法次之,6S 模型与 SMAC 最小。从 Band 2~Band 8a 波段的大气校正结果来看,Sen2cor 方法的精度最高,其次为 6S 模型和 SMAC。从 NDVI 值的分析可以看出,SMAC 计算的 NDVI 值与实测值的相关性最高,其次为 6S 模型和 Sen2cor 方法。三种方法的大气校正效果显著,且具有较高的精度, Sentinel-2 卫星影像经过校正后影像质量得到明显提高,增加了可用性。

在后续的研究中,将着重分析大气校正参数(如气溶胶类型)对其结果的影响,还将选择不同季节、不同植被类型和植被覆盖度的数据进行验证。

参 考 文 献

[1] Yue Z G. The Sentinel-2A satellite will display skills

to the full——“Copernicus” on earth observation program[J]. Infrared, 2015, 36(8): 32-36.

岳桢干. 欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——“哥白尼”对地观测计划简介(上)[J]. 红外, 2015, 36(8): 32-36.

[2] Sun C K, Sun L, Ma S F, et al. Atmospheric correction method based on HJ-1 CCD data[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 826-836.
孙长奎, 孙林, 麻盛芳, 等. HJ-1CCD 数据大气校正方法研究[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 826-836.

[3] Vermote E F, Saleous N Z E, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 97-111.

[4] Liang S, Fang H, Chen M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.

[5] Adlergolden S M, Matthew M W, Bernstein L S, et al. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4[C]. SPIE, 1999, 3753: 61-69.

[6] Zheng S, Zhao X, Zhang H, et al. Atmospheric correction on CCD data of HJ-1 satellite and analysis of its effect[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4): 709-721.
郑盛, 赵祥, 张颢, 等. HJ-1 卫星 CCD 数据的大气校正

- 及其效果分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 709-721.
- [7] Tachiiri K. Calculating NDVI for NOAA/AVHRR data after atmospheric correction for extensive images using 6S code: A case study in the Marsabit District, Kenya[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2005, 59(3): 103-114.
- [8] Liu J, Wang L M, Yang L B, *et al.* GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 159-168.
刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于 6S 模型的 GF-1 卫星影像大气校正及效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 159-168.
- [9] Peng N N, Yi W N, Fang Y H. Atmospheric correction of satellite imagery coastal areas using MODIS data[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 504-508.
彭妮娜, 易维宁, 方勇华. 利用 MODIS 数据进行海岸带卫星图像大气校正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 504-508.
- [10] Fuyi T, Mohammed S K, Abdullah K, *et al.* A comparison of atmospheric correction techniques for environmental applications[C]//IEEE International Conference on Space Science and Communication, 2013: 13769025.
- [11] Proud S R, Fensholt R, Rasmussen M O, *et al.* A comparison of the effectiveness of 6S and SMAC in correcting for atmospheric interference of Meteosat Second Generation images[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D17): D17209.
- [12] Song X Y, Wang J H, Liu L Y, *et al.* Atmospheric correction of hyper-spectral imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(4): 393-398.
宋晓宇, 王纪华, 刘良云, 等. 基于高光谱遥感影像的大气纠正: 用 AVIRIS 数据评价大气纠正模块 FLAASH[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(4): 393-398.
- [13] Zhou L, Li Y M, Gou Y L, *et al.* Atmospheric correction for Case-2 waters using a radiative transfer optimized model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201002.
周莉, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于辐射传输优化模型的二类水体大气校正[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201002.
- [14] 龚燃. 哨兵-2A 光学成像卫星发射升空[J]. 国际太空, 2015(440): 36-40.
- [15] Taskos D G, Koundouras S, Stamatiadis S, *et al.* Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(1): 77-98.
- [16] Kim H O, Yeom J M. Effect of red-edge and texture features for object-based paddy rice crop classification using RapidEye multi-spectral satellite image data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(19): 7046-7068.
- [17] Zhang K, Guo N, Wang R Y, *et al.* Comparison of spectral reflectance characteristics of two main grassland types in Gansu province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(s2): 142-148.
张凯, 郭锐, 王润元, 等. 甘肃省两种主要草地类型的光谱反射特征比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(s2): 142-148.
- [18] Rahman H, Dedieu G. SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(1): 123-143.
- [19] Zhang Y W. Study on atmospheric correction methods for MERSI image over Pearl River Delta region[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 26-29.
张月维. 珠三角 MERSI 影像的大气校正方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 26-29.
- [20] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1997, 35(3): 675-686.
- [21] Mackert M, Lazard A, Liang M C, *et al.* Calibration and validation plan for the l2A processor and products of the Sentinel-2 mission[J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & S, 2015, XL-7/W3(7): 1249-1255.
- [22] Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2005, 5: 1855-1877.
- [23] Huo J, Lü D R. Characteristics and distribution of all-sky radiance by libradtran modeling: For cloud determination algorithm in all-sky images[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(1): 31-38.
霍娟, 吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 31-38.
- [24] Yang L, Pan Z Q, Fu Q Y, *et al.* Research on the atmosphere correction for ZY-3 MUX image[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1903-1907.
杨磊, 潘志强, 傅俏燕, 等. 资源三号卫星多光谱数据的大气校正研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1903-1907.