

## 太阳天顶角对反演高光谱地表反射率影响分析

杜沈达<sup>1,2,3</sup>, 张运杰<sup>1,3\*</sup>, 韦玮<sup>1,3</sup>, 黄冬<sup>1,2,3</sup>, 李新<sup>1,3</sup>, 郑小兵<sup>1,3</sup><sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 为了满足星上载荷高频次的在轨定标需求,常使用场地自动化定标技术将多光谱反射率反演为高光谱反射率,所以提升光谱的反演精度对提高自动化定标精度尤为重要。使用布设在敦煌辐射校正场的通道式自动化观测仪器计算从 2018 年 9 月至 2019 年 9 月的反射率;根据测量过程中太阳天顶角的不同将数据分为 6 组,并使用双向反射分布函数模型对不同太阳天顶角下的光谱形状进行一致性分析。实验结果表明,双向反射分布函数模型校正不同入射角度是有效的。

**关键词** 散射; 自动化观测; 太阳天顶角; 地表反射率; 相似度; 光谱反演; 双向分布函数

**中图分类号** TP722.4; P182.2+1; P427.2+3 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/AOS202141.0229001

## Analysis of Influence of Solar Zenith Angle on Reconstruction of Hyperspectral Surface Reflectance

Du Shenda<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yunjie<sup>1,3\*</sup>, Wei Wei<sup>1,3</sup>, Huang Dong<sup>1,2,3</sup>, Li Xin<sup>1,3</sup>, Zheng Xiaobing<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** In order to meet the high-frequency on-orbit calibration requirements of the on-board load, the site automatic calibration technology is often used to invert the multi-spectral reflectance into the hyper spectral reflectance, so it is particularly important to improve the precision of automatic calibration to improve the inversion accuracy of spectrum. In this paper, we calculate the reflectance from September 2018 to September 2019 using a channel-type automated observation instrument deployed in the Dunhuang radiometric calibration site. Furthermore, we divide the data into 6 groups according to the difference in the solar zenith angles during the measurement process and employ the model of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) for the consistency analysis of spectral shapes at different solar zenith angles. The experimental results show that the BRDF model is effective for correcting the data at different incident angles.

**Key words** scattering; automated observation; solar zenith angle; surface reflectance; similarity; spectral reconstruction; bidirectional reflectance distribution function

**OCIS codes** 290.1483; 280.1100; 300.6320

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900, 2018YFB0504905)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ2019QN5)、安徽省自然科学基金青年项目(1908085QD158)

\* E-mail: zhangyj@aiofm.ac.cn

# 1 引言

自场地自动化定标技术提出以来,国内外的科研人员就使用该技术对一系列的载荷进行在轨辐射定标,如亚利桑那大学基于 RadCaTS(Radiometric Calibration Test Site)<sup>[1]</sup>、中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所基于敦煌辐射校正场<sup>[2]</sup>和中国科学院光电研究院基于国家高分辨遥感综合定标场在蓝、绿、红和近红外波段<sup>[3]</sup>均开展了自动化定标实验。实验结果表明,自动化定标的精度可以达到或优于人工定标,并能够解决人工值守测量成本大、频次低和频繁进出破坏场地等问题,为替代定标和互定标提供有力支持<sup>[4-5]</sup>。

将多光谱反射率反演为高光谱反射率是自动化定标流程中的重要一环,其直接影响最终的定标精度。由于多光谱仪器在可靠性、稳定性和野外适用性等方面均优于高光谱仪器,因此目前布设在野外定标场地进行长期自动化观测的仪器多为多光谱类仪器,并采用光谱反演法将其测量数据转换为实时的高光谱数据。首先选取高光谱反射率作为参考反射率,使用双向反射分布函数(BRDF)对其进行入射角的校正,然后与多光谱仪器的光谱响应函数进行卷积以得到波段响应值,最后通过响应值与实时多光谱数据之间的差异来校正参考反射率,从而得到实时的高光谱反射率,由此实现多光谱地表反射率的反演<sup>[3]</sup>。实际计算过程中,通过多条高光谱反

射率来建立反射率库,从而衡量高光谱与多光谱的形状差异,对形状最相似的参考反射率进行校正,可以尽可能地消除由地表特性变化与太阳天顶角不同引起的误差<sup>[2]</sup>。

本文使用布设在敦煌辐射校正场的自动化仪器测量从 2018 年 9 月至 2019 年 9 月的数据,根据大气状况相似的洁净天气来筛选数据并计算地表反射率;以多光谱曲线相似度为指标,使用该数据分析各类太阳天顶角下多光谱的形状变化程度以及不同天顶角之间的形状变化程度;使用 BRDF 模型对校正后的不同太阳天顶角数据进行相似度分析。实验结果表明,BRDF 模型对校正角度具有有效性。

## 2 研究方法

### 2.1 数据计算方法

自动化观测仪器由自动化场地辐射计(ATR)和高精度太阳辐射计(PSR)构成,其中 ATR 测量的数据用于计算地表辐射度,PSR 测量的数据用于计算太阳辐射照度。实验过程中,使用布置在敦煌辐射校正场内的两台 ATR 和一台 PSR 获得的数据。ATR 和 PSR 覆盖从可见光到短波红外 8 个波段,测量间隙均为 3 min,仪器的关键参数如表 1 所示。两台 ATR 的地理位置分别为(94.32°E, 48.14°N)和(94.41°E, 40.09°N),PSR 的地理位置为(94.41°E, 40.09°N)。ATR 在波长为 365 nm 处的带宽为 5 nm。

表 1 自动化仪器的关键参数

Table 1 Key parameters of automated instruments

Parameter	ATR	PSR
Center wavelength /nm	400, 450, 500, 600, 675, 810, 1000, 1550	365, 412, 500, 610, 675, 862, 940, 1025
Band width /nm	10	20-40

为了确保测量过程中的大气条件适合定标,需要计算气溶胶光学厚度(AOD)并通过光学厚度值来筛选数据。假设气溶胶粒子遵循 Junge 分布,计算波长为 550 nm 的 AOD 为

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

式中: $\tau$  为 AOD; $\lambda$  为波长; $\beta$  为 Angstrom 大气浑浊度系数; $\alpha$  为 Angstrom 波长指数。

以  $\tau < 0.3265$  为依据来筛选大气状况相似的洁净日期<sup>[6]</sup>,使用辐射传输模型得到入射辐射照度,使用 ATR 计算地表辐射度,从而得到在垂直观测方向的地表反射率,具体流程如图 1 所示,其中 6SV1.1 为大气辐射传输模型的代码。

使用地表辐射度与入射辐射照度来计算地表反

射率,表达式为

$$\rho_{\text{ATR},i} = \frac{\pi L}{E_i} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{ATR},i}$  为 ATR 在  $i$  波段的地表反射率; $L_i$  为在  $i$  波段的地表辐射度; $E_i$  为在  $i$  波段的总照度,计算公式为

$$E_i = E_{\text{d},i} + E_{\text{a},i} + E_{\text{e},i}, \quad (3)$$

式中: $E_{\text{d},i}$  为在  $i$  波段的直射辐射度; $E_{\text{a},i}$  为在  $i$  波段的大气散射辐射度; $E_{\text{e},i}$  为在  $i$  波段的环境辐射度。 $E_{\text{d},i}$ 、 $E_{\text{a},i}$  和  $E_{\text{e},i}$  均通过大气辐射传输模型中的 6SV1.1 代码<sup>[7-8]</sup>计算得到。

### 2.2 数据分析方法

经过计算得到结果数据的表示形式为数据元

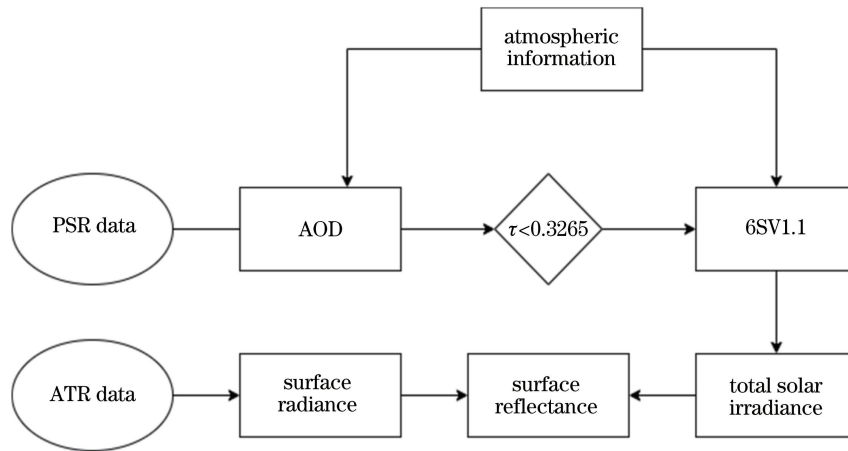


图 1 反射率的计算流程

Fig. 1 Flow chart of reflectance calculation

组,包括测量时间、测量地点、测量时的天顶角和方位角以及测量时的地表反射率。将反射率按照太阳天顶角分为  $30^\circ \pm 3^\circ$ ,  $40^\circ \pm 3^\circ$  和  $80^\circ \pm 3^\circ$  6 类。采用对数似然估计方法对每类天顶角下的 8 个波段进行正态分布估计,在 95% 的置信区间中计算 6 类数据各个波段的均值  $\hat{\mu}$  和标准差  $\hat{\sigma}$ ,通过均值与标准差来计算离散系数  $\hat{\delta}$ ,以分析场地反射率在时间上的变化与波长和入射角度的关联性。

采用轨迹相似度衡量算法计算多光谱反射率曲线的相似度,该算法使用曲线中的点来代替轨迹点。实验过程中采用基于面积划分的三角分割 (TD) 法<sup>[9]</sup>,该方法有基于点的全局与局部匹配方法和基于曲线段的划分方法<sup>[10]</sup>,通过轨迹的长度和轨迹所包围的面积来确定轨迹的相似度。实验过程中,使用曲线来代表轨迹。与传统方法相比,基于面积划分的 TD 法能够在保证相似度准确率的情况下减小计算的时间复杂度,在计算大批量数据的方面优势明显,并且该方法考虑波长尺度上的刻度问题,适用于各个波段之间的不均匀刻度。

基于面积划分的 TD 法计算曲线相似度的原理如图 2 所示,其中  $L_A$ 、 $L_B$  为两条波段式光谱折线。对原数据集进行归一化处理,从点  $a_1$ 、 $b_1$  开始,将  $a_1$ 、 $b_1$  的连线作为第一条边  $L_1$ ,将  $L_{a_1 b_2}$  和  $L_{b_1 a_2}$  的较短连线长度作为  $L_2$ ,与  $L_1$  和  $L_2$  构成三角形的边即为第三条边  $L_3$ ,并计算该三角形的面积,按此比较规则不断循环前进并累加三角形面积,最终在线段  $L_A$  或者  $L_B$  终点结束。累加的面积  $S'_T$  为

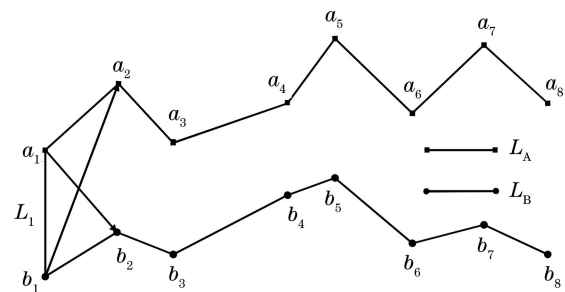


图 2 相似度的计算方法

Fig. 2 Calculation method of similarity

$$S'_T = \begin{cases} S_T + S''(a_k, b_{g+1}, a_{k+1}), & d(a_k, b_{g+1}) > d(a_{k+1}, b_g) \\ S_T + S''(a_k, b_g, b_{g+1}), & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S''(a_k, b_{g+1}, a_{k+1})$  为  $a_k, b_{g+1}$  和  $a_{k+1}$  三点围成的三角形面积;  $S''(a_k, b_g, b_{g+1})$  为  $a_k, b_g$  和  $b_{g+1}$  三点围成的三角形面积;  $d(a_k, b_{g+1})$  为  $a_k$  和  $b_{g+1}$  两点之间的距离;  $d(a_{k+1}, b_g)$  为  $a_{k+1}$  和  $b_g$  两点之间的距离;  $k$  为  $L_A$  上的点索引序号;  $g$  为  $L_B$  上的点索引序号。最终计算两条折线的平均长度  $\bar{L}$  和相似度  $S$ , 表达式为

$$\bar{L} = (d_A + d_B) / 2, \quad (5)$$

$$S = 1 - S_T / \bar{L}^2. \quad (6)$$

影响光谱曲线形状变化的因素除了地表物质外,还有光源的入射角度。一般为了消除这种影响,使用 BRDF 模型对不同角度的数据进行校正<sup>[11]</sup>,转换公式为

$$\rho(\theta_1, \vartheta_1, \varphi_1, \lambda) = \frac{R(\theta_2, \vartheta_2, \varphi_2, \lambda)}{R(\theta_1, \vartheta_1, \varphi_1, \lambda)} \cdot \rho(\theta_2, \vartheta_2, \varphi_2, \lambda), \quad (7)$$

式中： $\rho$  为地表反射率； $\theta$  为入射天顶角； $\vartheta$  为观测天顶角； $\varphi$  为相对方位角； $R(\theta, \vartheta, \varphi, \lambda)$  为方向反射比；下标 1、2 分别为校正前、后的参数。

实验使用的 BRDF 模型是由 Roujean 等<sup>[12]</sup> 提出的,该模型为目前常用的半经验核驱动模型,构造形式为

$$R(\theta, \vartheta, \varphi, \lambda) = f_{iso} + f_{vol}K_{vol}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_{geo}K_{geo}(\theta, \vartheta, \varphi), \quad (8)$$

式中： $f_{iso}$ 、 $f_{vol}$  和  $f_{geo}$  分别为各向同性散射核、体散射核和几何光学散射核的权重因数； $K_{vol}$  为体散射核； $K_{geo}$  为几何光学散射核。 $K_{vol}$  和  $K_{geo}$  的计算公式分别为

$$K_{vol}(\theta, \vartheta, \varphi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos \theta + \cos \vartheta} \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi + \sin \xi \right] - \frac{1}{3}, \quad (9)$$

$$K_{geo}(\theta, \vartheta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi] \tan \theta \tan \vartheta - \frac{1}{\pi} (\tan \theta + \tan \vartheta + \sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \vartheta - 2 \tan \theta \tan \vartheta \cos \varphi}), \quad (10)$$

式中： $\xi$  为散射相角,即入射方向与观测方向的夹角,计算公式为

$$\cos \xi = \cos \theta \cos \vartheta + \sin \theta \sin \vartheta \cos \varphi. \quad (11)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 太阳天顶角对多光谱形状相似度的影响

对计算得到的数据按照不同的太阳天顶角进行筛选,每组均约有 1500 条数据,其中 2019 年的有效数据占总有效数据的 84%,结果如图 3 所示。

采用对数似然估计方法在 95% 的置信区间中对反射率进行正态分布拟合,计算得到的  $\hat{\delta}$  如图 4(a)所示,离群比如图 4(b)所示,使用上、下四分位点计算的  $\hat{\mu}$  和  $\hat{\sigma}$  如图 4(c)所示。从图 4 可以看到,数据的离群比均小于 0.06,说明该测量数据的质量较高,噪声较小;剔除离群点后在 6 类天顶角、8 个波段和 9704 个数据采样点的情况下,敦煌辐射校正场的地表反射率平均变化范围为  $\pm 1.43\%$ ,说明地表反射率在时间上有较好的稳定性,离散系数均在 0.05~0.10 之间,总体变化程度较小,各组波长之间离散系数的标准差均小于 0.01,说明地表反射率的变化与波长的相关性小。

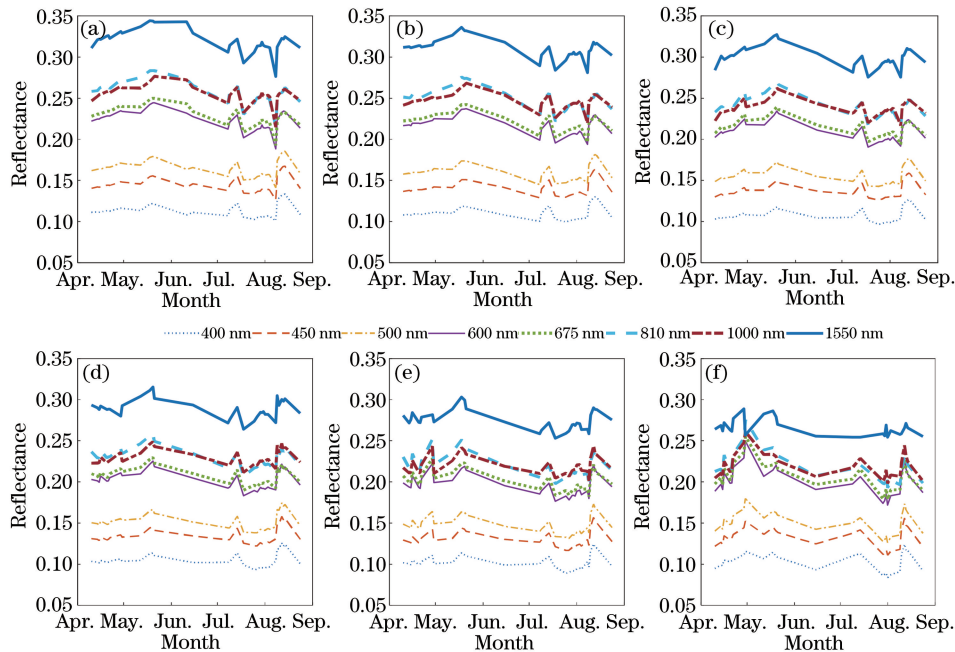


图 3 2019 年不同天顶角下的反射率。(a) 30°;(b) 40°;(c) 50°;(d) 60°;(e) 70°;(f) 80°

Fig. 3 Reflectance at different zenith angles in 2019. (a) 30°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 60°; (e) 70°; (f) 80°

计算 6 类天顶角数据两两之间的相似度,每组均约有  $1 \times 10^6$  条相似度数据,结果如表 2 所示。正态核函数又称高斯分布函数,采用正态核函数对相似度数据进行核密度估计(KDE),结果如图 5 所

示。KDE 利用数据自身的信息可以避免人为主观地带入先验知识,从而能够对样本数据进行最大程度的近似。对于相似度结果,若两条曲线相似度值越接近 100%,则说明两条曲线越相似。

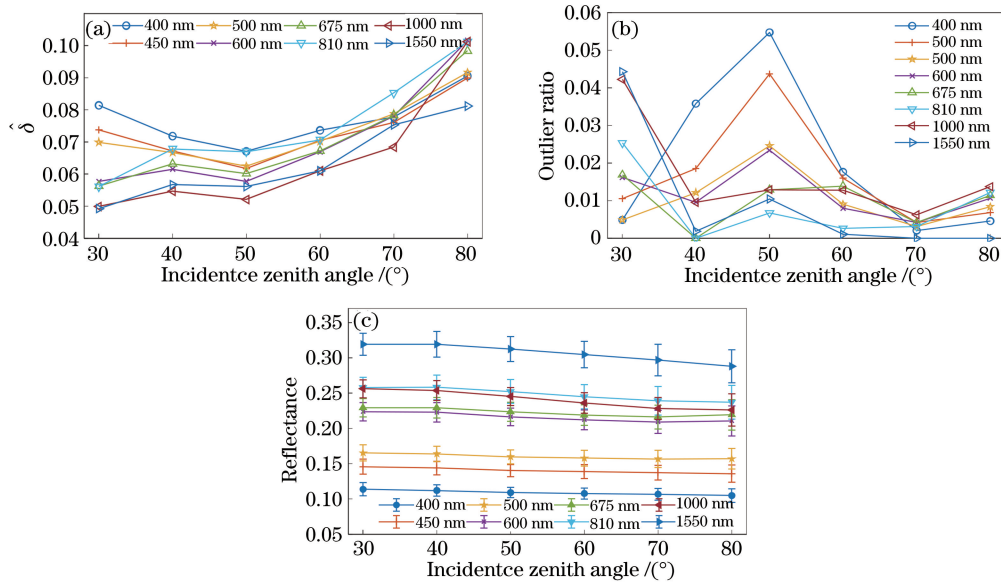


图 4 6 类天顶角的统计参数。(a)  $\hat{\delta}$ ; (b) 离群比; (c)  $\hat{\mu}$  和  $\hat{\sigma}$

Fig. 4 Statistical parameters of zenith angle in 6 categories. (a)  $\hat{\delta}$ ; (b) outlier ratio; (c)  $\hat{\mu}$  and  $\hat{\sigma}$

表 2 相似度的统计数据

Table 2 Similarity statistics

Zenith angle	30°	40°	50°	60°	70°	80°	30°&40°	30°&80°
Mean	0.9947	0.9942	0.9946	0.9940	0.9931	0.9915	0.9944	0.9898
Standard deviation	0.0041	0.0043	0.0042	0.0044	0.0048	0.0063	0.0042	0.0071
Minimum	0.9708	0.9633	0.9638	0.9605	0.9572	0.9464	0.9633	0.9464

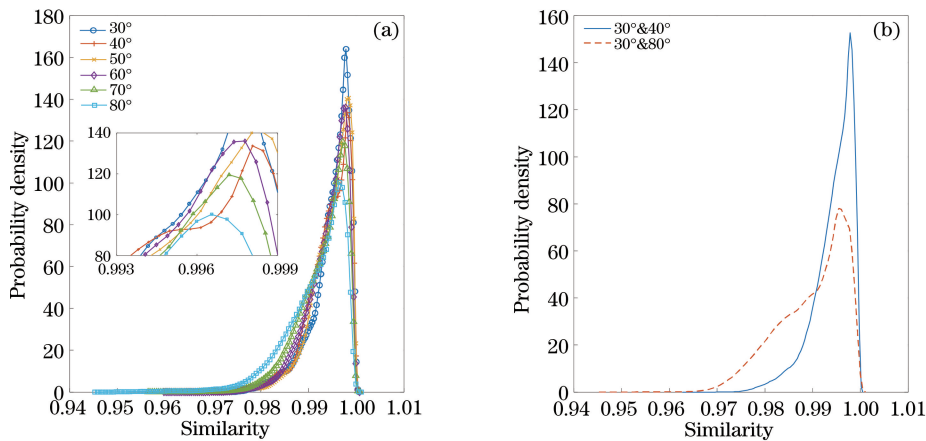


图 5 相似度的统计结果。(a) 单个情况; (b) 组合情况

Fig. 5 Statistical results of similarity. (a) Single case; (b) combined case

从表 2 和图 5 可以看到,随着天顶角的增大,曲线相似度的均值和最小值均逐渐减小,标准差逐渐增大;30°和 40°之间的曲线相似度均值为 0.9944,标准差为 0.0042,30°和 80°之间的曲线相似度均值为 0.9898,标准差为 0.0071,太阳天顶角之间的差距越大,说明两条曲线之间的形状误差越大。相似度十分接近的原因有三个:1)敦煌辐射校正场作为国家辐射校正场,其反射率在时间上有良好的稳定

性;2)计算过程中使用的是多光谱数据,采样的通道数仅为 8,所以只能在特定波段上体现光谱形状的变化;3)相似度计算算法受到自身的影响,则得到的数值相较于其他相似度计算方法偏大,其为最重要的原因。采用该算法计算敦煌冬季与夏季的相似度为 0.9596,虽然比夏季的相似度小,但在数值上不能明显体现,即该方法计算的值在[0,1]之间不能细致划分,但计算值之间的大小比较与曲线的相似度

的关联性更为优秀。

自动化定标过程中,采用平移光谱曲线的方法会忽略其形状变化。相似度计算结果表明,如果参考光谱曲线或者测量点的太阳天顶角越大,则会给计算结果引入更多的形状误差;如果参考光谱曲线与当前测量点之间的太阳天顶角的差距越大,则也会给计算结果造成更大的形状误差。

### 3.2 BRDF 模型校正不同角度下的光谱形状

为了分析 BRDF 模型对不同几何角度的校正作用,将角度为  $80^\circ$  的数据使用 BRDF 模型校正为  $30^\circ$ ,模型参数在不同波长下的变化情况如图 6 所示,其为本课题组反演实测方向的反射率数据而得到。自动观测计算的反射率数据的观测天顶角和相对方位角均为  $0^\circ$ ,最终得到每组均超过  $4 \times 10^6$  条相似度数据。校正前后的相似度统计数据如表 3 所示,相似度统计曲线如图 7 所示,其中  $30^\circ(80^\circ)$  为  $80^\circ$  的太阳天顶角数据使用 BRDF 模型校正为  $30^\circ$ 。从表 3 可以看到, $80^\circ$  的太阳天顶角经过 BRDF 模型校正为  $30^\circ$ ,其相似度的均值和最小值均有提高,标

准差降低,说明在大天顶角处产生的光谱曲线形状误差大于小天顶角,说明 BRDF 模型可以改善光谱曲线形状误差;经过 BRDF 模型校正后,相似度从 0.9898 提高到 0.9901,最小值从 0.9464 提高到 0.9494,标准差从 0.0071 下降到 0.0068。综上所述,证明使用 BRDF 模型校正不同几何角度是行之有效的。

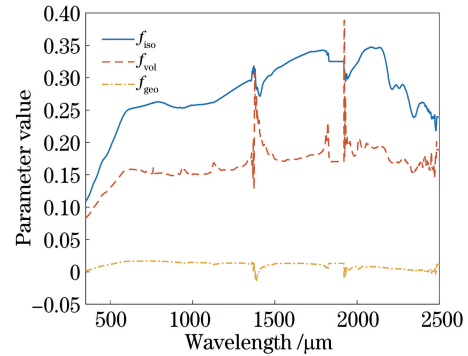


图 6 模型参数在不同波长下的变化情况

Fig. 6 Variation of model parameters at different wavelengths

表 3 校正前后的相似度统计数据

Table 3 Similarity statistics before and after correction

Zenith angle	$30^\circ$	$80^\circ$	$30^\circ(80^\circ)$	$30^\circ \& 80^\circ$	$30^\circ \& 30^\circ(80^\circ)$
Mean	0.9947	0.9915	0.9918	0.9898	0.9901
Standard deviation	0.0041	0.0063	0.0060	0.0071	0.0068
Minimum	0.9708	0.9464	0.9494	0.9464	0.9494

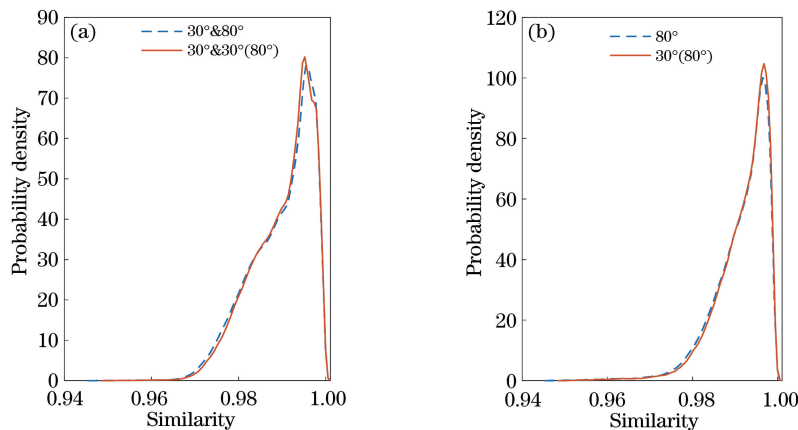


图 7 不同情况下校正前后的相似度统计曲线。(a)  $30^\circ$  和  $80^\circ$ ; (b)  $80^\circ$

Fig. 7 Similarity statistical curves before and after correction under different conditions. (a)  $30^\circ$  and  $80^\circ$ ; (b)  $80^\circ$

## 4 结 论

基于以上分析可以得到小天顶角下光谱形状的稳定性优于大天顶角,并且与太阳天顶角多光谱反射率曲线形状的差异更小,说明 BRDF 模型校正角度是有效的。对自动化定标流程中的光谱反演而

言,尽量选择同一太阳天顶角下的高光谱作为参考光谱,当缺乏几何条件的光谱数据时,使用 BRDF 模型校正其他角度的光谱曲线形状。以上的分析虽然使用的数据样本很多,但时间跨度仅为一年,若对敦煌辐射校正场的地表反射率进行更长时间的分析,还需要时间积累;并且基于通道式仪器体现光谱

形状的能力远不及连续谱数据,若能使用仪器自动化且高频次地得到连续谱数据,这对光谱形状变化程度的刻画更精准。

### 参 考 文 献

- [1] Czaplá-Myers J S. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[D]. Arizona: University of Arizona, 2006.
- [2] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528002.  
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0528002.
- [3] Ma Z H, Ma L L, Liu Y K, et al. A method for hyperspectral reflectance reconstruction from automatic observation with multispectral radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728004.  
马志宏, 马灵玲, 刘耀开, 等. 通道式辐射计自动观测数据的反射率光谱拓展方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0728004.
- [4] Li X, Zheng X B, Yin Y P. Progress in automated site vicarious calibration technologies[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 17-21.  
李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 场地自动化定标技术进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 17-21.
- [5] Lü J Y, He M Y, Chen L, et al. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801003.  
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801003.
- [6] Wang Y Q, Shen Z B, Ji G L, et al. Atmospheric turbidity in winter over Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 1982, 1(4): 84-91.  
王尧奇, 沈志宝, 季国良, 等. 兰州冬季的大气浑浊度[J]. *高原气象*, 1982, 1(4): 84-91.
- [7] 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 and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [8] Wilson R T. Py6S: a Python interface to the 6S radiative transfer model [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 51: 166-171.
- [9] Lü Y K, Xu K, Huang Z Q. Trajectory similarity measurement method based on area division [J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(2): 578-583.  
吕一可, 徐凯, 黄振强. 基于面积划分的轨迹相似性度量方法[J]. *计算机应用*, 2020, 40(2): 578-583.
- [10] Zhou X X, Ji G L, Zhang S L. Overview of the similarity measurement methods for spatial-temporal trajectory[J]. *Geomatics World*, 2018, 25(4): 11-18.  
周星星, 吉根林, 张书亮. 时空轨迹相似性度量方法综述[J]. *地理信息世界*, 2018, 25(4): 11-18.
- [11] Bruegge C J, Coburn C, Elmes A, et al. Bi-directional reflectance factor determination of the railroad valley playa[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2601.
- [12] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research: atmospheres*, 1992, 97(D18): 20455-20468.