

基于环境星 CCD 数据的山区大气校正研究

夏超^{1,2}, 黄红莲^{1*}, 孙晓兵¹, 刘晓¹, 余海啸^{1,2}, 韦祎晨^{1,2}¹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通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 山区地形崎岖, 高程变化较大, 遥感影像地形效应明显, 地物的光谱特征容易受到干扰, 导致在分类过程中对遥感影像出现误分, 不利于遥感信息的提取。基于辐射传输原理, 利用 Python 开发了针对山区的大气校正算法。所提算法充分考虑了太阳直接辐射、天空散射辐射及邻近地表反射辐射对卫星入瞳处目标辐亮度的影响, 可以有效地消除地形阴影的影响。利用所提算法, 结合数字高程模型 (DEM), 对环境减灾二号 01 组卫星的 CCD 传感器的山区数据进行大气校正研究。分析结果表明: 校正后的图像地形效应减弱, 图像质量得到了明显的改善, 反演得到的地表反射率与实地测量的地物光谱数据比较吻合, 为进一步开展定量遥感研究提供了数据质量保障。

关键词 大气校正; 反射率; 卫星遥感影像; 数字高程模型

中图分类号 TP751 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220608

Atmospheric Correction in Mountainous Areas Based on Environmental Satellite CCD Images

Xia Chao^{1,2}, Huang Honglian^{1*}, Sun Xiaobing¹, Liu Xiao¹, Yu Haixiao^{1,2}, Wei Yichen^{1,2}¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract Mountainous areas have rough terrain and substantial elevation changes. The topography effect of remote sensing images significantly interferes with the spectral characteristics of ground objects and may lead to the misclassification for remote sensing images, which is not conducive to remote sensing information extraction. Based on the principle of radiative transfer, an atmospheric correction algorithm for mountainous areas is developed using Python. The proposed algorithm considers the influence of direct solar, sky scattered, and adjacent surface reflected radiations on the target radiance at the satellite entrance pupil and can effectively eliminate the terrain shadow influence. We conducted the atmospheric correction of the CCD sensor for mountain area data of HJ-2AB (a small satellite for environmental and disaster monitoring and prediction made in China) using the proposed algorithm and digital elevation model (DEM). The analysis results show that the terrain effect of the corrected image is weak and that the image quality improves significantly. The surface reflectance obtained by inversion agrees with the spectral data of the ground objects measured in the field, which provides a data quality guarantee for further quantitative remote sensing research.

Key words atmospheric correction; reflectance; satellite remote sensing image; digital elevation model

1 引言

对于地表起伏较大的区域, 地物的谱征信息受到了严重干扰。特别是在丘陵山区, 传递到地表的太阳辐射能量并不均匀, 结果是部分区域位于阴影下, 而其他部分却感光过度, 进而出现“同物异谱”或者“同谱异

物”现象^[1]。尤其是中高分辨率传感器获得的影像地形效应更为突出, 这极大地阻碍了遥感数据的进一步应用^[2-3]。因此, 对山区遥感影像进行有效的大气校正, 消除地形起伏引起的影像灰度值变化, 是保障各种定量遥感分析精度的不可或缺的关键步骤。

目前, 国内外学者针对如何降低地形效应对山区

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-01-22; 录用日期: 2022-01-28; 网络首发日期: 2022-02-10

基金项目: 高分重大专项(30_Y20A010_9007_17/18)、合肥研究院重点项目

通信作者: hlhuang@aiofm.ac.cn

遥感影像的影响做出了充分的研究,并提出了大量的校正模型。模型总体可以归纳为三类:经验模型、半经验模型和物理模型^[4]。经验模型对遥感影像信息和地表实测信息进行统计分析以获得结果。如波段比模型^[5],该模型结构虽然简单,但只能去除部分地形影响,会造成图像原有信息的损失,难以完成后期的量化分析^[6]。半经验模型是一种物理机制与经验方法相结合的模型。目前应用广泛的是 C 校正模型^[7],该模型引入了半经验参数 C,并通过改变模型公式中分母的大小来降低地表起伏带来的影响。但参数 C 的获得过于依赖具体的图像数据,物理意义不足,使得模型不具备普适性^[8-9]。经验、半经验模型的局限性在于没有从物理机制的角度考虑到天空散射辐射、来自附近地表的直接和散射辐射的影响;而物理模型是一种建立在辐射传输理论基础上的模型,充分考虑了复杂地形目标地表接收到的辐射组分,具有严格的理论基础。虽然物理模型公式一般都比较复杂、参数较多、计算繁琐,但是模型参数具有明确的物理意义,结果更加准确^[10],精度较高。

环境减灾二号 01 组 A、B 星是环境与灾害监测预报的光学对地遥感卫星,于 2020 年 9 月 27 日成功发

射。每颗卫星配置了 4 类光学载荷,包括 16 m 分辨率相机、高光谱成像仪、红外相机、大气校正仪。其中,16 m 分辨率相机载荷由 4 台可见光 CCD 相机组成^[11]。

本文使用环境星的最新数据,结合 12.5 m 分辨率的数字高程模型 (DEM) 数据,基于地表朗伯体的假设,利用大气辐射传输模型,实现了对环境星 CCD 数据的山区大气校正和反射率反演。结果表明:所提算法可以有效地消除卫星影像中地形效应的影响。

2 算法基本原理

地形崎岖的山区接收到的太阳辐射主要分为三类,分别是太阳直接辐射、天空散射辐射及来自于附近地表的反射辐射^[12],即

$$E_g(\lambda) = E_{gb}(\lambda) + E_{gd}(\lambda) + E_{gr}(\lambda), \quad (1)$$

式中: $E_g(\lambda)$ 是波长为 λ 时的总光谱辐照度; $E_{gb}(\lambda)$ 是波长为 λ 时的直射光谱辐照度; $E_{gd}(\lambda)$ 是波长为 λ 时的散射光谱辐照度; $E_{gr}(\lambda)$ 是波长为 λ 时的邻近地表(像元)的反射辐照度。

根据上述模型,可推出多光谱遥感影像的大气辐射校正物理模型^[13],为

$$\rho^{(i)}(x, y) = \frac{\pi [d^2 L(x, y) - L_{ba}]}{\tau_v \left\{ b E_{dir} \tau_s \cos \beta(x, y) + E_{dif} [b \tau_s \cos \beta(x, y) / \cos \theta_s + (1 - b \tau_s) V_{sky}(x, y)] + E_t^{(i)} \bar{\rho}_{terrain}^{(i-1)} V_{terrain}(x, y) \right\}}, \quad (2)$$

式中: d 为日地距离; b 为地形遮蔽因子; L_{ba} 为路径辐射; τ_v 和 τ_s 分别是大气上行和下行透过率; E_{dir} 与 E_{dif} 分别是地面直射与散射辐照度; $V_{sky}(x, y)$ 和 $V_{terrain}(x, y)$ 分别是坐标为 (x, y) 处影像单元的天空可见因子和地形观测因子; $E_t^{(i)}$ 是周边相邻像元的多次反射辐照度; $\bar{\rho}_{terrain}^{(i-1)}$ 为邻近地表的平均反射率,初始值 $\bar{\rho}_{terrain}^{(0)} = 0.1$; β 是太阳有效入射角; θ_s 为太阳天顶角。

对遥感影像进行辐射校正,得出模型中入瞳处的辐亮度 $L(x, y)$:

$$L(x, y) = c_0 + c_1 \times L_{DN}(x, y), \quad (3)$$

式中: $L_{DN}(x, y)$ 是坐标为 (x, y) 处影像单元的亮度值,可由传感器测得; c_0 和 c_1 分别为传感器对应的定标截距和定标斜率。算法模型中所包含的地形参数主要有天空可见因子 $V_{sky}(x, y)$ 、地形观测因子 $V_{terrain}(x, y)$ 、地形遮蔽因子 b 、太阳有效入射角 $\cos \beta(x, y)$ 。这些参数主要是通过坡度和坡向及其他大气参数计算获得的。而坡度和坡向由 DEM 数据计算获得,公式为

$$S = \arctan(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}), \quad (4)$$

式中: S 表示坡度; f_x 与 f_y 分别表示水平与垂直两个方向上的高程变化程度。在实际情况下,坡度通常是以度为单位来进行测量的,式(4)转换为

$$S = \arctan(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \times (180/\pi). \quad (5)$$

坡向为地表某一位置高程值改变量的最大变化方向,计算公式为

$$A = 180^\circ - \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right) - 90^\circ\left(\frac{f_x}{f_y}\right), \quad (6)$$

式中: A 表示坡向。

天空可见因子与地形观测因子的计算可以通过简单的三角法模型获得,公式为

$$\begin{cases} V_{sky} = \frac{1 + \cos S}{2} \\ V_{terrain} = 1 - V_{sky} = \frac{1 - \cos S}{2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: S 为当前像元的坡度角;在三角法模型中,天空可见因子 V_{sky} 和地形观测因子 $V_{terrain}$ 仅仅与像元的坡度有关。在校正的过程中,需要检测判断山区地形阴影区域,而地形遮蔽因子代表了阴影区域的判别结果,通常用数值 0 表示阴影区域,其余区域为 1。判别地形阴影的依据主要是从 DEM 数据提取出的太阳有效入射角,计算方法^[14]为

$$\cos \beta = \cos \theta_s \cos S + \sin \theta_s \sin S \cos(\phi - A), \quad (8)$$

式中: ϕ 为太阳方位角。当地面某点的太阳有效入射角 $\beta > 90^\circ$ 时,即 $\cos \beta < 0$,判断该点为阴影区,此时地形遮蔽因子为 0,否则判断该点为非阴影区,地形遮蔽因子为 1。

邻近像元的多次反射辐照度 $E_t^{(i)}$ 的公式为

$$E_t^{(i)} = (E_{dir} + E_{dif}) \frac{\rho_{terrain}^{-(i-1)} [1 - V_{sky}(x, y)]}{1 - \rho_{terrain}^{-(i-1)} [1 - V_{sky}(x, y)]}, \quad (9)$$

式中: E_{dir} 与 E_{dif} 分别是水平地表接收到的太阳直射辐照度与漫散射辐照度。

3 环境星山区遥感影像的大气校正

3.1 数据准备

采用的数据源主要来自 HJ-2A 卫星的 CCD3 相机,其光谱辐亮度响应曲线如图 1 所示。选取 2021 年 5 月 22 日河北省张家口市怀来县附近山区 16 m 分辨率的多光谱遥感影像。

通过环境星搭载的大气校正仪同步获取大气参数及对应的气溶胶光学厚度数据。大气校正仪 (PSAC) 设计有可见/近红外 9 个光谱波段,每个波段有 4 个偏振度探测通道,同时配置有较为完备的星上辐射和偏振定标系统,所能达到的偏振探测精度为 0.5%,辐射定标精度为 6%~7%,完全能够满足大气气溶胶、水汽和云探测以及地气解耦的应用需求。同时,偏振信息的波长敏感性不强,光谱带宽的设计没有特别的约束;偏振探测对地表相对不敏感,而对大气非常敏感,可以更好地探测到气溶胶的信息。对于

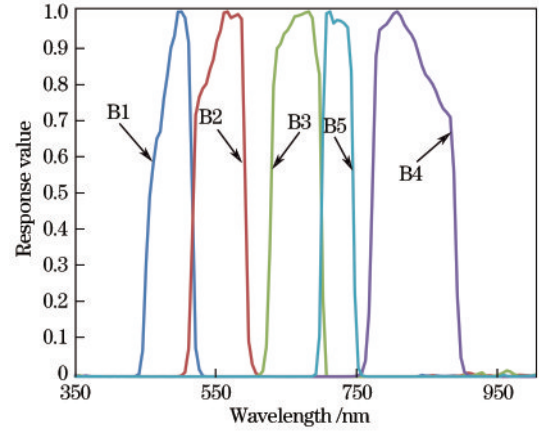


图 1 CCD3 相机各波段归一化光谱响应曲线

Fig. 1 Normalized spectral response curves of each spectrum segment of CCD3 camera

大气校正仪获取的数据,需要首先进行预处理和水汽、气溶胶参数同步反演,获得了大气校正仪的水汽和气溶胶的性质产品。大气校正仪的相关参数如表 1 所示。同时下载了河北地区的 DEM 数据,此数据由 advanced land observing satellite (ALOS) 相控阵型 L 波段合成孔径雷达 (PALSAR) 采集,该数据水平及垂直精度可达 12.5 m,后期可以很好地与环境星数据进行匹配。

表 1 大气校正仪波段设置

Table 1 Band setting of atmospheric calibrator

Band	Central wavelength /nm	Wavelength range /nm	Probe params	Polarization
Band 1	410	400-420	Aerosol	Yes
Band 2	443	433-453	Aerosol	Yes
Band 3	555	545-565	Aerosol	Yes
Band 4	670	660-680	Aerosol	Yes
Band 5	865	845-885	Aerosol, steam, cloud	Yes
Band 6	910	900-920	Steam	Yes
Band 7	1380	1360-1400	Cirrus recognition	Yes
Band 8	1610	1580-1640	Aerosol, surface	Yes
Band 9	2250	2210-2290	Aeroso, surface	Yes

3.2 处理流程

环境星山区遥感影像的大气校正过程主要分为 4 部分:数据预处理、大气参数的获取、地形参数的计算以及最终的校正,具体如图 2 所示。

1) 数据预处理

对获取到的多光谱遥感影像数据进行预处理操作。首先基于有理函数 (RPC) 模型对原始环境星数据进行正射校正,之后对正射影像进行辐射定标,具体是利用 HJ-2A 卫星的 CCD3 相机的定标系数,由式 (3) 计算获得辐亮度影像。为了使得遥感影像分辨率与 DEM 数据分辨率具有一致性,将 DEM 数据的分辨率重采样为 16 m 分辨率,同时与遥感影像进行配准,最

后根据选取的目标山区,以影像数据为基准,对重叠的 DEM 数据进行裁剪,结果如图 3 所示。

2) 获取大气辐射量

大气校正过程中必要的大气辐射量主要包括式 (2) 中的大气上行与下行透过率、地面直射与散射辐照度,这些参数主要通过 6S 辐射传输模型计算获得。模型的输入参数主要有:几何参数、大气模式、光谱参数等^[15],具体如表 2 所示。其中,大气气溶胶光学厚度为大气校正仪同步的气溶胶光学厚度数据,由于大气校正仪的空间分辨率为 6 km,而多光谱相机空间分辨率为 16 m,所以多光谱图像的 375×375 像元区域用一个光学厚度表示。目标高度参数主要从 DEM 数据中获取。

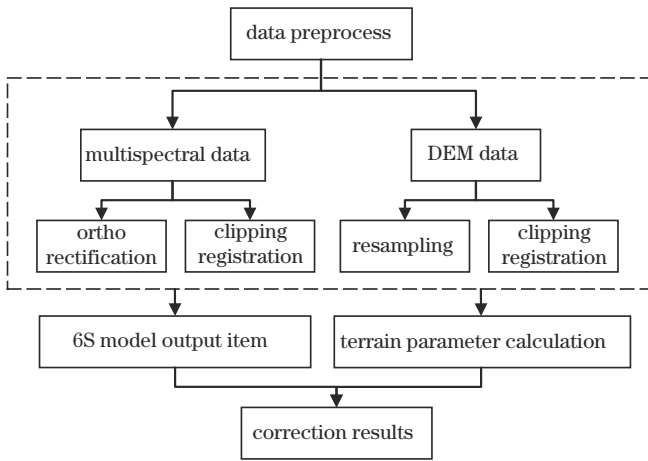


图 2 环境星山区遥感影像的大气校正流程

Fig. 2 Atmospheric correction process of remote sensing images in mountainous areas based on Environmental Satellite

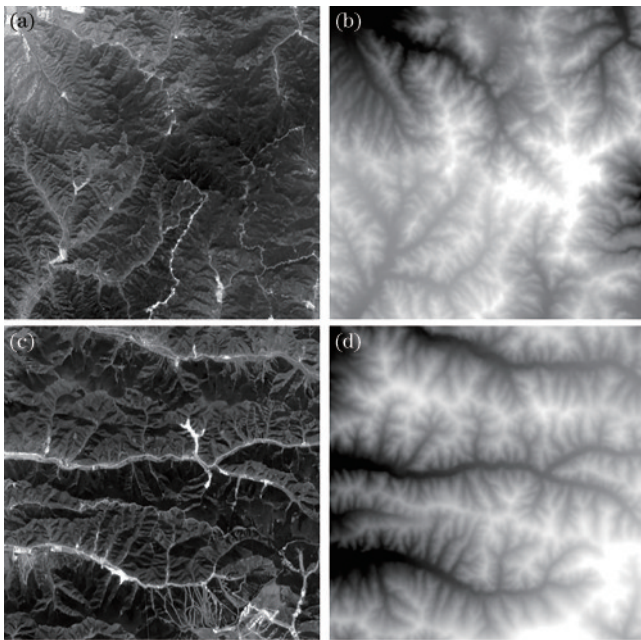


图 3 预处理后的遥感影像与 DEM 数据。(a)待校正区域 A 的多光谱遥感影像；(b)区域 A 匹配的 DEM 数据；(c)待校正区域 B 的多光谱遥感影像；(d)区域 B 匹配的 DEM 数据

Fig. 3 Remote sensing image and DEM data after pretreatment. (a) Multispectral remote sensing image of region A to be corrected; (b) DEM matched by region A; (c) multispectral remote sensing image of region B to be corrected; (d) DEM matched by region B

3) 计算地形参数

为了消除地形效应的影响,大气校正过程中地形参数的计算至关重要。坡度与坡向的计算通常采用拟合曲面法,借助 DEM 数据,以待处理的影像单元为中心,扩展出一个 3×3 的像域,再借助此像域的高程增量拟合出一个平面,最后利用最大平均值法获得该平面的坡度,该平面的朝向即为所求的坡向。获得各个

表 2 6S 模型输入参数
Table 2 6S model input parameters

Geometry parameter	Solar zenith / (°)	22.160191
	Solar azimuth / (°)	151.045525
	Satellite zenith / (°)	8.911552
	Satellite azimuth / (°)	103.483838
	Observation date	2021-05-22
Atmospheric parameter	Atmosphere model	Midlatitude summer
	Aerosol model	Mainland
	Aerosol concentration	region A: 0.223 region B: 0.217
Sensor parameter	Target altitude / km	region A: 1.6845 region B: 0.9555
	Band range / nm	Band 1: 450-520
		Band 2: 520-590
		Band 3: 630-690
		Band 4: 770-890
Band 5: 690-730		

像元坡度、坡向后,就可以通过相关公式进行计算,得出相应的地形参数,实验结果如图 4 所示。

4) 地形辐射校正

已通过 6S 辐射传输模型获得了大气上行与下行透过率、地面直射与散射辐射照度等大气辐射量,并且通过对 DEM 数据的处理获得了坡度、坡向、地形遮蔽因子、天空可见因子、地形观测因子等地形参数。基于大气辐射校正物理模型,将原始多光谱图像、大气辐射量与地形参数作为式(2)的输入项,其中邻近像元的多次反射辐射照度由式(9)获得,再对式(2)的输出结果进行处理,得到的结果作为式(9)中的邻近地表平均反射率。整个过程经过多次迭代就可以反演出多光谱遥感影像各个波段校正后的地表反射率。

3.3 校正效果

基于大气校正算法对 HJ-2A 卫星中的 CCD3 相机获得的山区多光谱遥感影像进行去除地形效应的校正,结果如图 5 所示。

图 5(a)与图 5(c)是河北省张家口市怀来县附近两处山区的多光谱合成彩色图。通过比较两个区域校正前后的遥感影像,可以观察到,山区阴影区域的亮度得到了明显的提升,图像的细节也得到了增强,说明所提算法有效降低了地形效应对多光谱图像各个波段辐射值的影响。同时也可以观察到校正后的图像中山区植被覆盖较多的区域颜色更加得鲜艳突出,与植被覆盖较少的区域对比明显,山脉纹理和山间公路的边缘也变得更加清晰。

4 分析与讨论

校正后的图像从目视效果上来看有了明显改善。

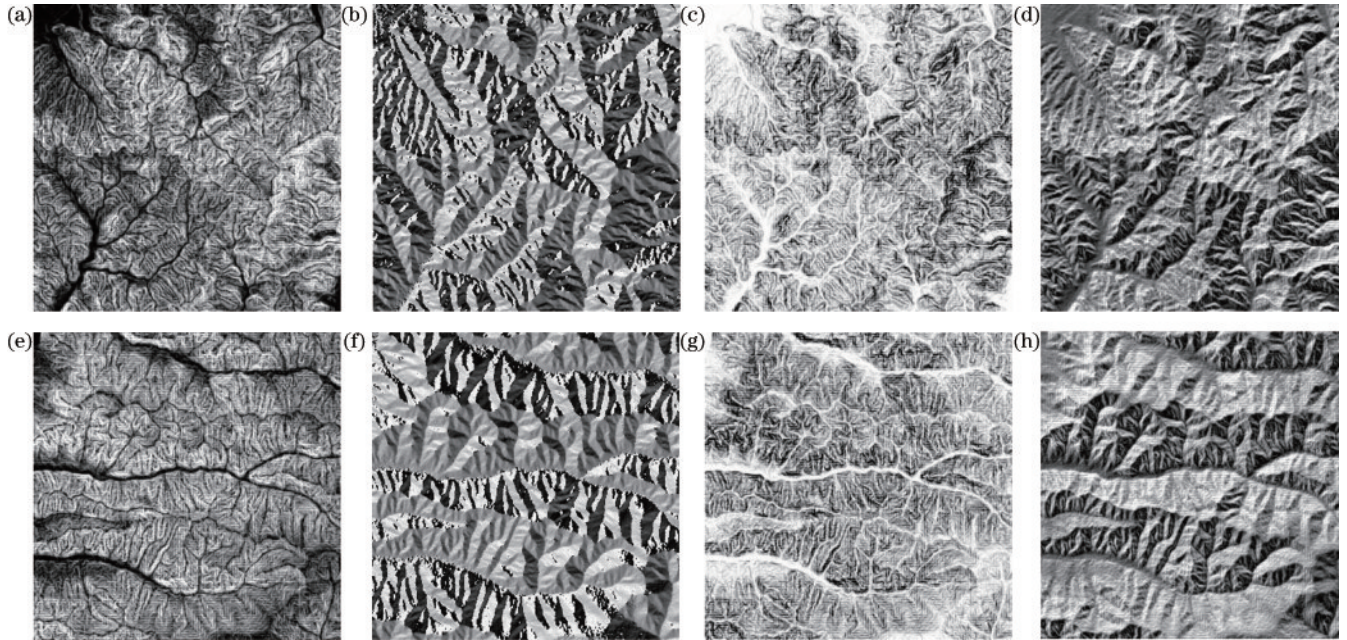


图 4 区域 A 和区域 B 的地形参数。(a)区域 A 坡度;(b)区域 A 坡向;(c)区域 A 天空可见因子;(d)区域 A 太阳有效入射角;(e)区域 B 坡度;(f)区域 B 坡向;(g)区域 B 天空可见因子;(h)区域 B 太阳有效入射角

Fig. 4 Topographic factors of regions A and B. (a) Slope of region A; (b) aspect of region A; (c) sky view factor of region A; (d) illumination angle of region A; (e) slope of region B; (f) aspect of region B; (g) sky view factor of region B; (h) illumination angle of region B

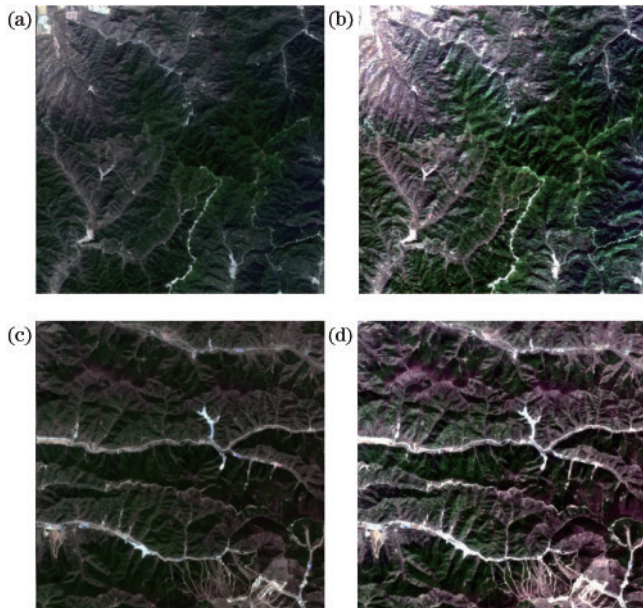


图 5 区域 A 和区域 B 校正前后的图像。(a)区域 A 校正前图像;(b)区域 A 校正后图像;(c)区域 B 校正前图像;(d)区域 B 校正后图像

Fig. 5 Images of regions A and B before and after correction. (a) Image of region A before correction; (b) image of region A after correction; (c) image of region B before correction; (d) image of region B after correction

下面将针对区域 B,对校正前后的图像进行量化的评价与分析。

4.1 图像质量分析

1) 图像的一维熵

图像的一维熵度量了图像所包含信息量的均值,反映了图像中灰度分布的聚集特征。其计算公式为

$$E_{ENT} = - \sum_{i=0}^{i_{max}} p_i \log p_i, \quad (10)$$

式中: E_{ENT} 表示图像的熵值; p_i 表示图像中灰度值为 i 的像素占比。通过比较校正前后遥感影像的信息熵,如图 6 所示,可知校正后的图像熵值更高,图像所包含的内容细节更加丰富,信息量更多。

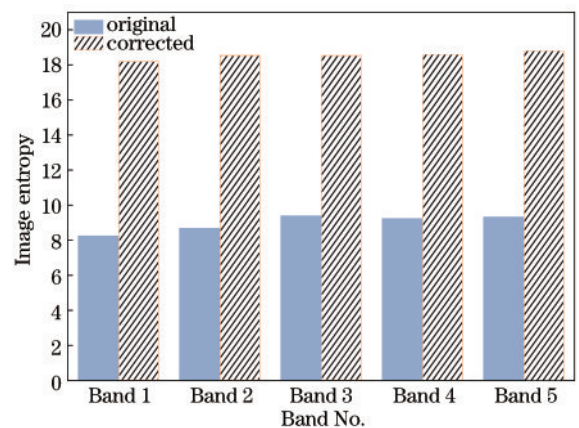


图 6 区域 B 校正前后的图像熵

Fig. 6 Image entropy of region B before and after correction

2) 对比度

图像对比度是一幅图像灰度差异大小的衡量标准。它决定了视觉效果的好坏,对比度越大,那么图像的颜色对比越明显。反之,对比度越小,图像会模糊不

清。其计算公式为

$$C_{\text{CONT}} = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j), \quad (11)$$

式中： $\delta(i, j) = |i - j|$ 表示相邻两个像素的灰度差值； $P_{\delta}(i, j)$ 表示灰度差值为 δ 的概率。通过比较遥感影像校正前后的对比度，如图 7 所示，发现校正后的图像对比度得到了明显提升，色彩也更加鲜艳，尤其是植被覆盖区域与非覆盖区域，颜色对比明显。

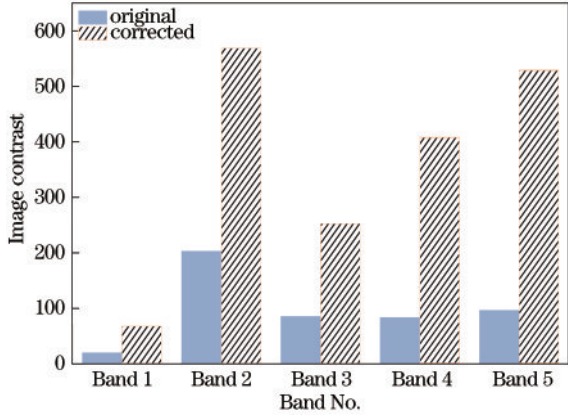


图 7 区域 B 校正前后的对比度

Fig. 7 Image contrast of region B before and after correction

3) 清晰度

清晰度对图像的质量至关重要，与图像的细节息息相关。采用基于 Laplacian 梯度函数的清晰度算法，具体计算过程为

$$L = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中： L 为 Laplacian 算子。在此基础上，图像清晰度的定义为

$$D(f) = \sum_y \sum_x |G(x, y)|, \quad (13)$$

式中： $G(x, y)$ 为像素点 (x, y) 处 Laplacian 算子的卷积。

校正前后遥感影像的清晰度结果如图 8 所示，通过比较两者的清晰度发现，校正后的图像清晰度更高，即图像质量更好，能表现出更多的细节，校正后的山路以及山体的轮廓也更加清晰。

4.2 地形效应分析

遥感影像值与太阳有效入射角的余弦值之间的线

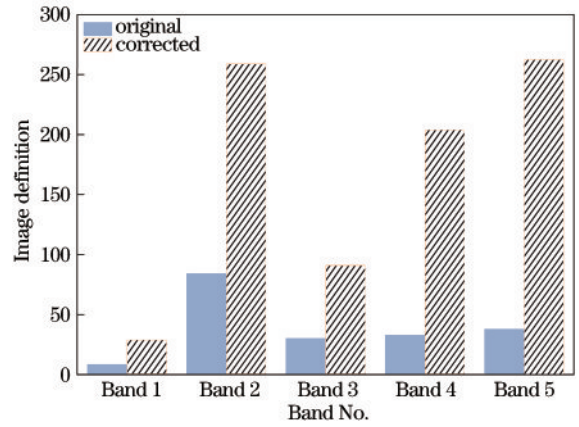


图 8 区域 B 校正前后的清晰度

Fig. 8 Image definition of region B before and after correction

性回归关系反映了遥感影像地形效应的程度^[16]。其中方程的斜率表示影像值随余弦值变化的程度，斜率越小，说明地形效应消除得越好。以区域 A 影像的前三个波段为例，从原始影像和校正后图像中分别随机选取 10000 个像元，与太阳入射角余弦值进行线性拟合，结果如图 9 所示，其中 R 为相关系数。

从图 9 可以看出，原始影像三个波段经过校正后，回归曲线的斜率均小于校正前的回归斜率，接近于水平，说明校正后遥感影像各个波段反射率值与太阳入射角的余弦值的相关性得到了很好消除，地形效应得到了有效减弱。但是经过校正后，波段 2 的相关系数 R 值接近于 0 但是为负值，说明该波段影像在太阳入射角的余弦值较小时存在轻微过度校正现象。

4.3 光谱一致性分析

为了验证校正后反射率的正确性，在区域 A 的山区 ($40^{\circ}15'57''$ N, $115^{\circ}49'4''$ E)，选取枯草地、油松、果树 3 类地物，使用 SVC 地物光谱仪，分别随机测量了 50 个样本，获得了相应的光谱反射率数据并计算出了均值。区域 A 测量地点校正前后的光谱曲线与实测地物的光谱曲线的拟合程度如图 10 所示，通过图 10 可以看出，三类地物校正后的光谱曲线与实测曲线更加吻合，说明原始影像校正后的反射率更加接近于真实反射率。对测量地点三类地物校正前后的反射率与实测数据进行误差分析，结果如表 3 所示，可以看出三类地物校正后反射率与实测值相比误差更小，更加准确。

表 3 不同地物校正前后的误差分析

Table 3 Error analysis of different features before and after correction

Band	Central wavelength /nm	Withered grass		Chinese pine		Fruit tree	
		Original	Corrected	Original	Corrected	Original	Corrected
Band 1	485	1.49	0.29	2.07	0.19	1.67	0.27
Band 2	555	2.97	0.11	2.94	0.07	2.25	0.03
Band 3	660	0.5	0.08	0.7	0.21	0.46	0.21
Band 4	710	1.31	0.43	1.37	0.49	0.79	0.41
Band 5	810	0.55	0.15	0.41	0.16	0.11	0.08

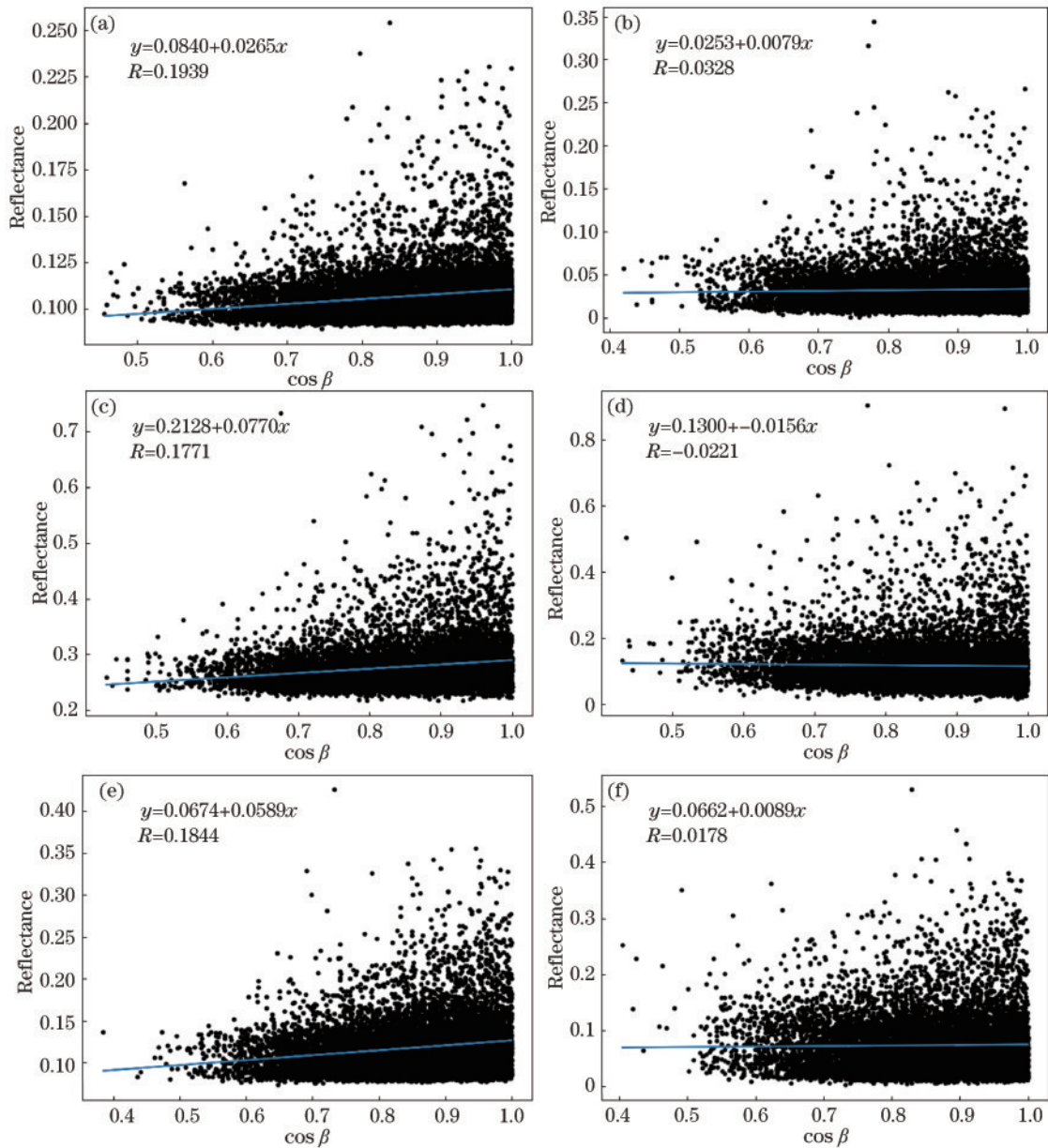


图 9 校正前后不同波段影像与太阳入射角余弦值的回归曲线。(a)校正前 band 1; (b)校正后 band 1; (c)校正前 band 2; (d)校正后 band 2; (e)校正前 band 3; (f)校正后 band 3

Fig. 9 Regression curves of cosine values of illumination angle and images in different bands before and after correction. (a) Band 1 before correction; (b) band 1 after correction; (c) band 2 before correction; (d) band 2 after correction; (e) band 3 before correction; (f) band 3 after correction

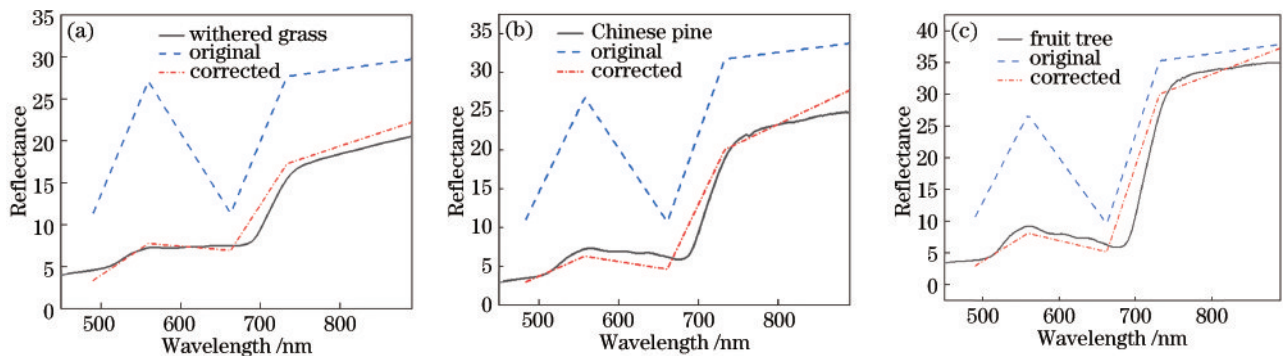


图 10 不同地物校正前后的光谱曲线。(a) 枯草地; (b) 油松; (c) 果树

Fig. 10 Spectral curves of different features before and after correction. (a) Withered grass; (b) Chinese pine; (c) fruit tree

5 结 论

丘陵山区地形效应明显。随着地面坡度和坡向的变化,辐照度也相应地发生变化,导致遥感影像辐亮度值存在差异,具体表现为阳坡亮度较高、阴坡亮度较暗。这种现象严重阻碍了对遥感影像的定量化分析。

基于大气辐射传输模型,利用环境星多光谱遥感影像,结合对应的 DEM 数据和相配套的大气数据,对山区图像进行大气校正,削弱地形效应的影响并反演出地表反射率。通过目视对比、图像质量分析、回归分析和光谱一致性分析等方法对处理结果进行分析比较,结果表明校正后的图像的清晰度、对比度以及信息熵值显著提高,地物信息更加丰富。相对于表观反射率,反演得到的地表反射率与太阳相对入射角余弦的线性相关性显著降低,地形效应改善明显。同时反演后的反射率与实地测量的地物光谱数据图形比较吻合,一致性较高,这对环境星图像的应用具有重要价值。

在现实中,地表为非朗伯体,地表各个方向反射率往往不同。但是所提算法建立在地表朗伯体的假设基础上,在实际校正过程中,往往会出现过度校正的现象。并且对于有人类活动的地区,山谷和山顶气溶胶光学厚度会存在差异较大的现象,需要获得每个像元的气溶胶光学厚度,否则将会影响校正的准确性。在今后的研究中,可以结合双向反射分布函数模型,进一步改进算法,同时考虑海拔高度对气溶胶的影响,逐像元匹配气溶胶光学厚度,将会反演出更准确的地表反射率和更优的校正效果。

参 考 文 献

- [1] 宋丽瑶,张浩,林峰.阴影区提取对高分辨率影像地形辐射校正的影响与分析[J].测绘通报,2017(3):29-33,66.
Song L Y, Zhang H, Lin F. Impact and analysis of shadow area extracting to the terrain radiation correction for high resolution image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(3): 29-33, 66.
- [2] 黄博,徐丽华.基于改进型 Minnaert 地形校正模型的应用研究[J].遥感技术与应用,2012,27(2):183-189.
Huang B, Xu L H. Applied research of topographic correction based on the improved Minnaert model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 183-189.
- [3] 李欣欣,张立新,蒋玲梅.山区地形对被动微波遥感影响的研究进展[J].国土资源遥感,2011,23(3):8-13.
Li X X, Zhang L X, Jiang L M. Advances in the study of mountainous relief effects on passive microwave remote sensing[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2011, 23(3): 8-13.
- [4] 段四波,阎广建.山区遥感图像地形校正模型研究综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):362-366.
Duan S B, Yan G J. A review of models for topographic

- correction of remotely sensed images in mountainous area [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2007, 43(3): 362-366.
- [5] Colby J D. Topographic normalization in rugged terrain [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(5): 531-537.
- [6] 李新,陈贤章,程国栋.地形对高山区 TM 积雪定量遥感的影响[J].遥感技术与应用,1997,12(1):2-8.
Li X, Chen X Z, Cheng G D. Influence of terrain on quantitative remote sensing of TM snow cover in high mountain areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1997, 12(1): 2-8.
- [7] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1982, 8(2): 84-106.
- [8] Meyer P, Itten K I, Kellenberger T, et al. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993, 48(4): 17-28.
- [9] 黄微,张良培,李平湘.一种改进的卫星影像地形校正算法[J].中国图象图形学报,2005,10(9):1124-1128,1069.
Huang W, Zhang L P, Li P X. An improved topographic correction approach for satellite image[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(9): 1124-1128, 1069.
- [10] 丁一帆,尤红建,张浩,等.面向高分辨率遥感影像的地形辐射校正方法[J].北京航空航天大学学报,2018,44(1):27-35.
Ding Y F, You H J, Zhang H, et al. Topographic correction method for high-resolution remote sensing images[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(1): 27-35.
- [11] 晓曲.环境减灾二号卫星[J].卫星应用,2020(12):70.
Xiao Q. Environmental disaster reduction satellite No. 2 [J]. Satellite Application, 2020(12): 70.
- [12] 高永年,刘传胜,王静.遥感影像地形校正理论基础与方法应用[M].北京:科学出版社,2013.
Gao Y N, Liu C S, Wang J. Theoretical basis and method application of remote sensing terrain correction [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [13] Richter R. Correction of satellite imagery over mountainous terrain[J]. Applied Optics, 1998, 37(18): 4004-4015.
- [14] 岳照溪,张永军,段延松,等. DEM 辅助的卫星光学遥感影像山体阴影检测与地形辐射校正[J].测绘学报,2018,47(1):113-122.
Yue Z X, Zhang Y J, Duan Y S, et al. DEM assisted shadow detection and topography correction of satellite remote sensing images in mountainous area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(1): 113-122.
- [15] 秦慧平,易维宁,潘邦龙,等.山地光学遥感成像仿真的实现[J].红外与激光工程,2011,40(6):1177-1180.
Qin H P, Yi W N, Pan B L, et al. Simulation of terrain optical remote sensing imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1177-1180.
- [16] Richter R, Müller A. De-shadowing of satellite/airborne imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(15): 3137-3148.