

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2015.05.005

山区复杂地形条件下 GF-1 卫星遥感雪面反射率计算

蒋璐媛^{1,2,3}, 肖鹏峰^{1,2,3*}, 冯学智^{1,2,3}, 耶楠^{1,2,3}, 贺广均^{1,2,3,4}, 张学良^{1,2,3}

(1. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京大学, 南京, 210023; 2. 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室, 南京大学, 南京, 210023; 3. 南京大学地理信息科学系, 南京, 210023; 4. 天地一体化信息技术国家重点实验室, 航天恒星科技有限公司, 北京, 100086)

摘要:针对山区遥感影像计算雪面反射率的难点,采用各向异性校正与地形校正相结合的方法,将研究区不同坡面方向的雪面反射率归一化至平坦地表垂直观测方向上的雪面反射率,以消除地形影响.其中,各向异性校正采用二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型;地形校正采用山地辐射传输模型.遥感影像选用新疆玛纳斯河流域的高分一号卫星(GF-1)宽幅相机数据.利用同步观测的积雪光谱数据对此方法的校正能力进行验证,结果表明此方法能够消除大部分地形和大气的影晌;计算的雪面反射率在非阴影区与阴影区均与实测数据相一致;该方法可为山区积雪的光学遥感研究提供技术支撑.

关键词:雪面反射率,各向异性校正,地形校正,GF-1,玛纳斯河流域

中图分类号: TP79

文献标识码: A

Calculation of snow reflectance from GF-1 satellite image in rugged mountain areas

Jiang Luyuan^{1,2,3}, Xiao Pengfeng^{1,2,3*}, Feng Xuezhi^{1,2,3}, Ye Nan^{1,2,3},
He Guangjun^{1,2,3,4}, Zhang Xueliang^{1,2,3}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Key Laboratory for Satellite Mapping Technology and Applications of State Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 3. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 4. State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Company Limited, Beijing, 100086, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in calculating snow reflectance from high spatial resolution image in mountain areas, a method combined with anisotropy correction and topographic correction was proposed to convert the snow reflectance in different slope to the nadir direction on the flat surface. In the process of anisotropy correction and topographic correction, BRDF model and mountain radiation transmission model were applied to eliminate topographic effects respectively. The GF-1 WFV image of Manasi River Basin, Xinjiang Province was chosen as research data and snow spectral data achieved by synchronous observation was employed to evaluate the this method. The results show

基金项目: 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(95-Y40B02-9001-13/15-04), 国家自然科学基金(41271353)

收稿日期: 2015-06-09

* 通讯联系人, E-mail: xiaopf@nju.edu.cn

that this method could generally eliminate the influence caused by rugged terrain and atmosphere, and the snow reflectance calculated by this method was in agreement with field observations in both non-shadow area and shadow area. This method can support the research on optical remote sensing of snow in mountain areas.

Key words: snow reflectance, anisotropy correction, topographic correction, GF-1, Manasi River Basin

雪面反照率是全球地表辐射与能量平衡、全球变化研究中的一个重要参数,是衡量地表能量收支的重要指标,其微小变化均可造成冰盖表面能量通量的强烈波动^[1];雪面反照率受环境影响变化很快,具有明显的时空差异特性^[2-3].雪面反照率不具有方向性,反映的是雪面在某个波段所有方向上对入射太阳辐射的反射能力;而雪面反射率却具有方向性,反映的是某一观测方向上雪面对入射方向上太阳辐射的反射能力,且角度分布差异明显.目前随着遥感技术的快速发展,通过卫星遥感反演雪面反照率已经成为一种理想的技术手段,而卫星传感器通常只能在特定方向上对地表进行观测,获得某一方向上的反射率数据,再利用反射率模型对方向反射率数据进行积分,从而得到反照率数据,因此正确的反射率数据是获取地表反照率的基础^[4-5].此外,地表反射率除了对气候、环境的变化具有指示作用外,还能够反映地表反射和大气散射的相互作用,进而影响大气校正和地表各向异性校正的过程^[6-9].

为计算山区遥感影像的地表反射率,已有研究通常采用基于地表朗伯体假设的山地辐射传输模型,消除地形及大气的影晌并计算得到反射率数据^[10-16].但由于真实地表的非朗伯体特性,经常会导致反射率过度校正的问题.如何在考虑地表方向反射的基础上消除地形及大气的影晌,进而计算地表反射率一直是山区遥感领域的一个难点^[17].闻建光等^[18]考虑真实地表的方 向反射特性,将各向异性校正模型 Walthall 与山地辐射传输模型相结合,发展了基于方向反射的地表反射率计算模型.此模型计算的反射率与实测结果相近,为准确计算山区真实地表反射率提供了一种可行、简便的方法.但所采用的 Walthall 模型是否能够准确地

模拟不同土地覆盖的方向反射,还有待探讨.

地表方向反射特征指地表反射入射光的方向性特征,一般用二向反射分布函数(BRDF)来描述这一特性^[19].与地球上大部分的自然表面一样,雪面是具有强烈前向散射特性的非朗伯体^[20].若忽略这一特性,必然会给反演结果带来较大误差.各向异性校正的关键在于选择合适的方向反射模型和参数.目前已有多种基于遥感的雪面方向反射模型,如 Lindsay and Rothrock^[21]、Knap *et al.*^[22-23]、Greuell and Marijn^[24]分别利用参数化的 BRDF 模型对实测的雪面方向反射数据进行模拟,分析不同观测方向上反射率的变化情况,并通过对拟合的参数进行积分得到雪面反照率数据. Schaff *et al.*^[25]采用核函数为 Ross-Li 的 (Ross-Thick, Li-Sparse) 线性核驱动模型对 16 天累积观测的 MODIS 多角度数据进行拟合,并利用拟合得到的参数生产 MODIS Albedo/BRDF 产品.在比较各 BRDF 模型对雪面方向反射模拟能力的研究中,已表明采用 Ross-Thick 和 Li-Sparse 两个核函数组合的核驱动模型的模拟结果与实际观测值最为一致,是一种有效的核模型^[26-28].

雪面方向反射模型的构建需要多个太阳入射角和传感器观测角的支持,而对于中高分辨率遥感卫星,传感器观测方式通常较为单一,难以在平坦地表获得多角度反射率数据,从而很难获取精确的地表 BRDF 特性^[29].而在地形起伏较大的山区,同一地表类型可提供多个相对太阳入射角、传感器观测角及相应的地表观测反射率数据,由此便可构建雪面方向反射分布模型^[30-31].

本文根据闻建光等^[18]、张玉环等^[31]提出的针对起伏地表中高分辨率遥感影像构建地表二向反射分布模型的思路,利用新疆玛纳斯河流域典型区 GF-1WV1(Wide Field of View)多光谱数据和 ASTER GDEM 数据提取雪面

方向反射数据集,采用核驱动模型 Ross-Li 拟合雪面 BRDF 特征,得到各向异性因子;采用各向异性校正与基于辐射传输模型的地形校正相结合的方法计算雪面反射率,消除地形和大气效应,最后利用同步观测的积雪光谱数据对模型进行验证.具体流程如图 1 所示.

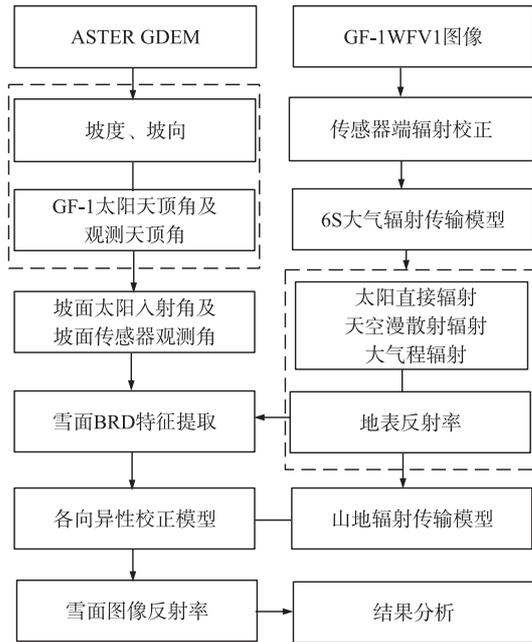


图 1 研究流程图

Fig. 1 The flowchart of the study

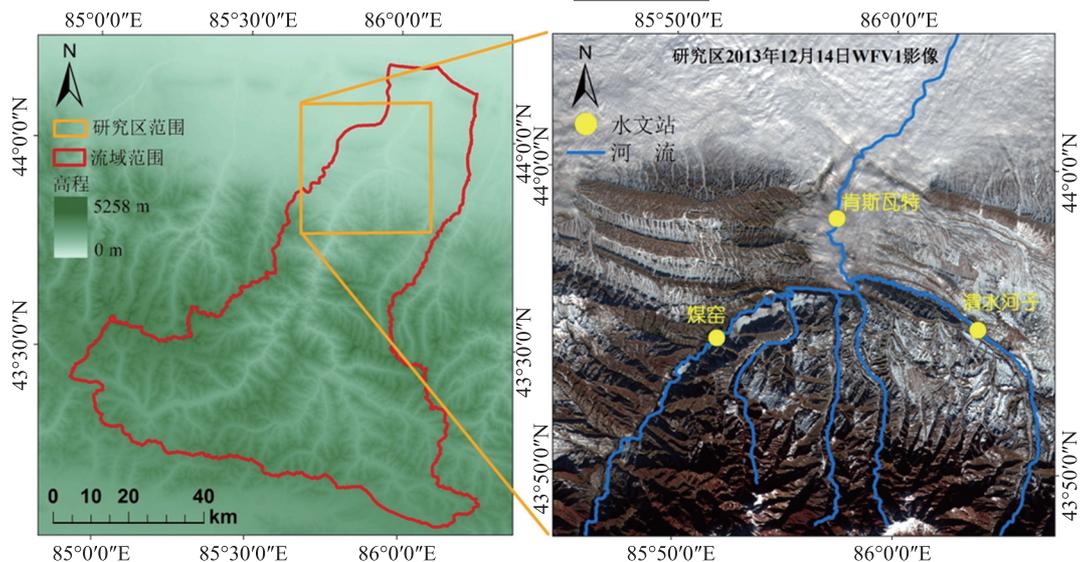


图 2 研究区范围示意图

Fig. 2 Range of the study area

1 研究区与数据

1.1 研究区概况 本文选取新疆玛纳斯河流域的典型区作为研究区域,如图 2 所示.图 2 左图显示了典型区域在玛纳斯河流域中的具体位置,右图为研究区 2013 年 12 月 14 日 GF-1 WFV1 数据(由 321 波段 RGB 合成),地理范围为 $43^{\circ}45' \sim 44^{\circ}10' N, 85^{\circ}40' \sim 86^{\circ}20' E$,面积约为 980 km^2 ,高程范围为 $518 \sim 3120 \text{ m}$.成像当日研究区北部云覆盖情况严重,约占研究区面积的 32%.

玛纳斯河流域积雪覆盖的季节差异明显,冬季积雪广泛覆盖在河源高山地区和中低山地区,夏季只有少部分高山区域被积雪覆盖.流域内海拔 3600 m 以上山区大部分面积为冰川及永久性积雪覆盖,平均雪线为 3970 m ,区内其余土地覆盖类型为草地、裸土以及林地.

1.2 数据资料 本文所采用的遥感数据为 GF1 WFV1 宽幅相机多光谱数据,分辨率为 16 m ,成像日期为 2013 年 12 月 14 日,成像时刻为北京时间 13:16,太阳天顶角为 67.49° .表 1 为 GF-1 WFV1 传感器的主要载荷参数及绝对辐射定标系数(资料来自: <http://www.cresda.com>).此外分别采用第二版 ASTER

GDEM 数据(空间分辨率为 30 m)作为大气校正和地形校正的辅助数据(数据来自:<http://earthexplorer.usgs.gov/>),地面准同步观测的积雪光谱数据作为验证数据.地面实测数据的测量日期为 2013 年 12 月 12 日与 13 日(研究区 12 日晚至 13 日中午存在降雪过程),与成像日期仅相差 1~2 日,有效测点为 15 个,共获得有效光谱曲线 800 条,同时为了尽可能与卫星成像时刻的太阳天顶角对应,测量时间多选择在当地时间 11:30—13:30,此时太阳天顶角介

于 $64.60^{\circ} \sim 68.50^{\circ}$. 所用的光谱测量仪器为 ASD HandHeld2 手持式地物光谱仪,所测量的积雪类型包括表面光滑的老雪和表面粗糙的老雪,测点均位于非阴影区域的平坦样地,观测时探头保持铅直方向与雪面垂直,入射角度为观测时刻的太阳天顶角.图 3 为实测积雪光谱数据的样点(底图采用 2013 年 12 月 14 日研究区影像,由 321 波段 RGB 合成)及测量结果(表面光滑老雪和表面粗糙老雪的测量结果分别由 550 条和 250 条光谱曲线平均得到).

表 1 GF-1 WFV1 传感器主要载荷参数及绝对辐射定标系数

Table 1 Parameters and Absolute radiation calibration coefficient on GF-1 WFV1 sensor

载荷	波段	分辨率(m)	光谱范围(μm)	Gain	Bias
WFV1	1	16 m	0.45~0.52	0.1709	-0.0039
	2		0.52~0.59	0.1398	-0.0047
	3		0.63~0.69	0.1195	-0.0030
	4		0.77~0.89	0.1338	0.0274

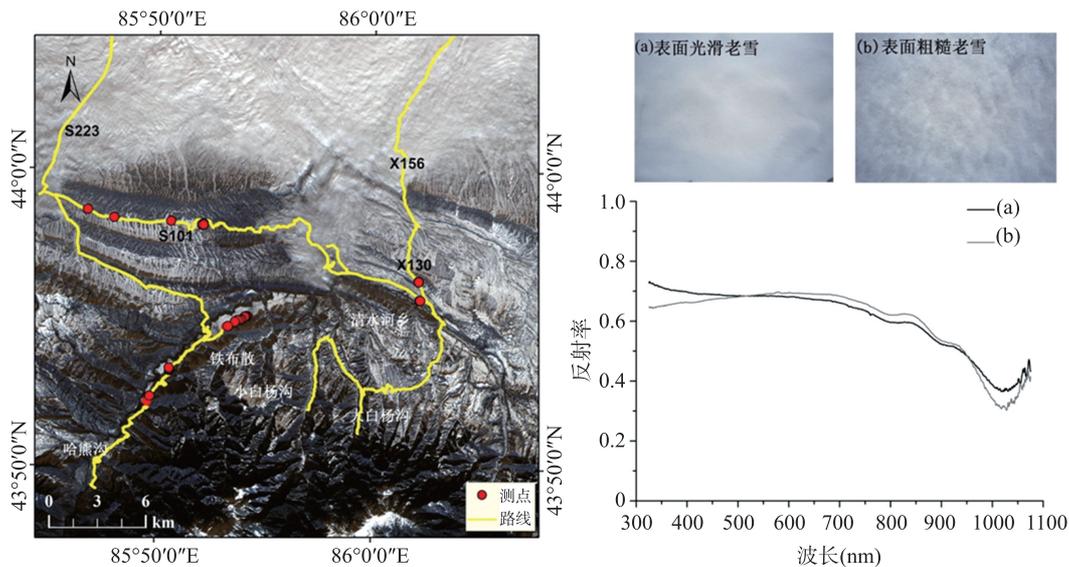


图 3 研究区光谱测点分布及两种不同类型积雪的光谱测量结果

Fig. 3 Spectral measurement points in study area and the snow reflectance of two different types

1.3 数据预处理 数据预处理主要包括图像数据的辐射定标及大气校正两部分.利用绝对辐射定标系数将传感器所记录的 DN 值转换成大气层顶的辐亮度值.

采用 6S 模型对研究区进行大气校正,得到地

表反射率.6S 模型可以对 $0.25 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 范围内太阳反射波段的大气辐射传输进行模拟计算,采用最新近似和逐次散射的算法计算散射核吸收,考虑了水汽、二氧化碳、臭氧、氧气的吸收,分子和气溶胶散射以及非均一地面和地表非朗伯特特性^[32].

2 模型与方法

2.1 雪面 BRDF 特征提取

2.1.1 雪面方向反射数据集的获取 首先利用基于最大似然法的监督分类方法将研究区分为积雪与非积雪两类土地覆盖类型,并保证分类后的积雪像元为纯雪像元;然后利用重采样至 16 m 的 DEM 数据提取各积雪像元对应的坡度、坡向数据,并由式(1)计算各像元的坡面太阳入射角 i_s 和坡面传感器观测角 i_v [16];最后将这两个参数结合雪面方向反射率,构建雪面方向反射数据集.

$\cos i_s = \cos \theta_s \cos S + \sin \theta_s \sin S \cos(\varphi_s - A)$ (1)
式中, i_s 为坡面太阳入射角, θ_s 为太阳天顶角, φ_s 为太阳方位角, S 为坡度, A 为坡向.

2.1.2 BRDF 模型系数的拟合 本研究采用基于 Ross-Thick 核 [33] 及 Li-Sparse 核 [34] 的线性核驱动 BRDF 模型 [33] 对雪面方向反射进行拟合,基本表达式如下:

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = K_0 + K_1 f_{\text{Ross-Thick}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + K_2 f_{\text{Li-Sparse}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (2)$$

式中, θ_s 和 θ_v 分别为太阳天顶角和传感器观测天顶角 ($0^\circ \sim 90^\circ$); φ 为太阳和传感器之间的相对方位角 ($0^\circ \sim 180^\circ$); $R(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 为地表方向反

射; K_0, K_1, K_2 为三个常系数,其中 K_0 代表当 $\theta_s = \theta_v = 0$ 时的方向反射, K_1, K_2 分别代表几何光学散射、体散射所占的比例; $f_{\text{Ross-Thick}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 和 $f_{\text{Li-Sparse}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 分别为:

$$f_{\text{Ross-Thick}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} - \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

式中, ξ 为相位角, $\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi$.

$$f_{\text{Li-Sparse}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = O(\theta_s, \theta_v, \varphi) - \sec \theta_s - \sec \theta_v + \frac{1}{2}(1 + \cos \xi) \sec \theta_v \quad (4)$$

式中,

$$O(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_s + \sec \theta_v)$$

$$\cos t = \frac{\sqrt{D^2 + (\tan \theta_s \tan \theta_v \sin \varphi)^2}}{\sec \theta_s + \sec \theta_v}$$

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos \varphi}$$

表 2 为利用 Ross-Li 模型对雪面方向反射数据集进行拟合所得到的模型各波段系数.拟合采用多元线性回归,结果用均方根误差 RMSE 进行评价.从表 2 中可以看出,由 Ross-Li 模型模拟的雪面方向反射率的均方根误差 RMSE 较小,说明拟合效果良好.

表 2 Ross-Li 模型各波段系数

Table 2 Coefficients of each band by Ross-Li model

模型系数	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
k_0	0.5010	0.4560	0.4270	0.3390
k_1	0.0870	0.0980	0.0850	0.0990
k_2	-0.0096	-0.0097	-0.0083	-0.0067
RMSE	0.0440	0.0430	0.0370	0.0120

2.2 平坦地表雪面反射率的计算 将各坡面像元的方向反射 $R(i_s, i_v, \varphi)$ 归一化至平坦地表面上的方向反射 $R(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 是消除各向异性特性对雪面反射率计算影响的主要步骤,其中 i_s, i_v 分别为太阳相对坡面的入射角及传感器相对坡面的观测角.这一过程需要引入各向异性因子 Ω ,被定义为方向反射 $R(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 与卫星观测方向为垂直方向 ($\theta_v = 0$) 以及太阳入射为垂直

方向 ($\theta_s = 0$) 时的方向反射 $R(0, 0, \varphi)$ 的归一化比值 [35-36]:

$$\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{R(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{R(0, 0, \varphi)} = 1 + \frac{K_1}{K_0} f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{K_2}{K_0} f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (5)$$

图 4 为根据拟合得的 Ross-Li 模型各波段系数所模拟的当太阳天顶角为 66° (卫星成像

时刻的太阳天顶角), 卫星观测天顶角从 0° 到 80° , 太阳与卫星的相对方位角从 0° 到 360° 时,

GF-1 WFV1 各波段雪面各向异性反射因子在半球空间中的分布情况.

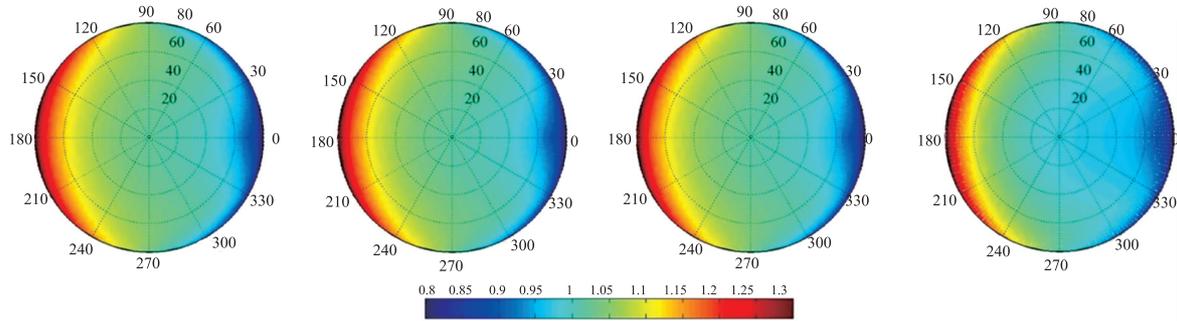


图 4 雪面各向异性反射因子(从左至右分别为波段 1~4. 极角表示相对方位角, 半径表示观测天顶角)

Fig. 4 Anisotropic factor of snow (Left subset to right subset are band1 to band4 respectively. Polar Angle and radius represent the relative azimuth angle and the satellite viewing zenith angles respectively)

根据式 (5), 利用已知的坡面方向反射 $R(i_s, i_v, \varphi)$ 便可推算平坦地表上的地表方向反射 $R(\theta_s, \theta_v, \varphi)$:

$$R(i_s, i_v, \varphi) = \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} R(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (6)$$

而在地形变化较大的山区, 同一类地物由于海拔、坡度、坡向以及周围地形相互遮蔽的影响也会形成不同的坡面方向反射, 坡面像元所接受的辐射能量也会有所不同. 因此, 在雪面反射率估算的研究中, 除考虑各向异性特性的影响外, 还应当考虑地形的影响, 通过基于山地辐射传输模型的地形校正获取无地形影响下的方向反射.

坡面像元实际所接收的总辐照度 E_{all} 可以分为三部分: 太阳直接辐照度 E_d ; 天空散射辐照度 E_f ; 周围地物的反射辐照度 E_a [37]. 具体计算公式可表示:

$$E_{all} = E_d + E_f + E_a \quad (7)$$

天空散射辐照度的计算分为各项同性部分和各向异性部分, 其中各向同性部分 $E_{isotropic}$ 采用 Sandmeier 的计算方法 [10], 各向异性部分 $E_{anisotropic}$ 采用 Pezer 模型进行计算 [38]. 周围地形的反射辐照度采用 Dozier 提出的近似计算方法 [16].

此外, 考虑到雪面对太阳直接辐照度的反射为方向一方向反射 $\rho_{DD}(i_s, i_v, \varphi)$, 对天空散射辐照度的反射及周围地形辐照度的反射为半球一方向反射 $\rho_{HD}(i_s, i_v, \varphi)$, 假设当时的大气光学厚

度为 τ , 则传感器所接收的入瞳总辐射 L 可以表示为大气程辐射 L_p 与雪面反射辐射之和:

$$L = L_p + \frac{1}{\pi} [E_d \rho_{DD} e^{-\tau/\cos(\theta_v)} + \rho_{HD} e^{-\tau/\cos(\theta_v)} (E_f + E_a)] \quad (8)$$

本文采用 6S 模型估算模型中所需要的参数, 包括水平面接收的太阳直接辐照度 E_d^h 、水平面接收的天空散射辐照度 E_f^h 、大气程辐射 L_p 、及大气上/下行总透射率 $e^{-\tau/\cos\theta_v}$, $e^{-\tau/\cos\theta_s}$.

在太阳和传感器的相对方位角不变的情况下, 将坡面反射太阳直接辐照度的方向一方向反射 $\rho_{DD}(i_s, i_v, \varphi)$ 和反射天空散射辐照度及周围地形的反射辐照度的半球一方向反射 $\rho_{HD}(i_s, i_v, \varphi)$ 归一化至平坦地表的方向一方向反射 $\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 为雪面反射率计算的最终目的. 坡面的半球一方向反射可以表示为方向一方向反射的入射角半球积分:

$$\rho_{HD}(i_s, i_v, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \int_{\pi/2} \rho_{DD}(i_s, i_v, \varphi) d\Omega_{i_s} \quad (9)$$

式中, Ω_{i_s} 是入射方向上投影的立体角, 表示为:

$$\Omega_{i_s} = \int_{2\pi} \int_{\pi/2} \cos i_s \sin i_s di_s d\varphi_s$$

将式 (6) 代入式 (9), 可得

$$\rho_{HD}(i_s, i_v, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \int_{\pi/2} \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} \rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi) d\Omega_{i_s} \quad (10)$$

将式 (6)、式 (10) 代入式 (8), 整理之后平坦地表的雪面方向反射可以表示为:

$$\rho_H(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi(L - L_p)e^{\tau/\cos\theta_v}}{(E_d + E_{\text{anisotropic}}) \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} + \frac{E_{\text{isotropic}} + E_a}{\pi\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} \int_{2\pi} \int_{\pi/2} \Omega(i_s, i_v, \varphi) d\Omega_i} \quad (11)$$

3 结果与分析

3.1 目视对比分析 利用 6S 模型分高程带估算的大气参数, 结合式(11)便可计算得到平坦地表的雪面反射率. 此外为了能够准确地评价本模型对雪面反射率的计算精度, 利用基于朗伯体假设的地形校正方法与本文方法进行对比, 各校正方法的校正结果如图 5 所示, 其中上图和下图分别显示了整个研究区域的校正结果及局部区域的校正结果. 图 5a 为仅进行大气校正后的雪面反射率, 可以看到地形影响并未消除, 雪面反射率在非阴影区与阴影区的差异仍然较大, 同时高海拔地区存在地物过亮的现象; 图 5b 是利用基于朗伯体假设的地形校正模型计算的雪面反射率, 此方法有效消除了地形的影响, 图像表现出平坦地表的特点. 阴坡的图像细节变得明显, 可以清楚地识别阴影区的积雪

与裸地; 图 5c 是由基于地表各向异性特性的地形校正模型计算的雪面反射率, 整体呈现出以平坦地表为特征的遥感图像, 非阴影区积雪与阴影区积雪的反射率更加趋于一致, 图像变得更为均一, 阴影区的图像的细节也更加明显.

经地形校正之后, 遥感影像在山脊与山谷处存在过度校正或校正不足的现象, 导致地表反射率高估或低估. 造成这种现象的主要原因有: (1) 利用 DEM 数据提取本影与落影的范围时, 与遥感影像存在 1 个像元左右的偏差, 这些偏差会导致计算的太阳直接辐射与天空散射辐射出现误差, 从而导致计算的地表反射率过高或过低; (2) DEM 数据的空间分辨率较低, 经此数据计算的辐射值与真实值在地形变化较大的区域存在较大误差, 从而导致计算的地表反射率出现异常, 同时 DEM 与影像之间的配准误差也会影响辐射值的计算精度. 为保证地形

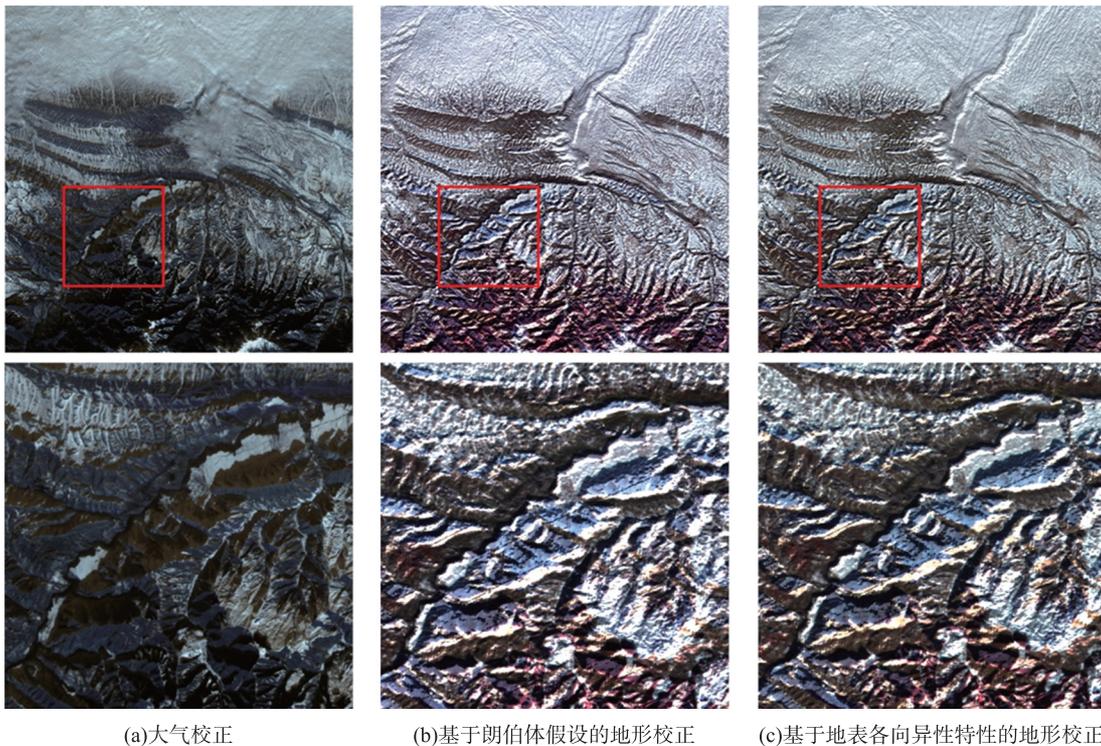


图 5 不同校正方法后的影像对比(321 波段 RGB 合成)

Fig. 5 The comparison of images by the different correction methods(RGB combined with 321 band)

校正的精度,不少学者认为 DEM 的空间分辨率应远高于遥感影像的分辨率,最好为影像的 4 倍^[39]; (3) 由于缺少遥感影像成像时的大气数据,在进行大气校正时只能根据影像成像日期选择 6S 提供的标准大气模式,导致计算的像元总辐照度与传感器端接收的辐照度不同,从而导致计算的反射率存在误差。

3.2 地形效应消除分析 由于地形效应的存在,仅进行大气校正后的地表反射率会随着坡面太阳入射角余弦($\cos i_s$)的变化而改变,趋势是随着 $\cos i_s$ 的增大而增大。基于此种思想,当地形效应消除后,像元反射率将不再随着 $\cos i_s$ 的变化而发生较大改变。因此为评价大气校正和地形校正对雪面反射率的计算精度,本文选

取 1000 个积雪像元,采用线性回归的方法对 $\cos i_s$ 和积雪像元反射率之间的关系进行统计,将线性回归方程的斜率作为评价指标,斜率的绝对值越大,地形效应的影响程度越大,斜率的绝对值越小,则地形效应的影响程度越小。

分析表 3 可以发现,若不考虑地形的影响,仅进行大气校正,则坡面像元反射率受 $\cos i_s$ 的影响较大;考虑地形影响之后,反射率受 $\cos i_s$ 的影响程度在各波段均大幅度降低;而当采用基于地表各向异性的地形校正后,积雪反射率受 $\cos i_s$ 的影响程度进一步减小,同时相比于基于地表朗伯体特性的地形校正方法,反射率的过校正现象得到了一定地改善。

表 3 三种校正方法下像元反射率与 $\cos i_s$ 的线性关系斜率(S)对比

Table 3 The correlation coefficient of pixel reflectance and $\cos i_s$ by three correction methods

波段	仅大气校正	朗伯体假设的地形校正	地表各向异性的地形校正
波段 1	0.324	-0.050	-0.012
波段 2	0.358	-0.010	-0.010
波段 3	0.365	-0.012	-0.008
波段 4	0.395	-0.063	0.010

3.3 实测光谱对比分析 为了进一步验证本文方法对雪面反射率的计算精度,采用地面实测的两类积雪平均反射率数据与三种方法校正后的雪面反射率数据进行对比。其中,用做对比的校正后雪面反射率数据为在研究区内选取的 1000 个非阴影区积雪像元与 1000 个阴影区积雪像元的各波段平均反射率。由于校正后的雪面反射率与实测数据的观测角度有所不同,因此在进行对比前首先需要根据雪面各向异性因

子将卫星观测方向的雪面反射率转换至垂直观测方向。同时由于地面实测的反射率数据为光谱分辨率小于 3.0 nm 的连续曲线,与 GF-1 WFV1 的波段反射率无法直接比较,因此还需利用 GF-1 WFV1 的波段响应函数(数据来自: <http://www.cresda.com>)对实测数据进行转换,计算在 GF-1 WFV1 对应波段上的反射率。图 6 即为 GF-1 WFV1 数据经过三种方法校正之后雪面反射率与实测反射率数据的对比。

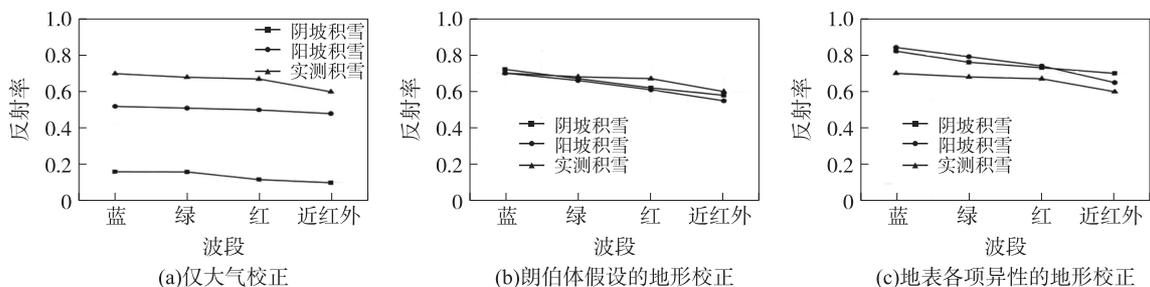


图 6 基于三种方法校正后的雪面反射率与实测积雪对比

Fig. 6 The comparison between snow reflectance calculated by three methods and field measured data

由图 6a 可以看出,当仅进行大气校正后,非阴影区积雪与阴影区积雪的反射率差异仍然较大,非阴影区反射率与实测相比差异较小,表明大气校正仅对非阴影区像元的反射率计算起作用,而对阴影区像元的反射率计算作用较小;图 6b 为经过基于地表朗伯体假设的地形校正后的雪面反射率与实测数据的对比,可以看出校正后非阴影区和阴影区的雪面反射率高于实测数据,表明采用基于地表朗伯体校正的地形校正方法会出现过校正现象;图 6c 为采用本文方法计算的雪面反射率与实测数据对比,可以看出相比朗伯体假设的反射率计算结果,此方法校正后的非阴影区雪面反射率、阴影区雪面反射率与实测数据趋于一致,非阴影区积雪的过校正现象得到了一定程度的解决. 与其余两种校正方法相比,计算结果也更加准确可信.

计算的雪面反射率与实测数据对比仍然存在误差,误差主要来源于:(1)地表接收的总辐射计算值的误差;(2)雪面各向异性因子计算的误差. 地表接收的总辐射计算值的误差上文已经讨论,此处不再重复. 造成雪面各向异性因子计算误差的主要原因是:根据仅大气校正后的雪面反射率数据拟合的 Ross-Li 模型参数与实际存在差异,同时较低分辨率的 DEM 也会导致模拟的雪面各向异性因子与实际相比存在误差.

4 结 论

本文以新疆玛纳斯河流域典型区的 GF-1 多光谱图像作为研究数据,采用基于地表各向异性的山地辐射传输模型计算雪面反射率,并消除地形及大气的影响. 与朗伯体假设的地形校正模型相比,本文方法在以下几个方面进行了改进:

(1)引入地表各向异性校正,结合山地辐射传输模型,将不同坡面太阳入射角及坡面传感器观测角的雪面反射率转换为平坦地表卫星观测方向的雪面反射率,并结合 6S 大气校正模型,以消除地形及大气的影响;

(2)利用 Ross-Li 模型模拟雪面的方向反射特性,引入雪面方向反射因子,同时在雪面方向反射率的计算中区别对待雪面对太阳直接辐射的反射及雪面对天空漫散射和周围地形反射辐射的反射.

通过对校正结果的目视对比分析、地形效应消除分析以及光谱统计分析,可以发现相比于仅进行大气校正及基于朗伯体假设的地形校正方法,此方法所计算雪面反射率在阴坡和阳坡趋于一致,并与实测数据相比也最为一致;同时该方法有效消除了地形及大气的影响,阴影区的地物也更加利于识别. 但由于 DEM 的空间分辨率较低,计算的雪面各向异性因子存在误差等原因导致经此模型计算的雪面反射率与实测数据仍然存在差异. 在后续研究中若采用高精度的 DEM 数据以及准确的地面实测雪面方向反射率数据,将会进一步提高山区遥感影像地表反射率计算的精度.

参考文献

- [1] Nolin A, Stroeve J. The changing albedo of the Greenland ice sheet: Implications for climate change. *Annals of Glaciology*, 1997, 25: 51-57.
- [2] Knap W H, Oerlemans J. The surface albedo of the Greenland ice sheet: satellite-derived and in situ measurements in the SondreStromfjord area during the 1991 melt season. *Journal of Glaciology*, 1996, 42: 364-374.
- [3] Stoeve J, Nolin A, Steffen K. Comparison of AVHRR-derived and in situ surface albedo over the greenland ice sheet. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 262-276.
- [4] Wanner W, Strahler A H, Hu B, *et al.* Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and Algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(14): 17143-17161.
- [5] Cabot F, Dedieu G. Surface albedo from space: Coupling bidirectional models and remotely sensed measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(16): 19645-19663.

- [6] Vermote E F, Saleous N EI, Justice C O, *et al.*. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (14): 17131 — 17171.
- [7] Vermote E F, Saleous N Z E, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83 (1 — 2): 97 — 111.
- [8] Gilbert M A, Conese C, Maselli F. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (10): 2065 — 2086.
- [9] Burgess S R, Pairman D. Bidirectional reflectance effects in NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2815 — 2825.
- [10] Sandmeier S, Itten K I. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 708 — 717.
- [11] Richter R. Correction of satellite imagery over mountainous terrain. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 4004 — 4015.
- [12] 闫广建, 朱重光, 郭军等. 基于模型的山地遥感影像辐射订正方法. *中国图形图像学报*, 2000, 5(1): 11 — 15.
- [13] 段四波, 闫广建. 山区遥感图像地形校正模型研究综述. *北京师范大学学报(自然科学报)*, 2007, 43(3): 362 — 366.
- [14] 汪凌霄. 玛纳斯河流域山区积雪遥感识别研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2012.
- [15] Shepherd J D, Dymond J R. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(17): 3503 — 3514.
- [16] Dozier J, Outcalt S I. An approach to energy balance simulation over rugged terrain. *Geographic Analysis*, 1979, 11(1): 65 — 85.
- [17] Chen Y, Hall A, Liou K N. Application of three-dimensional solar radiative transfer to mountains. *Journal of Geographic Research*, 2006, 111: D21111.
- [18] 闻建光, 柳钦火, 肖青等. 复杂山区光学遥感反射率计算模型. *中国科学 D: 地球科学*, 2008, 38(11): 1419 — 1427.
- [19] Nicodemus F, Richmond J, Hsia J, *et al.*. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. US Department of Commerce, Washington D C, 1977.
- [20] 曹梅盛, 李新, 陈贤章等. 冰冻圈遥感. 北京: 科学出版社, 2006, 71.
- [21] Lindsay R W, Rothrock D A. Arctic Sea Ice Albedo from AVHRR. *Journal of Climate*, 1994, 7: 1737 — 1749.
- [22] Knap W H, Brock B W, Oerlemans J, *et al.*. Comparison of Landsat TM derived and ground-based albedo of Haut Glacier d' Arolla, Switzerland. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(17): 3293 — 3310.
- [23] Knap W H, Reijmer C H. Anisotropy of the reflected radiation field over melting glacier ice: Measurements in Landsat TM bands 2 and 4. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65 (1): 93 — 104.
- [24] Greuell W, Martijn de Ruyter de Wildt. Anisotropic reflection by melting glacier ice: Measurements and parameterizations in Landsat TM bands 2 and 4. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(3): 265 — 277.
- [25] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H *et al.* First operation BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1 — 2): 135 — 148.
- [26] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semi-empirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38 (2): 977 — 998.
- [27] Privette J L, Emery W J, Schimel D S. Inversion of a vegetation reflectance model with NOAA AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(2): 187 — 200.

- [28] Stroeve J, Box J E, Gao F, *et al.* Accuracy assessment of the MODIS 16-day albedo product for snow: comparisons with Greenland in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 46–60.
- [29] Beisl U. Correction of bidirectional effects in imaging spectrometer data. *Remote Sensing Series 37*, Department of Geography, University of Zurich, 2001, 24–38.
- [30] 李先华, 杨肖琪, 章皖秋等. GIS 支持下地物 BRDF 卫星遥感研究. *科学技术与工程*, 2002, 2(3): 63–34.
- [31] 张玉环, 仲波, 杨锋杰等. TM/ETM 和 DEM 数据的 BRDF 特征提取. *遥感学报*, 2012, 16(2): 361–377.
- [32] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675–686.
- [33] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A Bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D18): 20455–20468.
- [34] Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 077–089.
- [35] Gutman G. Normalization of multi-annual global AVHRR reflectance data over land surfaces to common sun-target-sensor geometry. *Advances in Space Research*, 1994, 14(1): 121–124.
- [36] Wu A, Li Z, Cihlar J. Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometer bidirectional reflectances: Analysis and removal. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(5): 9179–9192.
- [37] Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30: 21–32.
- [38] Perez R, Stewart R, Arbogast C, *et al.* An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces, description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy*. 1986, 36: 481–497.
- [39] Reeder D H. Topographic correction of satellite images theory and application. New Hampshire: Dart-mouth College, 2002.