

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.012>



# 面向高空间分辨率遥感影像的山区地形校正方法

柳 潇<sup>1</sup>, 吕新彪<sup>1,2,3\*</sup>, 吴春明<sup>1</sup>, 刘 洪<sup>4</sup>, 黄瀚霄<sup>4</sup>,  
李 俊<sup>4</sup>, 李敏敏<sup>5</sup>, 毛 晨<sup>2</sup>, 周文孝<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081
5. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

**摘要:** 山区地形复杂, 遥感影像地形效应明显, 易造成“同物异谱”、“同谱异物”现象, 增大了遥感地质填图的难度。但前人对适用于复杂地形条件下地质填图的地形校正模型讨论较少, 特别是校正高空间分辨率遥感影像时多缺少对应高精度数字高程模型, 校正结果易受地形异常影响。在Richter“山区”校正模型基础上引入地形抹平模型, 提出“Smoothed山区”校正方法, 并与另14种地形校正模型在GF-1、GF-2、SPOT6山区影像上进行对比实验。结果显示, “Smoothed山区”校正模型在山区高空间分辨率遥感影像的校正效果明显优于其他模型, 校正结果地形效应减弱, 影像信息丰富不失真, 并且直接获取地表反射率数据, 可为进一步的遥感蚀变提取等工作提供基础数据。该模型适用于复杂地形山区的遥感地质填图。

**关键词:** 地形校正; 山地; 遥感地质填图; 高空间分辨率; 遥感; 地形抹平。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2020)02-645-18

收稿日期: 2019-06-22

## Topographic Correction Method for High Spatial Resolution Remote Sensing Data in Mountainous Area

Liu Xiao<sup>1</sup>, Lv Xinbiao<sup>1,2,3\*</sup>, Wu Chunming<sup>1</sup>, Liu Hong<sup>4</sup>, Huang Hanxiao<sup>4</sup>,  
Li Jun<sup>4</sup>, Li Minmin<sup>5</sup>, Mao Chen<sup>2</sup>, Zhou Wenxiao<sup>1</sup>

1. Geological Survey Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China
5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

**Abstract:** With complex terrain and steep slopes, sharp orographic effect occurs in mountainous areas which obviously increases the difficulty of remote sensing geological mapping by the phenomenon of "different bodies with same spectrums" or "same body with different spectrums". Although several Topographic correction (TOC) methods have been proposed and applied to vegetation-covered area and snowfield successfully in the last decades, there is little discussion on topographic correction models for geological mapping under complex topographic conditions, which have totally different application environment since the

**基金项目:** 中国地质调查局地质大调查项目(No.12120114018001);国家重点研发计划项目(No. SQ2018YFC060162);中国地质调查项目(No. DD20190540).  
**作者简介:** 柳潇(1988—),男,在读博士研究生,主要从事成矿规律与成矿预测研究. ORCID:0000-0003-0731-0389. E-mail: 754192781@qq.com

\***通讯作者:** 吕新彪,ORCID:0000-0003-0588-7934. E-mail:Lvxb\_01@163.com

**引用格式:** 柳潇, 吕新彪, 吴春明, 等, 2020. 面向高空间分辨率遥感影像的山区地形校正方法. 地球科学, 45(2):645—662.

uncovered geological bodies of mountainous areas have bigger spatial variability. Especially in the correction of high spatial resolution remote sensing images, the corresponding high-precision Digital Elevation Model (DEM) is often absent, and the correction results are vulnerable to topographic anomalies. This paper proposes a "Smoothed Mountains" correction method, which combines Richter "Mountains" correction model with terrain smoothing model. GF-1, GF-2 and SPOT6 mountain images obtained by this model have been compared with those by other 14 terrain correction models. The results show that the stability and correction effect of the "Smoothed Mountains" correction model are obviously better than other models. The correction images show that the terrain effect is weakened, and the image information is rich and undistorted. Moreover, the surface reflectance data can be obtained directly, which provides basic data for further remote sensing alteration extraction. Therefore, the "Smoothed Mountains" model could be a practical and feasible TOC model in remote sensing geological mapping over steep mountain terrain.

**Key words:** Topographic correction; mountainous terrain; Remote sensing geological mapping; high spatial resolution remote sensing; smoothed terrain

## 0 引言

区域地质调查和矿产勘查是遥感技术主要的应用领域之一,且是最成功的领域之一(浦瑞良等,2000;童庆禧等,2006).随着高分辨率遥感影像空间分辨率不断提高,地物的空间特征更加精细,这也使得地物的空间特征在地物识别中越来越占主导地位(王润生等,2011),分辨率在2.50~0.61 m的遥感影像甚至能识别宽度仅几十厘米的岩脉(何凯涛等,2009).这对于判断岩体侵入期次、圈定岩相接触带、识别矿化蚀变带等具有重要意义,进而为地质填图和矿产勘查提供辅助信息.同时,我国约69.1%国土为山区,这些山区地形起伏大、坡度陡峻,高海拔山脉地区尤甚,如昆仑山脉、祁连山脉、喜马拉雅山脉等.这类地区气候恶劣,道路不通,人员物资进出困难,开展地质和矿产调查工作难度大.但这类地区往往植被覆盖少.在这类地理环境下的地质和矿产调查中遥感地质解译发挥着重要作用,如张焜等(2016)在塔吉克斯坦东北部的帕米尔高原地区应用高分一号(GF-1)卫星数据进行遥感地质解译,Wang *et al.*(2017,2018)利用Google Earth平台测量伊犁盆地内地层走向.然而山地地形对遥感影像影响大,山阴山阳影像特征差异大,易造成“同物异谱”和“同谱异物”现象,这增加了解译工作的难度.为消除这种地形效用通常采用地形辐射校正技术,地形辐射校正即通过将视图内像元的辐射亮度转换到水平面,以消除地形起伏引起的影像辐射亮度值的变化(高永年和张万昌,2008a,2008b).目前,国内外学者已经建立了大量的地形校正模型,大体可以归纳为3大类:经验模型、半经验模型和物理模型(段四波和阎广建,2007).

第一类经验模型依据太阳入射角与卫星传感

器所接收的辐射之间的经验关系来进行地形校正,这类模型通常易于实现,但是有些校正参数没有物理意义(Blesius and Weirich, 2005; 段四波和阎广建,2007).如不需要额外辅助数据的波段比值法,但由于不同波段对地形变化的响应不同(段四波和阎广建,2007),易造成校正结果丢失大量信息;引进Minnaert BRDF(双向反射分布函数,Bidirectional Reflectance Distribution Function)统计模型的Minnaert校正模型(Minnaert, 1941; Smith *et al.*, 1980)改进了COS校正中阴坡过度校正的问题,但是当太阳入射角大于85°时,地形校正失去作用(Tokola *et al.*, 2001);基于图像辐亮度和太阳入射角余弦值之间线性关系的统计经验校正模型(Teillet *et al.*, 1982)、b校正模型(Vincini *et al.*, 2002)、变经验系数法VECA; 1989年Civco(1989)利用阴影模型提出二阶校正模型,但二阶校正模型对一些处于深大阴影中的极端像元的校正效果不佳, Law and Nichol(2004)改进了二阶校正模型校正参数 $C_{2m}$ 的求算方法; Nichol *et al.*(2006)提出了坡度匹配模型.

第二类半经验模型通过引入具有一定物理意义的线性经验校正参数来改进.这类模型既有一定的物理基础,输入参数也容易获取,应用较广.例如基于朗伯体反射的C校正模型(Teillet *et al.*, 1982).在C校正模型的基础上,国内外学者又提出众多改进模型,如引入Teillet校正算法的C—黄校正模型(黄微, 2005)、引入平滑因子的sCC3(Smoothed C)校正模型(Riano *et al.*, 2003)、加入反射角的改进C校正模型(臧熹等, 2015)和引入校正系数C以弱化SCS(Sun-Canopy-Sensor)校正模型过校正现象的SCS-C校正模型等.虽然这类模型具有很好的校正效果,但是校正参数C无法明确解释天空散射辐射和邻近地形的反射辐射两个辐射分

量,对于显著地形效应的陡峭山区,还是难于抑制阴影区域过度校正现象.

第三类物理模型建立在严格的太阳光与地表间辐射传输模型之上,模型理论基础完善,模型参数具有明确的物理意义,精度较高,但模型较为复杂,特别是需要准确估计大气相关因子.基于朗伯体反射的Cosine校正模型(Teillet *et al.*, 1982)和针对高植被覆盖区的SCS模型(Gu and Gillespie, 1998)较为简单,但都忽略了来自天空和周围地形的散射辐射的影响,造成阴影区校正后易于出现过校正现象.后续的改进模型有Cosine-C校正模型(Civco, 1989)、Cosine-B校正模型以及引入平滑因子的SCOS校正(Smoothed COS correction)模型(姜亢等, 2014).Dymond-shepherd校正模型(Dymond *et al.*, 1999)则因其4个假设基础在植被覆盖区可见光波段的地形校正中效果较好.Gamma校正(Richter *et al.*, 2009)则引入了斜面像元出射角参与校正.其他物理模型则将地表总入射太阳辐照度E分解为太阳直射辐射 $E_d$ 、天空散射辐射 $E_f$ 和邻近地形的反射辐射 $E_a$ 3个分量,包括有Proy校正模型(Proy *et al.*, 1989)和Sandmeier-Itten校正模型(Sandmeier and Itten, 1997).在此基础上,国内外学者提出了“山区”校正模型(Richter *et al.*, 1998)、ATCOR4(Richter and Schläpfer, 2002)、“基于DEM山区”模型(段四波等, 2007)、3因子+K模型(高永年和张万昌, 2008b)、3因子+C模型(Zhang and Gao, 2011)、半经验地形纠正模型SCEDIL(Simple topographic Correction using Estimation of Diffuse Light)、基于不同遮蔽因子模型的“山区阴影区提取”校正模型(宋丽瑶等, 2017)等.段四波等(2007)基于地表反射是各向异性的假定,提出了结合6S大气校正模型和DEM改进了地形校正的算法;闻建光等(2007)结合山地辐射传输模型和二向性反射分布函数,提出了基于方向反射的光学遥感地表反射率计算模型;在此基础上改进模型应用有:改用Ross-Thick核和Li-Sparse核代替Walhall模型,应用于新疆玛纳斯河流域的GF-1宽幅相机数据的地形校正(蒋璐媛等, 2015);利用MODIS BRDF对Landsat5 TM进行地形校正(Li *et al.*, 2015).另有一些学者也提出了半物理校正模型,如用于校正植被冠层ERDF异常的PLC(path length correction)校正模型.

虽然地形校正模型众多,但是前人校正对象多

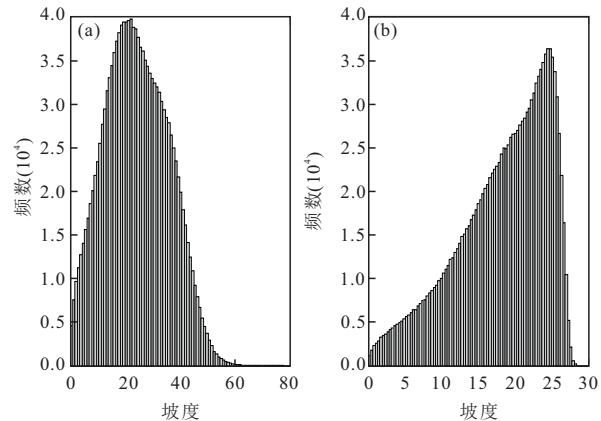


图1 实验区1坡度直方图(a)与地形抹平后坡度直方图(b)

Fig.1 Histogram of study surface slope (a) and histogram of surface slope by smoothed terrain in study area 1 (b)

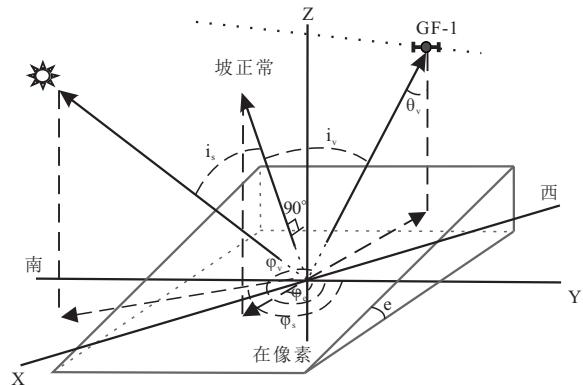


图2 卫星观测图像像元的观测几何图

Fig.2 Observational geometry in a pixel for satellite image

是植被覆盖区、雪地或沙漠等单一类地物,对于不同地质体间光谱特征、校正参数差异大的多类地物混杂的地质裸露区的地形校正讨论较少.同时在地质填图完成前、地质体界限未确定的情况下,也无法对各地质体进行单独地形校正.另外在高空间分辨率遥感数据校正中,对应的高精度数字高程模型DEM也难以获取,校正结果易受地形异常影响.因此,找出适用于复杂山地地区遥感地质调查的地形校正模型具有重要意义.本文在基于朗伯体假设的Richter“山区”校正模型的基础上引入地形抹平模型,提出“Smoothed山区”校正方法.并与另14种经验、半经验和物理地形校正模型在GF-1、高分二号(GF-2)、SPOT6山区影像上进行对比研究.目视判读和统计结果显示,“Smoothed山区”校正模型的校正结果地形效应减弱,影像信息丰富不失真,并且直接获取地表反射率数据,可为进一步的遥感蚀变提取等工作提供基础数据.“Smoothed山区”校正模

表 1 地形校正模型及其算法表达式

Table 1 algorithm Expressions of topographic correction methods

校正模型	算法公式	参考文献	校正模型	算法公式	参考文献
Teillet-回归	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda - a \cdot \cos i_s - b + \overline{L}_\lambda$	Teillet <i>et al.</i> (1982)	Cosine	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z}{\cos i_s}$	Teillet <i>et al.</i> (1982)
C	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z + C_\lambda}{\cos i_s + C_\lambda}$	Teillet <i>et al.</i> (1982)	SCOS	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z}{\cos i'_s}$	姜亢等(2014)
sCC3	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z + C_\lambda}{\cos i'_s + C_\lambda}$	Riano <i>et al.</i> (2003)	Minnaert	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \alpha}{\cos^k i_s \cdot \cos^k \alpha}$	Smith <i>et al.</i> (1980)
SCS-C	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z \cos \alpha + C_\lambda}{\cos i_s + C_\lambda}$	Scott <i>et al.</i> (2005)	Minnaert-SCS	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos^k \theta_z \cos \alpha}{\cos^k i_s}$	Vincini <i>et al.</i> (2002)
Smoothed Gamma	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \frac{\cos \theta_z + \cos \theta_v}{\cos i'_s + \cos i'_v}$	本文			
二阶段校正	1步: $L_{\text{first}} = L_\lambda + L_\lambda \left( \frac{\mu_k - X_{ij}}{\mu_k} \right)$ ; 2步: $L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda + L_\lambda \left( \frac{\mu_k - X_{ij}}{\mu_k} \right) C_{2\text{sn}}$				Civco(1989)
坡度匹配	1步: $L_{\text{first}} = L_\lambda + (L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}) \left( \frac{\mu_w - X_{ij}}{\mu_w} \right)$ ; 2步: $L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda + (L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}) \left( \frac{\mu_w - X_{ij}}{\mu_w} \right) C_{2\text{sm}}$				Nichol <i>et al.</i> (2006)
3因子+ C	$L_{\text{corr},\lambda} = L_\lambda \left\{ \frac{\cos \theta_z + \frac{1 - T(\lambda, \theta)}{2T(\lambda, \theta)} + C_\lambda}{\left( 1 + (1 - V_{\text{sky}}(x, y)) \beta_{\text{terrain}}^{(i-1)} \right) \left[ \Phi(x, y) \cos i_s + \frac{1 - T(\lambda, \theta)}{2} [\cos i_s + (1/T(\lambda, \theta) - \cos \theta_z) V_{\text{sky}}(x, y)] + C_\lambda \right]} \right\}$				Zhang and Gao (2011), 张伟阁等 (2015)
考虑地表 BRDF 校正	$\rho_{\text{corr},\lambda} = \frac{\pi \cdot [L_\lambda - L_p] / \tau_{\text{up}}}{\Phi(x, y) \frac{(E_{\text{dir}} + E_{\text{dif}} \cdot \tau_{\text{down}}) \cos i_s}{\cos \theta_s} \frac{\Omega(i_s, i_v, \varphi)}{\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)} + \frac{[E_{\text{dif}}(1 - \Phi(x, y) \tau_{\text{down}}) V_{\text{sky}}(x, y) + E_{\text{iter}}^{(i)}]}{\pi \Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \Omega(i_s, i_v, \varphi) d\Omega_{i_s}$				闻建光等(2007); 蒋璐媛等(2015)
“山区”校正	$\rho_{\text{corr},\lambda} = \frac{\pi [d^2 L_\lambda - L_{\min,\lambda}]}{\tau_{\text{up}} \left\{ \Phi(x, y) E_{\text{dir}} \cos i_s + E_{\text{dif}} [\Phi(x, y) \tau_{\text{down}} \frac{\cos i_s}{\cos \theta_s} + (1 - \Phi(x, y) \tau_{\text{down}}) V_{\text{sky}}(x, y)] + E_{\text{iter}}^{(i)} \right\}}$				Richter(1998); 宋丽瑶等(2017)

型可以满足复杂地形山区的遥感地质填图的要求。

## 1 地形校正模型

### 1.1 地形抹平

物体表面的结构或粗糙度会影响物体的反射特性,产生BRDF效应,使朗伯体假设不成立。对地面散射入射辐照和地表非朗伯特性的估计偏差都会引起辐射异常,常出现校正后阴坡的过度校正和阳坡的欠校正现象。同时在对米级及精度更高的高分辨率遥感数据进行地形校正时,对应的高精度DEM难以获取。常通过对低分辨率的DEM进行插值处理以获取高分辨率的DEM,但这类DEM存在地形异常,会影响地形辐射校正结果。并且对于遥感影像的单个像元,地表的结构或粗糙程度也会对

地表反射面的平均坡度产生影响。地形抹平处理可以消弱朗伯体假设带来的地形偏差,同时也可以削弱了DEM数据异常带来的影响(Riano *et al.*, 2003; 姜亢等, 2014)。

本文中“Smoothed 山区”校正模型及 SCOS、sCC3、Smoothed Gamma 校正模型中使用的地形抹平方程为:

$$\alpha' = f(\alpha) = \frac{e^{ka} - e^{-ka}}{k(e^{ka} + e^{-ka})}, \quad (1)$$

该模型的抹平曲线基本符合圆形微元和三角微元的抹平效果,式中:e为自然常数;α为坡度,通过DEM计算获得;α'为地形抹平后坡度;k取经验值,一般设定为2左右(姜亢等,2014)。图1显示研究区1地形抹平后大角度坡度的数量减少。

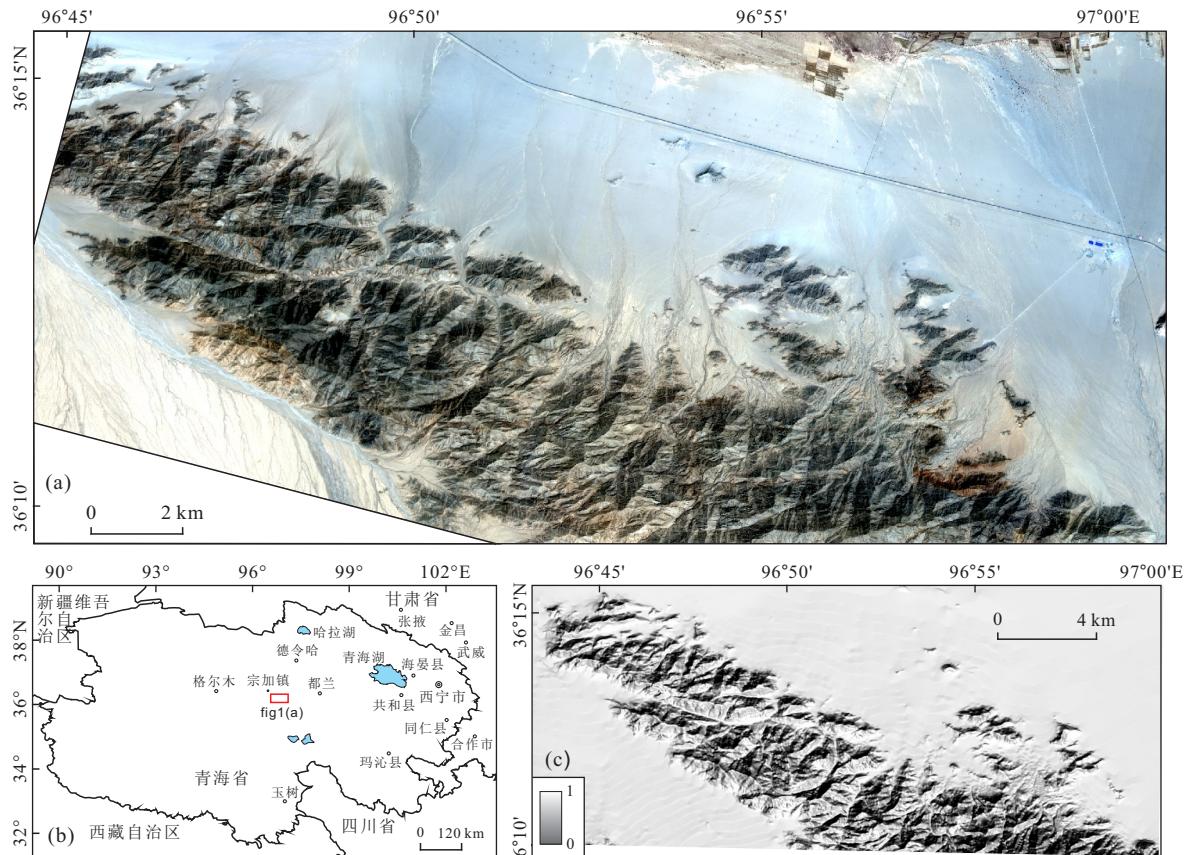


图3 地形校正前实验区1 GF-1 3(R),2(G)1(B)波段组合影像(a)、实验区1地理位置示意图(b)及地形阴影图(c)  
fig.3 Composite of GF-1 bands 3, 2 and 1in study area 1(before topographic correction) (a), Geographical location sketch map of study area (b), Topographic hill-shade map (c).

## 1.2 地形校正模型

Richter的“山区”校正模型属于物理模型。对于复杂地形山区,该模型考虑了天空散射辐射和邻近地表反射辐射的影响,同时假设地表为朗伯体、不

同高程的太阳辐射及大气为均匀。本文在此基础上引入地形抹平模型构建“Smoothed 山区”校正模型。地表反射率  $\rho_{corr, \lambda}$  公式如下:

$$\rho_{corr, \lambda} = \frac{\pi [d^2 L_\lambda - L_{min, \lambda}]}{\tau_{up} \left\{ \Phi(x, y) E_{dir} \cos i'_s + E_{dif} [\Phi(x, y) \tau_{down} \frac{\cos i'_s}{\cos \theta_z} + (1 - \Phi(x, y) \tau_{down}) V_{sky}(x, y)] + E_{iter}^{(i)} \right\}}, \quad (2)$$

式中: $d$ 为日地距离; $L_\lambda$ 为校正前像元的辐亮度; $L_{min, \lambda}$ 取自图像内有效像元区域最小值,代表图像程辐射对应辐射亮度;大气上行透过率  $\tau_{up}$ 、大气下行透过率  $\tau_{down}$ 、地面直射辐照度  $E_{dir}$ 、地面散射辐照度  $E_{dif}$  可直接由 6SV 模型(Kotchenova and Vermote, 2007)估算得来。 $i_s$ 为各像元的太阳有效入射角,计算公式为:

$$\cos i_s = \cos \theta_z \cos \alpha + \sin \theta_z \sin \alpha \cos(\varphi_s - \varphi), \quad (3)$$

当计算结果  $\cos i_s < 0$  时,令  $\cos i_s = 0$ ; $\theta_z$ 为太阳天顶角; $\varphi_s$ 为太阳方位角(图 2); $\varphi$ 为坡向;“Smoothed 山区”中  $i'_s$ 为经过地形抹平后得到的太阳有效入射角。

$\Phi(x, y)$ 为二进制阴影遮蔽因子,用以判断像元是否接收直射辐射,当  $\cos i_s > 0$  时, $\Phi(x, y) = 1$ ,否则  $\Phi(x, y) = 0$ 。 $E_{iter}^{(i)}$ 为邻近像元的多次反射辐照度,通过迭代计算公式(4)2~3次获得(丁一帆等,2018):

$$E_{iter}^{(i)} = (E_f + E_d) \frac{\rho_{terrain}^{(i-1)} \cdot [1 - V_{sky}(x, y)]}{1 - \rho_{terrain}^{(i-1)} \cdot [1 - V_{sky}(x, y)]}, \quad (4)$$

式中: $\rho_{terrain}^{(i-1)}$ 为邻近地表平均反射率,表示周边一定范围的平均反射率,属中间结果;第一次计算时的地表反射率用 FLAASH 大气校正模型(Cooley, 2002)计算获取; $V_{sky}$ 为天空开阔度,表征坡面像元观察的天空区域与在无遮挡的水平面上观察的天

空区域之比,本文选用 Oke(1987)提出几何排列来近似计算: ,

$$V_{\text{sky}}(x, y) = 1 - \sum_{i=0}^n \sin^2 \beta \cdot \left( \frac{\sigma}{360} \right), \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 方位角间距;  $\beta$ 为所在扇形体内的最大遮蔽高度角; $n=360/\sigma$ .

其他参与对比的地形校正模型及计算公式如表1所示,包括有:Teillet-回归、Cosine、SCOS、C校正、sCC3、SCS-C、Smoothed Gamma、Minnaert、Minnaert-SCS、二阶段校正、坡度匹配、“3因子+

C”、“考虑地表 BRDF”校正模型和“山区”校正模型.除了与“Smoothed 山区”共用的参数外,这些模型中的参数还包括有: $L_{\text{corr}, \lambda}$ 为校正后像元的辐亮度; $\bar{L}_{\lambda}$ 理论上为无地形起伏水平地表的辐亮度,这里用校正前图像有效像元区域中辐亮度的平均值替代; $a, b$ 为校正系数,通过线性回归式(6)拟合:

$$L_T = b + a \cdot \cos i_s, \quad (6)$$

校正因子  $C_{\lambda}$  的计算公式为

$$C_{\lambda} = a/b, \quad (7)$$

式中: $i_s$ 为校正斜面像观测角,按照式(8)计算:

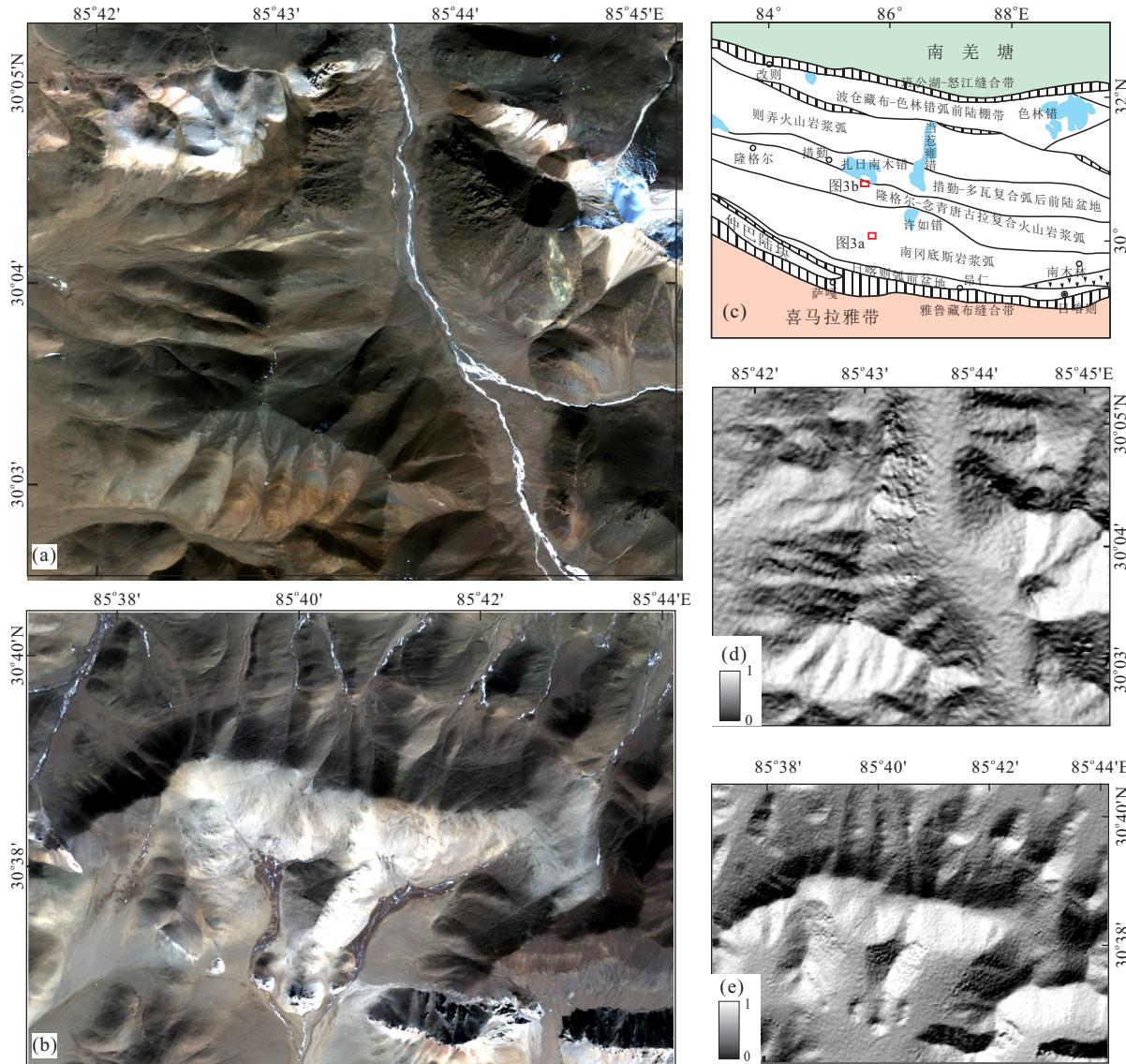


图4 地形校正前实验区2 GF-2 3(R), 2(G)1(B)波段组合影像(a)、实验区3 SPOT63(R), 2(G)1(B)波段组合影像(b)、实验区2与实验区3地理位置示意图(c)、及地形阴影图(d,e)

Fig.4 Composite of GF-2 bands 3, 2 and 1 in study area 2 (before topographic correction) (a), Composite of SPOT6 bands 3, 2 and 1 in study area 1 (before topographic correction) (b), Geographical location sketch map of study area-2 and area-3 (c), Topographic hill-shade map (d, e)

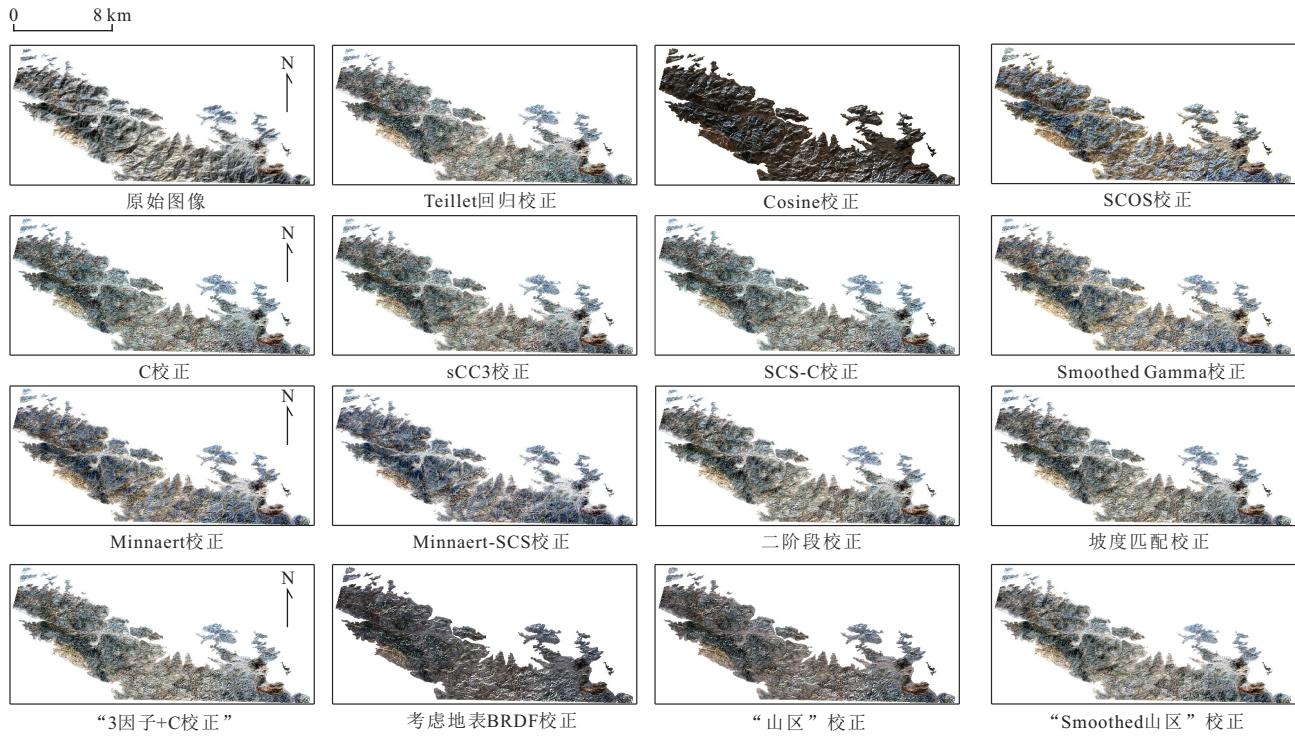


图5 实验区1地形校正前后影像对比[GF-1 3(R), 2(G), 1(B)1%线性拉伸]

Fig.5 Original and corrected images in study area 1 with different topographic correction models

$$\cos i_v = \cos \theta_v \cos \alpha + \sin \theta_v \sin \alpha \cos(\varphi - \varphi_v), \quad (8)$$

式中:  $\theta_v$  为卫星观测天顶角,  $\varphi_v$  为卫星观测方位角。Minnaert 系数  $k$  (Smith, 1980) 依赖于地表覆盖状况和波段, 通过线性回归式(9)拟合得:

$$\log(L_\lambda \cdot \cos \alpha) = \log(L_{corr,\lambda}) + k \cdot \log(\cos i_s \cdot \cos \alpha), \quad (9)$$

式中:  $L_{first}$  为校正中间结果;  $\mu_k$  为阴影模型平均值;  $\mu_w$  为阴影模型阳坡平均值;  $X$  为阴影模型中各像元像元值;  $L_{max,\lambda}$  为校正前图像有效像元区域内辐射亮度最大值;  $C_{2sn}$  为二阶校正模型的模型修正系数, 按照式(10)计算:

$$C_{2sn} = \left[ \left( \frac{\mu_\lambda - N_\lambda}{(\mu_\lambda - N_\lambda) \cdot (\mu_\lambda - N'_\lambda)} \right) + \left( \frac{\mu_\lambda - S_\lambda}{(\mu_\lambda - S_\lambda) \cdot (\mu_\lambda - S'_\lambda)} \right) \right] / 2, \quad (10)$$

式中:  $\mu_\lambda$  为原始图像平均值;  $N_\lambda$  为原始影像阴坡平均值;  $S_\lambda$  为原始图像阳坡平均值;  $N'_\lambda$  一阶校正图像阴坡平均值;  $S'_\lambda$  为一阶校正图像阳坡平均值。坡度匹配模型的修正系数  $C_{2sm}$  的求解公式为:

$$C_{2sm} = (S' - N) / (N' - N), \quad (11)$$

二阶校正模型和坡度匹配模型的阴影模型由太阳有效入射角余弦值拉伸为 [0, 255] 获得, 计算公

式为:

$$L_{shade} = 255 \times \left( \frac{\cos i_s - \cos i_{s,min}}{\cos i_{s,max} - \cos i_{s,min}} \right) + 0.5, \quad (12)$$

式中:  $\cos i_{s,max}$  为太阳有效入射角余弦值最大值;  $\cos i_{s,min}$  为太阳有效入射角余弦值最小值。“考虑地表 BRDF”校正模型在计算 BRDF 因子  $\Omega(i_s, i_v, \varphi)$  时采用 Ross-Thick 和 Li-Sparse 两个核函数组合拟合地表 BRDF。校正时剔除实验区内第四系, 用余下的地质体出露区构建拟合 BRDF 模型系数的地表反射率数据集。

### 1.3 地形校正验证方法

目视判读是地形校正效果评价的最常用方法 (Szantoi and Simonetti, 2013), 主要观测遥感影像的立体感是否降低。虽然此方法不能量化校正效果, 但由于地质出露区的遥感影像在地形校正后需要保留各地质体间影像差异, 这使得目视判读目前是最好的评价方法, 同时也决定了定量评价需要对比多个统计指标。

应用最广的定量评价地形校正效果的方法是比较太阳有效入射角余弦  $\cos i_s$  与地形校正前后辐射度的相关性。一般情况下,  $\cos i_s$  与辐射度拟合的线性回归方程斜率和相关系数的绝对值越小, 地形效应越小。另一个可定量评价地形校正效果的方法

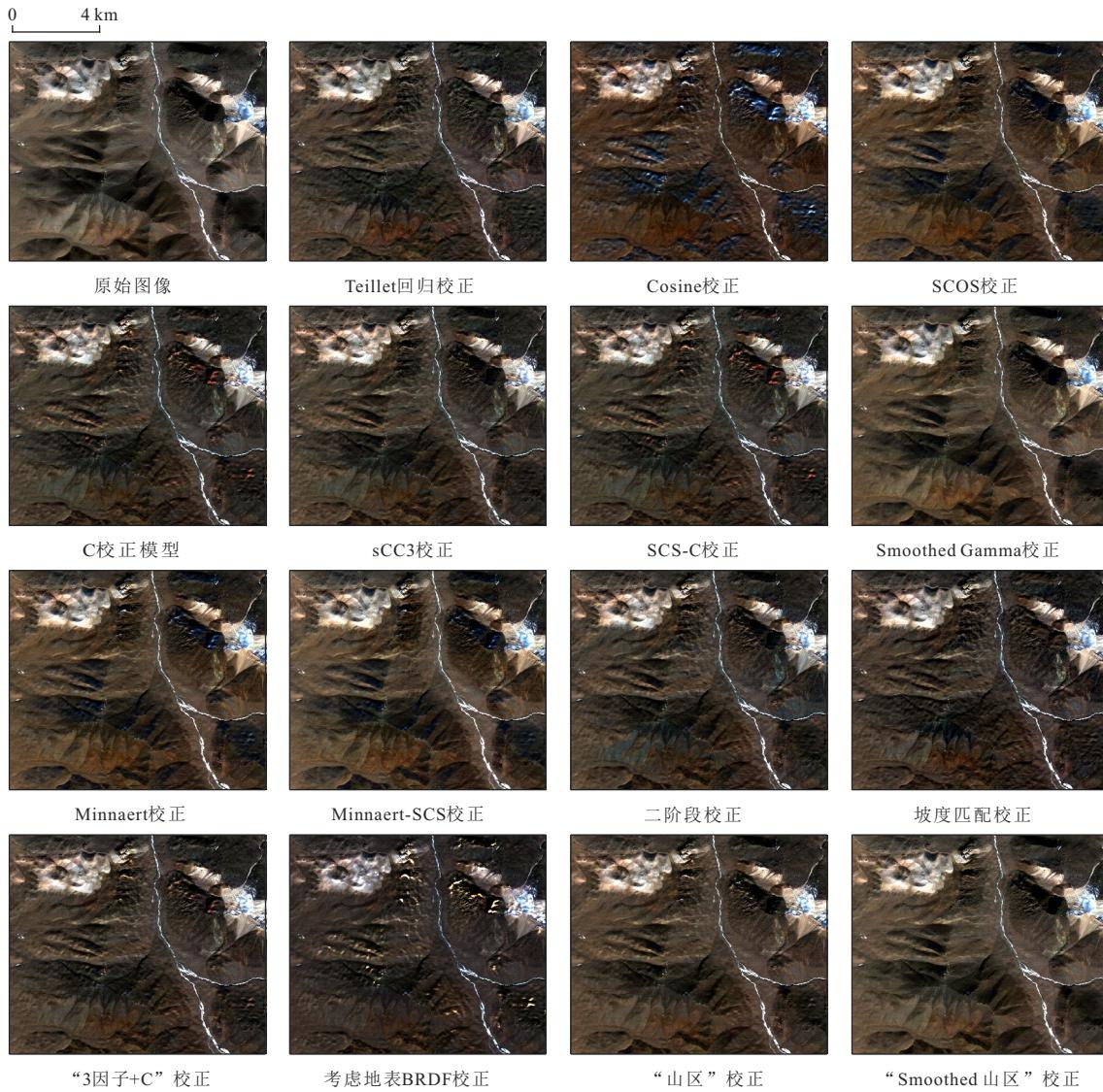


图 6 实验区 2 地形校正前后影像对比[GF-2 3(R), 2(G), 1(B)线性 1% 拉伸]

Fig.6 Original and corrected images in study area 2 with different topographic correction models

为类内离散度统计法,一般通过统计标准差、变异系数来实现.该类指数能够反映同一类型像元反射率值的波动大小,指标值越小表示同类地物光谱特性越统一,也即地形效应越小,校正效果也就越好.四分位距同样可以起到计算类内离散度的作用,即通过校正前后四分位距的变化量来评价地形校正效果:

$$IQR_{\text{reduction}} = 100 \left( 1 - \frac{IQR_{\text{corr}, \lambda}}{IQR_{\lambda}} \right), \quad (12)$$

式中: $IQR_{\lambda}$  和  $IQR_{\text{corr}, \lambda}$  分别为校正前和校正后各波段的四分位距, $IQR_{\text{reduction}}$  的值越大地形校正模型的效果越好(Ion Sola *et al.*, 2016).

## 2 实验区地质背景与遥感数据

### 2.1 实验区地质背景

实验区 1 蛇头山位于青海省都兰县诺木洪镇东南部(图 3.b),区内地形起伏大,海拔在 2 700~3 900 m,为典型的高海拔山地地貌.实验区大地构造处于东昆仑早古生代—晚古生代—早中生代复合造山系之昆中花岗—变质杂岩带的中东段(张雪亭等,2007),北部紧邻柴达木盆地南缘,属于祁漫塔格—都兰铁铜多金属成矿带的一部分(许长坤等,2012).区内主要出露的地层为古元古界金水口群白沙河岩组和中生界鄂拉山组以及新生界地层.沙河岩组在区内的主要岩性为大理岩,鄂拉山组主要岩性为安山质晶屑凝灰岩夹玄武安山岩.区内岩

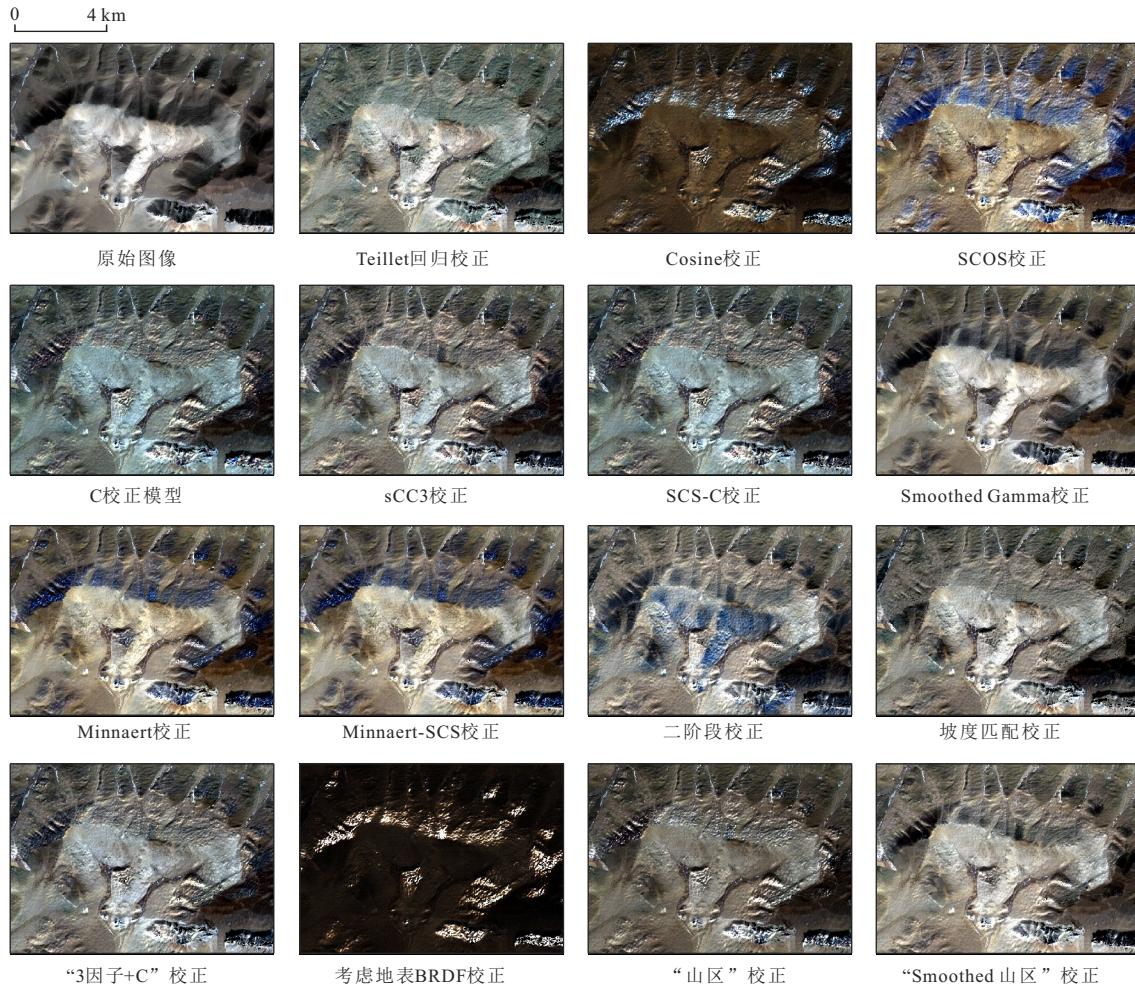


图7 实验区3地形校正前后影像对比[SPOT6 3(R), 2(G), 1(B)1%线性拉伸]

Fig.7 Original and corrected images in study area 3 with different topographic correction models

浆岩主要为中三叠世中酸性侵入岩,花岗闪长岩出露面积最大,其他还有少量二长花岗岩、正长花岗岩等。

实验区2位于西藏自治区昂仁县城北西方(图4c),区内起伏较大,海拔在5 200~6 000 m,属于高原丘陵型地貌。实验区大地构造处于冈底斯—念青唐古拉板片中段南缘(按潘桂棠等(2009)的大地构造划分方案),南邻雅鲁藏布江缝合带,北侧为班公错—怒江缝合带(李应栩等,2018),属于南冈底斯念青唐古拉Cu、Au、Mo、Fe、Pb、Zn、Sb成矿带中西段,南冈底斯Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Fe成矿亚带,区内已发现有鲁尔玛斑岩型铜矿(刘洪等,2018)。实验区内主要出露的地层为中侏罗纪世却桑温泉组和侏罗纪中晚世多底沟组。却桑温泉组为变质复成分砾岩、变质细砂岩、变质粉砂岩、板岩等,多底沟组为灰白色微晶灰岩和白色大理岩。区内岩浆岩主要为辉长岩、黑云母闪长岩、黑云母二长闪长岩、石英闪

长斑岩、二长斑岩。

实验区3位于西藏自治区措勤县城东南方尼雄地区(图4c)。区内起伏较大,海拔在4 900~5 600 m,属高原丘陵型地貌。实验区大地构造处于冈底斯—拉萨陆块中部的隆格尔—工布江达断隆带西段(按潘桂棠等(2009)的大地构造划分方案;苟正彬等,2018),属于南冈底斯念青唐古拉Cu、Au、Mo、Fe、Pb、Zn、Sb成矿带中西段,念青唐古拉Fe、Pb、Zn、Cu、Mo、Sn、Au、水晶成矿亚带。实验区内主要出露的地层为晚石炭纪世永珠组、中二叠纪世下拉组、晚二叠纪世敌布错组。永珠组主要出露石英砂岩、粉砂质泥质斑岩和石英质砾岩等,下拉组为白云质灰岩、微晶灰岩和细晶灰岩等,敌布错组为细砾岩屑砂岩、粉砂岩和粉砂质板岩等。区内岩浆岩主要为燕山晚期细粒和中粒黑云母二长花岗岩。

## 2.2 遥感数据及预处理

实验区1使用GF-1 8 m多光谱数据,采集时间

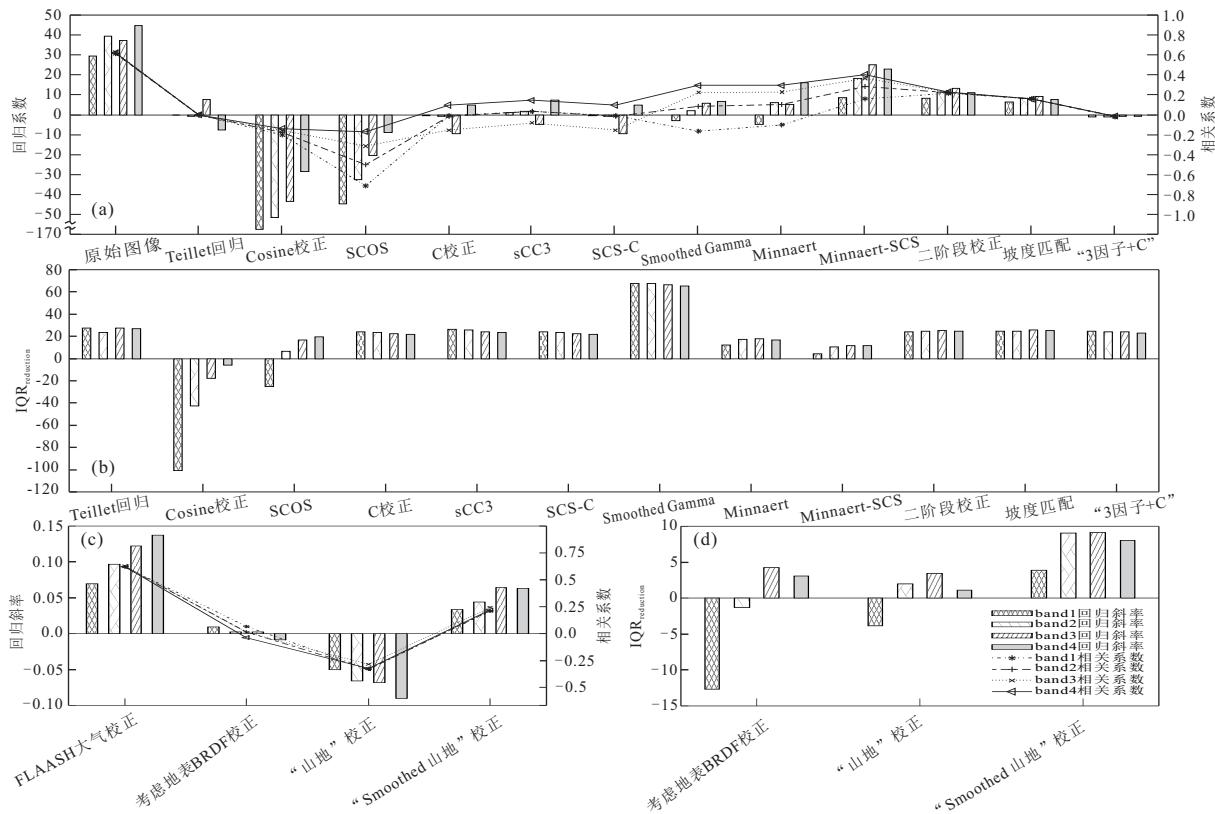


图8 实验区1地形校正后GF-1各波段辐射度与 $\cos i_s$ 的回归斜率和相关系数(a、c)、地形校正后GF-1各波段辐射度四分位距减少量(b、d)

Fig.8 Slope and correlation coefficient of regression between  $\cos i_s$  and the radiance of each spectral band of GF-1 after topographic correction in study area-1(a, c); Intraclass IQR reduction of each spectral band of GF-1 after topographic correction in study area-1(b, d)

为2014年4月26日,日地距离 $d=1.0063$ ,图像质量良好(图3a),无云覆盖.由于缺少遥感图像采集时的气象数据,依据当日邻区格尔木气温 $3\sim18^{\circ}\text{C}$ ,多云,北风3~4级,6SV大气校正模型选用亚北极区夏季.GF-1多光谱波段光谱响应函数由中国资源卫星应用中心网站提供.GF-1的多光谱数据具有4个波段,蓝色波段( $0.45\sim0.52\text{ }\mu\text{m}$ )、绿色波段( $0.52\sim0.59\text{ }\mu\text{m}$ )、红色波段( $0.63\sim0.69\text{ }\mu\text{m}$ )、近红外波段( $0.77\sim0.89\text{ }\mu\text{m}$ ).卫星数据采集时的影像的太阳方位角 $166.5270^{\circ}$ 、太阳高度角 $54.7281^{\circ}$ 、观测方位角 $86.7433^{\circ}$ 、观测高度角 $88.4685^{\circ}$ .

实验区2采用GF-2的4 m多光谱数据,采集时间为2016年12月19日,日地距离 $d=0.9837$ ,图像质量良好(图4a),无云覆盖,6SV大气校正模型选用亚北极区夏季.GF-2多光谱波段光谱响应函数由中国资源卫星应用中心网站提供.当日相邻萨嘎县气温: $-11\sim10^{\circ}\text{C}$ ,晴,西风3级.GF-2的多光谱数据具有4个波段,蓝色波段( $0.45\sim0.52\text{ }\mu\text{m}$ )、绿色波

段( $0.52\sim0.59\text{ }\mu\text{m}$ )、红色波段( $0.63\sim0.69\text{ }\mu\text{m}$ )、近红外波段( $0.77\sim0.89\text{ }\mu\text{m}$ ).卫星数据采集时的影像的太阳方位角 $166.5270^{\circ}$ 、太阳高度角 $54.7281^{\circ}$ 、观测方位角 $86.7433^{\circ}$ 、观测高度角 $88.4685^{\circ}$ .

实验区3采用SPOT6的6 m多光谱数据,采集时间为2014年11月22日,日地距离 $d=0.9833$ ,图像质量良好(图4b),无云覆盖,6SV大气校正模型选用中纬度冬季.当日相邻措勤县气温为 $-13\sim3^{\circ}\text{C}$ ,晴,西风小于3级.SPOT6的多光谱数据具有4个波段,蓝色波段( $0.455\sim0.525\text{ }\mu\text{m}$ )、绿色波段( $0.530\sim0.590\text{ }\mu\text{m}$ )、红色波段( $0.625\sim0.695\text{ }\mu\text{m}$ )、近红外波段( $0.760\sim0.890\text{ }\mu\text{m}$ ).卫星数据采集时的影像的太阳方位角 $154.8722^{\circ}$ 、太阳高度角 $35.6234^{\circ}$ 、观测方位角 $0^{\circ}$ 、观测高度角 $0^{\circ}$ .

各数据的前处理包括有辐射定标、正射校正、地理校正及实验区裁剪.高分数据的绝对辐射定标系数由中国资源卫星应用中心网站查询获得.前处理后的遥感真彩色合成图显示实验区的遥感影像

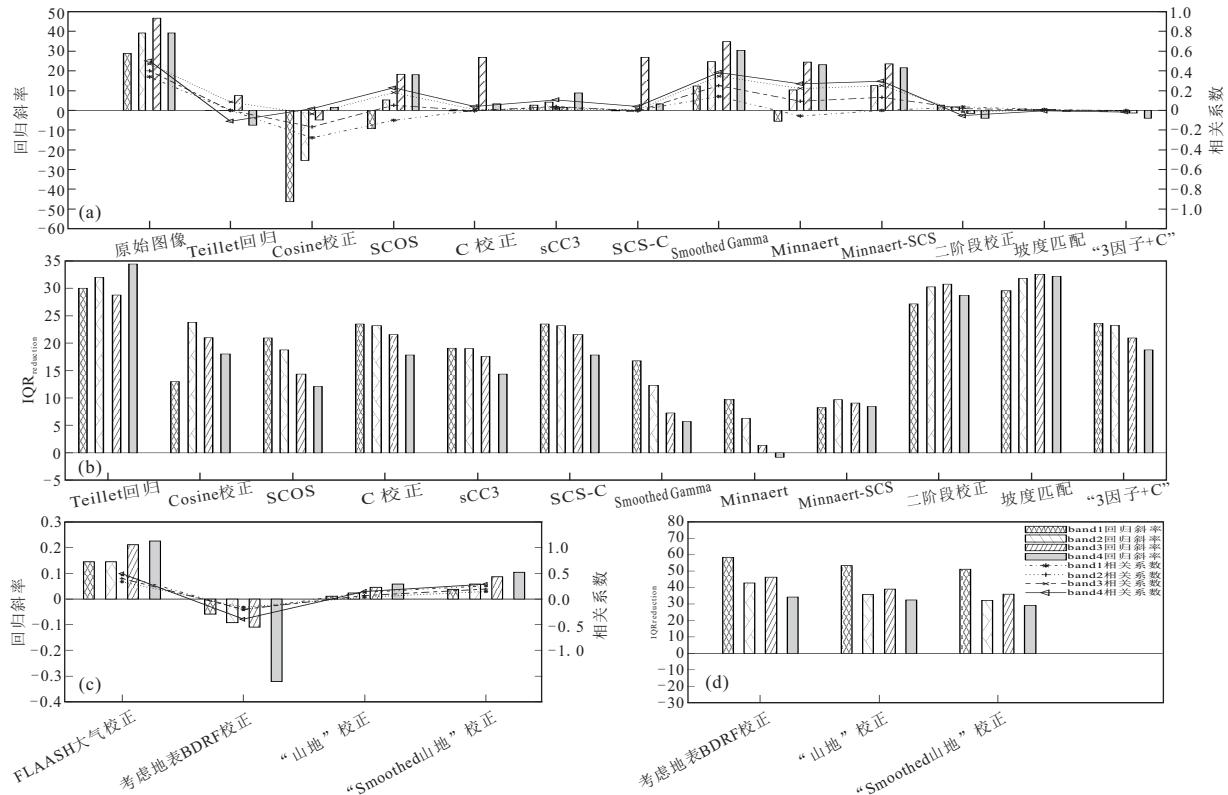


图9 实验区2地形校正后GF-2各波段辐射度与 $\cos i_s$ 的回归斜率和相关系数(a、c)、地形校正后GF-1各波段辐射度四分位距减少量(b、d)

Fig.9 Slope and correlation coefficient of regression between  $\cos i_s$  and the radiance of each spectral band of GF-2 after topographic correction in study area-2(a, c); Intraclass IQR reduction of each spectral band of GF-1 after topographic correction in study area-2(b, d)

受地形影响明显。实验区1的DEM数据由1:5万地形图提取,实验区2、3的DEM数据通过30米空间分辨率的数字高程数据ASTER GDEM按遥感影像分辨率重采样获取。各实验区遥感数据采集时阴影图如图3c、图4d、图4e所示。

### 3 结果及分析

#### 3.1 目视判读

各实验区应用各模型分别进行地形校正,校正结果如图5、图6、图7所示。各影像均进行了1%线性拉伸,如图原始影像中地形效应明显。校正结果显示,考虑三因子的物理模型校正结果明显优于经验、半经验模型,没有加入地形抹平的校正后影像均受到地形异常的影响。经验、半经验模型中坡度匹配的效果相对较好,虽然在实验区2、3应用坡度匹配后的校正影像存在一定的过校正现象,但也削弱了地形效应现象;Teillet-回归、Cosine校正、SCOS校正、Minnaert和Minnaert-SCS校正后影像

并没有削弱地形的影响,均存在过校正现象;C校正、sCC3校正、SCS-C校正后影像则存在欠校正现象;Smoothed Gamma校正后影像在实验区1阴影区存在异常,在实验区2、3则存在欠校正现象;二阶段校正校正后影像在实验区1、2内校正效果较好,在实验区3存在欠校正现象;“3因子+C”校正模型能削弱地形效应,实验区1、2的校正后影像的地形效应被削弱,但实验区3的校正后影像存在过校正现象,同时地形异常对各实验区校正结果有影响。

“山区”校正模型在实验区1、3的校正后影像存在过校正现象,且影像整体偏暗;在实验区2的校正后影像的校正效果较好。“考虑地表BRDF”校正模型在实验区1、2的校正后影像的校正效果一般;在实验区3的校正后影像存在过校正现象,且影像整体较暗。“Smoothed山区”校正模型在3个实验区内的校正后影像均显示地形效应被削弱,且保存了各地质体的影像差异,满足地质填图的需求。

#### 3.2 定量分析比较

##### 3.2.1 像元的太阳入射角与反射率相关性 辐射度

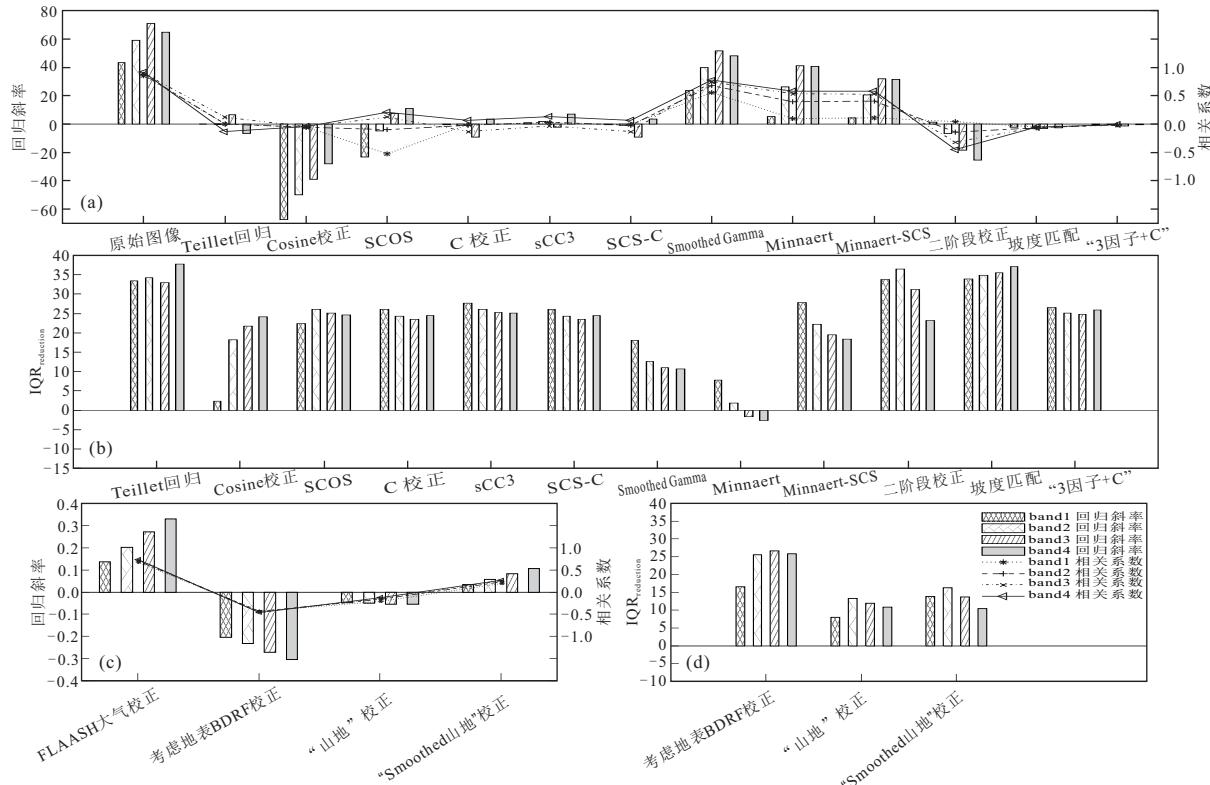


图 10 实验区 3 地形校正后 SPOT6 各波段辐射度与  $\cos_i$  的回归斜率和相关系数(a、c)、地形校正后 SPOT6 各波段辐射度四分位距减少量(b、d)

Fig.10 Slope and correlation coefficient of regression between  $\cos_i$  and the radiance of each spectral band of SPOT6 after topographic correction in study area-3(a,c);Intraclass IQR reduction of each spectral band of SPOT6 after topographic correction in study area-3(b,d)

或地表反射率与太阳有效入射角之间的回归关系反映了地形效应的程度,各实验区内地形校正后影像全区统计结果如图 8、图 9、图 10 所示。将获得地表辐射度的模型和获得地表反射率的模型分开比较,前者与校正前影像对比(图 8a, 图 9a, 图 10a),后者与直接进行 FLAASH 大气校正后影像对比(图 8c, 图 9c, 图 10c)。

获得地表辐射度的各校正模型中,除 Cosine 校正结果外,其他模型的校正结果的地表辐射度与太阳有效入射角余弦的相关性均一定程度的减少。其中“3 因子+C”模型的校正效果最好,能同时大幅减小各波段的回归斜率和相关系数;坡度匹配模型在实验区 2、3 的校正结果较好,但在实验区 1 的校正结果相关性减弱不多;Teillet 回归校正模型可以很好的减小各实验区遥感影像的回归系数,但是不同波段的校正效果不同,各遥感数据的波段 3、4 的相关系数明显大于波段 1、2 的相关系数;SCOS 模型校正效果优于 Cosine 模型,且在实验区 2、3 的校正后影像相关性减弱程度大于实验区 1;C 校正、sCC3

校正、SCS-C 校正模型校正结果的 3、4 波段的校正效果不如 1、2 波段;“Smoothed Gamma”在实验区 2、3 的校正后影像的相关性减少量较实验区 1 少;Minnaert 和 Minnaert-SCS 的校正后影像的相关性减少量相对其他方法较少;二阶段校正在实验区 1、2 的校正后影像的相关性减少量较实验区 3 少。

获得地表反射率的校正模型中,“考虑地表 BRDF”模型在实验区 1 的校正后影像的相关性最小,实验区 2、3 的校正后影像的相关性最大;“山区”校正模型在实验区 2、3 的校正后影像相关性最小,实验区 1 的校正后影像的相关性最大;“Smoothed 山区”校正在各实验区的校正后影像的相关性均为中等。

**3.2.2 组内间距的分析** 四分位距可以显示类内离散度,其值越小表示同类地物光谱特性越统一,也即地形效应越小。全区校正后影像统计结果如图 8b、图 8d、图 9b、图 9d、图 10b、图 10d 所示。获得地表辐射度的各校正模型中,除了 Cosine 校正在实验区 1 的校正结果的类内离散度增大了,其他校

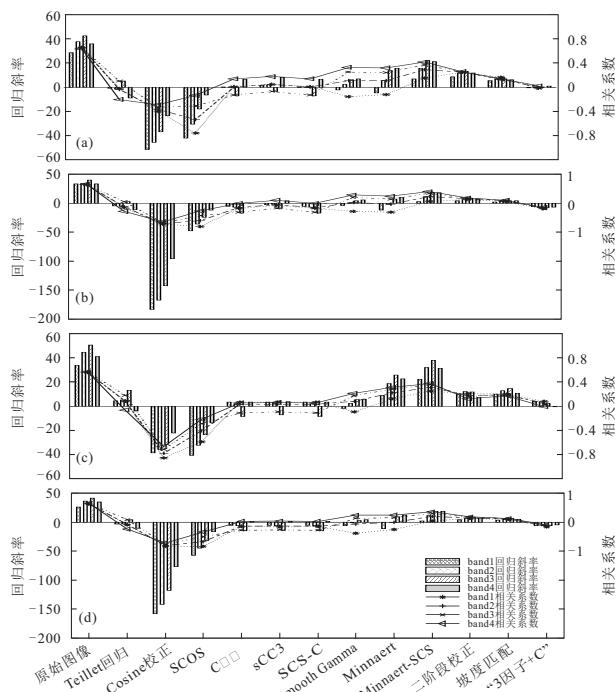


图11 实验区1内4个岩体地形校正后GF-1各波段辐射度与 $\cos i_s$ 的回归斜率和相关系数

Fig.11 Slope and correlation coefficient of regression between  $\cos i_s$  and the radiance of each spectral band of GF-1 after topographic correction for the 4 rocks in study area-1

正方法均能一定程度的缩小类内离散度。实验区1校正后影像类内离散度减少量最大的模型为Smoothed Gamma, 实验区2、3内减少量最大的前三种模型为Teillet-回归校正、二阶段校正、坡度匹配校正。

获得地表反射率的校正模型中, 实验区1内“Smoothed 山区”校正后影像的类内离散度减少量最大; “考虑地表BRDF”的校正结果在1、2波段的类内离散度增大, 3、4波段的类内离散度减小; “山区”模型校正结果的1波段的类内离散度增大, 其他波段的减小。实验区2各模型的校正后影像的类内离散度均减小, 减少量最大的模型为“考虑地表BRDF”校正模型, 其次为“山区”校正, 最少为“Smoothed 山区”校正, 但3者差别不大。实验区3内各模型的校正结果后影像的类内离散度减少量从大到小依次为“考虑地表BRDF”校正、“Smoothed 山区”和“山区”校正。

### 3.3 不同岩体校正结果对比

选取实验区1内四个含岩脉较少的岩体进行统计, 岩体1、岩体2、岩体3为花岗闪长岩, 岩体4为花

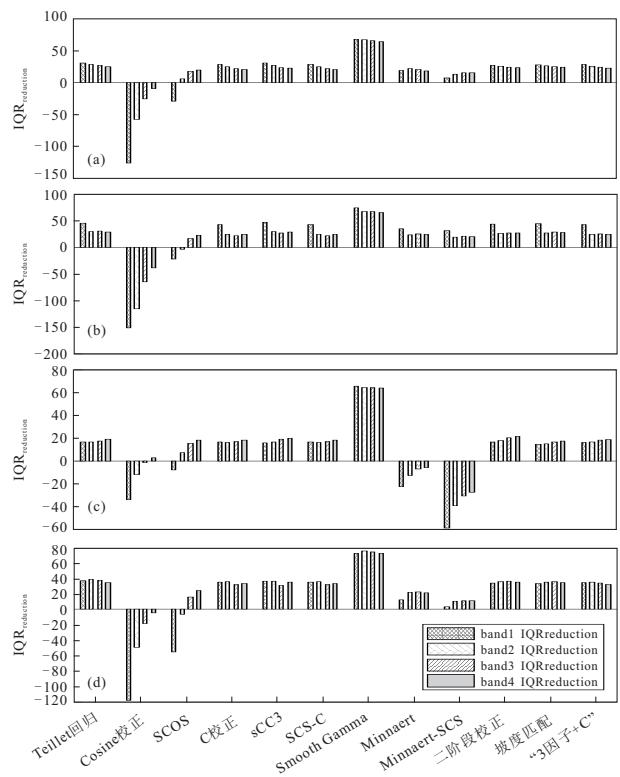


图12 实验区1内4个岩体地形校正后GF-1各波段辐射度四分位距减少量

Fig.12 Intraclass IQR reduction of each spectral band of GF-1 after topographic correction for the 4 rocks in study area-1

岗岩。校正后各岩体地表辐射度与太阳有效入射角余弦之间的相关性特征基本一致(图11), 其中“3因子+C”校正后影像的回归系数和相关系数最小、校正效果最好; 除Cosine校正外, 其他校正模型均能一定程度的减弱相关性。在校正后地表反射率与太阳有效入射角余弦之间的相关性关系中(图13 a,b, c,d), 考虑地表BRDF模型校正结果与太阳有效入射角余弦的相关性均为最小, 岩体1的“Smoothed 山区”校正结果的相关性大于“山区”模型校正结果的相关性, 岩体2、3、4校正后影像中“山区”模型校正结果的相关性大于“Smoothed 山区”校正结果的相关性。

校正后各岩体地表辐射度的类内离散度减少量最大的校正模型为Smooth Gamma校正(图12), Cosine校正未能减小各岩体的类内离散度, Minnaert和Minnaert-SCS校正也未能减少岩体3的类内离散度。校正后获取地表反射率的影像中(图13e~13h), 岩体1的“Smoothed 山区”校正结果的组内离散度减少量最大, “考虑地表BRDF”模型校正次

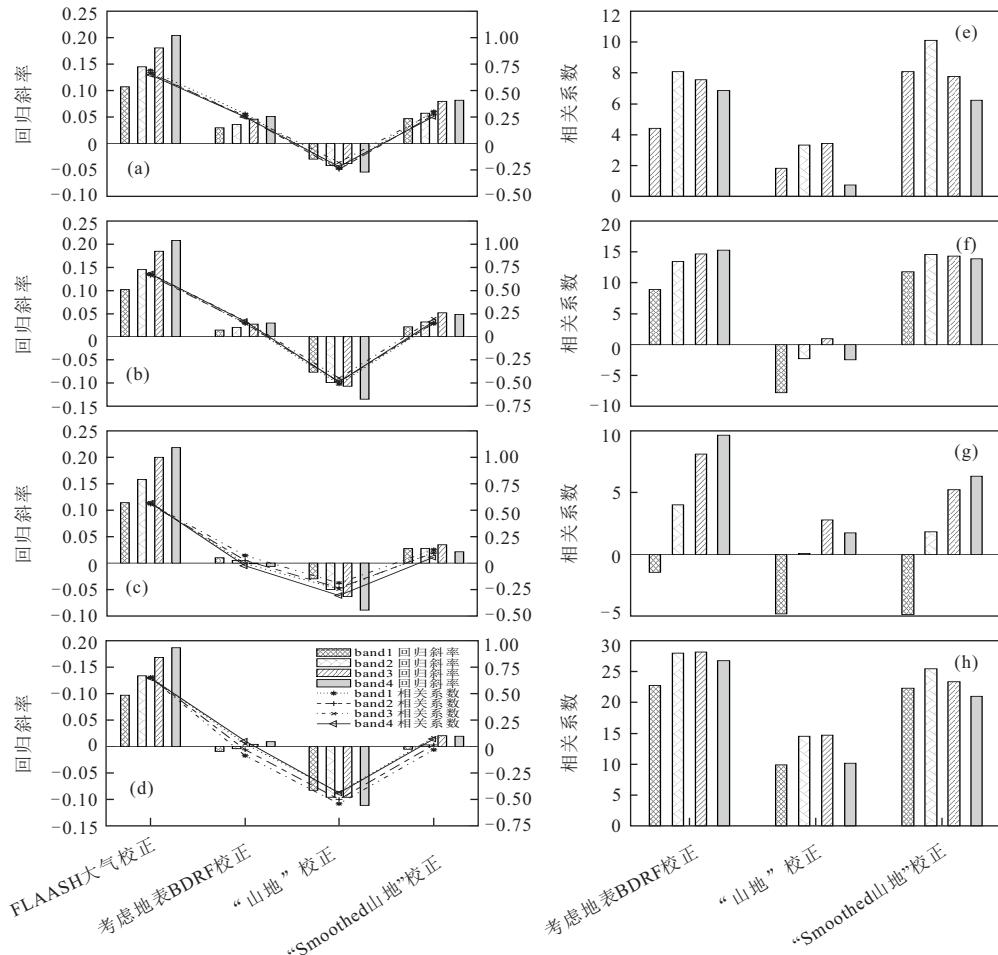


图13 实验区1内4个岩体地形校正后GF-1各波段辐射度与 $\cos i_s$ 的回归斜率和相关系数(a、b、c、d)、地形校正后GF-1各波段辐射度四分位距减少量(e、f、g、h)

Fig.13 Slope and correlation coefficient of regression between  $\cos i_s$  and the radiance of each spectral band of GF-1 after topographic correction Image for the4 rocks in study area-1 (a, b, c, d); Intraclass IQR reduction of each spectral band of GF-1 after topographic correction for the 4 rocks in study area-1 (e, f, g, h)

之，“山区”校正减少量最小；校正后岩体2,3,4的“考虑地表BRDF”模型的校正结果组内离散度减少量最大，“Smoothed 山区”校正次之，“山区”校正减少量最小。

### 3.4 讨论

3个实验区内15种地形校正对比结果显示考虑三因子的物理模型校正结果明显优于经验、半经验模型。地形抹平可以削弱地形数据异常引起的校正结果的辐射异常。“Smoothed 山区”模型可以削弱山区遥感影像中的地形效应。

Cosine、SCOS 校正结果的过校正现象严重，且过校正现象在太阳有效入射角越接近 90°时越明显，这与段四波等(2007)的结果一致。Teillet 回归、C 校正、sCC3、SCS-C、Minnaert、Minnaert-SCS 校正结果不理想，因其校正时需计算经验参数：Teillet 一回

归的参数  $L_\lambda$ 、C 校正的参数  $C_\lambda$ 、Minnaert 常数 K，这些参数是基于同一类地物的辐亮度计算获得，而本次实验的校正对象为混合地物样本集。二阶段校正和坡度匹配校正结果明显受到地形异常的影响，且在实验区3有过校正现象，这两种模型也是假设校正对象也为同类地物。遥感地质填图的目的即是通过地物光谱识别不同地质体，工作前地物分类未知，难以获取纯净的地物样本集。且地质出露区内不同地质体间光谱特征的差异明显大于植被覆盖区不同种类植被间光谱特征的差异，如花岗岩和花岗闪长岩的光谱差异显然大于阔叶林和针叶林的差异。这类地质体遥感影像构成的混合样本集不仅会使经验、半经验模型的校正参数的鲁棒性差，还会造成校正后地质体光谱特征假差异性，导致错误

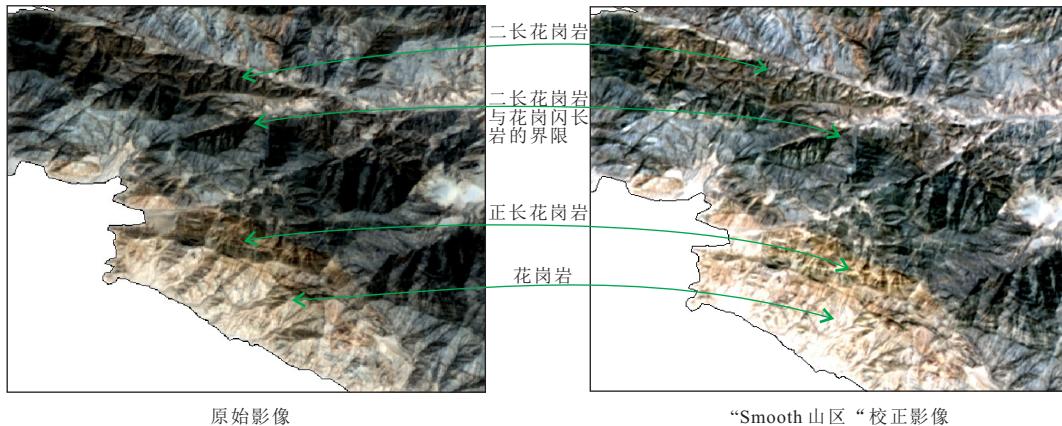


图 14 实验区 1“Smoothed 山区”校正前后影像对比

Fig.14 Image of the study area 1 before and after “Smooth Mountains” correction models

的地物分类.其他校正模型中,Smoothed Gamma 的校正结果均存在欠校正现象;“3因子+C”校正模型的校正结果易受到地形异常的影响,且校正参数  $C_\alpha$  的计算要求也很难满足.

“考虑地表 BRDF”的物理模型校正后影像与太阳入射角余弦的相关性较低,但是校正后影像存在不同程度的过校正现象,实验区 1 和实验区 3 校正后影像偏暗.造成该模型校正效果不好的原因主要是在计算 BRDF 核函数参数时用的是地表混合样集,但这与地质体光谱特征的高空间变异性相矛盾.且 Ross Thick-LiSparse 核组合向大天顶角外推时反射率失真.实验区 3 过校正现象尤其明显则是由于采集遥感数据时太阳高度角偏小,造成需要外推天顶角的范围更大.该模型的改进可考虑应用多时相遥感数据拟合逐个像元的 BRDF 参数,并使用外推性较好的 BRDF 模型参与校正.

相比校正前影像,“Smoothed 山区”模型校正后影像的地形效应被削弱,校正后影像纹理更为丰富,保留了各地质体间差别,岩脉的影像更加连贯,可提取出大部分地质体的界限,提供更准确的地质信息.如图 14 所示,实验区 1 内正长花岗岩与花岗岩、二长花岗岩与花岗闪长岩的界限更加清晰、连续.

## 4 结论

地形校正是山区遥感数据辐射处理中的难点,且地形效应明显加大了复杂山地地区的遥感地质填图的难度.本文针对复杂地形的山区遥感地质填图的需求,提出的引入地形抹平模型的“Smoothed 山区”校正模型,并对比了常用的 14 种经验、半经验

和物理地形校正模型.通过比较实验,可以得出以下结论:

(1) 相比经验、半经验和简单物理模型,考虑天空散射辐射、周围地形反射辐射的物理校正模型在复杂地形山区的遥感地质填图中,能更好地削弱地形效应,且校正后影像不失真.“Smoothed 山区”和“3因子+C”削弱地形效应的效率最好.

(2) 地形抹平模型可以抑制地形数据异常引起的校正后辐射异常,改善校正效果.

(3) “Smoothed 山区”校正可以削弱地形效应,获得的地表反射率数据也可为之后的遥感蚀变信息提取等定量分析工作提供基础数据,是遥感地质填图中实用可行的地形校正模型.

## References

- Blesius, L., Weirich, F., 2005. The Use of the Minnaert Correction for Land-Cover Classification in Mountainous Terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 26(17): 3831–3851. <https://doi.org/10.1080/01431160500104194>
- Civco, D. L., 1989. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55(9):1303–1309.
- Cooley, T., Anderson, G. P., Felde, G. W., et al., 2002. FLAASH, a MODTRAN4 - Based Atmospheric Correction Algorithm, Its Application and Validation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3:1414–1418. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026134>
- Ding, Y. F., You, H. J., Zhang, H., et al., 2018. Topographic Correction Method for High-Resolution Remote Sensing Images. *Journal of Beihang University of Aeronautics and Astronautics*, 44(1): 27–35(in Chinese with English abstract).

- Duan, S. B., Yan, G. J., 2007. A Review of Models for Topographic Correction of Remotely Sensed Images in Mountainous Area. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 43(3): 362—366(in Chinese with English abstract).
- Duan, S. B., Yan, J. G., Mu, X. H., et al., 2007. DEM Based Remote Sensed Imagery Topographic Correction Method in Mountainous Areas. *Geography and Geo-Information Science*, 23(6): 18—22 (in Chinese with English abstract).
- Dymond, J. R., Shepherd, J. D., 1999. Correction of the Topographic Effect in Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2618—2619. <https://doi.org/10.1109/36.789656>
- Gao, Y. N., Zhang, W. C., 2008a. Comparison Test and Research Progress of Topographic Correction on Remotely Sensed Data. *Geographical Research*, 27(2): 467—477 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. N., Zhang, W. C., 2008b. Simplification and Modification of a Physical Topographic Correction Algorithm for Remotely Sensed Data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 37(1): 89—94(in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. N., Zhang, W. C., 2009. A Simple Empirical Topographic Correction Method for ETM Plus Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 30(9): 2259—2275 (in Chinese with English abstract).
- Gou, Z. B., Liu, H., Li, J., et al., 2018. The Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Nixiong Area from the Central and Northern Lhasa Terrane. *Earth Science*, 43(8): 2780—2794. (in Chinese with English abstract).
- Gu, D. G., Gillespie, A., 1998. Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-Canopy-Sensor Geometry. *Remote Sensing of Environment*, 64(2): 166—175.
- He, K. T., Gan, P. P., Wang, Y. J., 2009. The Extraction of Geological Micro-Structure and Altered Rock Information with High-Resolution Satellite Images in a Small Range. *Remote Sensing For Land and Resources*, 21(1): 97—99 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W., Zhang, L. P., Li, X. P., 2005. An Improved Topographic Correction Approach for Satellite Image. *Journal of Image and Graphics*, 10(9): 1124—1128(in Chinese with English abstract).
- Ion, S., María, G. A., Jesús, Á., M., 2016. Multi-Criteria Evaluation of Topographic Correction Methods. *Remote Sensing of Environment*, 184: 247—262. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.002>
- Jiang, K., Hu, C. M., Yu, K., et al., 2014. Landsat TM/ETM+Topographic Correction Method Based on Smoothed Terrain and Semi-Empirical Model. *Journal of Remote Sensing*, 18(2): 287—306 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, L. Y., Xiao, P. F., Feng, X. Z., et al., 2015. Calculation of Snow Reflectance from GF-1 Satellite Image in Rugged Mountain Areas. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 51(5): 944—954 (in Chinese with English abstract).
- Kotchenova, S. Y., Vermote, E. F., 2007. Validation of a Vector Version of the 6S Radiative Transfer Code for Atmospheric Correction of Satellite Data Part II Homogeneous Lambertian and Anisotropic Surfaces. *Applied Optics*, 46 (20): 4455. <https://doi.org/10.1364/ao.46.004455>
- Law, K. H., Nichol, J., 2004. Topographic Correction for Differential Illumination Effects on iKONOS Satellite Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 641—646.
- Li, A. N., Wang, Q. F., Bian, J. H., et al., 2015. An Improved Physics-Based Model for Topographic Correction of Landsat TM Images. *Remote Sensing*, 7(5): 6296—6319. <https://doi.org/10.3390/rs70506296>
- Li, Y. X., Li, G. M., Xie, Y. L., et al., 2018. Properties and Evolution Path of Ore-Forming Fluid in Qiagong Polymetallic Deposit of Middle Gangdese in Tibet, China. *Earth Science*, 43(8): 2684—2700. (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Zhang, L. K., Huang, H. X., et al., 2018. Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids in Luerma Porphyry Copper Deposit from the Western Gangdise. *Earth Science*. (in Chinese with English abstract).
- Minnaert, M., 1941. The Reciprocity Principle in Lunar Photometry. *The Astrophysical Journal*, 93: 403. <https://doi.org/10.1086/144279>
- Nichol, J., Hang, L. K., Sing, W. M., 2006. Empirical Correction of Low Sun Angle Images in Steeply Sloping Terrain: A Slope-Matching Technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27(3): 629—635. <https://doi.org/10.1080/02781070500293414>
- Oke, T.R., 1987. Boundary Layer Climates. Routledge, London and New York, 405—410.
- Pan, G. T., Xiao, Q. H., Lu, S. N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36(1):1—28.(in Chinese with English abstract).
- Proy, C., Tanre, D., Deschamps, P., 1989. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data. *Remote*

- Sensing of Environment*, 30(1): 21—32. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90044-8)
- Pu, R. L., Gong, P., 2000. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application. Higher Education Press, Beijing, 47—80.
- Riano, D., Chuvieco, E., Salas, J., et al., 2003. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types (2003). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(5): 1056—1061. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.811693>
- Richter, R., 1998. Correction of Satellite Imagery over Mountainous Terrain. *Applied Optics*, 37(18): 4004. <https://doi.org/10.1364/ao.37.004004>
- Richter, R., Kellenberger, T., Kaufmann, H., 2009. Comparison of Topographic Correction Methods. *Remote Sensing*, 1(3): 184—196. <https://doi.org/10.3390/rs1030184>
- Richter, R., Schläpfer, D., 2002. Geo-Atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data. Part 2: Atmospheric/topographic Correction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2631—2649. <https://doi.org/10.1080/01431160110115834>
- Sandmeier, S., Itten, K. I., 1997. A Physically-Based Model to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 708—717. <https://doi.org/10.1109/36.581991>
- Scott, A. S., Derek, R., Craig, A. C., 2005. SCS +C : A modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9): 2148—2159. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.852480>
- Smith, J. A., Lin, T. L., Ranson, K. J., 1980. The Lambertian Assumption and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 46(9):1183—1189.
- Song, L. Y., Zhang, H., Lin, F., 2017. Impact and Analysis of Shadow Area Extracting to the Terrain Radiation Correction for High Resolution Image. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3):29—33 (in Chinese with English abstract).
- Szantoi, Z., Simonetti, D., 2013. Fast and Robust Topographic Correction Method for Medium Resolution Satellite Imagery Using a Stratified Approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(4): 1921—1933. <https://doi.org/10.1109/jstars.2012.2229260>
- Teillet, P. M., Guindon, B., Goodenough, D. G., 1982. On the Slope - Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2): 84—106. <https://doi.org/10.1080/07038992.1982.10855028>
- Tokola, T., Sarkeala, J., Van Der Linden, M., 2001. Use of Topographic Correction in Landsat TM—Based Forest Interpretation in Nepal. *International Journal of Remote Sensing*, 22(4): 551—563. <https://doi.org/10.1080/0143116005050856>
- Tong, Q. X., Zhang, B., Zheng, L. F., 2006. Hyperspectral Remote Sensing and Its Multidisciplinary Applications. Publishing House of Electronics Industry, Beijing, 153—177.
- Vincini, M., Reeder, D., Frazzi, E., 2002. An Empirical Topographic Normalization Method for Forest TM Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4(4): 2091—2093. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026454>
- Wang, J. G., Feng, X. Z., Xiao, P. F., et al., 2018. Snow Grain - Size Estimation over Mountainous Areas from MODIS Imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(1): 97—101.
- Wang, R. S., Xiong, S. Q., Nie, H. F., et al., 2001. Remote Sensing Technology and its Application in Geological Exploration. *Acta Geologica Sinica*. 85(11):1699—1744 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Lin, W. L., Ding, R. X., 2017. Quantitative Measurement of Bedding Orientation Using Remote Sensing Data: Yili Basin, Northwest China. *Journal of Earth Science*, 29(3): 689—694. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0943-1>
- Wen, J. G., Liu, Q. H., Xiao, Q., 2007. Assessment of Different Topographic Correction Methods and Validation. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 43(3):255—263 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. K., Liu, S. B., Zhao, Z. J., et al., 2012. Metallogenic Law and Prospect Direction of Iron Deposits in the East Kunlun Metallogenic Belt in Qinghai. *Acta Geologica Sinica*. 86(10): 1621—1678 (in Chinese with English abstract).
- Zang, X., Yang, B., Qi, J. W., et al., 2015. An Improved Topographic Correction Method of Remote-Sensing Images. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1):75—80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Ma, S. B., Li, Z. R., et al., 2016. Geological Interpretation of GF-1 Satellite Imagery. *Remote Sensing Information*, (1): 115—123 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. C., Gao, Y. N., 2011. Topographic Correction Algorithm for Remotely Sensed Data Accounting for Indirect Irradiance. *International Journal of Remote Sensing*, 32(7): 1807—1824. <https://doi.org/10.1080/01431161003623441>

- Zhang, W. G., Yang, L., Cao, L. Z, et al., 2015. An Improved Topographic Correction Based on the Three Factor + C Model. *Remote Sensing for Land and Resources*, 27(2):36—43(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. T., Yang, S. D., Yang, Z. J., 2007. The Regional Geology of Qinhai Province. Geological Publishing House, Beijing, 7—170.

#### 附中文参考文献

- 丁一帆,尤红建,张浩,等,2018.面向高分辨率遥感影像的地形辐射校正方法.北京航空航天大学学报,44(1):27—35.
- 段四波,闫广建,2007.山区遥感图像地形校正模型研究综述.北京师范大学学报:自然科学版,43(3):362—366.
- 段四波,闫广建,穆西晗,等,2007.基于DEM的山区遥感图像地形校正方法.地理与地理信息科学,23(6):18—22.
- 高永年,张万昌,2008a.遥感影像地形校正研究进展及其比较实验地理研究.地理研究,27(2):467—477.
- 高永年,张万昌,2008b.遥感地形校正物理模型的简化与改进.测绘学报,37(1):89—94.
- 苟正彬,刘函,李俊,等,2018.拉萨地块中北部尼雄地区早白垩世火山岩的成因及构造意义.地球科学,43(8):2780—2794.
- 何凯涛,甘甫平,王永江,2009.高空间分辨率卫星遥感地质微构造及蚀变信息识别.国土资源遥感,21(1):97—99.
- 黄微,张良培,李平湘,2005.一种改进的卫星影像地形校正算法.中国图象图形学报,10(9):1124—1128.
- 姜亢,胡昌苗,于凯,等,2014.地形抹平与半经验模型的Landsat TM /ETM+地形校正方法.遥感学报,18(2):287—306.
- 蒋璐媛,肖鹏峰,冯学智,等,2015.山区复杂地形条件下GF-1卫星遥感雪面反射率计算.南京大学学报(自然科学),51(5):944—954.
- 李应栩,李光明,谢玉玲,等,2018.西藏冈底斯中段恰功多金属矿床成矿流体性质与演化.地球科学,43(8):2684—2700.
- 刘洪,张林奎,黄瀚霄,等,2018.冈底斯西段鲁尔玛斑岩型铜矿成矿流体性质及演化.地球科学.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划分.中国地质,36(1):1—28.
- 浦瑞良,宫鹏,2000.高光谱遥感及其应用.北京:高等教育出版社,47—80.
- 宋丽瑶,张浩,林峰,2017.阴影区提取对高分辨率影像地形辐射校正的影响与分析.测绘通报,(3):29—33.
- 童庆禧,张兵,郑兰芬,2006.高光谱遥感的多学科应用.北京:电子工业出版社,153—177.
- 王润生,熊盛青,聂洪峰,等,2011.遥感地质勘查技术与应用研究.地质学报,85(11):1699—1744.
- 闻建光,柳钦火,肖青,2007.基于模拟数据分析地形校正模型效果及检验.北京师范大学学报:自然科学版,43(3):255—263.
- 许长坤,刘世宝,赵子基,等,2012.青海省东昆仑成矿带铁矿成矿规律与找矿方向研究.地质学报,86(10):1621—1678.
- 臧熹,杨博,齐建伟,等,2015.一种改进的遥感影像地形校正方.测绘通报,(1):75—80.
- 张焜,马世斌,李宗仁,等,2016.高分一号卫星数据遥感地质解译.遥感信息,(1):115—123.
- 张伟阁,杨辽,曹良中,等,2015.基于Three Factor + C模型改进的地形辐射校正方法.国土资源遥感,27(2):36—43.
- 张雪亭,杨生德,杨占君,2007.青海省区域地质概论.北京:地质出版社,7—170.