

文章编号: 1008-2786-(2014)3-257-10

# 不同地形校正模型计算地形复杂山区 地表反射率的对比

穆悦<sup>1,2</sup> 安裕伦<sup>1,2\*</sup> 王喆<sup>1,2</sup> 高翔<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州师范大学 山地资源与环境遥感重点实验室 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:** 地表反射率对定量遥感有重要意义,其在复杂地形区会受到地形条件影响。地形校正可以减小或消除山区遥感影像中地形因素影响。以梵净山区为研究区,利用 Landsat-5 TM 影像、DEM 及坡度、坡向数据,采用 10 种地形校正模型进行比较实验,以发现其在反演地表反射率时存在的问题,并为选择适合地形复杂山区地表反射率反演的地形校正模型及相关研究提供参考。结果显示:1. SCS + C、Minnaert、b、Teillet - 回归、VECA、C 模型地形校正效果较好,可用于反演山区的地表反射率,但是当坡度为 0° 时,Minnaert、Teillet - 回归、VECA 模型存在问题;2. Cosine - b、Cosine、SCS 和 Cosine - C 模型存在过度校正现象,Cosine 和 SCS 模型甚至可能出现反射率大于 1 的异常值,不宜选择;3. 在通过采样获得经验参数的情况下,Minnaert 模型对样点选取较为敏感,而 SCS + C 和 b 模型对样点选取的敏感性较低。在较大范围的地形复杂山区反演地表反射率时,SCS + C 和 b 模型更合适。此外,从 DEM 数据、大气校正模型、地表植被类型方面分别探讨了其对地表反射率的影响并提出了改进建议。

**关键词:** 地形校正; 地表反射率; 复杂地形

中图分类号: P931.91

文献标志码: A

地表反射率表征地球表面对太阳辐射的反射能力,是揭示地物目标本质的最有用信息<sup>[1]</sup>,直接关系到诸如植被指数、叶面积指数、FPAR 指数等各种地生物物理量的估计<sup>[2]</sup>,对于定量遥感有着重要意义。

在地形条件复杂的山区,地形效应对遥感影像中地表反射率反演的影响不可忽略。山区不同位置的像元由于受太阳、大气和地形等多种因素的影响,接收到的太阳辐射有很大的差别,造成有些影像区处于阴影覆盖下,而另一些却处于过度感光状态<sup>[3]</sup>,导致了“同物异谱”和“异物同谱”现象的出现<sup>[4-5]</sup>,这对地物信息提取造成了不利影响。地形

校正就是通过各种变换,将所有像元的反射率变换到某一参考平面上(通常取水平面),从而消除由于地形起伏而引起的像元反射率的变化,使像元反射率更好地反映地物光谱特性<sup>[3]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外研究者探索了多种地形校正模型用于减小或消除山区遥感图像中地形效应的影响。国外早期比较理想的地形校正模型包括 Teillet - 回归校正<sup>[6]</sup>、Minnaert 校正<sup>[7]</sup>、Cosine 校正<sup>[6]</sup>等。但他们也存在一些缺点,如 Teillet - 回归校正模型缺乏物理意义,代表性差<sup>[4]</sup>; Minnaert 校正模型对于地形起伏较大的地区校正精度较低<sup>[5]</sup>; Cosine 校正模型则有阴影区过度校正的现

收稿日期(Received date): 2013-08-20; 修回日期(Accepted): 2013-09-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41161002),国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403200)。[Supported by National Natural Science Foundation Program(41161002),National Basic Research Program of China(973 Program)[2006CB403200].]

作者简介(Biography): 穆悦(1988-),女,河南信阳人,硕士研究生,研究方向:地图学与地理信息系统。[Mu Yue(1988-),female,postgraduate major in Cartography and geography information system] E-mail: gfjiyue@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 安裕伦(1957-),男,贵州贵阳人,教授,硕士生导师,研究方向:自然地理学、GIS 和环境遥感研究。[An Yulun(1957-),male,professor,Master Tutor major in physical geography,GIS and environmental remote sensing.] E-mail: anyulun@126.com

象<sup>[4]</sup>。随后针对这些缺点,相继出现一些改进及新模型,如 C 模型<sup>[6]</sup>、Cosine - C 模型<sup>[8]</sup>、Cosine - b 模型<sup>[9]</sup>、SCS 模型<sup>[10]</sup>、SCS + C 模型<sup>[11]</sup>、b 模型<sup>[12]</sup>等。近年来,国内对地形校正模型研究也取得了一定的进展,如高永年等<sup>[3]</sup>提出了变经验系数校正模型(VECA)。元雪勇等<sup>[13]</sup>提出了一种改进的山地大气辐射校正模型,能够同时有效消除 TM 数据的大气与地形影响。闻建光等<sup>[14]</sup>发展了基于方向反射的地形影响消除和地表反射率计算模型。以上模型研究大多与模型本身有关,但对模型对比及适宜性的研究较少,尤其针对大区域复杂地形山区的模型间对比及适宜性的研究较少。高永年等<sup>[3]</sup>、段赛仙等<sup>[15]</sup>探讨了在复杂地形区进行地形校正时模型存在的问题和适合的模型,但是他们针对的是辐亮度进行的分析,对于有更大应用范围,更深层物理含义的地表反射率没有进行深入研究。而从辐射传输方程入手的各种消除大气和地形影响的地表反射率计算模型<sup>[13-14,16-17]</sup>,参与对比的地形校正模型又较少。

针对以上问题,本文利用当前国内外主要的 10 种地形校正模型,即 Teillet - 回归模型、b 模型、VECA 模型、Minnaert 模型、Cosine 模型、C 模型、Cosine - C 模型、Cosine - b 模型、SCS 模型、SCS + C 模型,对梵净山区的 TM 影像进行地形校正的对比实验。通过将不同地形校正模型的地形校正效果进行对比分析,评价不同地形校正模型对采样的敏感性,以发现在大范围地形复杂的山区应用某些模型进行地表反射率的反演时可能存在的问题,为地形复杂山区地形校正模型的选择及应用提供参考,对定量遥感研究有一定的实际意义。

## 1 研究区概况

研究区域为贵州省东北部的铜仁地区江口县(图 1),地处贵州高原向湘西丘陵过渡的梵净山区,位于  $108^{\circ}30' \sim 109^{\circ}06'E$ ,  $27^{\circ}27' \sim 27^{\circ}58'N$ ,面积约  $1\,800\text{ km}^2$ 。地势由西、北、南三方向东倾斜,地势起伏较大,地形复杂,海拔在  $297 \sim 2\,593\text{ m}$  之间,平均海拔  $799.425\text{ m}$ ,最大坡度  $72.298^{\circ}$ ,平均坡度为  $10.935^{\circ}$ 。江口县属于亚热带季风湿润气候区,垂直差异明显,年均气温  $16.2^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $1\,369.6\text{ mm}$ ,土地覆被以林地和灌木林地为主。

## 2 数据与处理

### 2.1 DEM 数据获取及坡度、坡向计算

DEM 数据采用 ASTER GDEM V1 数据,空间分辨率  $30\text{ m}$ ,景号为 ASTGTM\_N27E108M 和 ASTGTM\_N27E109O,进行了拼接处理,并在 ArcGIS 中生成了坡度和坡向。

### 2.2 遥感数据获取及地表反射率计算

采用 2010-11-01 获取的 Landsat-5 TM 遥感影像,轨道号为 path 126/row 40,太阳高度角为  $44^{\circ}$ ,方位角为  $151^{\circ}$ 。影像无云层覆盖,中心位置为  $108^{\circ}23'46.0898''E$ ,  $27^{\circ}25'51.3053''N$ ,空间分辨率为  $30\text{ m}$ 。

运用 ERDAS 的 Autosync 模块进行了自动几何纠正,误差控制在 0.5 个像元以内,结合头文件信息,采用陈静提出的方法<sup>[18]</sup> [公式(1)、(2)]对影像头文件中 GAIN/BIAS 进行转换后,得到标准单位的

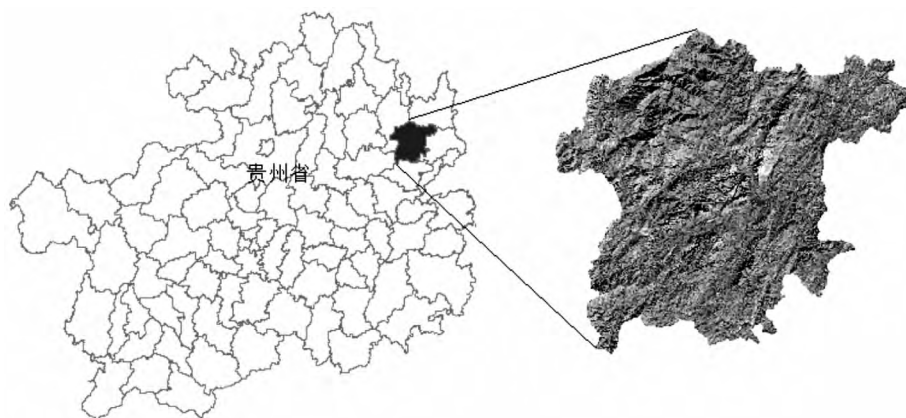


图 1 研究区域

Fig. 1 Research area

GAIN/BIAS 参数(表 1) 在 ENVI 4.7 中进行辐射定标。随后在 ENVI 4.7 中运用 fast line of sight atmospheric analysis of spectral hypercubes( FLAASH) 大气校正模型<sup>[19]</sup>对影像进行大气校正,得到地表反射率数据。其中第 7 波段的数据有小部分负值,对异常值进行了掩膜,运用 IDL 编程进行了参考反距离权重方法的线性插值。

$$Gains = Gain \cdot 10/W_i \quad (1)$$

$$Biass = Bias \cdot 10/W_i \quad (2)$$

式中  $Gains$ : 标准单位的增益 [ $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ];  $Biass$ : 标准单位的偏置值 [ $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ];  $W_i$ : 波段宽度( $\mu m$ ),第 1~5 波段和第 7 波段的宽度分别为 0.066、0.082、0.067、0.128、0.217 和 0.252。

表 1 增益和偏置取值  
Table 1 Values of Gain and Bias

Gain/Bias values of Landsat-5 TM		
波段 Band	增益 Gain	偏置 Bias
1	0.753 892	-1.515 152
2	1.425 758	-2.829 268
3	1.031 232	-1.164 179
4	0.863 269	-1.507 813
5	0.117 967	-0.368 664
7	0.069 055	-0.158 730

2.3 地形校正经验参数计算

利用 IDL 编程,在研究区域随机选取了 10 000 个样点导出在 SPSS 中进行线性回归,计算了地形校正所需的各种经验参数(表 2)。

3 研究方法

3.1 地形校正方法

利用 IDL 编程,分别采用 Teillet-回归模型、b 模型、VECA 模型、Minnaert 模型、Cosine 模型、C 模型、Cosine-C 模型、Cosine-b 模型、SCS 模型、SCS+C 模型(表 3)对研究区 TM 影像的地表反射率进行了地形校正,并对出现的反射率大于 1 的异常值进行掩膜和参考反距离权重方法的线性插值。

$$\cos i = \cos z \cdot \cos S + \sin z \cdot \sin S \cdot \cos(\Phi - A) \quad (3)$$

$$\rho = b + m \cdot \cos i \quad (4)$$

$$\log \rho = b_2 + m_2 \cdot \cos i \quad (5)$$

$$\log(\rho \cdot \cos S) = \log \rho_m + k \cdot \log(\cos S \cdot \cos i) \quad (6)$$

式中  $\rho_m$ : 校正后地表反射率(%); $\rho$ : 校正前地表反射率(%); $\rho_a$ : 校正前地表反射率均值(%); $i$ : 太阳入射角( $^\circ$ ); $z$ : 太阳天顶角( $^\circ$ ),为太阳高度角余角; $\Phi$ : 太阳方位角( $^\circ$ ); $S$ : 坡度( $^\circ$ ); $A$ : 坡向( $^\circ$ ); $m$ (或  $m_1$ ): 回归线(4)的斜率(无量纲); $m_2$ : 回归线(5)的斜率(无量纲); $b$ (或  $b_1$ ): 回归线(4)的截距(无量纲); $x$ :  $\rho$  与回归线(5)的偏离度(无量纲)  $x = \rho - (b_1 + m_1 \cdot \rho_m)$ ;  $c$ : 经验系数(无量纲)  $c = b/m$ ;  $\cos_a i \sim \cos i$  的均值(无量纲); $k$ : Minnaert 系数(无量纲),介于 0 到 1,是回归线(6)的斜率。

3.2 不同地形校正模型对采样的敏感性评价方法

由于研究区域较大,本研究采用的地形校正经验参数由随机选取的 10 000 个样点计算得到,只根据样点在地形校正前后的  $m$  值和  $r$  值进行比较分析,不能代表整个研究区(行列号 1997×1820)的地形校正结果,因此利用采样获得的经验参数,对不同地形校正模型在采样区域(10 000 个样点)和非采样区域(10 000 个样点)得到的地形校正前后的  $m$  值和  $r$  值进行对比,比较不同地形校正模型对采样的敏感性。

3.3 地形校正效果对比分析方法

表 2 研究区 Landsat-5 TM 影像各波段地形校正经验参数

Table 2 Empirical parameters used in research area for the Landsat-5 TM band 1~5,7

经验参数	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 7
Empirical parameters	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
b	0.016	0.021	0.017	0.046	0.013	0.001
m	0.028	0.046	0.047	0.252	0.210	0.040
$m_2$	0.754	0.948	1.052	1.365	1.676	2.049
k	0.446	0.641	0.429	0.553	0.684	0.570
c	0.571	0.457	0.362	0.183	0.062	0.025
$\rho_a$	0.041	0.055	0.050	0.200	0.141	0.026

表 3 基于 DEM 的地形校正模型  
Table 3 Topographic correction models requiring DEM data

模型类型 Model types	地形校正模型 Topographic correction models	公式 Formula
统计 - 经验模型 Statistics - empirical model	Teillet - 回归 Teillet - regression	$\rho_m = \rho - m \cdot \cos i - b + \rho_a$
	b	$\rho_m = \rho + (m_1 + x) \cdot (\cos z - \cos i)$
		$\rho_m = \rho \cdot \exp [m_2 \cdot (\cos z - \cos i)]$
	VECA	$\rho_m = \rho \cdot \rho_a / (m \cdot \cos i + b)$
非朗伯体反射模型 Non - Lambertian reflection model	Minnaert	$\rho_m = \rho \cdot \cos^{1-k} S / \cos^k i$
	Cosine	$\rho_m = \rho \cdot \cos z / \cos i$
朗伯体反射模型 Lambertian reflection model	C	$\rho_m = \rho \cdot (\cos z + c) / (\cos i + c)$
	Cosine - C	$\rho_m = \rho + \rho \cdot (\cos_a i - \cos i) / \cos_a i$
	Cosine - b	$\rho_m = (\rho - b) \cdot \cos z / \cos i$
	SCS	$\rho_m = \rho \cdot \cos z \cdot \cos S / \cos i$
	SCS + C	$\rho_m = \rho \cdot (\cos z \cdot \cos S + c) / (\cos i + c)$

1. 从视觉上对比研究区域的地形校正效果图 , 影像整体色调和饱和度是否趋于一致 ,光照面山坡反射率是否得到压制而阴影面山坡反射率得到增强 ,是否很好地恢复了原影像阴影隐藏下的地物类型<sup>[20]</sup>。

2. 线性回归拟合方程可以表示反射率与入射角余弦值之间的关系 ,其线性方程的斜率 m 以及相关系数 r 能在一定程度上反映地形校正的效果 ,斜率和相关系数越小 ,说明地形校正的效果越好<sup>[14 21-23]</sup>。通过对样点在地形校正前后的 m 值和 r 值对比 ,分析各地形校正模型的校正效果。

3. 通过对比不同地形校正方法在采样区域和非采样区域得到的地形校正前后的 m 值和 r 值 ,分析采样对不同地形校正模型地形校正效果的影响。

4 结果与分析

4.1 特殊值分析

当坡度值为 0°时 ,从理论上讲不存在地形效应 ,应该无需进行地形校正 ,在这一方面对各地形校正模型进行了验证。坡度值为 0°时 ,太阳入射角即为太阳天顶角 ,代入各地形校正模型的公式(见表 3)进行演算 ,发现大部分地形校正模型的计算结果为原始地表反射率;与此同时 ,Minnaert 模型计算结果为  $\rho / \cos^k z$  ,k 值介于 0 和 1 之间 ,计算得到的地表反射率大于原始地表反射率 ,在本研究区最大为原始地表反射率的 1.4 倍左右;而 Teillet - 回归模型的计算结果为  $\rho - m \cdot \cos i - b + \rho_a$  ,VECA 模型的计

算结果则为  $\rho \cdot \rho_a / (m \cdot \cos i + b)$  ,根据公式(4) ,计算结果都接近影像地表反射率的均值。这说明应用 Minnaert 模型、Teillet - 回归模型和 VECA 模型在坡度为 0°时 ,存在一些问题。

4.2 异常值分析

应用 Cosine 和 SCS 地形校正模型时 ,出现了反射率大于 1 的异常值。根据 Cosine 校正公式 ,由于 cos z 是定值 ,在 cos i 趋于 0 时 ,即太阳入射角接近 90°时 ,得到的反射率值有可能大于 1;SCS 校正公式可以变换为:  $\rho_m = \rho / [1 + \tan S \cdot \tan z \cdot \cos(\Phi - A)]$  ,在  $\tan S \cdot \tan z \cdot \cos(\Phi - A)$  接近 -1 时 ,如坡度为太阳天顶角的余角 ,坡向与太阳方位角相反时 ,得到的反射率值可能大于 1。这两种情况也在研究区得到验证。

4.3 地形校正的视觉对比

为了比较 10 种地形校正模型的效果 ,以波段 4 为例(图 2) ,从视觉效果上可以看出:除了 Cosine - b 校正模型以外 ,其他 9 种地形校正方法都在一定程度上消除了地形的影响 ,但 Cosine 模型和 SCS 模型存在明显的过度校正现象 ,即原本应该是阴影面的地方 ,被校正成比光照面的反射率更高。SCS + C 模型、b 模型、Minnaert 模型、VECA 模型、C 模型、Teillet - 回归模型都较好地降低了阴影面和光照面反射率的差异 ,削弱了山区地形对于地表反射率的干扰。

4.4 地形校正的统计量对比

如表 4 所示 ,地形校正前各波段反射率与 cosi 的回归线 m 值为正 ,而在地形校正之后大多数 m 值

为负,说明各地形校正模型或多或少都存在阴影面反射率过度校正现象。以波段四为例,通过对10种不同地形校正前后的 $m$ 值、 $r$ 值(表4)以及散点图(图3)进行比较发现:校正效果最好的是SCS+C模型,其次是Minnaert模型、 $b$ 模型、VECA模型、 $C$ 模

型、Teillet-回归模型;校正效果较差的是:Cosine- $b$ 模型、SCS模型、Cosine- $c$ 模型、Cosine模型。原因可能是研究区地表覆被类型主要为林地和灌木林地,SCS+C模型针对植被冠层而Minnaert模型针对非朗伯体表面,使得这两个模型在采样区域更为适用。

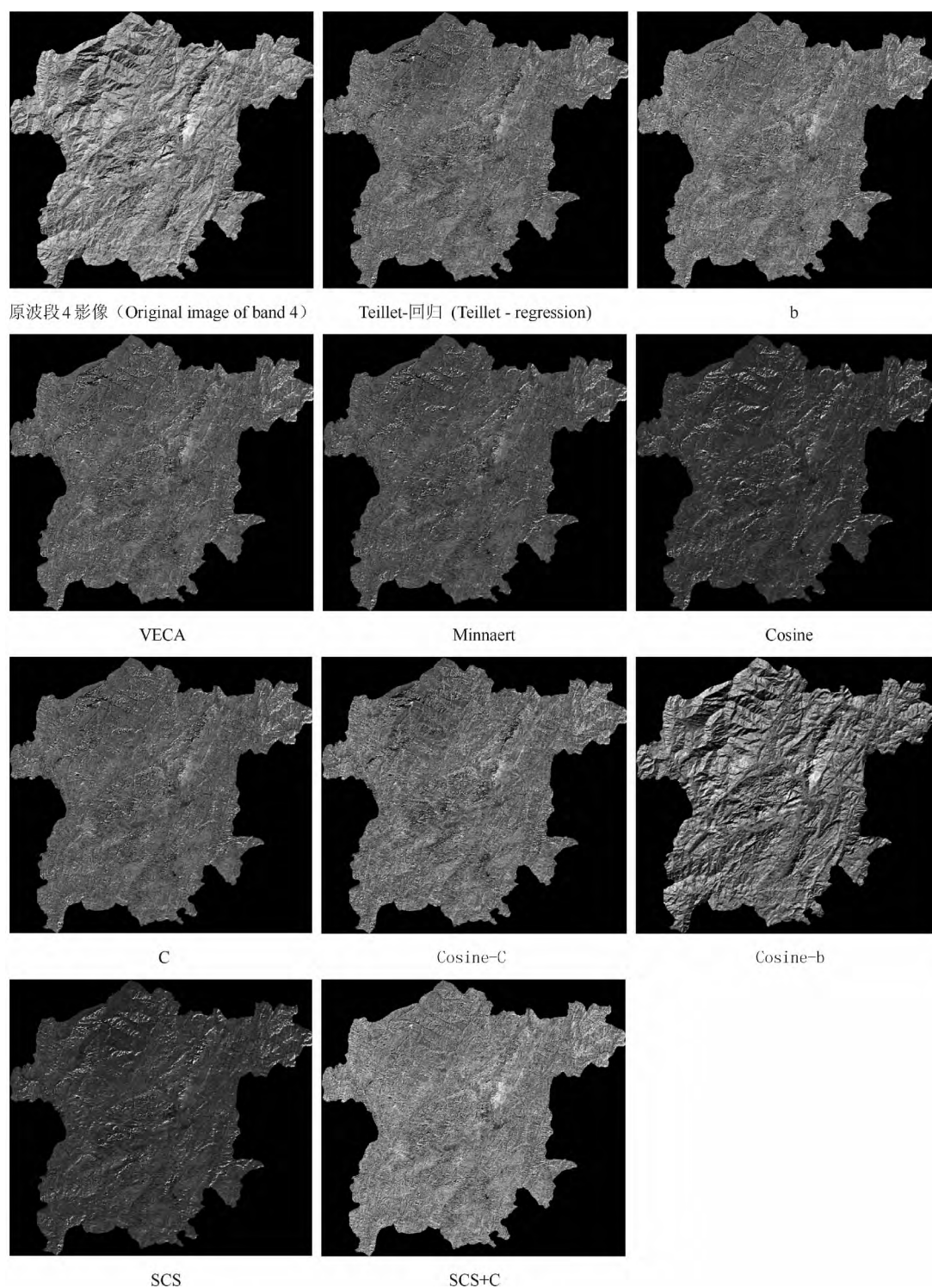


图2 Landsat-5 TM 波段4影像地表反射率地形校正前后的视觉检验

Fig.2 Surface reflectance of band 4 in target area before and after different topographic corrections

4.5 不同地形校正模型对采样的敏感性

以波段 4 为例 ,分别对采样区域和非采样区域进行地形校正前后 m 值和 r 值(表 5) 的比较发现:在非采样区域应用采样获得的经验参数进行地形校正 相比原始波段影像削弱了地形效应的影响;在非采样区各地形校正模型的校正效果排序与在采样区相近 ,但地形校正的效果有所下降。由此说明可以利用采样获得的经验参数来对大区域进行地形校正 ,但是该方法会对地形校正的效果有一定削弱作用。同时在不同模型的校正效果比较中可以发现 ,对于采样较为敏感模型是 Minnaert 校正模型 ,而地形校正效果始终较好且较稳定的模型是 SCS + C 模型和 b 模型。

5 讨论与结论

5.1 讨论

尽管地形校正模型主要应用于地形复杂 ,坡度较大的区域 ,但是这些地区也存在一些坡度为 0°的像元。通过将坡度值赋为 0°代入各地形校正模型进行演算 ,发现大部分地形校正模型的计算结果为原始地表反射率 ,这与理论上的结果相符;与此同时 ,Minnaert 模型计算结果大于原始地表反射率 ,存在过度校正的现象;而 Teillet - 回归模型和 VECA 模型的计算结果则接近影像地表反射率的均值 ,与该像元本身的地表反射率无关。

而在应用 Cosine 模型和 SCS 模型时 ,可能出现反射率大于 1 的异常值。根据计算公式推导 ,应用 Cosine 模型在  $\cos i$  接近 0 即太阳入射角接近 90°的像元 ,应用 SCS 模型在  $\tan S \cdot \tan z \cdot \cos(\Phi - A)$  接近 -1 的像元 ,都可能出现反射率大于 1 的异常值。这也进一步说明了这两种模型存在严重的过度校正问题 ,不适合在复杂的地形区使用。

表 4 地形校正前后样点  $\cos i$  与 Landsat - 5 TM 影像各波段反射率值的回归参数  
Table 4 Regression model parameters between Landsat - 5 TM band 1 ~ 5 , 7 surface reflectance and  $\cos i$  of sampling points

校正方法 Correct method	统计量 Regression model parameters	波段 1 Band 1	波段 2 Band 2	波段 3 Band 3	波段 4 Band 4	波段 5 Band 5	波段 7 Band 7
校正前 Before correction	m	0.028	0.046	0.047	0.252	0.210	0.040
	r	0.486	0.539	0.464	0.678	0.632	0.321
Teillet - 回归 Teillet - regression	m	-0.007	-0.005	-0.006	-0.012	-0.012	0.015
	r	0.165	0.079	0.067	0.042	0.047	0.125
b	m	0.000	-0.001	-0.001	-0.004	-0.002	0.017
	r	0.011	0.015	0.014	0.014	0.009	0.136
VECA	m	-0.005	-0.001	-0.001	-0.010	-0.011	0.012
	r	0.038	0.018	0.012	0.036	0.041	0.100
Minnaert	m	-0.001	-0.001	0.000	0.002	-0.011	0.020
	r	0.014	0.012	0.002	0.007	0.026	0.106
Cosin	m	-0.044	-0.054	-0.043	-0.121	-0.043	0.011
	r	0.538	0.464	0.370	0.323	0.136	0.076
C	m	-0.004	-0.001	-0.001	-0.011	-0.011	0.014
	r	0.088	0.018	0.012	0.036	0.036	0.100
Cosin - c	m	-0.025	-0.028	-0.022	-0.049	-0.001	0.017
	r	0.493	0.377	0.245	0.168	0.005	0.147
Cosin - b	m	0.047	0.083	0.086	0.456	0.381	0.098
	r	0.703	0.741	0.666	0.860	0.822	0.539
SCS	m	-0.037	-0.045	-0.036	-0.094	-0.026	0.013
	r	0.530	0.444	0.323	0.281	0.091	0.099
SCS + C	m	-0.003	0.001	0.001	0.002	0.000	0.016
	r	0.058	0.012	0.013	0.005	0.000	0.121

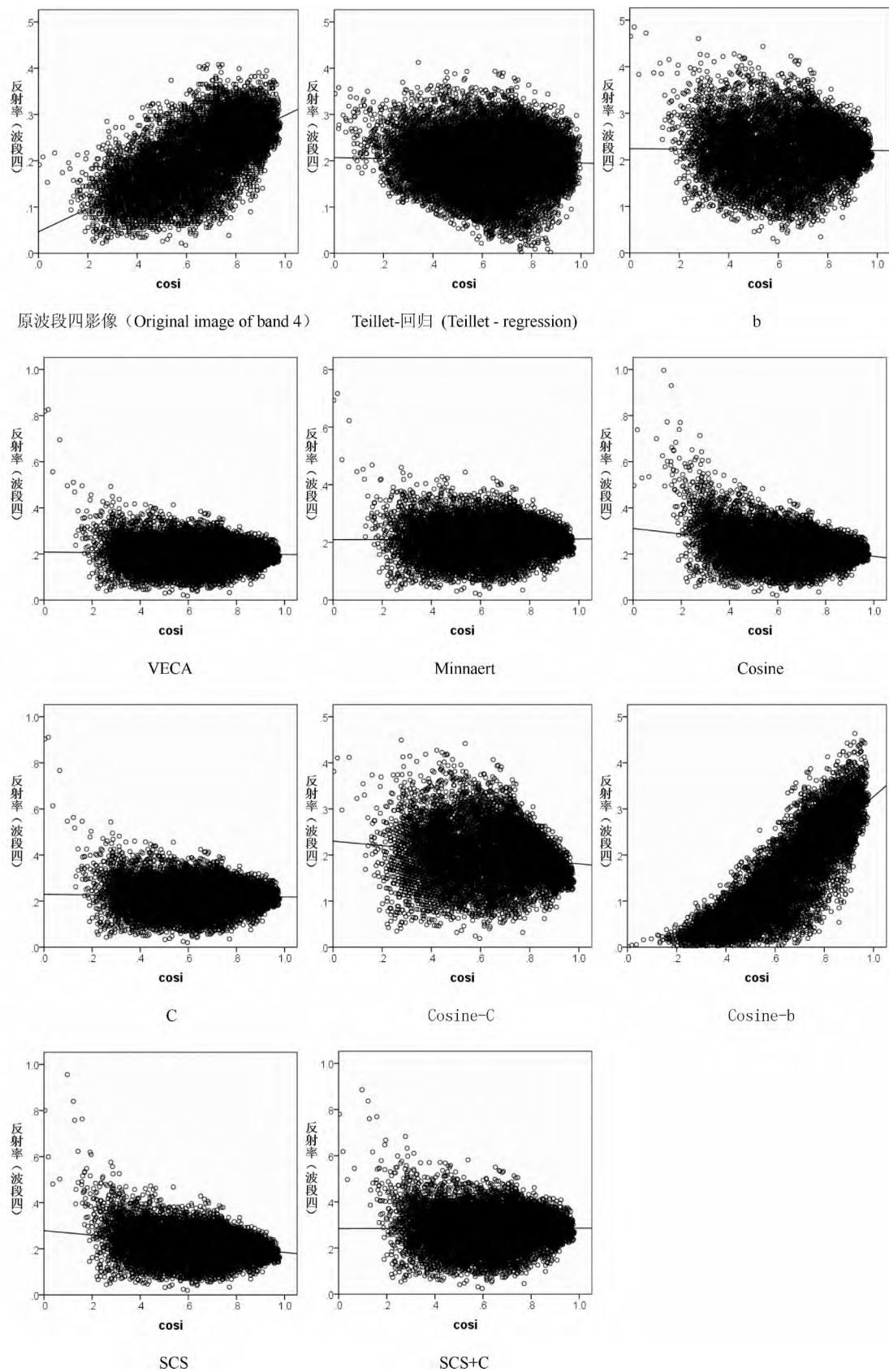


图3 研究区样点地形校正前后  $\cos i$  与 Landsat-5 TM 影像波段4 反射率值的散点图

Fig.3 Scatter plots of Landsat-5 TM band 4 sampling surface reflectance and  $\cos i$  before and after different topographic corrections

表 5 地形校正前后采样与非采样区域 *cosi* 与 Landsat - 5  
TM 影像波段四反射率值的回归参数

Table 5 Regression model parameters between *cosi* and surface  
reflectance of band 4 in sampling and non-sampling areas before  
and after topographic correction

校正方法 Correct method	统计量 Regression model parameters	采样区域 Sampling area	非采样区域 Non-sampling area
原始波段影像 original image	m	0.252	0.214
	r	0.678	0.592
Teillet - 回归 Teillet-regression	m	-0.012	-0.056
	r	0.042	0.185
b	m	-0.004	-0.053
	r	0.014	0.064
	m	-0.010	-0.083
VECA	r	0.036	0.239
	m	0.002	-0.136
Minnaert	r	0.005	0.263
	m	-0.121	-0.266
Cosine	r	0.323	0.499
	m	-0.011	-0.091
C	r	0.036	0.239
	m	-0.049	-0.069
Cosine - C	r	0.168	0.218
	m	0.456	0.403
Cosine - b	r	0.860	0.815
	m	-0.094	-0.223
SCS	r	0.281	0.467
	m	0.002	-0.056
SCS + C	r	0.007	0.168

根据研究区地形校正结果视觉比较和统计分析可以看出,出现过度校正现象较为严重的是 Cosine - b、Cosine、SCS 和 Cosine - C 模型,分析原因可能是后 4 种模型缺乏对地表朗伯体假设的合理修正以及未考虑天空散射辐射和临近地表反射辐射的影响。这与高永年等<sup>[3]</sup>、闻建光等<sup>[14]</sup>、段赛仙等<sup>[15]</sup>的研究结论是一致的。

本文在利用各模型进行地形校正时也发现,在山脊和山谷地区,存在一些地形效应的影响消除不完全的像元。考虑到采用的 DEM 影像和 TM 影像的空间分辨率都为 30 m,在将坡度、坡向、TM 影像、地形校正后的 TM 波段影像进行空间叠加分析后推断,原因可能是一方面在某些山脊和山谷地区,由

DEM 推导的坡度值较低,造成地形校正不足;另一方面 DEM 影像和 TM 影像的配准存在误差,这也会影响地形校正的精度<sup>[3-4,20]</sup>。

与此同时,大气校正对地表反射率反演的影响也不可忽略<sup>[24]</sup>。本研究采用 FLAASH 大气校正模型进行地表反射率的反演,使用了较多的经验参数如能见度、气溶胶类型、大气水汽含量等,而在山区因为海拔不同,大气参数差异较大<sup>[17]</sup>。因此进一步精确反演地表反射率需要依据更精确的大气参数数据<sup>[4]</sup>。

而地表覆盖类型对于地形校正模型的选取也有影响。当前的地形校正模型基于的物理模型主要为朗伯体模型和非朗伯体模型。朗伯体模型假设地表上任何方向均具有相同的反射率<sup>[25]</sup>,这与实际情况不符;非朗伯体模型当前主要为 Minnaert 模型,通过引入 *k* 值来衡量地表的非朗伯体特性,其值随波段和太阳高度角变化,只是描述地表 BRDF 的一个经验系数<sup>[26]</sup>,对于不同地表覆被类型的 BRDF 特性表达有限,尤其当引入前向或后向散射时 Minnaert 模型的算法缺点明显<sup>[27]</sup>。本研究区域的土地覆被类型 85% 以上是林地或灌木林地,考虑到植被的冠层反射,在进行地表反射率的反演时最好能加入 BRDF 校正,这也是本研究未来的努力方向。

5.2 结论

在地形复杂的山区,地形校正和大气校正是精确反演地表反射率的基础,是定量遥感研究的前提条件。本文通过应用 10 种地形校正模型,在较大范围地形复杂的山区进行地形校正的对比实验,反演地表反射率,并对利用采样方法来进行大区域地形校正的效果进行了影响评价,主要得出以下结论:

SCS + C 模型、b 模型、Minnaert 模型、Teillet - 回归模型、VECA 模型、C 模型地形校正效果较好,可用于复杂地形区地表反射率的反演,但是 Minnaert 模型、Teillet - 回归模型、VECA 模型应用于坡度值为 0° 的特殊情况时存在问题;而 Cosine - b、Cosine、SCS 和 Cosine - C 模型存在过度校正现象,应用 Cosine 模型和 SCS 模型时甚至可能出现反射率大于 1 的异常值,因此这四种模型不宜选择。

另外,在大区域利用采样方式获得的经验参数来对整个区域进行地形校正,仍具有地形校正效果,但校正效果相比采样区域会有所下降。同时在不同模型的校正效果比较中发现,地形校正效果始终较好且较稳定的是 SCS + C 模型和 b 模型。因此,建



议采用这两种模型对较大范围的地形复杂山区的地表反射率进行反演。

**致谢:**感谢北京师范大学杨胜天教授在论文思想上的指导和其课题组蔡明勇、张亦弛、罗娅等同学在论文数据处理和写作方面的帮助。

## 参考文献(References)

- [1] Zhao Yingshi. The principle and method of remote sensing application analysis [M]. Beijing: Science Press 2003: 20 - 34 [赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社 2003: 20 - 34]
- [2] Liang Shunlin. Quantitative remote sensing of land surface [M]. Beijing: Science Press 2009: 179 - 209 [梁顺林. 定量遥感 [M] 北京: 科学出版社 2009: 179 - 209]
- [3] Gao Yongnian, Zhang Wanchang. Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data [J]. Geographical Research 2008 27(2): 467 - 477 [高永年, 张万昌. 遥感影像地形校正研究进展及其比较实验地理研究 [J]. 地理研究 2008 27(2): 467 - 477]
- [4] Duan Sibao, Yan Guangjian. 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 [段四波, 闫广建. 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]
- [5] Huang Bo, Xu Lihua. Applied research of topographic correction based on the improved Minnaert model [J]. Remote Sensing Technology and Application 2012 27(2): 183 - 189 [黄博, 徐丽华. 基于改进型 Minnaert 地形校正模型的应用研究遥感技术与应用 [J]. 遥感技术与应用 2012 27(2): 183 - 189]
- [6] 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): 1537 - 1540
- [7] Smith J A, Lin T L, Ranson K J. The Lambertian assumption and Landsat data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1980 46: 1183 - 1189
- [8] Civco D L. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1989 55(9): 1303 - 1540
- [9] Yongnian Gao, Wanchang Zhang. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery [J]. International Journal of Remote Sensing 2009 30(9): 2259 - 2275
- [10] Gu D, Gillespie A. Topographic normal of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy-sensor geometry [J]. Remote Sensing of Environment 1998 64: 166 - 175
- [11] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS + C: a modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2005 43(9): 2148 - 2159
- [12] Vincini M, Reeder D, Frazzi E. An empirical topographic normalization method for forest TM data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 2002: 2091 - 2093
- [13] Qi Xueying, Tian Qingjiu. Modification of atmospheric correction model and surface reflectance retrieval from TM imagery in rugged terrain [J]. Remote Sensing Information 2005(4): 3 - 7 [齐雪勇, 田庆久. 山地 TM 遥感影像大气辐射校正模型改进及地表反射率反演 [J]. 遥感信息 2005(4): 3 - 7]
- [14] Wen Jianguang, Liu Qinhua, Xiao Qing, et al. Modeling the land surface reflectance for optical remote sensing data in rugged terrain [J]. Science in China Series D: Earth Science 2008 51(8): 1169 - 1178
- [15] Duan Saixian, Shi Kun, Lu Zuoying. Research on topographic correction of remotely sensed image in rugged terrain areas based on SRTM3 [J]. Science Technology and Engineering 2012 12(31): 8147 - 8153 [段赛仙, 施昆, 卢作英. 基于 SRTM3 的山区遥感影像地形校正研究 [J]. 科学技术与工程 2012 12(31): 8147 - 8153]
- [16] Wu Ruidong. Correcting satellite imagery for topographic effects [J]. Remote Sensing Information 2005(4): 31 - 34 [武瑞东. 卫星遥感影像数据的地形影响校正 [J]. 遥感信息 2005(4): 31 - 34]
- [17] Zhu Yefei, Zhang Wanchang, Jiang Jianjun. Radiant correction of ETM+ imagery based on DEM and derivation of albedo in Hanjiang river basin [J]. Remote Sensing For Land & Resource 2004, (3): 8 - 13 [朱叶飞, 张万昌, 蒋建军. 基于 DEM 的 ETM+ 图像辐射校正及汉江流域反照率的计算 [J]. 国土资源遥感, 2004 (3): 8 - 13]
- [18] Chen Jing, Yao Jing. The analysis of impaction in calculating surface reflectance of Landsat-5 TM caused by Gain and Bias values [J]. Remote Sensing For Land & Resource: 2010 (2): 45 - 54 [陈静, 姚静. Landsat-5 TM 影像增益偏差值对地面反射率计算影响分析 [J]. 国土资源遥感: 2010 (2): 45 - 54]
- [19] Anderson G P, Felde G W, Hoke M L, et al. MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm: FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) [J]. SPIE Proceedings 2002 4725: 65 - 71
- [20] Wen Jianguang, Liu Qinhua, Xiao Qing. Assessment of different topographic correction methods and validation [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science 2007 43(3): 255 - 263 [闻建光, 柳钦火, 肖青. 基于模拟数据分析地形校正模型效果及检验 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版 2007 43(3): 255 - 263]
- [21] Gao Yongnian, Zhang Wanchang. Simplification and modification of a physical topographic correction algorithm for remotely sensed data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 89 - 94 [高永年, 张万昌. 遥感地形校正物理模型的简化与改进 [J]. 测绘学报 2008 37(1): 89 - 94]
- [22] McDonald E R, Wu X L, Gaccetta P, et al. Illumination correction of Landsat TM data in south east NSW [J/OL]. [2013-08-19]. <http://www.environment.gov.au/land/publications/pubs/illumination.pdf>
- [23] Riano D, Chuvieco E, Salas J, et al. Assessment of Different Topographic Correction in Landsat TM data for mapping vegetation types [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,

- 2003, 41(5): 1056 – 1061
- [24] Law K H, Nichol J. Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery. [J/OL]. [2013 – 08 – 19]. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/347.pdf>.
- [25] Ghulam Abduwasit, Qin Qiming, Zhu Lijiang. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4): 611 – 618 [阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(4): 611 – 618]
- [26] Vincini M, Reeder D. Seasonal changes of Minnaert topographic normalization constants in rugged deciduous [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(4): 1603 – 1605
- [27] Pouch G W, et al. Hyperspherical direction cosine transformation for separation of spectral and illumination information in digital scanner data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(4): 475 – 479

## Comparison of Different Topographic Correction Models for Surface Reflectance Calculating in Rugged Terrain Area

MU Yue<sup>1 2</sup>, AN Yulun<sup>1 2</sup>, WANG Zhe<sup>1 2</sup>, GAO Xiang<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Key Laboratory of Mountain Resources and Environmental Remote Sensing, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Important to quantitative remote sensing, surface reflectance is affected by complicated terrain conditions. Topographic correction can reduce or eliminate the terrain effects of image in mountainous area. By taking Fanjing Mountain of Guizhou, China as study area, using Landsat-5 TM image, DEM, slope and aspect data, and applying 10 kinds of topographic correction models to make comparison in research area, this paper aimed to find problems existing in the application, select suitable model for surface reflectance calculating in rugged terrain area, and provide reference to related research. Results shows that: (1) SCS + C, Minnaert, b, C, Teillet-regression, VECA and C model, with good topographic correction effects, can be used in surface reflectance calculating in mountainous area, while Minnaert, Teillet-regression and VECA model may go wrong where slope is 0°. (2) Since Cosine - b, Cosine, SCS and Cosine - C model may lead to overcorrection, and results of Cosine and SCS model may even be greater than 1, they are not appropriate to choose. (3) If achieving the empirical parameters by sampling, Minnaert model showed higher sensitivity of sample points, while SCS + C and b model lower. The two are more suitable for surface reflectance calculating in large rugged terrain area. Moreover, from DEM data, atmospheric correction model, land cover types, its influence on surface reflectance were discussed respectively and improved suggestions were put forward.

**Key words:** topographic correction model; surface reflectance; rugged terrain