

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 5 - 623 - 09

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000170

高山峡谷地区遥感图像地形校正

陈建珍¹ 何超² 寇卫利³

(1. 西南林业大学 林业调查规划设计研究院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 林业 3S 技术工程研究中心, 云南 昆明 650224;

3. 西南林业大学 计算机与信息学院, 云南 昆明 650224)

摘 要: 为获得适用于高山峡谷地区遥感图像地形校正的方法, 以滇西高山峡谷地区为研究区, 在 6 景 Landsat - 5 TM 图像和 SRTM - 1 数据的基础上, 采用 C 校正、Teillet - 回归、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b 校正和 VECA 校正进行对比实验。从目视效果看, C 校正、Teillet - 回归、b - II 校正和 VECA 校正结果的亮度与校正前基本一致; 在地形阴影严重地区, SCS + C 校正出现过校正, b - I 校正出现校正不足, Minnaert 校正结果较暗且像元值为空, C 校正和 VECA 校正出现彩色合成异常。从标准差看, Teillet - 回归、b - I 校正和 b - II 校正结果的标准差小于校正前; Minnaert 校正结果的标准差大于校正前; C 校正和 VECA 校正在 TM1 - 3 和高太阳高度角 TM4 上校正结果的标准差小于校正前, 在 TM5、TM7 和低太阳高度角 TM4 上校正结果的标准差大于校正前; SCS + C 校正在 TM1 - 3、TM4 和高太阳高度角 TM7 上校正结果的标准差小于校正前, 在 TM5 和低太阳高度角 TM7 上校正结果的标准差大于校正前。从分散指数看, b - II 校正在 31 个波段上的分散指数最小, 占波段总数的 86. 11%。结果表明: C 校正、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b - I 校正和 VECA 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正; Teillet - 回归和 b - II 校正可用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正。相比之下, b - II 校正的效果优于 Teillet - 回归。

关键词: 高山峡谷地区; 地形效应; 地形校正

中图分类号: TP75

文献标志码: A

地球起伏不平的地表地形是造成卫星遥感图像辐射畸变的主要外部因素之一。由其造成的影响通常称为地形效应, 具体来说, 地形效应是传感器对倾斜面元总体辐射亮度的响应相对于水平面元的变化, 它是倾斜面元与光源传感器间相对方位的函数^[1-2]。地形效应严重干扰了遥感图像上地物的光谱信息, 给遥感图像的分析和应用带来严重影响^[3]。因此, 在地形起伏地区遥感图像的分析和应用前, 必须消除或减弱地形效应的影响。

1 遥感图像地形校正研究简述

消除或减弱地形效应的过程可称为地形校正。

具体地说, 地形校正是指通过各种变换, 将所有像元的辐射亮度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图像灰度值(或亮度值)的变化, 使图像更好地反映地物的光谱特性^[2]。对遥感图像地形校正的研究始于 20 世纪 80 年代, 经过 30 多年的发展, 国内外学者提出了大量的校正方法。根据地形校正中是否使用了数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), 可将遥感图像的地形校正方法分为无 DEM 参与的地形校正方法和有 DEM 参与的地形校正方法两大类。无 DEM 参与的地形校正方法具体包括波段比值法^[4]和超球面方向余弦转换法^[5]。有 DEM 参与的地形校正方法可划分为物理模型^[6-8]、统计 - 经验模型(Teil-

收稿日期(Received date): 2015 - 03 - 31; 改回日期(Accepted): 2015 - 06 - 15。

基金项目(Foundation item): 云南省森林灾害预警与控制重点实验室开放基金项目(ZK150001); 西南林业大学科学研究基金项目(111131); 国家自然科学基金项目(31400493; 31260156)。[Forest Disaster Warning and Control Key Laboratory(ZK150001); Foundation of Southwest Forestry University(111131), and National Natural Science Foundation of China(31400493; 31260156).]

作者简介(Biography): 陈建珍(1980 -), 女(汉), 广东连州人, 硕士, 讲师, 主要从事森林测计和林业遥感研究。[Chen Jianzhen(1980 -), female, born in Lianzhou, Guangdong, M. Sc., lecturer, interested in forest mensuration and forest remote sensing.] E-mail: 31362197@qq.com

let - 回归^[9]、b 校正^[10]、VECA 校正^[11]等)、归一化模型(二阶校正^[3]、地形均衡模型^[2]、坡度匹配模型^[12]等)、朗伯模型(余弦校正^[9]、C 校正^[9]、SCS + C 校正^[13]等)和非朗伯模型(Minnaert 校正^[14]、Ekstrand 校正^[15]和基于像元的 Minnaert 校正^[16]等)。

针对校正方法的适用性问题,国内外学者展开了不同校正方法间的比较研究。何超等^[17]对 C 校正、Minnaert 校正和 Teillet - 回归进行比较研究,指出 Teillet - 回归的校正效果较好。Mishra 等^[18]对余弦校正、C 校正、Minnaert 校正、二阶校正和坡度匹配模型进行比较研究,指出坡度匹配模型的校正效果较好。Richter^[19]对 C 校正、Gamma 校正和改进的 Minnaert 校正进行比较研究,指出改进的 Minnaert 校正多数图像上的校正效果较好。Hanson 等^[20]对余弦校正、C 校正、Teillet - 回归、Minnaert 校正和改进的 Minnaert 校正进行比较研究,指出 Teillet - 回归的校正效果较好。王颀等^[21]对余弦校正、C 校正、SCS + C 校正和 Minnaert 校正进行比较研究,指出 C 校正的适用性最广泛,其次是 SCS + C 校正。Ghasemi 等^[22]对余弦校正、C 校正、SCS 校正、SCS + C 校正、Minnaert 校正、改进的 Minnaert 校正和基于像元的 Minnaert 校正进行比较研究,指出基于像元的 Minnaert 校正的效果较好。高永年等^[23]和穆悦等^[24]对余弦校正、改进的余弦校正、SCS 校正、VECA 校正、b 校正、C 校正、Teillet - 回归、SCS + C 校正、Minnaert 校正进行了比较研究,均指出 C 校正、Teillet - 回归、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b 校正和 VECA 校正可用于山区遥感图像的地形校正。

在上述的研究中,大部分是在一景遥感图像的基础上进行的,且涉及高山峡谷地区的较少。因此,本文以滇西高山峡谷地区为研究区,采用 C 校正、Teillet - 回归、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b 校正和 VECA 校正对 6 景不同时相的 Landsat - 5 TM 图像进行校正比较实验,以期获得适用于高山峡谷地区遥感图像地形校正的方法。通过研究可为高山峡谷地区森林遥感定量分析、森林资源遥感调查、森林碳汇、土地利用遥感调查等领域地形校正模型的选择提供参考。

2 研究区概况

研究区位于云南省西部保山市、腾冲县的交界处,地理位置为 98°39'18" ~ 98°51'26"E 24°59'57" ~

25°18'36"N,占地面积 702 km²。研究区中部为高黎贡山脉、左侧为伊洛瓦底江流域、右侧为怒江峡谷。由研究区的 DEM 可得到,研究区海拔在 653 ~ 3 572 m 之间,平均海拔 1 869.58 m;坡度在 0 ~ 71.18°之间,平均坡度 24.60°。

3 实验数据、校正方法及校正过程

3.1 实验数据

3.1.1 遥感数据

为避免云层阴影的影响,实验时尽量选择平均云量较少的图像。在此前提下,共收集到研究区不同时相的 Landsat - 5 TM 图像 6 景(表 1) 数据格式 GEOTIFF,坐标系统 WGS84 投影方式 UTM 投影带 47N,产品级别 L1T,空间分辨率 30 m。

3.1.2 DEM 数据

实验用的 DEM 为 2014 - 09 - 24 公布的 SRTM - 1 标称空间分辨率 30m,数据格式 GEOTIFF,坐标系统 WGS84,未进行投影。

3.2 校正方法

本文使用的 6 种地形校正方法(表 2),都需要用到太阳有效入射角余弦值。太阳有效入射角余弦值按下式进行计算^[2]:

$$\cos i = \cos z \cdot \cos s + \sin z \cdot \sin s \cdot \cos(\varphi_x - \varphi_n)$$

式中 z 为太阳天顶角,与太阳高度角互余; φ_x 为太阳方位角; s 为坡度; φ_n 为坡向。

3.3 校正过程

3.3.1 遥感图像预处理

研究区 TM 图像已做过精确的几何校正,且坐标系统与 DEM 相同。因此,不需要对遥感图像和 DEM 进行配准处理^[25]。在 ENVI 中,按研究区范围,从 6 景图像中剪裁出研究区的图像,并将其数据格式转换为 ESRI GRID 格式。

3.3.2 DEM 预处理

为获得正确的坡度信息,须对 DEM 进行投影。在 ARCGIS 中,按遥感图像的投影信息对其进行投影。

3.3.3 校正处理

在 ARC/INFO WORKSTATION 中,采用 AML 语言(Arc Macro Language)编程完成各图像对应 $\cos i$ 的计算(表 3); 求算各校正模型在各景图像上的校正参数(以整个研究区图像的像元值和对应的 $\cos i$ 作为线性回归的样本);进行地形校正。

表 1 研究区遥感图像

Tab. 1 Remote sensing images at study area

图像编号 Image number	成像时间 Acquisition time	平均云量 Mean cloud/%	太阳高度角 Sun elevation	太阳方位角 Sun azimuth
1	2001-01-18	0.03	35.835 4	143.683 3
2	2004-03-15	0.01	50.111 6	127.394 7
3	2007-02-20	0.01	45.090 4	139.272 2
4	2010-02-12	0.01	42.380 7	140.390 0
5	2011-01-30	0.02	39.130 3	143.523 7
6	2011-03-13	0.02	47.858 0	134.737 4

表 2 地形校正方法

Tab. 2 Topographic correction methods

校正方法 Correction method	公式 Formula
C 校正	$L_H = L_T \times \frac{\cos z + c}{\cos i + c}$
Teillet - 回归	$L_H = L_T - m \cdot \cos i - b + L_a$
SCS + C 校正	$L_H = L_T \times \frac{\cos z \cos S + c}{\cos i + c}$
Minnaert 校正	$L_H = L_T \cdot \cos^{i-k} e / \cos^k i$
b 校正	b - I 校正 $L_H = L_T \cdot \exp [b_2 \cdot (\cos z - \cos i)]$
	b - II 校正 $L_H = L_T + (m + x) \cdot (\cos z - \cos i)$
VECA 校正	$L_H = L_T \lambda$

注 1: L_H 为校正后的图像; L_T 为校正前的图像, L_a 为校正前图像的平均值 e 为出射角, 当传感器是星下点成像时, e 等于 S ; k 为 Minnaert 常数; $x = L_T - (b + m \cdot \cos i)$; $\lambda = L_a / (m \cdot \cos i + b)$ 。

注 2: Minnaert 校正的线性回归方程为 $\log(L_T \cdot \cos S) = \log(L_H) + k \cdot \log(\cos i \cdot \cos S)$; b - I 校正的线性回归方程为 $\ln L_T = b_2 \cdot \cos i + a$; 其余校正方法的线性回归方程为 $L_T = m \cdot \cos i + b$ 。

表 3 研究区各图像对应的 $\cos i$

Tab. 3 $\cos i$ of each image at study area

图像编号 Image number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
1	-0.503 0	1.000 0	0.537 7	0.261 7
2	-0.271 4	1.000 0	0.698 5	0.211 9
3	-0.350 5	1.000 0	0.645 7	0.231 1
4	-0.396 0	1.000 0	0.615 8	0.240 6
5	-0.452 7	1.000 0	0.577 7	0.251 4
6	-0.299 8	1.000 0	0.675 3	0.220 8

4 结果与分析

4.1 校正结果目视比较

在 ENVI 中, 以相同的方式, 按照假彩色合成方

法($TM5 = R, TM4 = G, TM3 = B$), 显示研究区地形校正前后的图像, 见图 1 ~ 图 6。图中: (1) 为校正前图像; (2) 为 C 校正; (3) 为 Teillet - 回归; (4) 为 SCS + C 校正; (5) 为 Minnaert 校正; (6) b - I 校正; (7) 为 b - II 校正; (8) 为 VECA 校正。

从图中可以看出, 6 种方法都减弱了地形对图像的影响, 校正后图像的三维立体感降低。但是, 各种方法的校正效果不尽相同。

1. 地形校正后图像的平均值应与校正前一致或接近^[26-28], 即校正后图像的亮度应与校正前一致或接近。从图像整体亮度来看, SCS + C 校正和 b - I 校正结果的亮度较校正前暗; Minnaert 校正结果的亮度较校正前亮; C 校正、Teillet - 回归、b - II 校正和 VECA 校正结果的亮度与校正前基本一致。

2. 在地形阴影严重地区, SCS + C 校正出现异常亮点, 说明存在过校正现象; b - I 校正的结果较暗, 说明存在校正不足现象; Minnaert 校正的结果也较暗, 并且这些像元的值是空值; C 校正和 VECA 校正的结果, 出现彩色合成异常像元; Teillet - 回归和 b - II 校正的结果无异常。

3. Teillet - 回归和 b - II 校正的结果相似, 但细察之下可发现, Teillet - 回归的结果在高黎贡山脉顶部附近(即图像中部) 的像元较校正前暗, b - II 校正的结果与校正前基本一致。

4.2 校正前后图像标准差比较

有效的地形校正应能够减小图像的标准差^[26-28], 研究区各图像校正前后的标准差见表 4 至表 9。

从表中可以看出:

1. Teillet - 回归、b - I 校正和 b - II 校正得到的结果, 其标准差较校正前小, 表明: Teillet - 回归、b - I 校正和 b - II 校正可用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正。

2. 经 Minnaert 校正得到的结果, 其标准差较校正前大, 表明: Minnaert 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正。

3. 经 C 校正和 VECA 校正得到的结果, 在 $TM1$ 、 $TM2$ 、 $TM3$ 上的标准差较校正前小, 表明 C 校正和 VECA 校正可用于高山峡谷地区遥感图像可见光波段的地形校正。在 $TM4$ 上, 对于成像时太阳高角度 $< 45^\circ$ 的图像, 其标准差较校正前大; 对于成像时太阳高角度 $\geq 45^\circ$ 的图像, 其标准差较校正前小, 表明 C 校正和 VECA 校正可用于高太阳高度角

高山峡谷地区遥感图像短波长近红外波段的地形校正 不宜用于低太阳高度角高山峡谷地区遥感图像短波长近红外波段的地形校正。在 TM5 上的标准差较校正前大,表明 C 校正和 VECA 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像长波长近红外波段的地形校正。在 TM7 上的标准差较校正前大,表明 C 校正和

VECA 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像中红外波段的地形校正。

4. SCS + C 校正 在 TM1、TM2、TM3 上的标准差较校正前小,表明 SCS + C 校正可用于高山峡谷地区遥感图像可见光波段的地形校正。在 TM4 上除图像 1 外,其标准差较校正前小,总体看 SCS + C 校

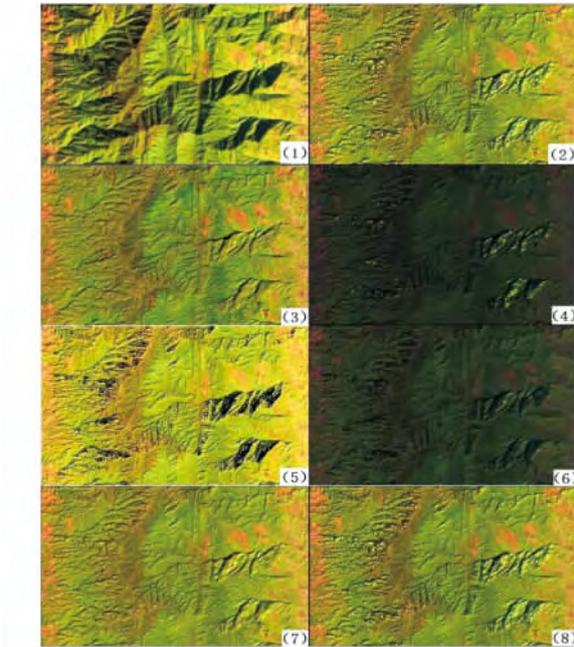


图 1 图像 1 校正前后对比

Fig. 1 Comparison of image 1 between before and after correction

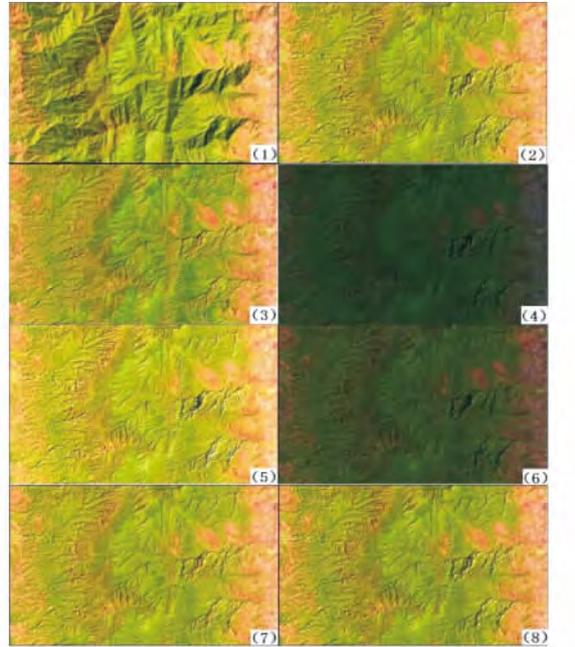


图 2 图像 2 校正前后对比

Fig. 2 Comparison of image 2 between before and after correction

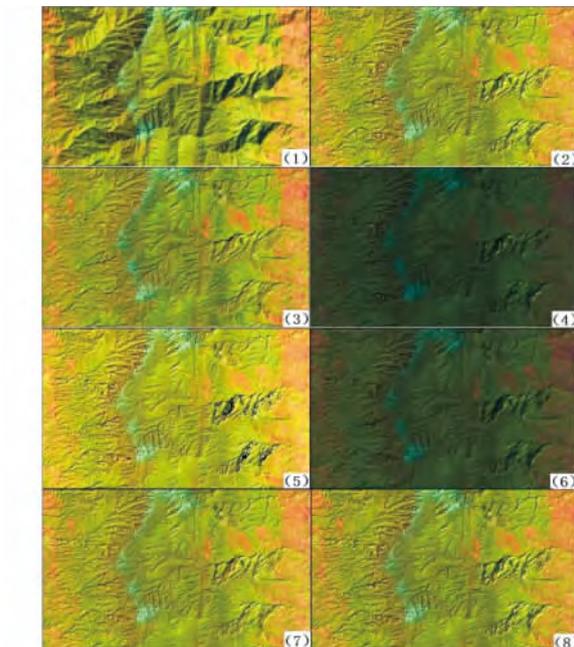


图 3 图像 3 校正前后对比

Fig. 3 Comparison of image 3 between before and after correction

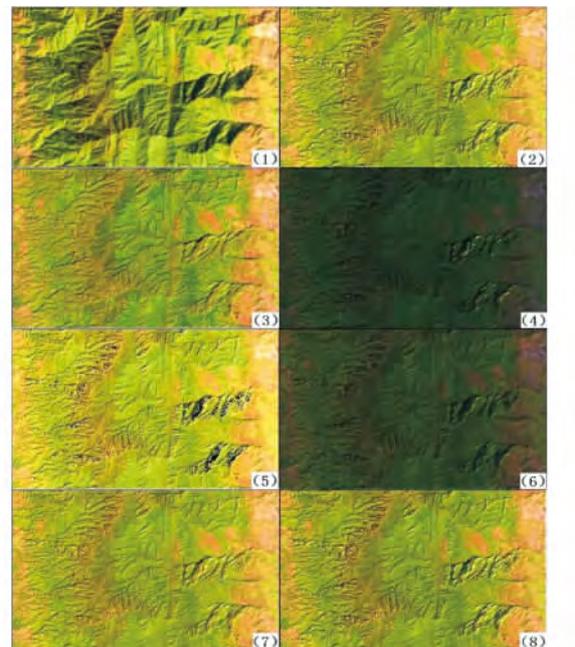


图 4 图像 4 校正前后对比

Fig. 4 Comparison of image 4 between before and after correction

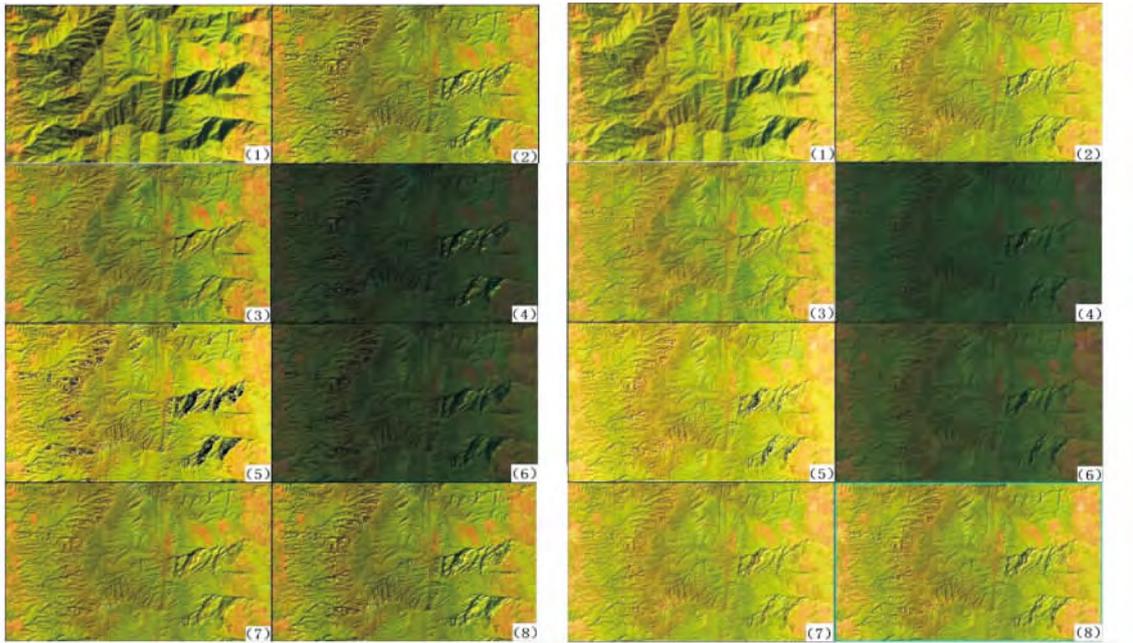


图 5 图像 5 校正前后对比

图 6 图像 6 校正前后对比

Fig. 5 Comparison of image 5 between before and after correction

Fig. 6 Comparison of image 6 between before and after correction

表 4 图像 1 校正前后标准差

Tab. 4 Standard deviation of image 1 between before and after correction

校正方法 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
校正前	7.309 5	5.128 9	7.911 7	19.783 0	25.479 5	11.486 9
C 校正	6.654 2	4.387 9	6.993 8	3 737.031 3	436.604 5	467.792 9
Teillet - 回归	6.664 3	4.398 8	7.086 4	12.483 0	19.017 6	9.821 4
SCS + C 校正	5.583 9	2.997 4	3.955 1	1 098.314 6	115.092 2	160.339 7
Minnaert 校正	8.342 8	5.461 1	8.807 3	37.193 8	86.700 1	20.445 8
b - I 校正	5.638 2	3.098 1	4.224 3	5.715 8	7.039 5	3.925 2
b - II 校正	6.648 0	4.317 6	6.779 8	12.981 6	18.668 3	9.446 1
VECA 校正	6.569 1	4.277 1	6.751 3	1 833.923 7	489.394 5	157.621 5

表 5 图像 2 校正前后标准差

Tab. 5 Standard deviation of image 2 between before and after correction

校正方法 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
校正前	10.177 1	6.606 2	10.989 2	15.191 5	27.654 8	16.219 5
C 校正	9.668 7	6.107 1	10.379 7	12.300 7	36.518 7	17.656 2
Teillet - 回归	9.614 8	6.057 4	10.272 3	11.176 1	23.305 4	14.770 7
SCS + C 校正	7.610 4	3.834 3	4.871 5	4.351 1	7.874 3	3.659 9
Minnaert 校正	11.458 9	7.175 1	12.165 6	17.397 7	37.958 2	21.597 4
b - I 校正	7.780 5	4.093 5	5.776 0	5.567 1	8.799 7	5.515 3
b - II 校正	9.824 9	6.108 3	10.237 2	11.917 0	23.498 8	14.688 9
VECA 校正	9.486 8	5.906 3	9.892 3	11.598 4	34.351 2	16.493 0

表 6 图像 3 校正前后标准差

Tab. 6 Standard deviation of image 3 between before and after correction

校正方法 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
校正前	15.106 3	9.655 7	12.674 4	17.992 1	23.646 7	12.262 7
C 校正	14.799 3	9.293 9	12.308 3	15.413 3	65.789 6	28.377 7
Teillet - 回归	14.780 2	9.281 2	12.188 3	13.727 7	19.005 6	10.836 3
SCS + C 校正	12.010 7	6.049 2	6.516 1	5.572 4	16.939 5	7.797 7
Minnaert 校正	15.314 5	10.036 1	13.742 6	23.035 6	42.783 8	18.132 9
b - I 校正	12.293 1	6.401 1	7.307 1	6.780 4	7.509 1	4.328 0
b - II 校正	14.893 5	9.185 0	12.042 2	14.372 6	19.002 6	10.555 9
VECA 校正	14.549 2	9.003 3	11.789 4	14.534 8	62.065 0	29.804 3

表 7 图像 4 校正前后标准差

Tab. 7 Standard deviation of image 4 between before and after correction

校正方法 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
校正前	9.164 7	6.226 5	10.109 1	17.945 0	27.088 1	13.846 8
C 校正	8.627 5	5.611 7	9.290 8	26.765 2	428.675 5	75.063 2
Teillet - 回归	8.607 2	5.586 1	9.322 3	12.091 1	21.567 5	12.192 6
SCS + C 校正	7.061 7	3.682 7	4.802 0	9.046 2	102.688 2	20.398 2
Minnaert 校正	10.280 5	6.677 2	11.045 3	24.071 6	47.985 7	20.213 9
b - I 校正	7.156 7	3.844 6	5.371 7	5.908 6	7.937 7	4.631 2
b - II 校正	8.710 1	5.568 9	9.054 4	12.891 3	21.230 2	11.737 8
VECA 校正	8.495 6	5.448 9	8.911 2	24.958 1	2 722.146 9	72.108 2

表 8 图像 5 校正前后标准差

Tab. 8 Standard deviation of image 5 between before and after correction

校正方法 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
校正前	8.611 8	5.616 2	7.887 9	18.227 8	22.381 1	9.921 3
C 校正	8.137 5	5.069 7	7.224 6	43.196 2	846.003 7	572.471 2
Teillet - 回归	8.171 8	5.098 4	7.299 4	12.425 0	16.598 8	8.380 3
SCS + C 校正	6.947 8	3.613 8	4.354 1	15.093 5	235.776 5	193.430 5
Minnaert 校正	9.570 4	5.997 1	8.775 5	80.596 3	305.953 7	42.064 1
b - I 校正	7.015 4	3.715 8	4.626 5	6.165 9	6.704 5	3.548 9
b - II 校正	8.065 7	4.991 7	7.046 7	13.007 8	16.527 0	8.100 1
VECA 校正	8.034 7	4.943 9	6.976 8	40.775 8	1 017.443 6	227.445 6

正可用于高山峡谷地区遥感图像短波长近红外波段的地形校正。在 TM5 上只有图像 2 和图像 3 的标准差较校正前小,总体看 SCS + C 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像长波长近红外波段的地形校正。在 TM7 上,对于成像时太阳高角度角 $< 45^\circ$ 的

图像,其标准差较校正前大;对于成像时太阳高角度 $\geq 45^\circ$ 的图像,其标准差较校正前小,表明 SCS + C 校正可用于高太阳高度角高山峡谷地区遥感图像中红外波段的地形校正,不宜用于低太阳高度角高山峡谷地区遥感图像中红外波段的地形校正。

表 9 图像 6 校正前后标准差

Tab. 9 Standard deviation of image 6 between before and after correction

校正前 Correction method	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
原始图像	7.978 1	5.563 0	8.529 9	16.692 6	24.218 0	12.754 4
C 校正	7.550 6	5.103 9	7.977 3	13.548 7	376.519 8	13.693 9
Teillet - 回归	7.530 1	5.075 4	7.935 1	12.172 0	19.536 2	11.371 4
SCS + C 校正	6.298 8	3.507 8	4.438 6	4.871 1	94.389 8	3.637 4
Minnaert 校正	9.406 2	6.087 0	9.344 4	19.685 4	38.144 5	17.357 5
b - I 校正	6.382 6	3.654 2	4.898 8	6.103 0	7.754 9	4.537 1
b - II 校正	7.652 5	5.117 1	7.905 2	12.941 8	19.803 5	11.290 3
VECA 校正	7.439 7	4.962 6	7.663 9	12.779 6	204.822 6	12.807 5

表 10 研究区各图像校正前后的 DI

Tab. 10 DI of each image at study area

校正方法 Correction method	图像编号 Image number	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
校正前	1	0.173 1	0.276 4	0.442 9	0.425 3	0.518 1	0.590 7
Teillet - 回归		0.157 9	0.237 0	0.396 7	0.268 4	0.386 7	0.505 1
b - II 校正		0.155 5	0.226 8	0.366 4	0.263 3	0.357 1	0.460 0
校正前	2	0.180 2	0.262 8	0.427 1	0.275 9	0.428 5	0.563 4
Teillet - 回归		0.170 2	0.240 9	0.399 3	0.203 0	0.361 1	0.513 1
b - II 校正		0.170 7	0.235 0	0.379 2	0.204 1	0.338 8	0.474 3
校正前	3	0.302 6	0.429 2	0.588 7	0.345 9	0.438 8	0.544 5
Teillet - 回归		0.296 1	0.412 5	0.566 1	0.263 9	0.352 7	0.481 1
b - II 校正		0.293 3	0.395 5	0.535 8	0.260 6	0.329 4	0.438 4
校正前	4	0.186 8	0.279 4	0.454 5	0.334 4	0.473 2	0.577 2
Teillet - 回归		0.175 5	0.250 7	0.419 1	0.225 3	0.376 8	0.508 3
b - II 校正		0.174 8	0.242 6	0.390 4	0.226 7	0.346 8	0.458 9
校正前	5	0.191 2	0.286 1	0.442 2	0.379 6	0.462 7	0.528 4
Teillet - 回归		0.181 4	0.259 7	0.409 2	0.258 8	0.343 2	0.446 4
b - II 校正		0.176 8	0.248 0	0.381 5	0.255 8	0.320 5	0.407 0
校正前	6	0.150 8	0.232 7	0.373 1	0.293 7	0.403 4	0.514 0
Teillet - 回归		0.142 4	0.212 3	0.347 1	0.214 1	0.325 4	0.458 2
b - II 校正		0.142 6	0.208 1	0.332 2	0.214 7	0.307 9	0.425 3

4.3 校正前后图像分散指数比较

有效的地形校正应减小图像的分散指数(Dispersion Indices, DI), 且分散指数越小, 校正效果越好, 它可按下式进行计算^[29]:

$$DI = SD/M$$

式中 SD 为图像标准差; M 为图像平均值。

综合 3.1 和 3.2 节的研究结果, 在此仅比较 Teillet - 回归和 b - II 校正结果的 DI(见表 10)。

从表中可以看出: 1. Teillet - 回归和 b - II 校正得到的结果, 其 DI 较校正前小, 表明: Teillet - 回归和 b - II 校正可用于高山峡谷地区遥感图像的地形

校正。2. 对于研究区 6 景图像的 36 个波段来说, b - II 校正 在 31 个波段上的分散指数最小, 占波段总数的 86.11%。表明: b - II 校正的效果优于 Teillet - 回归。

5 讨论与结论

本文采用 C 校正、Teillet - 回归、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b 校正和 VECA 校正, 对滇西高山峡谷地区 6 景不同时相的 Landsat - 5 TM 图像进行地形校正实验, 从目视、标准差和 DI 三个方面对校正

结果进行了比较和分析,主要得出以下结论:

1. C 校正、SCS + C 校正、Minnaert 校正、b - I 校正和 VECA 校正不宜用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正。

2. Teillet - 回归和 b - II 校正可用于高山峡谷地区遥感图像的地形校正。相比之下, b - II 校正的效果优于 Teillet - 回归。

3. 实验虽然已从定性定量的角度对地形校正的结果进行了评价比较,但是若能获取地面大量可靠数据(如土地利用/土地覆盖分布情况、森林蓄积量等),则可从遥感应用的角度进一步验证研究结论。此外,本文的研究结论是否适用于其他地区及其他传感器的数据还有待进一步验证。

参考文献(References)

- [1] Holben B N, Justice C O. The topographic effect on spectral response from nadir - pointing sensor [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, 46(9): 1191 - 1200
- [2] Li Yingcheng. Analysis and correction technique of topographic effect in digital remote sensing image [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 1994 (2): 14 - 19 [李英成. 数字遥感影像地形效应分析及校正[J]. *北京测绘*, 1994, (2): 14 - 19]
- [3] Civco D L. Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(9): 1303 - 1309
- [4] Hoblen B, Justice C. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1981, 2(2): 115 - 133
- [5] Pouch G W, Campagna D J. 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
- [6] Sandmeier S, Itten K I. A physically - based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 708 - 717
- [7] 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]
- [8] Shi Di, Yan Gangjian, Mu Xihan. Optical remote sensing image apparent radiance topographic correction physical model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1039 - 1046 [史迪, 阎广建, 穆西晗. 光学遥感影像表观辐射亮度地形效应纠正物理模型[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1039 - 1046]
- [9] 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
- [10] Vincini M, Reeder D, Frazzi E. An empirical topographic normalization method for forest TM data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002: 2091 - 2093
- [11] Yongnian Gao, Wanchang Zhang. A simple empirical topographic correction method for ETM + imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(9): 2259 - 2275
- [12] Nichol J, Hang L K and Sing W M. Empirical correction of low sun angle images in steeply sloping terrain: a slope - matching technique [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(3): 629 - 635
- [13] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS + C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2148 - 2159
- [14] Smith J A, Lin T L, Ranson K J. The lambertian assumption and landsat data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, 46(9): 1183 - 1189
- [15] Ekstrand S. Landsat TM - based forest damage assessment: correction for topographic effects [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, (2): 151 - 161
- [16] Dengsheng Lu, Hongli Ge, Shizhen He, et al. Pixel - based Minnaert Correction method for reducing topographic effects on a Landsat 7 ETM + image [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2008, 74(11): 1343 - 1350
- [17] He Chao, Yue Cairong, Chen Jianzhen, et al. Terrain correction of India remote sensing satellite image [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 25(7): 59 - 60, 63 [何超, 岳彩荣, 陈建珍, 等. IRS 遥感卫星图像地形校正[J]. *东北林业大学学报*, 2007, 25(7): 59 - 60, 63]
- [18] Mishra V D, Sharma J K, Singh K K, et al. Assessment of different topographic corrections in AWiFS satellite imagery of Himalaya terrain [J]. *Journal of Earth System Science*, 2009, 118(1): 11 - 26
- [19] Richter R, Kellenberger T, Kaufmann H. Comparison of topographic correction methods [J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 184 - 196
- [20] Hantson S, Chuvieco E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(5): 691 - 700
- [21] Wang Sa, Li Xi, Zhang Qi, et al. Analysis on the applicability of the topographic correction models for Landsat images [J]. *Journal of Hua Zhong Normal University: Nation Science*, 2013, 47(4): 571 - 577 [王飒, 李熙, 张奇, 等. Landsat 影像地形校正方法的适用性分析. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2013, (4): 571 - 577]
- [22] Ghasemi N, Mohammadzadeh A, Sahebi M R. Assessment of different topographic correction methods in ALOS AVNIR - 2 data over a forest area [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(5): 504 - 520
- [23] 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[J]. *地理研*

- 究, 2008, 27(2): 467-477]
- [24] Mu Yue, An Yulun, Wang Zhe, et al. Comparison of different topographic correction models for surface reflectance calculating in rugged terrain area [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(3): 257-266 [穆悦, 安裕伦, 王喆等. 不同地形校正模型计算地形复杂山区地表反射率的对比[J]. *山地学报*, 2014, 32(3): 257-266]
- [25] 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]
- [26] Law K H, Nichol J. Topographic Correction for Differential Illumination Effects on Ikonos Satellite Imagery [J/OL]. [2015-03-29]. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/347.pdf>
- [27] Riaño D, Chuvieco E, Salas J, et al. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(5): 1056-1061
- [28] 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[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(2): 183-189]
- [29] Yongnian Gao, Wanchang Zhang. LULC classification and topographic correction of landsat-7 ETM+ imagery in the Yangjia river watershed: the influence of DEM Resolution [J]. *Sensors*, 2009(9): 1980-1995

Topographic Correction of Remote Sensing Image at High Mountain and Gorge Regions

CHEN Jianzhen¹, HE Chao², KOU Weili³

(1. Forestry Survey Planning Design Institute, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Forestry 3S Technology Engineering Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

3. College of Computer and Information, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to obtain suitable method to correct topographic effect in remote sensing image at high mountain and gorge regions, comparison tests were conducted by using C correction, Teillet-regression, SCS + C correction, Minnaert correction, b correction and VECA correction, based on 6 scenes Landsat-5 TM images and SRTM-1 data from high mountain and gorge regions in western Yunnan. From the perspective of visual effect, the brightness of C correction, Teillet-regression, b-II correction and VECA correction images were basically identical with the original images. At the severe topographic effect areas, the SCS + C correction led to overcorrection; the b-I correction caused under-correction; the Minnaert correction created dark pixels with the null value; C correction and VECA correction caused color composite anomaly. From the perspective of standard deviation, the standard deviations of Teillet-regression, b-I correction and b-II correction images were less than that of original images. The standard deviations of Minnaert correction images were greater than that of original images. After corrected by C correction and VECA correction, the standard deviations of TM1-3 and the high sun elevation angle TM4 were less than that of original images, the standard deviations of TM5, TM7 and the low sun elevation angle TM4 were greater than that of original images. After corrected by SCS + C correction, the standard deviations of TM1-3, TM4 and the high sun elevation angle TM7 were less than original images, and the standard deviations of TM5 and low sun elevation angle TM7 were greater than original images. From the perspective of dispersion indices, the dispersion indices of b-II correction done images were the smallest in 31 bands, accounting for 86.11% of total band. The results show that C correction, SCS + C correction, Minnaert correction, b-I correction and VECA correction are not suitable for correction topographic effect in remote sensing image at high mountain and gorge regions. Teillet-regression and b-II correction can be used to correct topographic effect in remote sensing image of high mountain and gorge regions. In contrast, the effect of b-II correction is better than Teillet-regression.

Key words: high mountain and gorge regions; topographic effect; topographic correction