

一种改进的卫星影像地形校正算法

黄微 张良培 李平湘

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要 地形校正的目的主要是补偿由于不规则的地形起伏而造成的地物亮度的变化。由于这种变化会导致相似或同种植被的反射率不一致而影响遥感影像的分类精度,因此,精确的地形校正不仅能提高影像分类的精度,而且还是遥感应用的前提。C校正方法是常用的一种基于影像像素值和太阳入射角余弦值之间线性关系的经验校正方法,但它必须对遥感影像的每一波段都进行像素值和入射角余弦值的线性拟合,这是一个复杂费时的过程。为了改善校正效果和节省校正时间,提出了一种改进的C校正算法,即在不进行线性拟合的情况下也可以达到良好的校正效果。利用三峡地区的TM影像和DEM数据所做的实验证明,该改进方法对影像进行地形辐射校正的结果比原始的C校正算法以及余弦校正都有较大的提高,且优于C校正模型。

关键词 DEM 地形校正 卫星遥感影像

中图分类号: TP751.1 P236 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)09-1124-05

An Improved Topographic Correction Approach for Satellite Image

HUANG Wei, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang

(National Laboratory for Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079)

Abstract The topographic correction refers to the compensation of the different solar illuminations due to the irregular shape of the terrain. This effect causes a high variation in the reflectance response for similar vegetation types. Therefore in remote sensing applications, precise topographic correction not only can improve the classification accuracy, but also is a prerequisite in any multitemporal approach. The C correction method based on the empirical linear correlation between observed radiance L and sun incident angle $\cos\alpha$ is one of the most common correction methods. However, the C correction method requires building linear regression equation between radiance L and sun incident angle $\cos\alpha$ in each band. It is a complex and arduous progress for multispectral image data. In this paper, an improved method was proposed without linear regression, based on the C correction method. It can yield very good results. The experiments using a Landsat TM image and DEM in Three Gorges proved that the results of the improved method are better than the cosine correction method and the C correction method.

Keywords DEM, topographic correction, satellite remote-sensing imagery

1 引言

在遥感应用中,精确的地形校正十分重要,因为其校正的结果不仅可以提高分类精度,而且还是遥感应用的前提^[1]。近十几年来,研究人员做了大量的研究,都尝试规范和减小地形的坡度坡向对影像

的影响^[2]。

众所周知,地表辐射能量和传感器所接收的信息要受到地形起伏的影响,特别是对于山区,由于地形起伏使相同的地物影像呈现出不同的亮度值,这不仅会给影像准确分类带来困难,也会影响地表反射率反演的精度^[3]。目前的地形校正主要是基于太阳入射角的余弦校正,其基本思想是把影像上存

基金项目:国家自然科学基金项目(40471088);国家重点基础研究发展规划“973”项目(2003CB415205)

收稿日期:2004-07-12;改回日期:2005-03-14

第一作者简介:黄微(1980-),女。2002年获武汉大学摄影测量与遥感系学士学位,现为武汉大学摄影测量与遥感专业博士研究生。主要研究方向为高光谱遥感、摄影测量、图像处理。E-mail:lyx800925@163.com

在起伏地形影响的像素的 DN 值校正到水平地面影像的 DN 值。

C 校正是余弦校正中一种具有代表性的校正方法,它是一种线性拟合的方法^[1,4]。其基本思想是通过先选取一定数量的像素,再将像素值和对应的人射角余弦值拟合成一条直线,由此确定人射角余弦值和像素 DN 值的关系;然后将直线投影到与水平地表对应的直线上来对影像进行校正。C 校正能较好地模拟影像像素值和太阳入射角余弦值之间的关系,由于它既能保证影像被校正(即减小由于坡度变化产生的同种地物类型像素值的差异),又可避免由于入射角太低而引起的校正过度的情况,因此该方法是目前最常用的校正方法。但是,由于 C 校正完全是基于样本统计来建立回归方程的校正方法,因此在进行线性拟合时,样本的选择对于算法中参数的确定存在着很大的影响,同时,由于样区的选择和数据拟合是一个复杂的过程,若对每一个波段的数据各自拟合线性方程,则其计算量无疑是十分庞大的,因此,本文提出了一种改进模型,试图在不对提取样本进行线性拟合的情况下也能很好地进行地形校正。

2 改进的地形校正模型

C 校正模型的基本思想是^[4]:对于任意波段影像的像素 DN 值和其对应的太阳入射角余弦值都遵循线性关系。理想情况下,当太阳入射角为零或小于零时,表明该点缺乏太阳光照,则该点的 DN 值应该为零,该拟合直线应通过原点。然而,实际情况是,由于大气散射和地表相邻点反射光折射的缘故^[5],使像素 DN 值和太阳入射角 α 的余弦值满足

$$L_T = a + b \times \cos\alpha \quad (1)$$

其中, L_T 为倾斜地面某点的辐射值, a 、 b 为拟合的线性方程的系数, $\cos\alpha$ 为对应太阳入射角的余弦值,其计算公式为

$$\cos\alpha = \cos\theta\cos\beta + \sin\theta\sin\beta\cos(\lambda - \omega)$$

其中, θ 是像元所在平面的坡度角, λ 是太阳方位角, ω 是像元所在平面的坡向角。其中, θ 和 ω 可通过 DEM 数据计算得出。

对于水平地面,与影像上像素对应的地面太阳入射角就是太阳天顶角,其 DN 值和太阳入射角余弦值的关系为

$$L_H = a + b \times \cos\beta \quad (2)$$

其中, L_H 为水平地面某点的辐射值, $\cos\beta$ 为太阳天

顶角的余弦值。

把倾斜地面对应的直线投影到水平地面对应的直线上,即

$$\frac{L_H}{L_T} = \frac{a + b \times \cos\beta}{a + b \times \cos\alpha} \quad (3)$$

这就得到了以下 C 校对方程:

$$L_H = L_T \times \left(\frac{\cos\beta + c}{\cos\alpha + c} \right) \quad (4)$$

其中, $c = a/b$ 。

由式(4)可以看出,C 校正模型中必须确定参数 a 、 b ,它们是通过像素的 DN 值和其对应的太阳入射角的余弦值进行线性拟合(以下简称 DN 值线性拟合)来得到的。然而,由于每一波段影像各自的特性,使得每个波段影像 DN 值线性拟合方程中的 a 、 b 系数各不相同。对于多光谱遥感影像,对每一个波段影像 DN 值和太阳入射角的余弦值进行线性拟合是一个复杂和费时的过程。解决这一问题的途径是对 C 校正模型进行改进,使其在不进行线性拟合的条件下,也能取得良好的校正效果。

对于 C 校正模型的改进是基于以下 3 个条件:

(1)在同一波段,同类地物的辐射值和其对应太阳入射角的余弦值满足一种线性关系^[6],根据这种线性关系就可以拟合出一条经验线性方程;

(2)阴影像素的 DN 值小于其他非阴影地物像素的 DN 值;

(3)对直线进行平移变换,其直线的基本特性不变^[7]。

那么,对于任意波段影像,其线性拟合方程和式(1)相同。根据条件(3),将式(1)进行平移,并把坐标系的原点移到拟合直线的最小值上,则式(1)就转换为理想条件下的拟合直线:

$$(L_T - L_{min}) = b \times [\cos\alpha - \cos\alpha_{min}] \quad (5)$$

其中, L_{min} 为最小太阳入射角对应点的地表辐射值, $\cos\alpha_{min}$ 为最小的太阳入射角的余弦值。

对于水平地面对应的直线为

$$(L_H - L_{min}) = b \times [\cos\beta - \cos\alpha_{min}] \quad (6)$$

将式(6)除以式(5),即可得到以下改进后的校正方程:

$$L_H = (L_T - L_{min}) \times \frac{[\cos\beta - \cos\alpha_{min}]}{[\cos\alpha - \cos\alpha_{min}]} + L_{min} \quad (7)$$

由条件(2)知,由于 L_{min} 对应地形阴影地区的像素值,因此 L_{min} 可用影像上阴影地区最小的 DN 值代替^[6]。式(7)既保留了 C 校正的模型的基本思想,

又避免了用离散样本求 a 、 b 系数这一复杂的过程。

3 试验与分析

3.1 试验数据

试验中使用的影像数据是湖北省三峡地区的 Landsat-7 TM 影像 (125/039), 影像获取时间为 1999 年 9 月 1 日, 影像中心位置位于东经 $110^{\circ}44'33''$, 北纬 $30^{\circ}18'10''$, 太阳高度角和方位角分别为 58.8° 和 129.4° 。文中选取了一块 $21.9\text{km} \times 14.1\text{km}$ ($732\text{pixels} \times 471\text{pixels}$) 的试验区域, 该地区的地物类型主要是山林。

在地形校正中, DEM 数据的精度和质量对校正结果有很大的影响, 为了保证影像校正质量, DEM 的分辨率不得低于影像的分辨率^[1]。试验中采用的是 1:50000 的 DEM 数据, 数据在 X, Y 方向上分辨率为 25m, 在 Z 方向上分辨率为 0.1m, 满足试验的要求。

3.2 试验过程

试验中分别采用了余弦校正^[1]、C 校正和本文改进方法对影像进行了校正。其试验步骤如下:

(1) 影像和 DEM 配准, 即先通过 13 个地面控制点和二次线性插值对影像进行几何校正, 校正误差为 0.49pixels, 再对 DEM 进行重采样, 使影像和 DEM 的分辨率一致;

(2) 生成入射角影像, 即利用影像头文件中, 卫星影像获取时的太阳方位参数 (包括太阳方位角、高度角) 和重采样的 DEM 来生成太阳入射角余弦值影像 (如图版 I 图 1(b) 所示);

(3) 线性拟合。为了确保拟合的精度, 试验区域中太阳入射角的变化范围应全部包括在选取的样区中, 为此试验选取了 3 个样区 (总共 6265pixels), 样区的大小以及在影像中的位置如表 1 所示, 样区包括了试验区域中太阳入射角余弦值的最小值 0.06 到最大值 0.89 的变化范围, 并且在太阳入射

角变化范围内选择的像素个数分布比较均匀, 以确保 DN 值线性拟合的精度, 然后就可利用样区影像的 DN 值和对应的入射角余弦值求解出每一波段影像校正方程的参数 a, b ;

(4) 利用校正方程对各个波段影像的像素 DN 值进行校正。

3.3 试验结果分析

3.3.1 校正后影像视觉评价

图版 I 图 2 是校正前的影像和 3 种校正方法校正后的影像, 由该图可以看出, 每一种校正方法都达到了地形校正的效果, 地形起伏对像素 DN 值的影响基本上都消除了, 但从余弦校正后的影像上可以看到, 在太阳入射角很低的地方出现了曝光过度的状况 (如图版 I 图 2(b) 中 A 所示区域), 而在 C 校正和改进的方法校正后的影像上则没有出现这种情况。

3.3.2 定量评价

为了进一步对影像校正质量进行客观的评价, 本文采用了线性拟合的方法来进行评估。根据 C 校正的基本思想, 校正后的影像, 如果像素的 DN 值不再受太阳入射角变化的影响, 那么线性回归拟合方程的斜率应该较小, 并且斜率越小, 说明处理后的影像效果越好。因此可采用一个分离系数 r^2 来对校正效果进行评估, 系数越小, 说明校正效果越好^[4]。评估公式为

$$r^2 = (b/a)^2 \quad (8)$$

以第 4 波段影像为例, 图 1 表示 3 个样本区域影像校正前后的 DN 值和太阳入射角余弦值的线性拟合曲线。校正前, 样本区域影像的 DN 值明显地随着太阳入射角的变化而变化, 而校正后影像的 DN 值则随太阳入射角变化明显减小。其中, 余弦校正太阳入射角余弦值接近于零的情况下出现了严重的校正过度, 校正后影像的 DN 值达到了 700; 而对于 C 校正和改进方法校正后影像的像素 DN 值都没有出现这种情况。

比较图 1(c) 和图 1(d) 可以发现, 改进方法校正后影像的 DN 值和太阳入射角的拟合直线明显优于 C 校正。这是由于 C 校正是基于样本统计的校正方法, 其选择的样本对于参数的确定有很大影响的缘故。从图 1(a) 中可以看出, 在选择样本中存在一些太阳入射角余弦值很小, 而 DN 值却很高的像素点, 正是这些点对于 C 校正的结果影响很大。

表 1 样区位置

Tab.1 Sample location

样区编号	样区大小 (pixels)	样区位置 (pixels)			
		起点 (左上角坐标)		终点 (右下角坐标)	
		X	Y	X	Y
1	5841	173	218	231	316
2	176	631	283	638	304
3	248	0	0	8	31

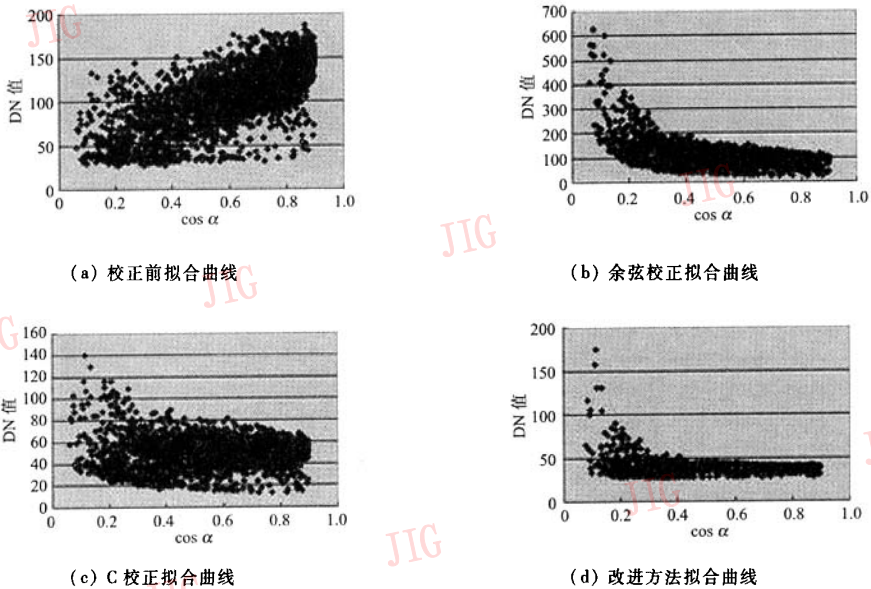


图 1 3 种方法校正后影像的 DN 值与人射角余弦值线性拟合结果比较
 Fig.1 Comparison for fitting results between DN and incident angel cos α

表 2 中列出了选取的样区在校正前和 3 种方法校正后的每一波段影像 DN 值线性拟合直线的斜率值和分离系数 r^2 。由表 2 可以看出,本文改进方法校正后各波段影像 DN 值线性拟合直线的斜率值接近于 0,这表明改进方法校正后的像素 DN 值几乎不受地形起伏的影响,其校正效果优于 C 校正。

3.3.3 阴阳坡向归一化评估

地形的起伏使相同的物地呈现不同的亮度值,尤其在山区,山坡阴面和阳面的像素值变化很大,这是影响遥感影像分类的一个主要问题,而地形校正就是要解决这一问题。为了检验校正的效果,为了更好地说明地形起伏对于像素亮度值的影响,在试验区域中(如图版 I 图 2(a)中 X 处所示)选取了一条跨越山岭阴阳坡面的直线,该直线长 360m,高程的变化范围从 1293.3m 到 1444.2m,太阳入射角余弦值的变化范围从 0.34 到 0.88,并选取了对地形起伏反映明显的 4、5、7 波段影像的 DN 值进行统计,统计结果见图 2。从图 2(b)可以看出,校正前影像 DN 值随太阳入射角变化有明显的变化,阳面的像素 DN 值明显高于阴面。经过校正后,阴阳坡面的像素 DN 值差异明显减小(见图 2(c)、图 2(d)、图 2(e))。从图 2(e)中可以看出,改进方法计算出的山岭阴阳面像素的 DN 值差异最小。

表 2 不同方法影像校正处理结果评价

Tab. 2 Estimation of image processing results

样本区域 各波段影像	校正方法	斜率 b	分离系数 r^2
波段 1	未校正	6.6	0.11
	余弦校正	-129.6	0.94
	C 校正	-2.3	0.03
	改进方法	-0.33	0
波段 2	未校正	20.4	0.58
	余弦校正	-48.7	0.96
	C 校正	0.12	0
	改进方法	0.08	0
波段 3	未校正	16.7	0.65
	余弦校正	-32.1	0.86
	C 校正	-2.2	0.06
	改进方法	-0.46	0
波段 4	未校正	86.2	0.72
	余弦校正	-39.6	0.26
	C 校正	-1.6	0.23
	改进方法	0.84	0.09
波段 5	未校正	84.6	0.38
	余弦校正	-20.7	0.64
	C 校正	-1.7	0.06
	改进方法	0.93	0
波段 7	未校正	38.1	0.19
	余弦校正	-9.5	0.53
	C 校正	-1.9	0.05
	改进方法	-0.93	0

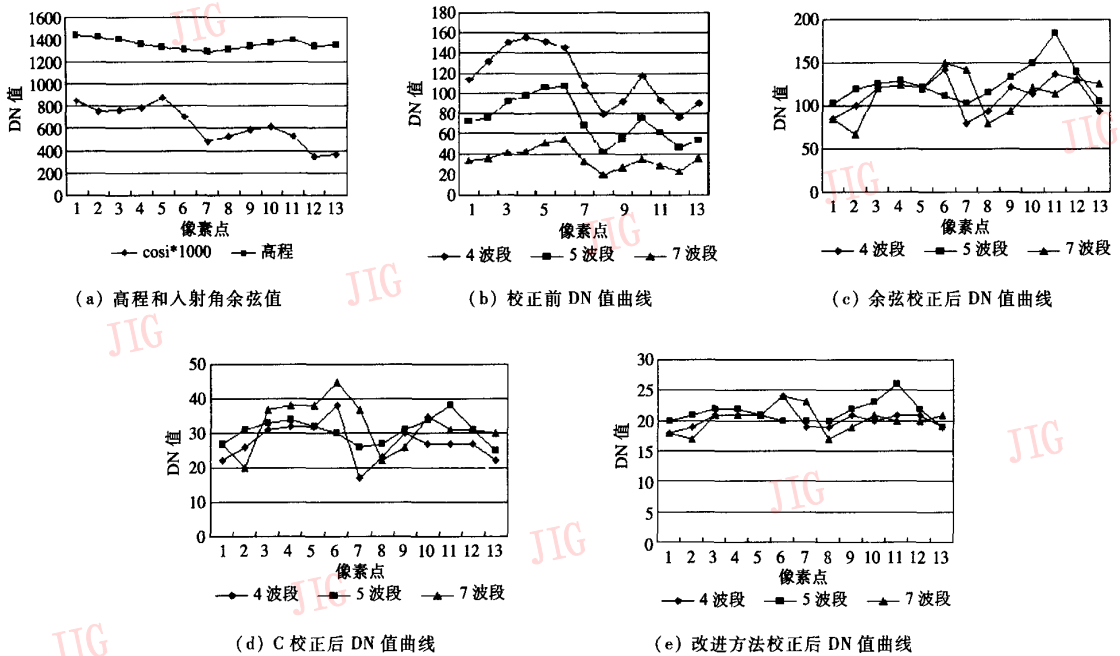


图 2 3 种方法的阴阳坡面归一化比较

Fig.2 Comparison for normalization of sunlit and shadow

从以上分析可以认为,本文提出的改进方法不仅在校正效果上优于 C 校正方法,而且校正过程比 C 校正简洁,实用性更好。

4 结 论

经过以上讨论,可以得到以下结论:

(1) 本文提出的方法是在 C 校正方法的基础上改进的,与 C 校正方法相比,既保留了 C 校正方法的基本思想,又避免了用离散样本求解系数这一繁琐的过程。

(2) 改进方法的校正试验结果优于 C 校正模型,例如,对试验区域处理结果的评价系数 r^2 平均从 0.07 减小到 0.01,4、5、7 波段影像阴阳坡面像素 DN 值均值的差异分别从 5.45、0.88、3.87 减小到 0.67、0.71、0.15,对阴阳坡像素 DN 值进行校正的效果有了显著的提高。试验证明,本文的改进模型是合理、有效的。

参考文献 (References)

1 Klaus I Itten, Peter Meyer. Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(4):764 ~ 770.

2 Feng Jilu, Rivard Benoit, Sanchez-Azofeifa. The topographic normalization of hyperspectral data: implications for the selection of spectral end members and lithologic mapping [J]. Remote Sensing Environment, 2003, 85(2): 221 ~ 231.

3 LIU San-chao, ZHANG Wang-chang, JIANG Jian-jun, et al. Derivation of ground reflectance and Albedo by integration of landsat thematic mapper and DEM in Heihe River Basin, Northwestern China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(5):585 ~ 591. [刘三超,张万昌,蒋建军等. 用 TM 影像和 DEM 获取黑河流域地表反射率和反照率[J]. 地理科学, 2003, 23(5):585 ~ 591.]

4 McDonald Elizabeth Roslyn, Wu Xiaoliang, Caccetta Peter, et al. Illumination correction of landsat TM data in south east NSW [EB/OL]. <http://www.deh.gov.au/land/publications/illumination/pubs/illumination.pdf>, 2002.

5 Yoshikazu Iikura. Topographic Effects Observed in Shadowed Pixels in Satellite Imagery[A]. In: Processings of 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS '02 [C], Toronto, Canada, 2002, 6:3489 ~ 3491.

6 Vincini M, Reeder D, Frazzi E. An empirical topographic normalization method for forest TM data[A]. In: Processings of 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS '02 [C], Toronto, Canada, 2002, 4:2091 ~ 2093.

7 Applied Mathematics Department Tongji University. Higher mathematics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. [同济大学应用数学系. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.]

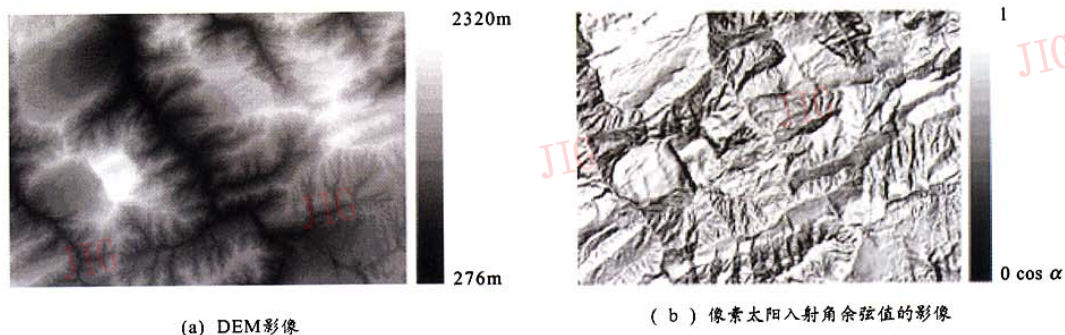


图1 DEM和入射角余弦值影像

Fig.1 DEM and incidence angle images

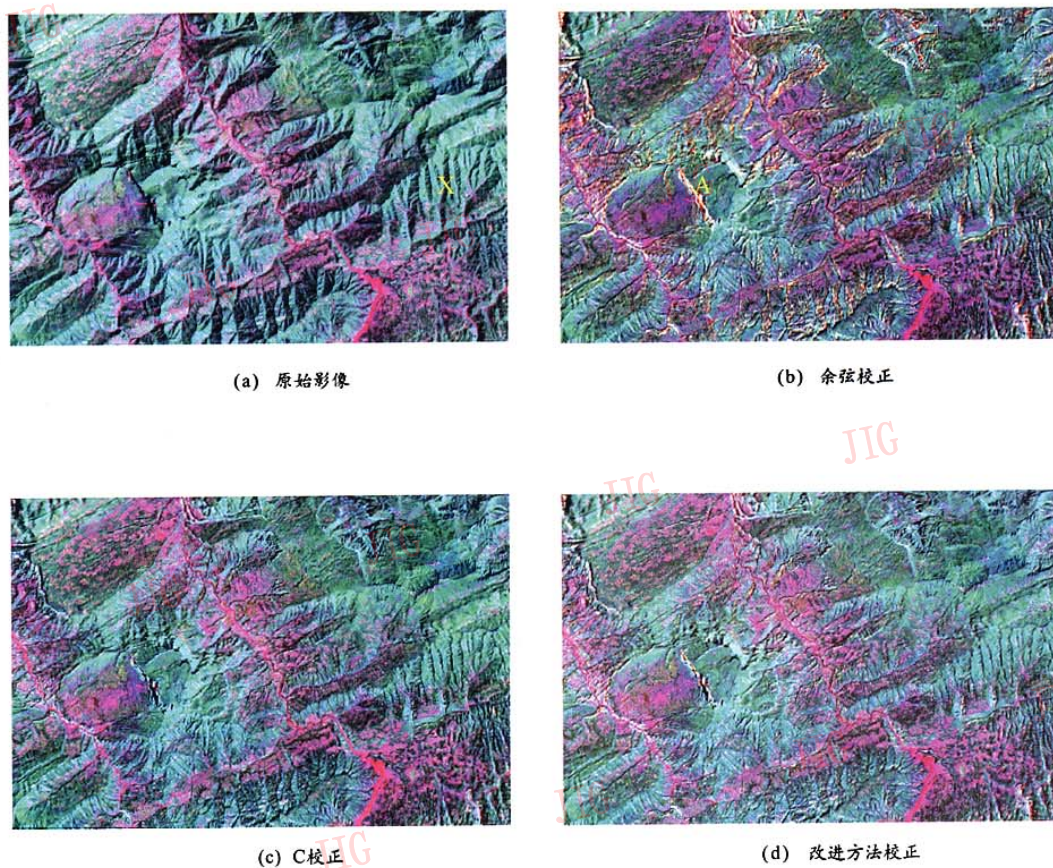


图2 3种方法校正后的影像比较

Fig.2 Image comparison for the three methods