

# SCS + C 地形辐射校正模型的应用分析研究

钟耀武<sup>1,2</sup>, 刘良云<sup>1</sup>, 王纪华<sup>1</sup>, 阎广建<sup>2</sup>

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 在对有森林覆盖的山区影像进行地形辐射校正时, 基于太阳-冠层-传感器(SCS)几何关系的校正模型优于基于太阳-地形-传感器(STS)几何关系的模型。SCS校正模型解释了树木不依赖于地形、观测角和光照入射角而具有向地性生长的本质特性, 但在某些地形区域, SCS与余弦校正同样存在过度校正的问题。为了解决这个问题, 研究者在SCS校正模型中引入C校正系数来解释散射辐射项, 提出了SCS+C校正模型。以北京密云 Landsat 5影像为数据源, 通过目视判别、直方图、定量的统计参数和地物光谱曲线对比等方法, 对SCS+C校正模型与传统的余弦校正、C校正和SCS校正模型进行了对比。结果表明, 4种方法均能在很大程度上消除地形阴影, 更好地反映阴影区域的细节信息; 从总体的光谱特性保真程度来说, 余弦和SCS校正都因过度校正问题表现较差, SCS+C校正最好, C校正次之。

**关键词:** 遥感影像; 地形辐射校正; SCS; SCS+C

**中图分类号:** TP 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2006)04-0014-05

## 0 引言

山区遥感监测除受大气等因素影响外, 地形起伏的影响也很严重。地形起伏异常使传感器的测量值与地物实际光谱辐射不一致, 从而降低了遥感影像质量, 影响了遥感影像的进一步分析应用。定量遥感的兴起, 使得山区遥感影像地形辐射校正越来越受到重视。

地形辐射校正在20世纪80年代就引起了很大关注, 发展了各式各样的校正模型。早期有余弦校正、Minnaert校正、C校正模型以及其它的一些经验统计模型<sup>[1~3]</sup>。这些模型应用到森林覆盖区域, 都基于一个固有的假定, 那就是地形与树木的几何关系在校正前后是一致的。然而, 这个假定是不正确的, 因为树木具有向地生长的本质特性, 即树木的生长总是垂直于地表水平面的, 而并不是像假定的那样垂直于地形坡面生长<sup>[4,5]</sup>。

在余弦校正和C校正发展应用后相当一段时期一直没有发现新的基础性方法, 直到Gu D等提出基于太阳-冠层-传感器(SCS)几何关系的森林地形辐射校正模型<sup>[6]</sup>。SCS校正模型比传统基于太阳-

地形-传感器(STS)几何关系的校正模型在消除森林覆盖区地形影响上更加有效, 模型没有改变太阳和传感器的相对位置、几何关系以及冠层结构, 因而被认为是一个森林区域地形校正的更合理方案。但在应用中发现, 对于某些地形区域, SCS模型与其它模型一样普遍存在过度校正现象, 这主要是没有考虑到散射辐射的影响。为了更好地解释散射辐射, Scott作了进一步的研究, 在SCS模型的基础上提出了SCS+C模型, 他引入半经验的C系数来说明散射辐射, 对SCS模型进行改进<sup>[7]</sup>。

本文以北京密云 Landsat 5影像为数据源, 将SCS+C校正模型与传统的校正模型(余弦校正、C校正和SCS校正)进行对比分析, 探讨SCS+C校正模型的应用特性。

## 1 几种典型的地形辐射校正模型

### 1.1 余弦校正

余弦校正模型由Teillet(1982)提出, 它是一个简单的光学函数, 其基本原理是: 校正后像素接受的总辐射与坡面像素接受的总辐射有一个由入射角(定义为太阳天顶与垂直于坡面的方位夹角)余弦决

定的直接比例关系。

定义  $\gamma_i$  为太阳入射角,  $\cos\gamma_i$  为光照系数, 其计算方法为

$$\cos\gamma_i = \cos\theta_p \cos\theta_z + \sin\theta_p \sin\theta_z \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (1)$$

式中,  $\theta_p$  为坡度角;  $\theta_z$  为太阳天顶角;  $\phi_a$  为太阳方位角;  $\phi_o$  为坡向。

余弦校正模型表示为

$$\rho_H = \rho_T (\cos\theta_z / \cos\gamma_i) \quad (2)$$

式中,  $\rho_H$  为水平地表反射;  $\rho_T$  为斜坡地表反射。

但 Duguay 等学者指出了这种方法存在过度校正的问题, 特别是在低光照参数地区<sup>[8,9]</sup>。这是因为: 余弦校正模型对每一个波段都作同样的参数假定, 常常过低估计了地形光照面的反射率而过高估计了地形背光面的反射率, 结果, 在校正影像中出现异常现象; 余弦模型并没有解释源于大气和地形的散射辐射, 结果, 那些实际只接受到较少直接辐射但较多散射辐射的微弱光照区域, 就会存在过度校正问题, 这在入射角越接近  $90^\circ$  时表现的越为明显。

## 1.2 C 校正模型

C 校正模型是目前应用相对较为广泛的地形辐射校正模型。为了修正余弦校正中存在的问题, 文献[8]提出将一个半经验系数  $C$  应用到余弦校正中, 通过研究崎岖山地的影像数据处理发现, 每一个波段的反射率  $\rho_T$  和  $\cos\gamma_i$  之间存在一个线性相关, 即

$$\rho_T = \alpha_\lambda + b_\lambda \cos\gamma_i \quad (3)$$

式中,  $\alpha_\lambda$ 、 $b_\lambda$  分别为  $\lambda$  波段的经验系数。将这个线性相关应用到余弦校正中, 得出了  $C$  校正模型为

$$\rho_H = \rho_T (\cos\theta_z + C_\lambda) / (\cos\gamma_i + C_\lambda) \quad (4)$$

式中,  $C_\lambda = a_\lambda / b_\lambda$ 。C 校正模型在一定程度上避免了余弦校正模型在低光照参数地区的过度校正问题, 特别是对于地形背光面效果更好。参数  $C$  的值也可以通过经验统计回归线的斜率和截距获得, 该参数通过提高分母的值在  $C$  校正中发挥一个调节作用, 以缩减弱光照像素区域的过度校正问题。

## 1.3 SCS 校正模型

SCS 模型<sup>[6]</sup>在植被覆盖区获得了比余弦校正更好的效果。前面的余弦校正模型和  $C$  校正模型都是基于太阳-地表-传感器三者的几何关系来考虑校正方法的, 可以统称为 STS 校正模型。SCS 校正模型主要是基于太阳-冠层-传感器三者的几何关系来考虑问题, 由于树木的生长是向地性的(垂直于大地水准面), 地形不能控制太阳和树木之间的几何关系, 地形影响的只是树木相对地表的位置关系。SCS

校正模型是基于冠层的校正模型, 与 STS 模型的着眼点不同, 它使光照冠层在从坡面到水平面校正的过程中, 光照方向的变化更符合实际情况。假定来自光照冠层的反射辐射因树木的向地生长特性而大大独立于地形, 光照冠层的总体反射率与其范围成正比。SCS 模型表示为

$$\rho_H = \rho_T \cos\theta_p \cos\theta_z / \cos\gamma_i \quad (5)$$

在 SCS 模型中, 太阳和冠层之间的几何关系在校正前后保持不变, 因此更加符合实际情况, 适合于对森林区域的地形辐射校正。然而, SCS 校正模型也同样由于散射辐射的影响被忽视了, 使得背光区域的坡面存在过度校正问题, 于是迫切需要对 SCS 校正模型进行修正。

## 1.4 SCS + C 校正

SCS 校正出现过度校正问题的原因与余弦校正相似, 当入射角接近  $90^\circ$  时, 校正系数变得很大而引起过度校正。在  $C$  校正中, 参数  $C$  应用到余弦校正中, 仿效天空散射辐射的影响, 具有调节过度校正的作用。于是, Scott 引入  $C$  系数来改进 SCS 校正模型, 提出了 SCS +  $C$  校正模型, 即

$$\rho_H = \rho_T (\cos\theta_p \cos\theta_z + C_\lambda) / (\cos\gamma_i + C_\lambda) \quad (6)$$

选择参数  $C$  主要是由于它在改进余弦校正模型时有效, 同时计算也比较简单。虽然其它用来说明大气散射辐射和地形散射辐射的参数可能会提供更加精确的结果, 但计算量很大且计算时要求输入参数的获取很难实现, 与引入的  $C$  系数相比没有优势。

## 2 试验结果

### 2.1 研究区域选取和数据预处理

研究区域密云县位于北京的东北部, 总面积约  $2\,226.5\text{ km}^2$ , 除了县境中央总面积  $199\text{ km}^2$  的密云水库外, 大多数为山地, 全县森林覆盖率为  $47.33\%$ , 名列京郊之首。山区地形比较复杂, 森林地表覆盖以自然林和经济林为主。试验采用的数据源是 2004 年 10 月 26 日获取的 Landsat 5 卫星影像, 影像成像时太阳天顶角为  $55.1357^\circ$ , 太阳方位角为  $157.4711^\circ$ 。这个时期北京太阳高度较低, 影像受地形影响问题比较突出。

采用 ENVI 4.0 几何校正模块, 以经过几何精校正后的 2003 年 4 月 1 日 Landsat 5 影像为基准, 通过选取 60 个控制点来进行, 纠正误差控制在 0.5 个像元以内, 采用双线性插值方法进行重采样。试验用  $30\text{ m}$  分辨率的 DEM 栅格数据通过  $1:1$  万等高线数

据插值转换得到。利用选择的 DEM 数据计算相应的坡度和坡向, C 系数通过公式(4)、(3)和(1)计算获取。

### 2.2 试验结果比较

#### 2.2.1 目视比较

为了比较 SCS + C 与其它 3 种模型的校正结果, 抽取影像子区, 按照第 5、4、3 波段真彩色组合显示。与原始影像相比, 4 种方法校正后影像的层次感增强, 空间纹理信息提高, 特别是阴影区域的地表信息得到很大程度上的恢复, 原本模糊的阴影区域地表信息变得清晰可见(插页彩片 4), 其中, 余弦校正与 SCS 校正后的影像在阴影区域表现为亮度增强最为

剧烈, 而 SCS + C 与 C 校正后影像在阴影区域则表现得较为柔和。

#### 2.2.2 定量参数比较

遥感影像地形辐射校正效果的定量评价是一项比较复杂的工作, 一般通过多种统计参数的定量分析方法来评价校正图像的质量。目前, 定量评价影像校正效果的统计参数较多, 本文基于阴影区域信息恢复程度和保持校正前影像的光谱性质的标准, 选取图像最大值、最小值、峰值、均值和标准差等 5 个参数, 从试验区原始影像和校正影像部分区域(400 像元 × 400 像元)选取 1~4 波段进行定量参数统计(表 1)。

表 1 地形辐射校正前后影像统计参数值对比

校正方法	波段	最小值	最大值	亮度值范围	峰值	均值	标准差
原始影像	1	36.00	82.00	46.00	48.00	46.21	4.20
余弦校正	1	0.00	254.70	254.70	42.95	55.18	18.14
C 校正	1	35.19	87.62	52.43	46.91	47.70	3.64
SCS 校正	1	0.00	254.23	254.23	39.88	48.60	14.12
SCS + C 校正	1	33.80	82.97	49.17	45.37	46.06	3.64
原始影像	2	10.00	47.00	37.00	20.00	18.98	3.63
余弦校正	2	0.00	244.70	244.70	19.19	22.33	7.33
C 校正	2	9.96	51.38	41.42	19.87	20.00	3.01
SCS 校正	2	0.00	253.86	253.86	16.92	19.62	5.56
SCS + C 校正	2	8.95	46.82	37.87	18.16	18.85	2.95
原始影像	3	9.00	79.00	70.00	30.00	26.24	7.87
余弦校正	3	0.00	253.38	253.38	28.82	30.04	9.04
C 校正	3	9.42	86.54	77.12	28.48	28.15	6.78
SCS 校正	3	0.00	250.12	250.12	24.52	26.51	7.64
SCS + C 校正	3	0.00	157.67	157.67	24.73	26.14	6.74
原始影像	4	3.00	76.00	73.00	37.00	29.47	12.17
余弦校正	4	0.00	254.15	254.15	34.88	32.46	10.88
C 校正	4	0.00	194.04	194.04	35.76	31.93	10.49
SCS 校正	4	0.00	240.00	240.00	31.06	28.67	9.53
SCS + C 校正	4	0.00	226.39	226.39	31.07	28.55	9.44

图像亮度值范围可以描述图像中亮度值的离散程度, 是其在每个波段中最大值和最小值之差。当最大值或最小值是特殊或超常的目标时, 从亮度值范围看其离散程度可能会引起误差。试验区影像在校正后出现了少数奇异值, 在比较前进行了剔除。具体方法是: 把图像中亮度值小于 0 的设置为 0 值, 而图像中大于 255 的值则设置为 255。

从表 1 可以看出, 通过 4 种方法进行地形辐射校正后, 除了第 1 和第 2 波段 SCS + C 校正前后亮度值范围没有大的变化以外, 其余各波段的亮度值分布范围变大, 图像层次感增强。就均值来说, 余弦校正与 SCS 校正后各波段的均值增大, 这主要是因为它们都存在一个过度校正问题, 但 SCS + C 校正后的

影像均值更接近于原始影像均值; 就峰值与均值接近情况来说, SCS + C 校正结果表现最好; 就标准差而言, 4 种方法校正后影像标准差都有减小, 其中 SCS + C 校正后影像标准差减小最为明显。

以上分析表明, SCS + C 校正比其它 3 种方法更适合于北京密云 Landsat 5 影像的地形辐射校正。

#### 2.2.3 地表植被光谱曲线比较

分别选取光照区域植被和阴影区域植被, 考察原始影像与 4 种地形辐射校正后影像的光谱变化情况(图 1)。

如图 1 所示, 光照区域植被光谱特征通过 4 种方法进行地形辐射校正后基本形状都未改变, 而是更好地保持了其原有曲线特征; 阴影区域植被在一

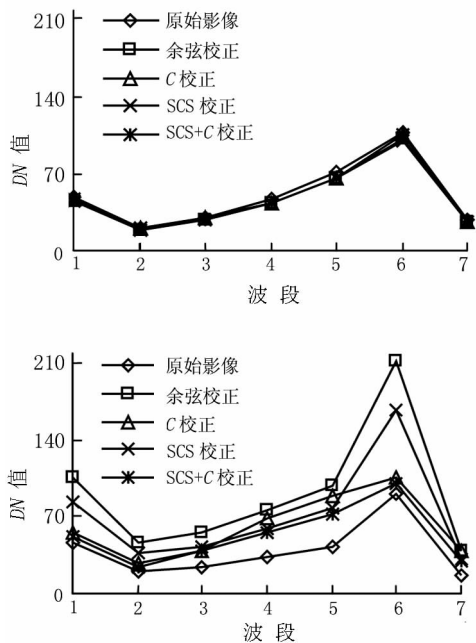


图 1 典型地物光谱曲线对比  
(上:光照区植被;下:阴影区植被)

一定程度上增强了其植被的光谱曲线形状特征,4种方法校正结果差异非常明显。对比阴影区域与光照区域植被的光谱曲线发现,经 SCS + C 校正后的阴影区植被与光照区域植被的光谱曲线最为接近,而其它3种方法校正后的植被光谱曲线相对光照区域植被都有很大程度地变异,其中 C 校正第4和第5波段偏移较大,使得其校正后的影像植被光谱曲线有失真现象。而余弦校正和 SCS 校正后的 DN 值相对光照区域植被的 DN 值在各个波段都有增加,这也印证了余弦校正与 SCS 校正普遍存在的过度校正问题。

分析表明,只有 SCS + C 校正模型既保持了光照区域地物基本特征,同时又更好地恢复了阴影区域地物的解析特征,达到了较好的阴影消除效果。

### 2.2.4 图像亮度值与光照系数散点图比较

图像亮度值与光照系数的相关关系反映了地形对影像亮度值的影响,原始影像中图像亮度值与光照系数的相关性一般都比较好,而地形辐射校正正是为了消除这种相关性。选取图像中 233 个随机像素样本,对第 4 波段的亮度值与对应的光照系数作散点图,并进行线性拟合(图 2),结果发现,原始影像中第 4 波段亮度值受光照系数影响的情形经过地形辐射校正后明显减弱。比较 4 种校正方法,SCS + C 方法最大程度地消除了地形对影像亮度值的影响,效果最好;SCS 和 C 方法也有一定的效果;余弦校正方法效果最差。

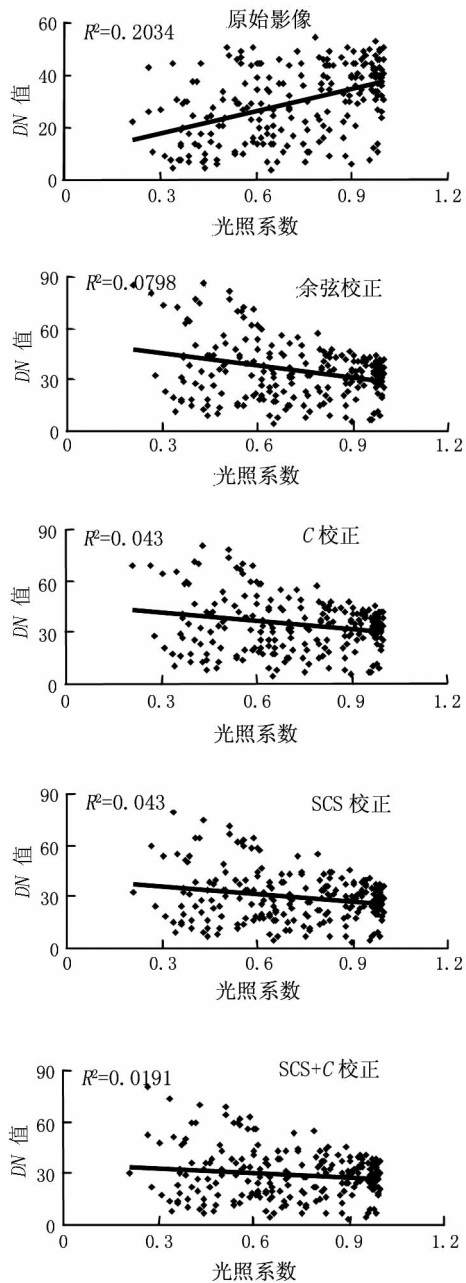


图 2 影像第 4 波段亮度值与光照系数散点图

### 2.2.5 直方图比较

将原始影像与 4 种地形辐射校正模型校正后影像的直方图(第 4 波段)进行对比,如图 3 所示,结果发现,原始影像的直方图在较低以及较高的灰度处形成两个峰值,说明由于坡度以及坡向地形的影响,一部分像元接收的光照不足,而另外一部分却呈现饱和和趋势;4 种校正方法校正后的影像直方图都近似高斯分布,与自然现象中的地物随机特性一致,反映了该地区地物真实统计特性,很好地去除了地形的影响。但是从直方图形状看,4 种地形辐射校正方法没有明显的差异。

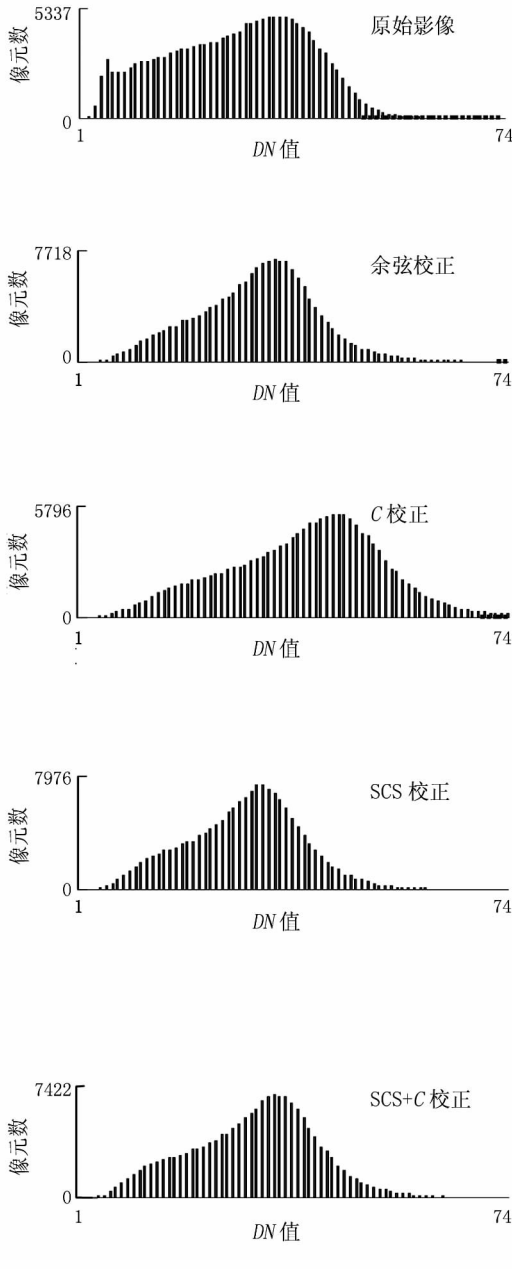


图3 SCS + C 与其它三种模型校正结果直方图对比

### 3 结 论

(1)在4种模型中,SCS + C 模型具有最优的校正效果,最大程度地改善了影像质量,而且符合实际情况,因而更有发展和应用优势。

(2)除了小区域的经验统计模型以外,理论上所有的校正模型在校正坡度大于20°的陡峭山地影像

时都没有很好效果。因为,地形坡度越大的区域,校正方程的分母越小,校正参数值就会越大,从而产生过度校正问题。

(3)SCS + C 校正是在 SCS 校正框架上引入 C 系数,减弱了过度校正问题,同是又保留了 SCS 校正的优点。概括来说,SCS 提供了一种更加符合地表实际的地形辐射校正原理,而 SCS + C 是在这个原理基础上获得的一种具有良好地形辐射校正效果的实践方案。

### 参 考 文 献

[1] Justice C O, Wharton S W, Holben B N. Application of Digital Terrain Data to Quantify and Reduce the Topographic Effect on Landsat Data [J]. Int. J. Remote Sens., 1981, 2 (3): 213 - 230.

[2] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G, On the Slope - aspect Correction of Multispectral Scanner Data [J]. Can. J. Remote Sens., 1982, 8(2): 84 - 106.

[3] Smith J A, Lin T L, Ranson K J. The Lambertian Assumption and Landsat Data [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1980, 46 (9): 1183 - 1189.

[4] Meyer P, Itten K I, Kellenberger T, et al. Radiometric Corrections of Topographically Induced Effects on Landsat TM Data in an Alpine Environment [J]. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 1993, 48(4): 17 - 28.

[5] Colby J D. Topographic Normalization in Rugged Terrain [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1991, 57(5): 531 - 537.

[6] Gu D and Gillespie A. Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun - canopy - sensor Geometry [J]. Remote Sens. Environ., 1998, 64: 166 - 175.

[7] Scott A, Soenen, Derek R, et al. SCS + C: A Modified Sun - canopy - sensor Topographic Correction in Forested Terrain [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2005, 43(9): 2148 - 2159.

[8] Duguay C R, LeDrew E F. Estimating Surface Reflectance and Albedo from Landsat 5 TM over Rugged Terrain [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1992, 58: 551 - 558.

[9] Holben B, Justice C. The Topographic Effect on Spectral Response from Nadir Pointing Sources [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1980, 46: 1191 - 1200.