

遥感影像地形校正研究进展及其比较实验

高永年^{1,2}, 张万昌^{2,*}

(1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

摘要: 地形校正作为复杂地形区遥感影像预处理的重要步骤, 对提高地表参数遥感定量化精度具有重要意义。为此, 在简述地形校正含义与目标的基础上, 回顾并总结了国内外各种地形校正方法并将其划分为基于波段比、DEM 和超球面 3 类方法, 以期为地形校正及相关研究提供参考。在 DEM 的支持下, 采用 11 种地形校正方法对 ETM+ 影像进行了校正比较实验, 研究表明: (1) VECA、b、C、Teillet 回归、SCS+ C、Minnaert 和 Minnaert-SCS 校正 7 种地形校正效果较好, 可用于遥感影像的地形校正; 而 Cosine T、Cosine C、SCS 和 Cosine b 校正存在过度校正现象, 不宜选择。(2) VECA 与 b 校正模型校正效果最好, 且 VECA 校正比 b 校正可操作性更强。在此基础上, 从地形效应的理论诠释与数学表达、DEM 数据、地形校正应用研究 3 个方面探讨了目前该领域存在的一些问题和难点, 并对今后可能的工作重点和研究方向提出了建议。

关键词: 复杂地形; 遥感影像; 地形效应; 地形校正; 研究进展

文章编号: 1000-0585(2008)02-0467-11

1 引言

复杂地形地表接收到的太阳辐射受太阳、大气和地形等多种因素的影响, 从而造成地表接收到的太阳辐射能量的非均一性。卫星传感器如 MSS、TM、SPOT 和 IKONOS 等获得的影像由于受到地形起伏即坡度和坡向变异影响而导致阴阳坡影像辐亮度的差异^[1], 即阳坡较亮, 而阴坡较暗。复杂地形地区遥感影像的这种辐射畸变称为地形效应。产生这种现象的主要原因是传感器方位与目标影像区的太阳高度及方位相关, 这就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。图版 4 图 1(a) 表示了 Landsat-7 ETM+ 遥感影像的地形效应, 从图上可以看出, 阴坡与阳坡的辐亮度值具有明显的差异, 阳坡较亮, 阴坡较暗。这种地形效应严重影响了遥感影像的各种定量分析, 必须对其进行校正处理, 即地形校正。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影像辐亮度值的变化, 使影像更好地反映地物光谱特性^[2], 即对遥感影像由于地形不规则形状而导致的太阳辐射亮度值差异进行校正。其目标是消除所有由于地形而导致的辐射亮度值的差异即地形效应, 以便使具有相同反射率的两个不同太阳方位角的物体表现出相同的波谱响应。

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400502)和中科院“百人计划”择优支持项目(8-057493)。

作者简介: 高永年 (1977-), 男, 汉族, 安徽郎溪人, 博士生。主要从事生态水文参数遥感定量化和 GIS 区域建模研究。E-mail: nianyonggao@163.com

* 通讯作者: 张万昌 (1966-), 博士, “百人计划”研究员, 博士生导师。E-mail: zhangwc@tea.ac.cn

地形校正作为辐射校正的一部分, 是进行遥感影像分析预处理的重要内容, 对于遥感影像定量化研究具有重要意义。国内外学者对地形校正做了大量研究, 并提出了许多地形校正算法, 如 Cosine 校正^[3]、C 校正^[3]、2 阶段法校正^[4]、SCS 校正^[5]、SCS+ C 校正^[6]、Minnaert 校正^[7]等, 本文将对当前国际上的地形校正算法及其相关研究进行总结概括, 并在此基础上对当前主流的地形校正算法进行比较实验, 以期为模型选择及应用提供参考, 在文章最后指出了地形校正研究存在的问题和可能的进一步研究方向。

2 地形校正方法现状

2.1 地形变量与影像辐亮度的关系

美国达特茅斯大学的 Reeder 博士对位于 Grand 的阔叶落叶林区 Landsat TM 4 影像亮度值与入射角 i 余弦、坡度、高程分别进行回归分析, 发现影像亮度值与 $\cos i$ 之间具有高度相关性, 相关系数达 0.64, 而与坡度、高程的相关性相对较低, 相关系数仅有 0.04 和 0.03^[8]。其他研究者也发现类似结果, 如 Vincini 对意大利亚平宁山脉北部的 Valboreca 区 TM 数据地形变量影响的定量研究表明, 太阳入射角的余弦值与影像亮度值之间具有高度的相关性, 其相关系数达到了 0.76^[9]。Lawrence 对入射角及影像亮度值之间的关系也进行了研究, 并且认为一旦影像各个像素的入射角确定, 则其像素亮度值就可修正^[10]。图 2(a) 和 (b) 分别表示了图版 4 图 1(a) 区域 Landsat-7 ETM+ 影像波段 4 和波段 5 辐亮度 L 与地形变量 $\cos i$ 之间的相关关系, 其相关系数分别达到了 0.65 和 0.69。因此, 入射角 i 余弦与遥感影像辐亮度值之间的高度相关性, 鉴于此, 通过建立太阳入射角余弦和遥感影像即定波段波谱响应之间的相关系数成为评价复杂地形卫星遥感数据地形效应的一种有效手段, 并运用入射角 i 的余弦来进行地形效应的校正。

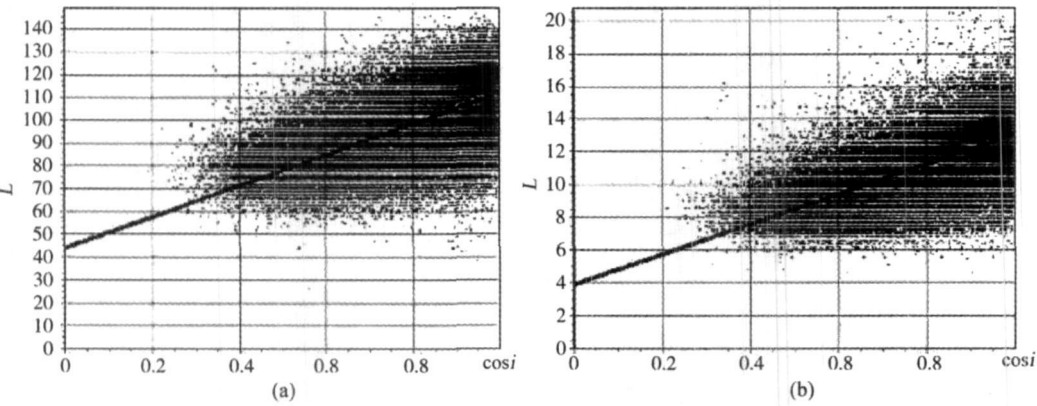


图 2 ETM+ 影像波段 4、5 辐亮度 L 与地形变量 $\cos i$ 之间的关系拟合
Fig. 2 The relationship between ETM+ band 4, 5 radiation L and $\cos i$

2.2 地形校正方法

目前, 国内外已提出了不少地形校正模型, 大致可以归纳为 3 大类, 即基于波段比的方法、基于 DEM 的方法和基于超球面的方法。其中, 基于 DEM 的校正方法又可以划分为 4 种类型: 统计-经验模型、归一化模型、朗伯体反射率模型和非朗伯体反射率模型, 表 1 对其进行了概括。

表 1 基于 DEM 的地形校正方法

Tab 1 Topographic correction methods requiring DEM data

序号	类别	校正模型	公式
1	统计-经验模型	Teillet-回归	$L_m = L - m \cdot \cos i - b + L_a$
2		b	$L_m = L + (b_1 + x) \cdot (\cos \theta - \cos i)$ $L_m = L \cdot \exp[b_2 \cdot (\cos \theta - \cos i)]$
3		VECA	$L_m = L \cdot \lambda$ $\lambda = L_a / (m \cdot \cos i + b)$
4	归一化模型	2阶段	$\delta L_{ij} = L_{ij} + L_{ij} \times (\mu_k - X_{ij}) / \mu_k$ $\delta L_{ij} = L_{ij} + C_\lambda \times L_{ij} \times (\mu_k - X_{ij}) / \mu_k$ $C_\lambda = [(\mu_\lambda - N_\lambda) / [(\mu_\lambda - N_\lambda)(u_\lambda - N'_\lambda)] + (\mu_\lambda - S_\lambda) / [(\mu_\lambda - S_\lambda)(\mu_\lambda - S'_\lambda)]] / 2$
5	朗伯体反射率模型	Cosine-T	$L_m = L \cdot \cos \theta / \cos i$
6		Cosine-C	$L_m = L + \left[L \cdot \left(\frac{\cos a(i) - \cos i}{\cos a(i)} \right) \right]$
7		Cosine b	$L_m = (L - b) (\cos \theta / \cos i)$
8		C	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos \theta + c}{\cos i + c} \right)$
9		G-黄微	$L_m = (L - L_{min}) \times \left(\frac{\cos \theta - \cos i_{min}}{\cos i - \cos i_{min}} \right) + L_{min}$
10		SCS	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos \theta \cdot \cos a}{\cos i} \right)$
11		SCS+ C	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos \theta \cos a + C}{\cos i + C} \right)$
12		Dymond & Shepherd	$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{\cos i + \cos e}{\cos i_s + \cos e_s}$
13	非朗伯体反射率模型	Minnaert	$L_m = L \cdot (\cos a) / (\cos^k i \cos^k a)$
14		Ekstrand & e	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos^k \theta \cdot \cos^{1-k} e}{\cos^k i} \right)$
15		Ekstrand & r	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos \theta}{\cos i} \right)^{\cos i}$
16		Minnaert-SCS	$L_m = L \cdot \left(\frac{\cos^k \theta \cdot \cos a}{\cos^k i} \right)$

注: L_m 表示校正后像素亮度值, L 表示校正前像素亮度值, L_a 表示校正前像素亮度平均值, m (或 b_1) 和 b 分别表示影像亮度值与 $\cos i$ 线性回归方程的坡度和截距, b_1 表示 $\ln(L)$ 与 $\cos i$ 线性回归方程的坡度, L_{ij} 和 δL_{ij} 分别为像素 ij 在波段 λ 校正前后的辐射亮度值, μ_k 为全部灰度值的平均值, X_{ij} 为像素 ij 的灰度值, C_λ 为波段 λ 的校正系数, μ_λ 为波段 λ 时灰度值的平均值, N_λ 和 N'_λ 分别为未经过校准和经过第一阶段校正后的阴坡像元辐射亮度值的平均值, S_λ 和 S'_λ 分别为未经过校正和经过第一阶段校正后的阳坡像元辐射亮度值的平均值, $\cos a(i)$ 为 $\cos i$ 的平均值, i_{min} 为最小入射角, L_{min} 为具有最小入射角的像素辐射亮度值, ρ_s 为坡度上的植被反射率, ρ 为水平面上的植被反射率, i_s 和 e_s 分别为坡度上的入射角和反射角, i 和 e 分别为水平面上的入射角和反射角, θ 为太阳天顶角, φ 为太阳方位角, a 为坡度, k 为 Minnaert 常数, r 为波长相关型常数。

2.2.1 基于波段比的方法 即比值法或比值合成法是消除地形阴影的最简单方法。它主要用一个波段的光谱值除以另一个波段的光谱值产生一个新的数据层, 此比值数据通常可增强空间辐射变化, 与原始数据相比, 一定程度上消除了地形阴影的影响, 此方法存在一个问题, 即当地表覆被具有相似的光谱反射特性时, 地表反照率的差异变的模糊不清^[11]。

2.2.2 基于 DEM 的方法

(1) 统计-经验模型 主要包括由 Teillet 等^[3]提出的 Teillet-回归校正法、b 校正法和本文作者提出的变经验系数法 (VECA)。Teillet-回归校正是一种依赖于影像场景的经验技术, 它主要是利用影像亮度值与 $\cos i$ 之间的强相关性。1993 年, Meyer 等利用该方法对瑞士落叶针叶混合林 TM 影像进行了分析, 消除了地形效应, 使针叶林、落叶林以及混合林的总体分类精度提高了 7%^[8, 12]。b 校正法是 Vincini 等^[13]在针对北亚平宁山脉混合落叶林区不同生长季节 TM 影像多时段分析时提出来的, 它主要包括两个可选择性方程, 具体校正时, 通常把这两个方程结合起来使用, 具体选择哪个校正方程, 主要是看

哪个方程更能反映影像辐亮度与 $\cos i$ 之间的关系^[14,15]。VECA 模型利用一个可变的调整系数来校正影像像元的辐亮度值,从而获得校正结果影像^[16]。

(2) 归一化模型 它是由 Civco^[4] 在 1989 年提出来的,它在校正过程中分两个阶段进行,故也称为 2 阶段校正法。2000 年, Zhang^[17] 利用该算法对天山流域 1989 年 9 月的 Landsat TM 影像进行地形校正,校正后,阳坡和阴坡阔叶林在 1~5 和 7 波段的平均光谱响应差值分别降到了 0.2、0.2、0.3、0.1、0.2 和 0.2,取得了较好的校正效果。

(3) 朗伯体反射率模型

①Cosine 校正 早在 1982 年, Teillet 等^[3] 在考虑太阳天顶角的情况下首先提出了一个基于物理机制的校正模型即 Cosine-T 校正法,它假设所有波段的双向反射率因子是一个独立于入射角和反射角的常量,并且忽略散射辐射的影响。1989 年, Civco 等^[4] 在考虑太阳辐射的平均情况下,对 Teillet 的算法进行了改进,将其发展为 Cosine-C 校正。2002 年, Chen^[18] 利用 TM 影像对美国西部内华达州的 Pershing 县的岩石分类时,针对 Cosine-T 校正法在阴坡产生严重过度校正现象的缺陷,将其发展为 Cosine-b 校正;利用该方法进行校正,在可见光与近红外波段取得了满意的结果,地形效应减少了,然而在热波段其效果仍不理想,存在“暗区”和过度校正现象。

②C 校正 针对 Cosine 校正忽略散射辐射的缺陷, Teillet 等^[3] 对 Cosine 校正进行改进,提出了 C 校正。C 校正是一种使用像素亮度值与太阳入射角余弦值的经验校正,通过建立两者之间的回归方程并利用该回归方程的截距(b)与坡度(m)的比值来生成新的参数(c)。一般来说,波段越长, c 值越小,波段越短, c 值越大,这主要是由于波长越短散射效应越明显的缘故。该模型既考虑了物理机制,又使用了经验方法,故可称之为半经验方法^[8]。2005 年,黄微等^[19] 在 Teillet 等提出的 C 校正算法的基础上将其改进为 G-黄微校正法,该法避免了 C 校正法用离散样本求解系数的烦琐过程。

③SCS 与 SCS+ C 校正 Gu 等^[5] 认为基于太阳-地表-传感器几何关系的校正算法是不合理的,他们认为无论地形如何,树木都是垂直生长的,树木冠层与地形方向不是一致的,因此,用地形的坡度和坡向的几何关系来校正植被冠层光谱反射特性是不恰当的。从植被冠层着手,提出了 SCS(太阳-冠层-传感器)校正算法。由于 SCS 模型未考虑到散射特性,从而导致了类似于 Cosine 模型的过度校正现象,于是 Soenen 等^[6] 借鉴 C 校正的思想,引入一个半经验的用于散射辐射调节的参数 C ,将 SCS 模型改进为 SCS+ C 模型。

④Dymond-Shepherd 校正 该算法由 Dymond 等^[15] 于 1999 年提出,它是基于 Dymond 等^[20] 提出的植被可见光反射率计算公式的推导,故其仅适用于可见光波段地形效应的校正;而且该算法是建立在 4 个假设^[15] 基础上的,即冠层较深;接收到的主要为太阳直接辐射;树叶为任意方向分布;冠层粗糙度与坡度无关。

(4) 非朗伯体反射率模型

①Minnaert 校正 基于朗伯体假设的缺陷, Smith 等^[7] 在地形校正算法中引入经验光度计函数常量 k ,提出了一个非朗伯体反射率模型即 Minnaert 校正模型。 k 为 Minnaert 常数,是在 1941 年由 Minnaert 提出的,它主要是用来削弱地形校正的力度^[21]。 k 介于 0~1 之间,当地面为朗伯体时, k 值为 1,否则小于 1,主要采用回归法进行确定。Minnaert 校正考虑了地面的粗糙程度,可以解决 Cosine 校正中阴坡的过度校正问题^[22]。

②Ekstrand 校正 1996 年, Ekstrand^[23] 引入了太阳天顶角 θ 和反射角 e 将 Minnaert 校正发展为 Ekstrand- e 校正,反射角 e 在校正中起两种作用,分子中的 $\cos e$ 表示倾斜地

表的瞬时视场角效应, 随着倾斜地表坡度的增加, 传感器瞬时视场所获的地表面积也将增加。同时, Ekstrand^[23] 发现在几乎所有的真实地形条件下, $(\cos e / \cos^k e)$ 的值近乎为一个常量, 因此, 对 Ekstrand- e 校正进行简化并引入常数 r , 从而提出 Ekstrand- r 校正。模型中, r 为波长相关型常数, 其计算方法类似于 Minnaert 校正中对 k 值的回归。

③Minnaert-SCS 校正 Vincini 等^[24] 研究发现, C 校正中 c 值与 Minnaert 校正中 k 值之间具有高度相关性, 相关系数甚至高达 0.99。针对图版 4 图 1(a) 区域, 计算 C 校正中 c 值与 Minnaert 校正中 k 值, 并对两者进行回归分析(图 3(a)), 发现两者高度线性相关, 确定系数 R^2 为 0.895, 相关系数达 0.946, 与 Vincini 等的研究结论一致。2002 年, Reeder^[8] 基于 c 值与 k 值之间相关性以及瞬时视场角的考虑, 认为把 Ekstrand- e 校正模型中的反射角 e 消去具有可行性, 同时基于简化 Minnaert 校正算法的考虑, 并引入坡度角, 将 Minnaert 校正发展为 Minnaert-SCS 校正。Minnaert-SCS 校正与 SCS 校正算法不仅在形式上具有相似性, 而且也继承了 SCS 的校正原理。虽然该校正算法是基于 Minnaert 校正提出来的, 但 Reeder^[8] 更倾向于认为该算法是对 SCS 校正的改进。对 C 校正中 c 值与 Minnaert-SCS 校正中 k 值回归分析, 得两者相关关系图(图 3(b)), 发现两者也存在高度相关性, 其确定系数 R^2 为 0.8928, 相关系数为 0.945。

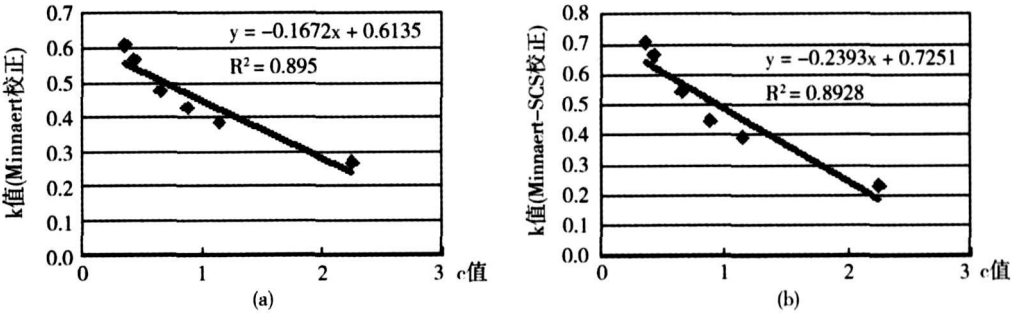


Figure 3 consists of two scatter plots, (a) and (b), showing the relationship between parameters c and k . Both plots have c on the x-axis (ranging from 0 to 3) and k on the y-axis. Plot (a) shows k (Minnaert) on the y-axis (ranging from 0.0 to 0.7) with a regression line $y = -0.1672x + 0.6135$ and $R^2 = 0.895$. Plot (b) shows k (Minnaert-SCS) on the y-axis (ranging from 0.0 to 0.8) with a regression line $y = -0.2393x + 0.7251$ and $R^2 = 0.8928$. Both plots show a negative linear correlation with data points and a fitted line.

图 3 经验参数 c 与 k 关系图

Fig 3 The relationship between c and k parameters

2.2.3 基于超球面的方法 主要为超球面方向余弦转换(HSDC)校正法^[18,25], HSDC 方法把度量向量映射到超球面上。研究发现, HSDC 法很好的消除了地形阴影的影响, 特别是热波段效果更佳, 在进行岩石分类时, 校正前的(4, 3, 2)波段的假彩色合成影像不能很好的区分岩石类别界线, 而校正后界线变得清晰可见, 提高了分类精度^[18]。

3 地形校正比较实验

3.1 实验区选择与数据处理

3.1.1 实验区概况

实验区位于陕西太白县和凤县, 地处秦岭南麓, 位于 $107^{\circ}02'48.01'' \sim 107^{\circ}05'47.88''E$, $33^{\circ}56'13.45'' \sim 33^{\circ}50'37.38''N$; 主要位于褒河流域的红岩河子流域, 其中西北角有一小部分属于西河子流域。实验区面积约 50km^2 , 地形起伏较大, 海拔在 $1050 \sim 2150\text{m}$ 之间, 属暖温带山地气候, 垂直差异明显, 年平均气温约 11.4°C , 平均年降水量在 613mm 左右, 无霜期 188 天。土地覆被主要以林地、宜林地、灌木林地和旱地为主。

3.1.2 数据与处理

(1) DEM 数据 由 1:5 万地形图数字化生成, 空间分辨率为 30m 。 $\cos i$ 采用 ERDAS IMAGE 8.5 软件中的 Modeler 模块计算。实验区 DEM 高程及 $\cos i$ 统计值见表 2。

表 2 实验区 DEM 高程及坡向统计值 (m)

Tab 2 DEM summary statistics for the study area

项目	均值	中值	标准差	最小值	最大值
高程	1713.954	1739.8	192.176	1061	2147
<i>cosi</i>	0.778	0.814	0.169	0.191	1

(2) 遥感数据获取及光谱辐亮度计算 采用 2000 年 5 月 19 日获取的 Landsat ETM+ 遥感影像, 轨道号为 path 128/row 36, 太阳天顶角为 65.30° , 方位角为 120.98° 。数据来源于马里兰大学(获取网址为 <ftp://jkjdl.jafalal.edu.com>), 数据记录格式为 GEOTIFF, 产品级别为正射校正。影像无云层覆盖, 中心位置为 $105^{\circ}05'22''\text{E}$, $35^{\circ}06'43''\text{N}$, 空间分辨率为 28.5m。采用光谱辐亮度计算公式^[26]将影像灰度值转换为辐亮度值, 同时将空间分辨率重采样为 30m, 并截取实验区影像(343 行 \times 162 列)(图版 4 图 1(a))。

(3) 地形校正处理 在实验区 DEM 的支持, 分别采用 Teillet 回归校正、VECA 校正、Cosine-T 校正、Cosine-C 校正、Cosine-b 校正、C 校正、b 校正、SCS 校正、SCS+C 校正、Minnaert 校正、Minnaert+SCS 校正 11 种方法对实验区 ETM+ 影像进行校正实验。校正中计算了地形校正所需的各种中间参数, 其中 Cosine-C 校正的校正参数 *cosi* 均值为 0.778, 其他校正参数见表 3。经过校正后获得的结果图(图版 4 图 1(b)-(l))。

表 3 实验区 Landsat-7 ETM+ 影像各波段地形校正经验参数

Tab 3 Correction parameters used in comparison tests for the Landsat-7 ETM+ 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
$a_1(b)$	33.350592	23.837658	11.540684	43.939582	3.901151	0.529378
$b_1(m)$	14.836153	20.880550	13.142226	68.138500	9.173498	1.515074
b_2	6.496051	14.889922	10.197843	57.289740	8.202432	1.380297
$k(\text{Minnaert})$	0.267830	0.385354	0.427539	0.476036	0.565227	0.608168
$k(\text{Minnaert}+\text{SCS})$	0.233304	0.392533	0.447235	0.545719	0.663782	0.707579
c	2.247927	1.141620	0.878138	0.644857	0.425263	0.349407
L_a	45.176	40.268	21.842	97.31	11.069	1.71

3.2 地形校正效果比较分析

从视觉上看, 相比地形校正前的实验区影像(图版 4 图 1(a)), 不同地形校正方法校正后的影像(图版 4 图 1(b)~(l))的地形阴影都得到了不同程度的消除, 但不同校正方法的校正效果是不一样的。Cosine-T 校正、Cosine-C 校正和 SCS 校正这 3 种方法校正后的影像看起来仍然具有强烈的三维立体效果, 但凸凹效果与校正前影像正好相反, 说明这 3 种方法对影像起到了校正效果, 但阴阳坡亮度值发生了明显变化, 阴坡变得比阳坡还亮, 说明存在严重的过度校正现象, 其中 Cosine-T 校正的过度校正最为严重, SCS 校正次之, Cosine-C 校正略好一点。而其他 8 种方法的校正结果图已不显现出明显的凸凹效果, 看起来更像一个“平面”, 这正体现了地形校正概念“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)”的视觉效果, 说明较好地消除了由于地形起伏而引起的影像亮度值的变化, 但 Cosine-b 校正仍存在一定程度的过度校正现象, 部分阴坡像元具有较高的亮度值, 剩下的 7 种方法的校正结果图从视觉上看则较为相近。

从上面的分析可知, 实验区影像经过不同校正方法: Teillet 回归校正、VECA 校正、C 校正、b 校正、SCS+C 校正、Minnaert 校正、Minnaert+SCS 校正后的效果很难从视觉

上加以区分, 而从统计的角度可进一步定量分析不同校正方法的校正效果。

对校正前后 $\cos i$ 与 ETM+ 影像各波段辐亮度值进行回归分析, 得到回归拟合直线斜率 m 和相关系数 r (表 4)。从总体上看, Cosine-T 校正、Cosine-C 校正和 SCS 校正的 m 和 r 均较校正前有所减小, 说明取得了一定的校正效果, 然而它们均为负值且绝对值相对较大, 说明存在严重的过度校正现象。Cosine-b 校正的 1、2、3、4 波段为负值, 而 5、7 波段为正值, 说明 1、2、3、4 波段存在过度校正现象, 而 5、7 波段未发生过度校正; 相比 Cosine-T 校正、Cosine-C 校正和 SCS 校正, Cosine-b 校正的绝对值已明显减小, 说明效果明显优于这三种方法。Teillet 回归校正、VECA 校正、C 校正、b 校正、SCS+ C 校正、Minnaert 校正和 Minnaert+SCS 校正 7 种方法的 m 和 r 均为正值, 说明不存在过度校正; 相比之下, VECA 校正和 b 校正表现出最好的校正效果, C 校正和 Teillet 回归校正次之, SCS+ C 校正再次之, 而 Minnaert 校正和 Minnaert+SCS 校正的效果在这 7 种方法中最差; Minnaert 校正的前 3 个波段优于 Minnaert+SCS 校正, 而后 3 个波段比 Minnaert+SCS 校正稍差。Minnaert+SCS 校正作为 SCS 校正方法的改进, 其效果已明显优于 SCS 校正。

表 4 地形校正前后 $\cos i$ 与 ETM+ 影像各波段辐亮度值的回归参数
Tab 4 Regression model parameters between ETM+ band 1-5, 7 radiance and $\cos i$

校正方法	统计量	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 7
校正前	m	14 836153	20 880550	13 142226	68 138500	9 173498	1 515074
	r	0 490087	0 639590	0 434081	0 652775	0 692984	0 544276
Teillet 回归	m	2 445615	3 398033	2 130475	11 037859	1 482432	0 244173
	r	0 079570	0 112567	0 073695	0 121413	0 135498	0 098397
VECA	m	2 027151	2 847797	1 7888261	9 050302	1 209570	0 202550
	r	0 065733	0 093920	0 062949	0 098905	0 108763	0 082411
Cosine-T	m	- 54 082261	- 37 014147	- 17 465833	- 64 158759	- 5 242126	- 0 664371
	r	- 0 650494	- 0 568630	- 0 411012	- 0 425851	- 0 319543	- 0 208015
Cosine-C	m	- 33 390978	- 21 353563	- 9 593487	- 32 492770	- 2 134307	- 0 220182
	r	- 0 608125	- 0 491728	- 0 308054	- 0 309368	- 0 181519	- 0 089846
Cosine b	m	- 8 322446	- 4 306877	- 1 631045	- 3 869960	0 110581	0 061980
	r	- 0 315653	- 0 147949	- 0 052203	- 0 039073	0 008880	0 021931
C	m	2 101374	3 027487	1 922466	9 844324	1 337072	0 225755
	r	0 065733	0 093920	0 062949	0 098905	0 108763	0 082411
b	m	0 944467	2 517507	1 764833	9 658716	1 407226	0 242019
	r	0 028516	0 076042	0 056566	0 095730	0 114605	0 088941
SCS	m	- 35 240346	- 22 453497	- 9 992380	- 34 407679	- 2 232074	- 0 221312
	r	- 0 579009	- 0 468239	- 0 293300	- 0 314822	- 0 181889	- 0 084437
SCS+ C	m	3 921696	5 514154	3 513152	17 514425	2 375139	0 400449
	r	0 129448	0 184714	0 122431	0 202807	0 223127	0 162197
Minnaert	m	5 532929	6 543727	4 303791	22 722474	2 886691	0 465521
	r	0 177200	0 212522	0 145307	0 251454	0 249983	0 172789
Minnaert+SCS	m	8 556172	7 984618	4 868164	19 796347	2 282520	0 379651
	r	0 274003	0 263256	0 174288	0 238820	0 218900	0 156691

4 结论与讨论

4.1 主要结论

根据实验区地形校正结果视觉比较和统计分析可以看出, VECA 校正、b 校正、C 校正、Teillet 回归校正、SCS+ C 校正、Minnaert 校正和 Minnaert-SCS 校正 7 种地形校正效果较好, 可用于复杂地形遥感影像的地形校正; 而 Cosine-T 校正、Cosine-C 校正、SCS 校正和 Cosine-b 校正存在过度校正现象, 这与 Soenen 等^[6]、Chen^[18] 以及 Lawa 等^[22] 的研究结论是一致的, 存在过度校正的原因可能是缺乏对地表朗伯体假设的合理修正以及未考虑非直接太阳辐射即天空散射辐射和临近地表反射辐射的影响的缘故, 故在进行地形校正模型选择时建议不要选择这 4 种地形校正模型。VECA 模型与 b 校正模型表现出最好的校正效果, 并且与 b 校正相比, VECA 校正实现起来也更加容易, 可操作性更强。在不同地表覆被类型或地貌条件下, 不同的地形校正模型可能表现出不同的校正效果, 这仍有待于更进一步的比较研究。

4.2 存在问题和今后可能的研究方向

4.2.1 地形效应的理论诠释与数学表达

(1) 地表类型问题 当前, 地形校正算法中对地表类型的考虑主要有两种, 即朗伯体模型和非朗伯体模型。尽管基于朗伯体假设的地形校正算法简单方便, 但却存在着一个识别问题。基于朗伯体假设的模型认为地表上的任何方向均具有相同的反射率, 故其仅能校正由于地面方向不同而导致的辐亮度差异^[22]。运用此类模型校正时, 往往会导致过度校正, 阴坡比阳坡更亮, 这主要是由于朗伯体算法的一个重要假设是入射太阳通量完全依赖于直接辐射, 然而实际上散射在阴坡产生更强烈影响^[22]。为解决朗伯体模型的这一缺陷, 提出了几个半经验性校正模型, 如 C 校正、b 校正和 SCS+ C 校正模型等, 这在一定程度上解决了 Cosine 校正的过度校正问题, 然而这些校正模型经验系数的确定随着波长和太阳高度角等不同而异。

当前, 基于非朗伯体模型的地形校正方法主要为 Minnaert 校正, 在这种方法中, 引入 k 值来表示地表的非朗伯体特性, 然而 k 值的确定需要通过对遥感影像建立回归模型来计算, 其值因波段和太阳高度角不同而异, 而且它只是用来描述地表 BRDF 的一个经验系数^[27]。不同覆被类型的 BRDF 特性是不一样的, 以覆被类型为基础计算 k 值来代替当前主要以波段为基础计算 k 值则更进一步增加了计算的复杂性。然而, 当引入前向或后向散射时, Minnaert 校正算法的缺点就很明显^[25]。

(2) 太阳辐射问题 复杂地形接收到的太阳辐射受多种因素的影响, 如大气、云、坡度、坡向等。并且, 接收到的太阳辐射 E 主要由 3 部分组成, 即太阳直接辐射 E_d 、天空散射辐射 E_f 、以及来自于附近地表的直接和散射辐射 E_a 。故复杂地形地表总入射太阳辐射可表示为:

$$E = E_d + E_f + E_a \quad (1)$$

而当前几乎所有的地形校正模型仅考虑了太阳直接辐射, 未考虑天空散射辐射、来自于附近地表的直接和散射辐射, 或考虑得相对比较简单, 如 C 校正模型, 仅以经验参数来表征。从对前面不同地形校正方法校正效果的比较分析可以看出, 考虑到 E_f 和 E_a 的, 地形校正效果则较好; 未考虑 E_f 和 E_a 的, 效果则较差, 这充分说明地形校正模型中仅考虑太阳直接辐射是不够的。当前, 关于 E 、 E_d 、 E_f 、和 E_a 的研究已相对成熟, 如适合复杂地形条件下 E_f 的计算模型——Hay's 模型^[28]:

$$E_f = E_f^* \{ (E_d/E_0) (\cos i/\cos \theta) + (1/2)[1 - (E_d/E_0)](1 + \cos \alpha) \} \quad (2)$$

式中, E_f^* 为水平地表接收到的天空散射辐射, E_0 为大气层顶的太阳平均光谱辐射。如何充分运用和完善这些理论, 建立适合遥感影像地形校正的地形效应理论模型是进行有效地形校正的理论基础。

(3) 地形效应理论模型 复杂地形地表 E_d 、 E_f 和 E_a 既受大气条件的影响, 也受地形条件和地表类型的影响, 因此, 遥感影像地形效应是这 3 种因素共同作用的结果。遥感影像地形校正是一个复杂的问题, 涉及到众多理论与实践问题, 孤立地对其进行计算会影响到地形校正的效果, 建立科学的地形效应理论模型, 融合地表反射率模型进行大气校正和地形校正模型的耦合, 发展决定性而非经验性的物理校正模型具有最大的发展潜力。

4.2.2 DEM 数据问题 DEM 数据问题特别是 DEM 精度关系到地形校正的实践应用。关于 DEM 精度, 有的则认为应当与影像分辨率一致或相当, 有的研究者认为, 应当是影像分辨率的 4 倍^[29]。Conese 等^[30]认为, DEM 的分辨率及精确性对地形校正会产生重要影响。一般来说, DEM 的分辨率应当不低于遥感影像的空间分辨率, 然而, 高精度和高分辨率的 DEM 往往比较昂贵并且难以获得, 这在一定程度上限制了地形校正的发展和应用。

DEM 精度对地形校正效果到底有多大影响? 相对较粗精度的 DEM 能否起到符合实用要求的地形校正效果? 不同精度 DEM 对不同地形校正方法的地形校正效果会产生怎样的影响? 这些问题仍有待进一步研究, 如果在相对较粗精度 DEM 的支持下, 地形校正效果能够达到实用要求, 则有利于地形校正的推广与实用化。值得注意的是, 近年来已有研究者开始研究 DEM 地形分析中的尺度问题^[31], 这或许有利于地形校正的应用研究。

4.2.3 地形校正的应用研究问题 目前为止, 大多数的研究主要集中在对 Landsat 影像的地形校正上^[3,4,21], 虽然也有学者对 SPOT、IKONOS 等影像的地形校正进行了研究^[22], 但相对较少, 这主要是受 DEM 数据获取困难的影响。现在, 地形校正作为复杂地形地表遥感影像预处理的重要内容, 已经引起我国学者的关注, 并应用到相应的研究中, 并取得较好的效果^[32,33], 然而相对国外来说, 我国研究人员在这方面的研究还较少, 有待进一步深入。同时, 地形校正作为遥感影像定量分析预处理过程中的重要步骤, 研究人员应加以重视, 以提高地表过程参数定量遥感反演精度。

参考文献:

- [1] Jensen J R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. New Jersey: Prentice-Hall, 1996
- [2] 李英成. 数字遥感影像地形效应分析及校正. 北京测绘, 1994, (2): 14~ 19
- [3] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. Canadian Journal of Remote Sensing, 1982, 8(2): 1537~ 1540.
- [4] Civco D L. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989, 55(9): 1303~ 1309
- [5] Gu D, Gillespie A. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun canopy-sensor geometry. Remote Sensing of Environment, 1998, 64: 166~ 175.
- [6] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS+ C: a modified sun canopy-sensor topographic correction in forested terrain. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2148~ 2159
- [7] Smith J A, Lin T L, Ranson K J. The Lambertian assumption and Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46: 1183~ 1189

- [8] Reeder D H. Topographic correction of satellite images theory and application Hanover, New Hampshire: Dartmouth College, 2002
- [9] D M. Influence of topography on vegetation indexes of forested ecosystems http://srtm.die.uni-fi.it/eng_vers/prog_6.htm, 2006
- [10] Holben B N, Justice C O. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46(9): 1191~ 1200
- [11] 张洪亮,倪绍祥,张军. 国外遥感图像的地形归一化方法研究进展. 遥感信息, 2001,(3): 24~ 29
- [12] Meyer P, Itten K I, Kellenberger T, *et al*. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993, 48(4): 17~ 28
- [13] Vincini M, Reeder D, Frazzi E. An empirical topographic normalization method for forest TM data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002: 2091~ 2093
- [14] Vincini M, Frazzi E. Multitemporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 40(11): 2586~ 2590.
- [15] Dymond J R, Shepherd J D. Correction of the topographic effect in remote sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2618~ 2620
- [16] Gao Y N, Zhang W C, Wang J, *et al*. Variable empirical coefficient algorithm for removal of topographic effects on remotely sensed data from rugged terrain. IGARSS2007, Baseluona, Spain, 23-27 July 2007
- [17] Zhang W C. Water resource and hydrological processes studies on the Urumqi river basin, Tianshan, China by means of remote sensing and GIS techniques (Ph. D. dissertation). Nagoya: Nagoya University, 2000.
- [18] Chen X F. Topographic normalization of TM imagery for rock classification in Pershing county, Nevada <http://www.geo.wvu.edu/geog755/spring98/12/intro.htm>, 2006
- [19] 黄微,张良培,李平湘. 一种改进的卫星影像地形校正算法. 中国图象图形学报, 2005, 10(9): 1124~ 1128.
- [20] Dymond J R, Qi J. Reflection of visible light from a dense vegetation canopy: A physical model. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 86(9): 143~ 155
- [21] Thomson A G, Johns C. Effects of topography on radiance from upland vegetation in North Wales. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(5): 829~ 840
- [22] Lawa K H, Nichol J. Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery. www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/347.pdf, 2006
- [23] Ekstrand S. Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(2): 151~ 161.
- [24] Vincini M, Reeder D, Frazzi E. Seasonal Landsat TM data and topographic dependence in rugged deciduous forest areas. In: Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. Singapore: World Scientific, 2002. 305~ 312
- [25] Pouch G W, *et al*. Hyperspherical direction cosine transformation for separation of spectral and illumination information in digital scanner data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(4): 475~ 479
- [26] 池宏康,周广胜,许振柱,等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用. 植物生态学报, 2005, 29(1): 74~ 80
- [27] Vincini M, Reeder D. Seasonal changes of Minnaert topographic normalization constants in rugged deciduous. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, (4): 1603~ 1605
- [28] Hay J E, McKay D C. Estimating solar irradiation on inclined surfaces: a review and assessment of methodologies. International Journal of Solar Energy, 1985, (3): 203~ 240
- [29] Botanical institute. Vegetation and remote sensing: Radiometric correction <http://www.uib.no/bot/kurs/bb2-09/correction.pdf>, 2002
- [30] Conese C, Gilbert M A, Maselli F, *et al*. Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59(12): 1745~ 1753
- [31] 刘学军,卢华兴,等. 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 2007, 26(3): 433~ 442
- [32] 刘三超,张万昌. 用TM影像和DEM获取黑河流域地表反射率和反照率. 地理科学, 2003, 23(5): 585~ 591
- [33] 夏学齐,田庆久,杜凤兰. 遥感提取叶面积指数的地形影响分析. 遥感信息, 2004, (2): 16~ 37

Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data

GAO Yong-nian^{1,2}, ZHANG Wan-chang²

(1 International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2 Key Laboratory of Regional Climate Environment Research for Temperate East Asia (RCE-TEA),
Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: In remotely sensed image from rugged terrain the sunny surface shows more radiance than the expected and on the shady surface the effect is the opposite. That is to say, a high variation in the reflectance response for the same land use/ land cover types is caused by the irregular shape of the terrain. Therefore, the removal of the topographic effect named topographic correction may be critical in areas of rugged terrain, as a preliminary step to the estimation of land surface parameters for Landsat ETM+ image. And then the concept and goal of topographic correction was briefly introduced and then various algorithms for topographic correction developed internationally were reviewed and summarized. Many researches have been carried out on topographic correction and many topographic correction algorithms have been put forward such as cosine correction, C correction, SCS correction, SCS+ C correction, Minnaert correction etc. However, there is no clear consensus on methods that may be universally applicable. The main difficulty in applying topographic corrections is related to the lack of standard and generally accepted models. So a correction test was carried out in this study to compare 11 existing popular methods of topographic correction, including a new one named VECA developed by ourselves, and see how successfully they can be applied to Landsat-7 ETM+ image. The test site was selected on the relatively rugged terrain located on the southern piedmont of the Qinling Mountains. And then visual comparison and statistical analysis were adopted for feasible evaluation of the 11 topographic correction methods, and the results suggested that VECA correction, b correction, C correction, Teillet regression correction, SCS+ C correction Minnaert correction and Minnaert+SCS correction have good correction performance, however, the Cosine-T correction, Cosine-C correction, SCS correction and Cosine-b correction would overcorrect the shaded areas in image; and the VECA and b correction are the most capable ones for removing the topographic effects contained in ETM+ image among the 11 methods, compared with b correction, VECA was not only better in performance on topographic effects removal but also simple in theory and easy for operation. In the last section of this paper, the problems and difficulties existing in topographic correction were discussed, and the future hot points and research focuses were discussed.

Key words: rugged terrain; remote sensing image; topographic effect; topographic correction; research progress

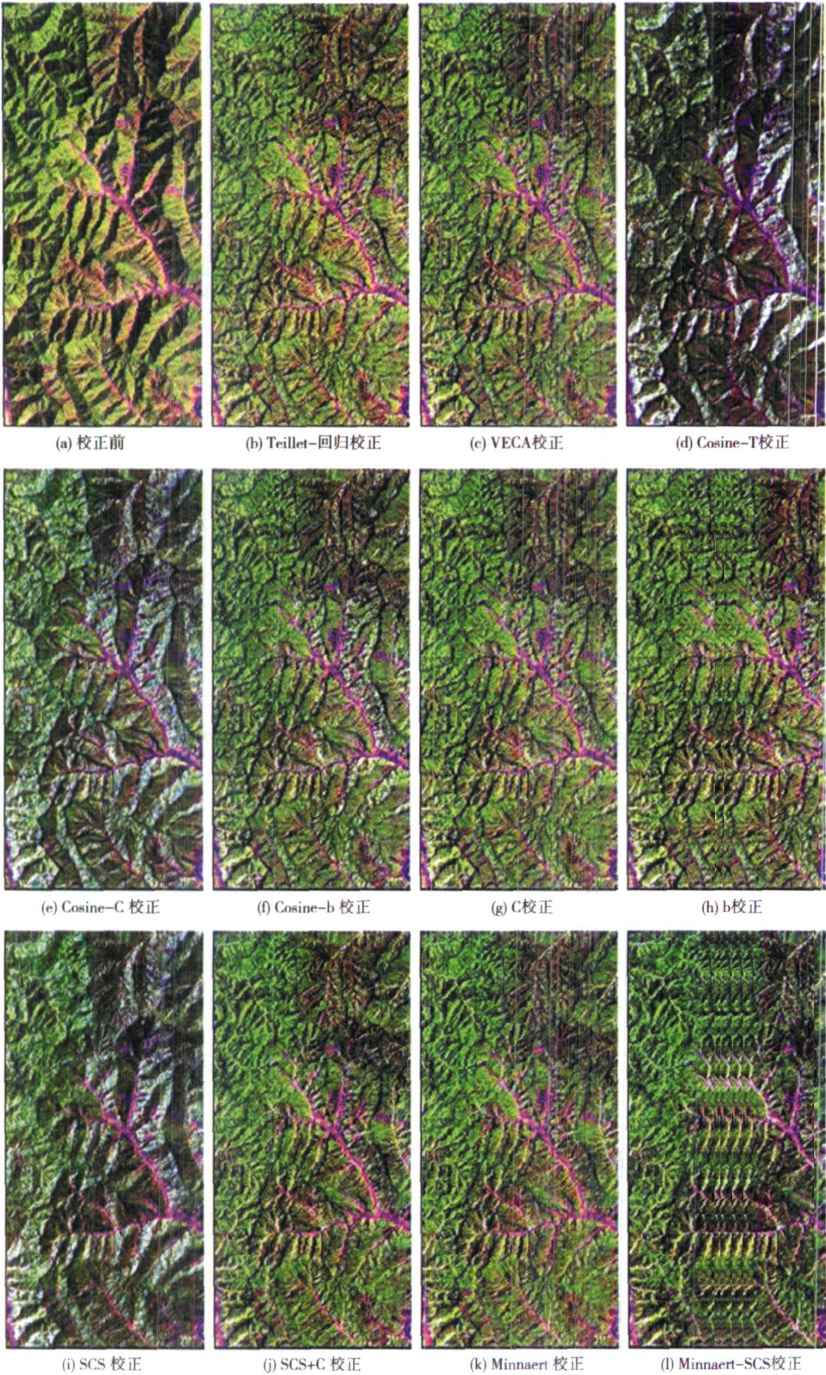


图 1 秦岭南麓实验区 ETM+影像(ETM+5,4,3 假彩色合成)地形校正前后效果比较
Fig.1 ETM+ band 5,4,3 false color image of the target area before and ater topographic correction