

# 地形复杂区域的典型植被指数评估

姚晨, 黄微, 李先华

(上海大学遥感与空间信息研究中心, 上海 200072)

**摘要:** 植被多分布在复杂地形, 不规则的地形会造成遥感影像中同种或相似地物呈现不同的反射率/辐射值, 也会使得不同种地物呈现相似的反射率/辐射值, 这种反射率的变化会给植被的生物、物理量评估带来误差, 所以对地形复杂区域的典型植被指数的评估是十分必要的。选用 Landsat 卫星影像对复杂地形条件下典型植被指数进行了评估。经过详细的分析, 植被指数对由地形引起的红光波段反射率变化敏感, 导致它们对地形的变化敏感, 所以植被指数受地形的影响总体上是不容忽视的。

**关键词:** 植被指数; 复杂地形; 波段反射率

**中图分类号:** TP 79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2009)04-0496-06

## 1 引言

植被指数 (Vegetation Index, VI) 是指通过多/高光谱遥感数据波段的线性或非线性组合, 定量描述地球表面植被状况的一种光谱特征度量指标。它是一种有效利用遥感光谱数据监测地面植物生长和分布, 定性、定量评估植被的方法<sup>[1]</sup>。植被指数有助于增强遥感影像的解译力, 并已作为一种遥感手段广泛应用于生物、物理量评估等方面<sup>[2,3]</sup>。

植被多分布在地形复杂区域, 不规则的地形会造成遥感影像中同种或相似地物呈现不同的反射率/辐射值, 这种反射率的变化会给植被的生物、物理量评估带来误差。植被指数是反映植被生物量的重要参数, 它的变化能够反映植被本身的生长变化。然而, 由于植被指数是波段反射率的波段组合; 在地形复杂地区, 受地形影响的波段反射率会对植被指数的评估引入误差, 使植被指数无法正确地反映植被内部物理/生物量的变化, 因此必须尽量消除地形对植被指数的影响。目前, 地形对植被生物/物理量评估的影响已经开始得到学者的关注。例如, 夏学齐<sup>[4]</sup>等详细分析了复杂地形对叶面积指数 (LAI) 的影响; 王培娟<sup>[5]</sup>等在充分考虑复杂地形的前提下, 对植被初级生产力 (NPP) 进行了评估。他们的研究均

表明了地形对植被生物/物理量评估精度的影响不容忽视。然而, 现在关于复杂地形对典型植被指数影响的研究并不多见, 因此对地形复杂区域的植被指数的评估是十分必要的。

为了研究复杂地形下的典型植被指数, 本文选取几种典型植被指数: NDVI (归一化植被指数)、SAVI (土壤调节植被指数) 和 EVI (增强型植被指数) 进行分析。为了分析复杂地形对植被指数评估的影响, 本文运用顾及空间相关性模型对复杂区域进行地形校正, 用以消除地形起伏带给植被指数评估的影响, 进而对平坦地表的典型植被指数进行评估。

## 2 研究内容与方法

### 2.1 典型植被指数的介绍

至今为止, 植被指数的发展已经有几十种, 本文选取的典型的植被指数包括: 归一化植被指数 (NDVI)、土壤调节植被指数 (SAVI)、增强型植被指数 (EVI)。

#### (1) 归一化植被指数

NDVI 最早由 Rouse<sup>[6]</sup>等于 1974 年提出, 它是基于太阳光谱在红光波段处 ( $0.69 \mu\text{m}$ ) 被植被叶绿素强烈吸收, 而在近红外处太阳光谱被叶细胞结构

收稿日期: 2009-01-08; 修订日期: 2009-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771145); 高等学校博士点基金项目 (20070280011); 科技部气象行业公益专项基金 (GYHY20070628); 国土资源部项目 (KD081902-03) 子课题。

作者简介: 姚晨 (1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事典型植被指数评估研究。E-mail: yaochen666@shu.edu.cn。

强烈反射的植被生物物理机理而提出的,NDVI的公式如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

其中: $NIR$ 和 $R$ 分别为红外波段和红波段处的反射率值,它没有考虑大气环境、土壤背景、仪器定标、植被本身的光化学变化等内外界因素,虽然被广泛应用,但有一定的局限性。

## (2) 土壤调节植被指数

为了修正土壤背景对植被指数的影响,Huete于1988年<sup>[7]</sup>提出了土壤调整植被指数(SAVI),SAVI的公式如下:

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} (1 + L) \quad (2)$$

其中: $L$ 为土壤调节系数,它是植被密度的函数,应根据具体的植被密度而变化,一般取 $L = 0.5$ ,它的确定需要预先知道植被数量<sup>[7]</sup>。

## (3) 增强型植被指数

为了消除大气对植被指数带来的影响,用红、蓝波段的组合,代替NDVI中的红波段。增强型植被指数(EVI)就是根据这一原理,充分考虑了大气、土壤对植被指数的影响而提出的,EVI的公式如下:

$$EVI = G \frac{NIR - R}{NIR + C_1 R - C_2 B + L} \quad (3)$$

其中: $G$ 为调节因子,一般取 $G = 2.5$ ;  $C_1$ 和 $C_2$ 为抵抗大气调节系数, $C_1 = 6$ , $C_2 = 7.5$ , $L$ 为土壤调节因子,用来调节土壤背景对植被指数的影响,取值一般为 $L = 1$ 。

## 2.2 研究数据与区域

本文采用的影像数据为湖北省西部地区的Landsat-7卫星影像(125/039),影像获取时间为1999年9月1日,影像中心位置位于 $110^{\circ}44'33''E$ , $30^{\circ}18'10''N$ ,太阳高度角和方位角分别为 $58.8^{\circ}$ 和 $129.4^{\circ}$ 。与影像匹配的DEM数据的地面分辨率为25 m,高程分辨率为0.1 m,坡度的变化范围是 $0.0^{\circ}$ 到 $79.4^{\circ}$ ,坡向的变化范围是 $0.0^{\circ}$ 到 $360.0^{\circ}$ 。文中选取的试验区域为 $20.6 \text{ km} \times 24.8 \text{ km}$ (686像素 $\times$ 826像素),高程变化范围从216.7 m到2 320.2 m。为了对复杂地形下的植被指数进行线性拟合,研究选取的样本点为茂密植被地区,总共2 539个像素样本点,太阳入射角余弦值的变化范围从最小值0.0到最大值0.9999;丰富变化的坡度、坡向与太阳入射角可以为复杂地形下的植被指数评估创造一个好的试验基地。文中的坡度、坡向与太阳入射角等数据都可以从DEM数据中获取。

## 2.3 数据处理

为了精确评估复杂地形区域下的典型植被,首先对遥感图像进行了以下预处理:

(1)几何校正。本实验根据1:50 000地形图选地面控制点(GCP)13个,平均标准误差(RMS)为0.32个像素。

(2)辐射定标。本实验根据公式 $L_0 = A * DN + B$ 将该影像 $DN$ 值转变为卫星传感器高度的辐射值,从而消除传感器增益和暗电流的影响。式中, $L_0$ 为光谱亮度值, $A$ 为增益系数, $B$ 为校正偏差系数; $A$ 、 $B$ 从Landsat影像的头文件中获取。

(3)大气校正。为了更精确地对植被指数进行评估,本实验对影像进行了大气校正,得到地面反射率。

(4)地形校正。由于地形的高低起伏现象,植被的光谱反射率会受其影响,进而影响植被指数的评估。为了更好地分析复杂地形对植被指数评估的影响,本文分别计算地形校正前后的典型植被指数值,进而进行比较。通过运用顾及空间相关性模型对复杂区域进行地形校正,以便对消除地形影响后的典型植被指数进行评估,在消除地形影响前后分别得到植被指数分布图。此地形校正模型利用辐射值和入射角之间存在的相关性对影像进行校正的同时也考虑了相邻地形散射的影响,使其在太阳入射角很低的情况下,也能得到良好的校正效果<sup>[8,9]</sup>。校正模型如下:

$$L_H = L_0 + b(\cos\theta - \cos i) - \sum_{j=1}^n \frac{w_j L_j |\cos j - \cos i| ds_i}{r_{ij}^2} \quad (4)$$

其中: $L_H$ 是经过地形校正后的水平地面像素的辐射值, $\cos\theta$ 是太阳天顶角, $\cos j$ 、 $\cos i$ 分别为相邻像素和中心像素的入射角, $w_j$ 是一个限制系数,它表明在相关函数中仅考虑非阴影像素对于中心像素的影响, $L_j$ 表示相邻像素的辐射值, $ds_i$ 为中心像素所在面元的面积, $r$ 为两点之间的距离。由上式得出像素辐射值,进而运用公式(5)计算地物波段反射率,如下:

$$\rho = \pi * L * d_s^2 / (E_0 * \cos\theta) \quad (5)$$

其中: $\rho$ 是地物波段反射率, $d_s$ 是日地天文距离, $E_0$ 是太阳辐照度。

通过公式(1)~(5)便可以用校正前后的辐射亮度值计算出校正前后的不同波段地物波段反射率值,进而计算植被指数并分析比较。

## 2.4 研究方法

### 2.4.1 波段反射率对地形的敏感性分析

在倾斜地表,像素接收到的辐射量的变化是由

地表坡度、坡向的变化导致的,而辐射量的变化又会导致影像中波段反射率的变化。其中,太阳直射辐射是影像信息的最主要来源。太阳入射角是太阳入射光线和倾斜地表法线构成的夹角,它由太阳的方位和地表像素所处的坡度和坡向共同决定,是表征起伏地表接收太阳直射辐射的参量。所以可以通过太阳入射角余弦值的变化表征地形的起伏。因此,通过选取感兴趣区域,计算太阳入射角余弦值与波段反射率之间的线性拟合方程和相关性,分析波段反射率对地形的敏感性。公式如下:

$$\text{band}=a+k*\cos i$$

(6)

其中:band 是波段反射率,a 和 k 代表拟合方程的系数,cos*i* 是太阳入射角余弦值:

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

(7)

其中:α 是像素所处地表的坡度角,β 是像素所处地表的坡向角,这两个角度利用数字高程模型(DEM)数据计算得到。θ 是太阳天顶角,ω 是太阳方位角。

2.4.2 复杂地形区域的典型植被指数分析

植被指数是波段反射率的线性或者非线性组合,而由 2.4.1 可知,波段反射率会受到地形的影

响。为了更加详细分析地形对植被指数的影响,分析植被指数对波段反射率的敏感性是十分必要的。本文通过计算波段反射率与植被指数之间的线性拟合方程和相关性,分析了不同植被指数对波段反射率的敏感性。公式如下所示:

$$VI=a+k*\text{band}$$

(8)

其中:VI 代表植被指数。

最后,基于以上的分析,本文通过计算植被指数与太阳入射角余弦值之间的线性拟合方程和相关性,对复杂地形对植被指数的影响程度进行了定量评估,公式如下:

$$VI=a+k*\cos i$$

(9)

3 试验结果与分析

3.1 波段反射率对地形的敏感性分析

本试验对各类典型植被指数的波段反射率与太阳入射角之间进行了分析,计算出植被波段反射率与太阳入射角之间的拟合回归方程和相关性系数,如图 1 所示。其中横轴表示太阳入射角余弦值,纵轴表示各个波段反射率值。

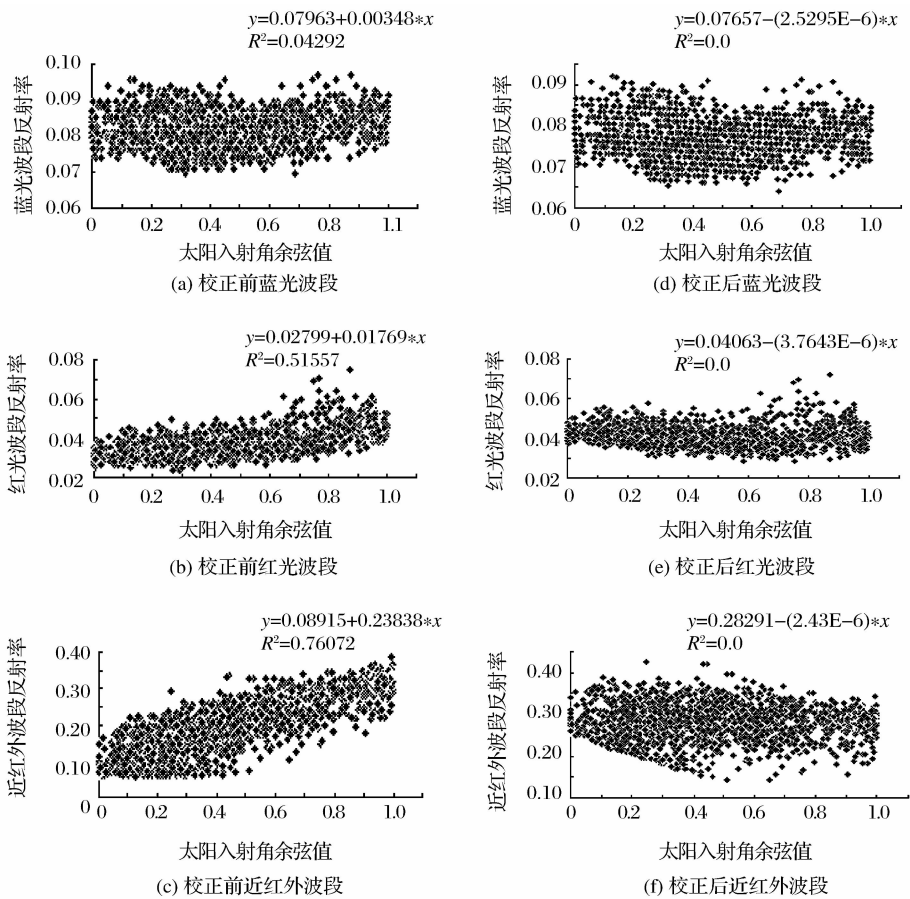


图 1 波段反射率与太阳入射角之间的拟合回归方程与相关性

Fig. 1 The correlation coefficients of band reflectivity and solar incidence angle

由图 1 所示,在消除地形影响后,所有波段反射率与太阳入射角之间的相关性都减小了。其中蓝光与太阳入射角的相关性只减小了 0.0429,说明蓝光对复杂地形不敏感,这可能是由于大气中蓝光易被散射,并且被植被叶绿素强烈吸收,所以到达地面的蓝光信息很少。而红光、近红外与太阳入射角的相关性分别减小了 0.5156、0.7607,如此高的差值说

明它们对地形变化很敏感,起伏地形对这些波段反射率的影响是不容忽视的。

3.2 植被指数对波段反射率的敏感性分析

基于 2.4 节的分析方法和公式(1)至公式(3),以波段反射率为基础,分析了植被指数对波段反射率的敏感程度,其波段反射率与植被指数之间的拟合回归方程和相关性,如表 1 所示。

表 1 植被指数与波段反射率的拟合系数及相关性  
Table 1 The correlation coefficients of band reflectivity and VIs

		$\alpha$		$k$		$R^2$	
		校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后
植被指数	NDVI						
波段反射率	R	0.4701	0.8482	5.5498	-2.4968	0.1535	0.1519
	NIR	0.4538	0.5977	1.0513	0.5269	0.6777	0.4108
植被指数	SAVI						
波段反射率	R	-0.0639	0.3523	10.8285	2.1386	0.4646	0.0509
	NIR	0.0398	0.1052	1.4097	1.1807	0.9690	0.9432
植被指数	EVI						
波段反射率	B	-0.0762	0.4546	7.1976	2.333 9	0.0438	0.0255
	R	-0.0782	0.4899	15.8824	3.5298	0.458 3	0.0635
	NIR	0.0732	0.1497	2.0702	1.7097	0.9584	0.9054

从表 1 可以看出,无论是否消除地形的影响,植被指数对近红外波段反射率的敏感性都比红光波段反射率高,说明植被指数对近红外的灵敏度比红光强;同时植被指数对波段反射率的敏感性还取决于植被指数的组合公式。

对于 NDVI,在消除地形影响前后,红光、近红外反射率与 NDVI 的相关性变化都比较小,分别减小了 0.0016、0.2669;相比之下 NDVI 对由复杂地形引起的近红外反射率变化敏感。然而对于 SAVI 和 EVI,情况却相反。SAVI 与红光反射率的相关性减小了 0.4137,与近红外相关性只减小了 0.0258,这表明 SAVI 对由复杂地形引起的红光反射率变化敏感。对于 EVI,情况也是如此,EVI 对由复杂地形引起的红光反射率变化响应强烈,对蓝光和近红外反射率的变化响应平淡。总的来说,

NDVI 对由复杂地形引起的近红外反射率的变化敏感,而 SAVI 和 EVI 对由地形引起的红光反射率的变化反应强烈。

在消除地形影响后,所有的波段反射率和植被指数之间的相关性都降低了,这表明消除地形影响后,植被指数随波段反射率的变化程度有所减小。这可能是由于消除地形影响后,波段反射率和植被指数的变化范围减小,它们的数值相对集中于平坦地表对应的均值,造成了波段反射率和植被指数之间相关性的降低。

3.3 植被指数对地形的敏感性分析

基于以上两部分的讨论,本文接下来对地形复杂区域的典型植被指数进行评估,如表 2 所示。从表 2 可知,复杂地形校正前后,NDVI 与太阳入射角之间的相关性变化小于 0.4,SAVI 和 EVI 与太阳

表 2 复杂地形下太阳入射角与植被指数的拟合方程及相关性  
Table 2 The related coefficients of solar incidence angle and vegetation index in rugged terrain

植被指数	$\alpha$		$k$		$R^2$	
	校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后
NDVI	0.0563	0.7456	0.2257	0.0023	0.4183	0.0005
SAVI	0.1700	0.4384	0.3270	0.0017	0.6981	0.0001
EVI	0.2671	0.6318	0.4753	0.0030	0.6763	0.0002

入射角之间的相关性变化分别达到了 0.7 和 0.65 左右,所以以上 3 种典型的植被指数受到复杂地形的影响是不容忽视的;相比之下,NDVI 比其它两种植被指数受地形的影响小。

从以上分析可以看出,红光和近红外波段反射率对复杂地形都很敏感,因为在消除地形影响前后,它们各自与太阳入射角之间的相关性分别减小了 0.5156 和 0.7607。然而,由于 NDVI 对由地形引起的波段反射率变化并不敏感,所以相比之下它基本上可以不受地形起伏的影响。然而,SAVI 与 EVI 对红光波段反射率的变化反应强烈,而红光波段反射率的变化受到地形起伏的影响,所以 SAVI 与 EVI 不能抵抗地形起伏带来的影响,对地形的变化比较敏感。

虽然 NDVI 对地形变化不敏感,能够比较好地克服地形变化带给植被指数评估的影响,但同时,它对波段反射率的变化也不敏感,因此在植被茂密区域常出现 NDVI“饱和”的情况。这对植被生态评估是不利的。相对地,SAVI 和 EVI 对地形的变化和波段反射率的变化都比较敏感。它们对波段反射率敏感可以很好的体现植被内部因素的变化,但是对

地形变化的敏感性又把不利于植被指数评估的外部因素纳入其中,这又将会影响植被指数评估的精度。因此,充分考虑地形对植被指数评估的影响是十分必要的。

3.4 植被指数空间分布评估

本文对研究区域地形校正前后植被指数的空间分布进行了评估,如图 2 所示。可以看出,地形对植被指数的影响十分明显,特别在低入射角的植被区域,其植被指数评估值与非植被地物的评估值相近。进行地形校正后,地形对植被指数的影响明显减小。

同时,本文对校正前后区域植被指数进行了统计,如表 3 所示。可以看出,虽然植被指数的均值各不相同,但是地形对植被指数的影响趋势是一致的。校正后,植被指数的标准偏差均明显减小,而均值却

表 3 地形校正前后植被指数评估

Table 3 VIs estimation before and after topographical correction

植被指数	均值		标准偏差	
	校正前	校正后	校正前	校正后
NDVI	0.6755	0.7467	0.097	0.0306
SAVI	0.3370	0.4392	0.1092	0.0453
EVI	0.5098	0.6333	0.1613	0.0670

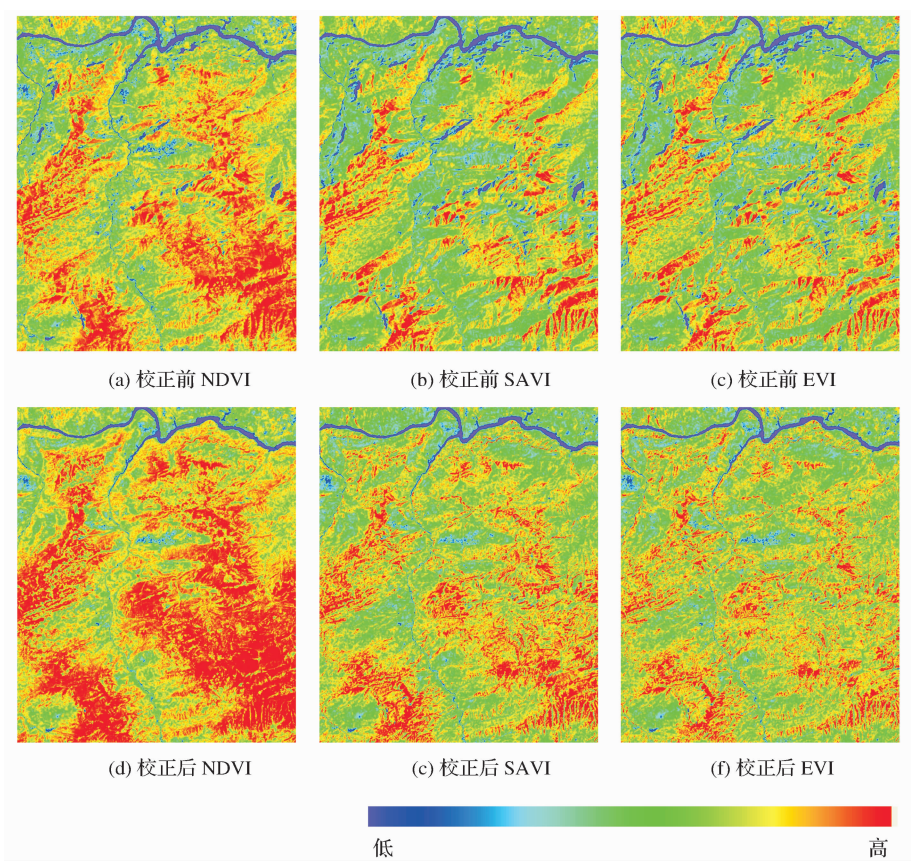


图 2 复杂地形区域植被指数分布图

Fig. 2 The spatial distribution of VIs in rugged terrain

增大。这主要是由于对于同质区域,植被指数应该相同或相似;而校正后的植被指数均集中于水平地表对应的植被指数数值。这和前文的分析是一致的。

## 4 结 论

由于植被指数是指通过多/高光谱遥感数据波段获取的植被参数,通过以上的试验可以发现,植被指数之所以受到地形起伏的影响,是因为植被指数主要受植被指数组合公式中的波段反射率的影响,而波段反射率又受地形起伏的影响;所以,由地形起伏引起的波段反射率的变化导致了植被指数的变化。在山区的卫星影像中,表面反射率强烈受到地形起伏的影响;特别是近红外和红光波段反射率受复杂地形影响比蓝光反射率明显。在这三种植被指数中,SAVI 和 EVI 对由地形起伏引起的红光波段反射率变化敏感,导致它们对地形的变化敏感。

总体来说,因为植被指数是波段反射率的线性或者非线性组合,而其中的红光波段反射率对复杂地形比较敏感,导致植被指数受地形起伏影响明显,所以植被指数受地形的影响总体上是不容忽视的。为了更好的监测山区植被的生长状况,进而对植被生物/物理量进行定量分析,必须考虑地形的影响,从而提高植被指数的评估精度。

### 参考文献:

- [1] Bnanari A, Morin D, Bonn F, *et al.* A Review of Vegetation Indices [J]. Remote Sensing Review, 1995, 13: 95-120.
- [2] Jiang Zhangyan, Huete A R, Chen Jin. Analysis of NDVI and Scaled

Difference Vegetation Index Retrievals of Vegetation Fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101: 366-378.

- [3] Hui Fengming, Tian Qingjiu, Jin Zhenyu. Research and Quantitative Analysis of the Correlation between Vegetation Index and Leaf Area Index [J]. Remote Sensing Information of China, 2003, 2: 10-13. [惠凤鸣, 田庆久, 金震宇, 等. 植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析[J]. 遥感信息, 2003, 2: 10-13.]
- [4] Xia Xueqi, Tian Qingjiu, Du Fenglan. Analysis of Topographical Effect on Retrieval of LAI from Remotely Sensed Data [J]. Remote Sensing Information of China, 2004, 2: 16-19. [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[J]. 遥感信息, 2004, 2: 16-19.]
- [5] Wang Peijuan, Sun Rui, Zhu Qijiang. Improvement on the Abilities of BEPS under Accidented Terrain [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11 (07): 1017-1026. [王培娟, 孙睿, 朱启疆, 等. 复杂地形条件下提高 BEPS 模型模拟能力的途径[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11 (07): 1017-1026.]
- [6] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS [C]. Proceedings of Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt, 1974, 351: 310-317.
- [7] Huete A R. A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25: 295-309.
- [8] Huang Wei, Zhang Liangpei, Li Pingxiang. A Topographic Correction Approach for Radiation of RS Images by Using Spatial Context Information [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35: 285-290. [黄微, 张良培, 李平湘. 一种顾及空间相关性遥感影像辐射度的地形校正算法[J]. 测绘学报, 2006, 35: 285-290.]
- [9] Qin Chun, Wang Jian. Improved CIVCO Topographic Correction Model and Application [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23 (1): 82-88. [秦春, 王建. CIVCO 地形校正模型的改进与应用[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23 (1): 82-88.]

## Evaluation of Topographical Influence on Vegetation Indices of Rugged Terrain

YAO Chen, HUANG Wei, LI Xian-hua

(Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Science,  
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Most vegetation distributes in rugged terrain and for the terrain is so complex, the same or similar vegetations show various reflectivities in remotely sensed imagery or the different vegetations have the similar reflectivities, which will lead the error on the vegetation index (VI) evaluation and also will reduce the precision of the vegetation biomass evaluation. In this paper, Landsat ETM+ imagery is adopted to evaluate the topographical influences on VI in complex terrain. The detailed analysis indicates that VI is sensitive to the variation of red-reflectivity which is strongly influenced by topography. Therefore, topographical influences on VI should not be neglected.

**Key words:** Vegetation Index; Rugged terrain; Reflectivity