

不同大气校正方法对森林叶面积指数遥感估算影响的比较^{*}

陈新芳¹ 陈镜明² 安树青¹ 刘玉虹¹ 方秀琴³ 王书明⁴

(¹ 南京大学生命科学院, 南京 210093; ² 多伦多大学地理系, 安大略 M5S 3G3; ³ 河海大学水资源环境学院, 南京 210098; ⁴ 南京大学地学院, 南京 210093)

摘要 利用 TM 原始图像以及经过 6S 模型和基于影像自身的 Gilabert 模型大气校正后的地面绝对反射率图像, 分别计算了褒河流域阔叶林和针阔混交林 2 种林型的 5 类光谱植被指数 (SR、NDVI、MNDVI、ARVI 和 RSR), 并建立各林型森林叶面积指数与同时相的各个植被指数的相关关系。结果表明, 2 种大气校正模型均显著提高了各植被指数与森林叶面积指数的相关关系, 除了对森林叶面积指数与植被指数 SR 和 NDVI 的相关关系影响不显著外, 对森林叶面积指数与植被指数 MNDVI、ARVI 和 RSR 相关关系的影响均非常显著。说明不同大气校正模型对叶面积指数的遥感估算结果有较大影响。因此, 在利用遥感数据进行定量分析、信息提取和生态遥感应用时, 不仅要进行大气校正, 而且还要慎重选择大气校正模型和植被指数。

关键词 大气校正, 6S 辐射传输模型, Gilabert 模型, 叶面积指数

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000 - 4890(2006)07 - 0769 - 05

Comparison of different atmospheric correction models in their effects on Landsat TM estimation of forest leaf area index. CHEN Xinfang¹, CHEN Jingming², AN Shuqing¹, LIU Yuhong¹, FANG Xiuqin³, WANG Shuming⁴ (¹ School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; ² Department of Geography and Program in Planning, University of Toronto, Ontario M5S 3G3, Canada; ³ College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; ⁴ School of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 769 ~ 773.

To compare the effects of two atmospheric correction models on the relationships between vegetation indices (VIs) and forest leaf area index (LAI), the atmospheric correction reflectance images on the basis of DN image were obtained by using 6S and Gilabert models. The simple ratio (SR), normalized difference vegetation index (NDVI), modified normalized difference vegetation index (MNDVI), atmospheric resistant vegetation index (ARVI) and reduced simple ratio (RSR) of the broad-leaved forests and mixed broad-leaved and coniferous forests in Baohe basin were estimated, and the relationships between the VIs and the ground-based measurements of LAI were calculated. The results showed that compared with DN image, the two models significantly increased the correlation coefficients between LAI and VIs except SR and NDVI. Different atmospheric correction models had significant effects on the estimation of forest leaf area. It was suggested that more attention should be paid to choose appropriate atmospheric correction models and VIs when remote sensing data were applied to quantitative analyzing and information collecting in field.

Key words atmospheric correction, 6S model, Gilabert model, leaf area index.

1 引言

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 指单位地表面积上总叶片面积 (双面或多面) 的一半^[10]。它是植被系统的重要参数, 用遥感影像反演 LAI、生产力、生物量等生态系统生物物理参数是植被生态遥感的重要内容之一^[1, 11]。尤其随着全球变化研究的深入、全球范围和大区域尺度的森林碳循环和森林水文分布式模型的建立, LAI 常常作为重要的输入因子而成为模型中不可缺少的组成部

分^[5, 6, 9, 13, 16]。目前存在很多使用遥感技术提取 LAI 的方法^[2, 15], 其中, 通过建立植被指数 (VI) 与 LAI 的相关关系来反演 LAI 的方法目前最实用^[3, 7, 10, 12]。但在这一方法中, 有很多干扰因素制约了反演的精度, 其中大气影响是一个最重要的因子^[1, 17, 18, 20]。

遥感技术是空间传感器获取地面地物信息的一

* 加拿大国际发展署项目 (CIDA) 和国家自然科学基金资助项目 (40128001)。

** 通讯作者

收稿日期: 2005 - 09 - 17 接受日期: 2006 - 04 - 11

个非常复杂的过程。传感器接收到的地面辐射,既包括了地面反射光谱信息,也记录了大气辐射传输效应引起的地面反射辐照度的变化信息。影像上灰度值的大小与地形、太阳光入射角、天空光散射、传感器观测角等有关。由于遥感数据获取时受到大气的影响,直接通过影像 DN 值获取的植被指数带有大量的噪音,如果影像不经过大气校正,就不能够剔除这些干扰因素,也就影响了 LAI 的提取精度,所以有必要对遥感影像进行大气校正。

在对地光学遥感中,大气影响是妨碍遥感定量化和应用的关键因素之一。目前大气校正模型大体可分为 3 类:基于影像特征的统计模型、基于地面定标的经验回归模型和基于大气传输理论的辐射传输模型。基于影像特征的模型优点是不需要地面光谱及大气环境参数的测量。辐射传输模型考虑光子与大气相互作用机理,物理意义明确。经验模型要求有地面实测光谱数据,对大范围 and 地形复杂区域几乎是难以实现,故本研究未考虑此种方法。本研究利用 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 大气辐射传输模型^[19]和基于 TM 影像自身的 Glibert 等^[14]和 Zhang 等^[21]大气校正模型分别对该影像进行了大气校正,得到地面反射率的反演,所产生的地面反射率图像消除了传感器和大气的影响。比较了基于 TM 原始影像的植被指数和叶面积指数的相关性和经过这 2 种大气校正模型校正后的植被指数和叶面积指数的相关性,以及这 2 种大气校正模型对叶面积指数和植被指数相关性的影响。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

褒河发源于秦岭太白山灵湫,在留坝县桑园流入汉中境内,经褒河水库流入汉中盆地,在勉县和汉台区交界处的孤山注入汉江,全长 175.5 km,流域面积 3 908 km²。褒河流域地处亚热带与暖温带过渡区域,秦岭西南坡;海拔高度 734 ~ 3 767 m,地势起伏很大;数百里褒水依山而行,从海拔 3 000 m 多的太白山飞流而下至石门峡谷,有 2 000 m 多落差。气候具有暖温带与亚热带过渡性山地气候特点,年平均降水量 782 mm,年平均气温 7.6 ℃。植被地带属北亚热带常绿落叶阔叶混交林地带和暖温带落叶阔叶林地带,主要的森林植被类型有落叶阔叶林,如栎树类 (*Quercus* spp.) 和油桐 (*Aleurites fordii*) 等,

针阔混交林,如华山松 (*Pinus armandi*)、油松 (*P. tabulaeformis*)、栎树类 (*Quercus* spp.) 和桦树类 (*Betula* spp.) 等,高山针叶林有冷杉 (*Abies fabric*) 等。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感数据 遥感数据为 2003 年 6 月 5 日的美国陆地资源卫星 TM 数据,其轨道号是 128/36 和 128/37,太阳高度角 64°。

2.2.2 测定方法 森林叶面积指数的野外调查是利用加拿大国家遥感中心陈镜明博士研制的跟踪辐射与冠层结构测量仪 (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, TRAC) 测得^[8]。野外观测于 2003 年 7 月期间进行。用手持式 Magellan GPS Field Pro V 进行样地定位,根据 GPS 的定位坐标 (WGS84 坐标) 在 TM 影像中选择距样地坐标最近的像元代表该样地,以该像元为中心,提取该像元相邻 3 × 3 像元的反射光谱信息,求其平均值,代表该样地的反射光谱信息。

结合地形图、森林分布图和实地考察将林型分成阔叶林区和针阔混交林区,考虑到地形影响,在每一个阔叶林样区和针阔混交林样区选择地势较为平坦、树木分布均匀的地区测量。野外 LAI 观测场布设严格按照 TRAC 仪器野外操作规范的要求进行,即观测场一般以相隔约 15 m 的 3 根长 50 m 左右的测线布设,取这 3 条线的平均 LAI 为该测点的实际 LAI。测点的选择尽量考虑到植被种类的不同及研究区内测点分布的均匀性。野外实际有效观测样线 168 条,观测场 56 个,基本上涵盖了研究区主要的植被类型;遥感图像预处理按以下顺序进行:1) 辐射量根据公式 $L_0 = A \times DN + B$, 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 TM 影像的头文件中获取,通过 ENVI 4.0 图像处理系统定标模块,将该影像 DN 值转变为卫星传感器高度的反射率值,从而消除传感器增益和暗电流的影响。2) 在大气校正方面,6S 模型运行时大气模式选择中纬度夏季模式;Glibert 模型是根据影像 1、3 波段暗像元的 DN 值推导出相关的大气参数,以此来计算其它 4 个波段的大气辐射能量,得到影像中 1、2、3、4、5 和 7 波段的地表反射率和 DN 值的对应关系。3) 几何校正根据 1:50 000 地形图选地面控制点 (GCP) 30 个,平均标准误差 (RMS) 为 0.34 (±0.15) 个像元,即地面几何误差平均为 10.2 m。两景影像分波段几何校正后利用 Erdas 8.6 软件拼

接,按研究区经纬度范围切割。

植被指数已经发展有 50 余种^[4]。本文采用较常用的 2 波段植被指数 SR (比值植被指数)、NDVI (归一化差值植被指数)和三波段的植被指数 MNDVI (修正归一化差值植被指数)、ARVI (大气阻抗植被指数)和 RSR (缩小的比值植被指数)与野外实测 LAI 数据,分别在 2 种大气校正方式下作相关性分析,以期找出较适合于研究区的 LAI 统计模型和大气校正方法。利用精校正 TM 影像的 3 (红波)、4 (近红外)、5 (短波红外) 波段提取各种植被指数 (VI) 如下:

1) 比值植被指数

$$SR = R_n / R_r$$

2) 归一化植被指数

$$NDVI = (R_n - R_r) / (R_n + R_r)$$

3) 修正归一化差值植被指数

$$MNDVI = NDVI [(1 - (R_{swir} - R_{swirmin}) / (R_{swirmax} - R_{swirmin}))]$$

4) 大气阻抗植被指数

$$ARVI = (R_n - R_{rb}) / (R_n + R_{rb})$$

式中, $R_{rb} = R_r - (R_b - R_r)$ 。

5) 缩小的比值植被指数

$$RSR = SR [1 - (R_{swir} - R_{swirmin}) / (R_{swirmax} - R_{swirmin})]$$

式中, R_n 、 R_r 和 R_{swir} 分别是 TM 4、3、5 通道的反射率; R_b 是与气溶胶类型和性质有关的参数; $R_{swirmin}$ 和 $R_{swirmax}$ 分别是 5 通道反射率的最小值和最大值, 分别取 5 波段反射率直方图两端 1% 处的反射率

值; R_b 是蓝光反射率。

由于阔叶树和针叶树反射光谱特征上的差异, 因此不能用相同的模型来估算不同类型森林的叶面积指数, 而应先将研究区进行分类研究。TRACWin 软件处理后有效森林样地叶面积指数数据 57 个, 从中随机选取 30 个数据 (15 个阔叶林数据和 15 个针阔混交林数据) 作为建模数据, 剩余 27 个数据 (12 个阔叶林数据和 15 个针阔混交林数据) 作为对模型的验证。对 TM 原始影像和经过预处理后的 TM 影像依据 30 个野外实测值经纬度坐标提取其相应点的植被指数, 分别探究实测 LAI 与经过不同大气校正模型校正后的 Landsat TM 同时相影像各植被指数 (SR、NDVI、ARVI、RSR、MNDVI) 的相关关系。对应的各种植被指数 SR、NDVI、MNDVI、ARVI 和 RSR 值, 均采用地面对应点相邻 3 × 3 像元均值。运用 Origin 软件对叶面积指数与植被指数进行线性、对数、乘幂、指数回归拟合分析, 选出最佳拟合回归方程。

3 结果与分析

表 1 列出选择出的 2 种大气校正方法的最佳拟合回归方程和相关性 (R^2)。由表 1 可知, 经过 6S 模型和 Glabert 模型大气校正后, 去除了大气辐射的影响, 与原始影像相比较, 计算出的各个植被指数与实测的 LAI 之间的相关性都有了显著提高。说明随着大气影响的去除, 计算出的各个植被指数更能真实地体现地面植被的覆盖情况。

表 1 2 种大气校正方法的最佳的拟合回归方程及相关性 (R^2) 比较

Tab. 1 Comparison of the correlation coefficients of forest leaf area index estimates and vegetation indices using different atmospheric correction models

植被指数	未经大气校正 (DN 值)		6S 模型		Glabert 模型	
	阔叶林	针阔混交林	阔叶林	针阔混交林	阔叶林	针阔混交林
SR	$y = 21.65 SR + 0.1946$ $R^2 = 0.2473$	$LAI = 23.7253 SR + 0.1174$ $R^2 = 0.2169$	$LAI = 0.1938 SR + 1.74$ $R^2 = 0.5389$	$LAI = 1.7153 \ln(SR) + 0.6427$ $R^2 = 0.4502$	$LAI = 0.371 SR + 1.6011$ $R^2 = 0.504$	$LAI = 1.7233 \ln(SR) + 1.4705$ $R^2 = 0.4465$
NDVI	$LAI = 19.91 NDVI + 0.2923$ $R^2 = 0.3136$	$LAI = 20.74 NDVI + 0.1683$ $R^2 = 0.2638$	$LAI = 5.9709 NDVI - 0.8423$ $R^2 = 0.4782$	$LAI = 5.6974 NDVI - 0.1986$ $R^2 = 0.3971$	$LAI = 4.1475 NDVI + 1.0068$ $R^2 = 0.4703$	$LAI = 4.7946 NDVI + 0.9969$ $R^2 = 0.4589$
MNDVI	$y = 16.63 MNDVI + 3.6173$ $R^2 = 0.2754$	负相关	$LAI = 7.1931 MNDVI + 0.3472$ $R^2 = 0.4969$	$LAI = 1.2218 MNDVI^{0.4743}$ $R^2 = 0.4024$	$LAI = 6.919 MNDVI + 4.1279$ $R^2 = 0.45674$	$LAI = 3.7268 e^{0.6999 MNDVI}$ $R^2 = 0.4173$
ARVI	$LAI = 9.7746 ARVI + 0.1853$ $R^2 = 0.3582$	负相关	$LAI = 5.055 ARVI^{0.7829}$ $R^2 = 0.7066$	$LAI = 2.3754 ARVI^{0.3152}$ $R^2 = 0.3938$	$LAI = 4.3339 ARVI + 0.9703$ $R^2 = 0.494$	$LAI = 3.4349 ARVI + 2.0084$ $R^2 = 0.4306$
RSR	$LAI = 10.2845 RSR + 0.2106$ $R^2 = 0.3347$	$LAI = 17.67 RSR + 0.3821$ $R^2 = 0.2569$	$LAI = 0.2648 RSR + 2.1053$ $R^2 = 0.4772$	$LAI = 0.3507 RSR + 2.2447$ $R^2 = 0.4499$	$LAI = 0.4361 RSR + 2.4102$ $R^2 = 0.3633$	$LAI = 0.5161 RSR + 3.8281$ $R^2 = 0.3887$

未经过大气校正的 MNDVI 和 ARVI 与针阔混交林 LAI 的相关性是负相关,这可能是由于稀疏林地内针叶林比例较大、林内阴影多造成的。经过 6S 模型和 Gilabert 模型大气校正后,其相关关系为正相关,相关性也得到很大提高。

从植被类型来看,阔叶林 LAI 与各个植被指数的相关性普遍高于针阔混交林 LAI 与各个植被指数的相关性;从大气校正模型来看,6S 模型大气校正后各个植被指数与 LAI 的相关性要高于 Gilabert 模型。

对于 2 波段植被指数 SR 和 NDVI 来说,2 种大气校正方法下其与 LAI 的相关关系比较一致;植被指数 MNDVI、ARVI 和 RSR 虽然都引进了 3 个波段,但不同的校正方法对其与 LAI 的相关性的改善并不一致,对阔叶林的大气校正,6S 模型较优,而

对于针阔混交林,则 Gilabert 模型较优;RSR 和各林型的 LAI 都是线性相关;MNDVI 和各林型的 LAI 的相关关系变化较大。

对于阔叶林,ARVI 与 LAI 的相关性在任一模型大气校正的情况下都高于 NDVI 与 LAI 的相关性,原因在于 ARVI 引入了蓝光波段与同气溶胶类型和性质有关的参数 来进一步消除大气校正后残余的大气影响。在所有的估算模型中,6S 模型大气校正后的 ARVI 与阔叶林 LAI 相关性最高,但与针阔混交林 LAI 相关性却不高。对本研究较理想的植被指数是经过 6S 模型大气校正后的 SR 和经过 Gilabert 模型校正后的 SR,与阔叶林 LAI 的最佳相关关系均是线性关系,与针阔混交林 LAI 的最佳相关关系均是对数关系(表 1)。因此,选用这 4 种较优的估算模型来进行验证。

研究表明,6S 模型大气校正后阔叶林实测 LAI 值与估算值的相关性较高 ($R^2 = 0.6839$);而 Gilabert 模型大气校正后针阔混交林实测 LAI 值与估算值的相关性则很低 ($R^2 = 0.237$);故对本研究区应选用 6S 模型大气校正后 SR 来估算阔叶林 LAI。对于针阔混交林,6S 模型大气校正和 Gilabert 模型大气校正后实测 LAI 值与估算值的相关性都很高(图 1),可选用任一大气校正方法校正后 SR 来估算针阔混交林 LAI。

4 结 论

未经大气校正的各个植被指数与 LAI 的相关性都不显著;经过任一模型大气校正后,各个植被指数与 LAI 之间的相关性都很显著,说明经过大气校正后的植被指数更能真实体现地面植被的覆盖状况,所以很有必要对遥感影像进行大气校正。

2 种大气校正方法对植被指数 SR 和 NDVI 与 LAI 相关关系的影响不大,这也是对 SR 和 NDVI 自发展以来一直在植被、生态遥感应用研究中被应用最多的一个有力证明。

对于不同的植被类型,LAI 与植被指数的关系和回归方程也表现出一定差异,因此将植被进行分类对 LAI 的遥感估算是必要的。

对于相同的植被类型,不同的大气校正方法下的植被指数与 LAI 的关系和相关性也表现出一定的差异,所以,利用遥感数据进此进行定量分析、信息提取、遥感应用时,一定要重视遥感影像的预处理——大气校正,将遥感影像原始 DN 值数据转换为

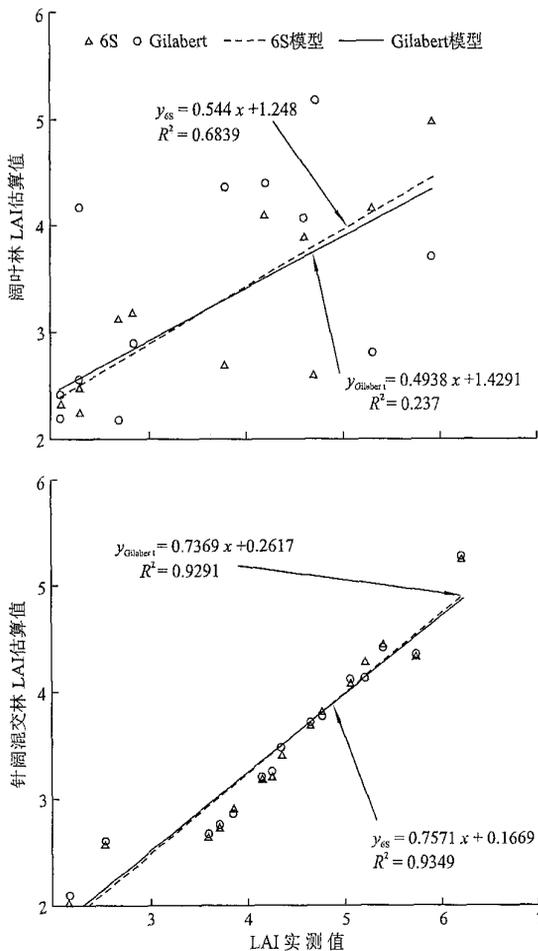


图 1 6S 模型和 Gilabert 模型估算的阔叶林和针阔混交林 LAI 值和实测 LAI 值相关性比较

Fig. 1 Comparison of the relationships between measured LAI and estimated LAI of broad-leaved forest, conifer and broad-leaved mixed forest using 6S model and Gilabert model

反射率,剔除干扰因素,对于正确利用遥感数据进行定量分析和信息提取、参数估算、遥感应用十分关键。

参考文献

- [1] 王军邦,牛铮,胡秉民,等. 2004. 定量遥感在生态学研究中的基础应用[J]. 生态学杂志, **23**(2):152~157.
- [2] 方秀琴,张万昌. 2003. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, **57**(3):58~62.
- [3] 方秀琴,张万昌,刘三超. 2004. 黑河流域叶面积指数的遥感估算[J]. 国土资源遥感, **59**(1):27~30.
- [4] 田庆久,闵祥军. 1998. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, **13**(4):327~333.
- [5] 张志强,王礼先,余新晓,等. 2001. 森林植被影响径流形成机制研究进展[J]. 自然资源学报, **16**(1):71~78.
- [6] 张娜,于贵瑞. 2003. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟[J]. 应用生态学报, **14**(5):643~652.
- [7] 惠凤鸣,田庆久,金震宇,等. 2003. 植被指数与叶面积指数关系研究及定量化分析[J]. 遥感信息, **2**:10~12.
- [8] Chen JM. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation in leaf area index of boreal conifer forests[J]. *Agric. For. Meteorol.*, **80**:135~163.
- [9] Chen JM, Chen XY, Ju WM, et al. 2005. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. *J. Hydrol.*, **305**:15~39.
- [10] Chen JM, Cihlar J. 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forest using Landsat TM images[J]. *Remote Sens. Environ.*, **55**:153~162.
- [11] Chen JM, Pavlic G, Brown L, et al. 2001. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements[J]. *Remote Sens. Environ.*, **80**:165~184.
- [12] Eklundh L, Harrie L, Kuusk A. 2001. Investigating relationship between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest[J]. *Remote Sens. Environ.*, **78**:239~251.
- [13] Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, et al. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, **281**:237~240.
- [14] Gilbert MA, Conese C, Maselli F. 1994. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images[J]. *Int. J. Remote Sens.*, **15**:2065~2086.
- [15] Gower ST, Kucharik JK, Norman JM. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems[J]. *Remote Sens. Environ.*, **70**:29~51.
- [16] Liu J, Chen JM, Cihlar J, et al. 1997. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. *Remote Sens. Environ.*, **62**:158~175.
- [17] Thome KJ. 2001. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method[J]. *Remote Sens. Environ.*, **78**:127~38.
- [18] Vermote EF, El Saleous NZ, Justice CO. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results[J]. *Remote Sens. Environ.*, **83**:97~111.
- [19] Vermote EF, Tanre D, Deuze JL, et al. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **35**:675~686.
- [20] Vogelmann JE, Helder D, Morfitt R, et al. 2001. Effects of Landsat 5 thematic mapper and Landsat 7 enhanced thematic mapper plus radiometric and geometric calibrations and corrections on landscape characterization[J]. *Remote Sens. Environ.*, **78**:55~70.
- [21] Zhang WC, Yamaguchi Y, Ogaw K. 2000. Evaluation of the pre-processing of the remotely sensed data on the actual evapotranspiration, surface soil moisture mapping by an approach using Landsat, DEM and Meteorological data[J]. *Geocartointer*, **15**:57~67.

作者简介 陈新芳,女,1973年生,博士研究生。主要从事生态遥感和全球变化研究,发表论文5篇。E-mail: xinfangnju@yahoo.com.cn

责任编辑 王伟