

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 2011

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第31卷 第24期 2011年12月 (半月刊)

## 目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性.....	刘波, 郑雪芳, 孙大光, 等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应.....	尹红, 王靖, 刘洪滨, 等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程.....	李海波, 李英华, 孙铁珩, 等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划.....	肖燚, 陈圣宾, 张路, 等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例.....	鲁春霞, 刘铭, 冯跃, 等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征.....	许倍慎, 周勇, 徐理, 等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响.....	李宁云, 袁华, 田昆, 等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例.....	宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力.....	韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究.....	张杰, 张强 (7418)
基于GIS的下辽河平原地下水生态敏感性评价.....	孙才志, 杨磊, 胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性.....	黄静, 崔胜辉, 李方一, 等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析.....	钟林生, 王婧 (7450)
黄腹山鹪莺稳定的配偶关系限制雄性欺骗者.....	褚福印, 唐思贤, 潘虎君, 等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响.....	朱俊霞, 王勇, 张美文, 等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统.....	祁君, 苏志勇 (7471)
桑科中4种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究.....	张琳, WANG Baode, 许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系.....	杨忠岐, 王小艺, 王宝, 等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响.....	李乐, 万冬梅, 刘鹤, 等 (7492)
鸭绿江口湿地鸻鹬类停歇地的生物生态研究.....	宋伦, 杨国军, 李爱, 等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征.....	王海梅, 李政海, 乌兰, 等 (7511)
UV-B辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响.....	兰春剑, 江洪, 黄梅玲, 等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理.....	赵风华, 王秋凤, 王建林, 等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较.....	巩国丽, 陈辉, 段德玉 (7533)
2010年冬季寒冷天气对闽江口3种红树植物幼苗的影响.....	雍石泉, 全川, 庄晨辉, 等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性.....	谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等 (7551)
芪对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响.....	谢晓梅, 廖敏, 杨静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定.....	张丽珍, 樊晶晶, 牛伟, 等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响.....	安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建.....	楼波, 徐毅, 林振冠 (7591)
<b>专论与综述</b>	
西南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响.....	张远东, 刘世荣, 顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展.....	胡广录, 赵文智, 王岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物.....	高东, 何霞红, 朱书生 (7617)
<b>研究简报</b>	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征.....	刘刚, 沈守云, 闫文德, 等 (7625)
氯氟菊酯和溴氟菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响.....	黄林, 刘昌利, 韦传宝, 等 (7632)
<b>学术信息与动态</b>	
SCOPE-ZHONGYU环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办.....	(7639)
《生态学报》3篇文章入选2010年中国百篇最具影响国内学术论文等.....	(I)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境, 同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中, 但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变, 形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭、绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬, 远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

张杰, 张强. 影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究. 生态学报, 2011, 31(24): 7418-7427.  
Zhang J, Zhang Q. The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7418-7427.

## 影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子 及反照率参数化研究

张杰<sup>1,\*</sup>, 张强<sup>2</sup>

(1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京信息工程大学,南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020)

**摘要:**通过应用高光谱反射仪进行各种植被覆盖度地物的同期观测,分析不同地物光谱反射率和宽波段反照率的差异,得出:除太阳高度角的影响外,植被的不同生育期及生长状况决定的叶绿素、细胞构造和含水量等要素都会影响植物光谱反射率;基于归一化植被指数(*NDVI*)、归一化植被水分指数(*NDWI*)、土壤体积含水量以及参考对象的光谱曲线建立了植物光谱反射率的估算模型,能较好地反映地物光谱反射率特征;基于地物波谱反射率估算得到的全波段反照率误差在 0.02 范围内,可以作为反照率遥感反演和转换的依据;该方法也为高光谱遥感在反照率等陆面过程参数尺度耦合和转换过程中应用奠定了基础。

**关键词:**地表反照率; 光谱反射率; 尺度转换; 归一化植被指数; 归一化植被水分指数; 非均匀地表

### The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization

ZHANG Jie<sup>1,\*</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, 730020, China

**Abstract:** Remote sensing of albedo over inhomogeneous surfaces is an important topic that involves core problems such as assuring incidence angle, reflection angle and spectrum continuity. Hyper-spectral remote sensing is a good way to investigate the spectral continuity effect on albedo retrieval. In this research, synchronized observations of a wide range of soil and vegetative land cover were performed using the hyper-spectral instrument ASD FieldSpec Pro FRTM. Differences between spectral reflectance and broad albedo were analyzed. Spectral curves show that there are large differences at visible and near-infrared wavelengths; reflectance is low from 400 to 450 nm and from 650 to 700 nm due to strong chlorophyll absorption; reflectance is high, from 750 to 1300 nm due to cell structure reflectance; and reflectance is low from 1360 to 1470 nm, 1830 to 2080 nm, and 2350 to 2500 nm, due to water vapor absorption. In addition to the sun zenith angle, chlorophyll, the cell structure of vegetation and water content are shown to be the main factors affecting the spectral reflectance of underlying surfaces, which are determined by the different growth stages and conditions of the vegetation. Therefore, chlorophyll, the cell structure of vegetation and water content are considered to be the important distinguishing indices for describing the spectral reflectance of sparse vegetation and inhomogeneous surfaces. They can be described by the normal difference vegetation index (*NDVI*), the normal difference vegetation water index (*NDWI*), and the soil water content capacity (*SWCC*), respectively.

There is a good negative logarithmic relationship between albedo and *SWCC* when *SWCC* is larger than 0.2, and a

基金项目:国家自然科学基金(40830957;40805009)

收稿日期:2011-03-27; 修订日期:2011-09-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gs-zhangjie@163.com

negative logarithmic relationship and linearity between albedo and both *NDVI* and *NDWI*. Based on the relationships, an albedo retrieval model is estimated that relies on the reference spectral reflectance of the vegetation and soil. Spectral wavelengths between 0.3 and 2.35  $\mu\text{m}$  are divided into 12 sections; the broad albedo is estimated by combining the 12 reflectance bands with a weighting relationship. Testing shows that the model can readily reflect the spectral reflectance and albedo, with an estimated value very closed to the observed value. The error in the albedo is less than 0.02, and relative error is from 8% to 13%, which shows that the model is fit for the retrieval of albedo. However, the model still needs to improve. The estimated spectral reflectance at near infrared wavelengths (750—1000 nm) is a little large, and the maximum absolute error is 0.015, which means that the model cannot correspond to the cell structure of the vegetation. The Aster spectrum library provides many kinds of land cover and spectral curves, which can be used for the model application.

As with other land process parameters, the theory of albedo retrieval for inhomogeneous surfaces is a basic problem involving parameterization, scale conversion, and scale coupling. Regions of low vegetation coverage are assumed to be mixed cells, and spectral reflectance can be expressed according to a model that may include reference vegetation, soil spectral reflectance curves, *NDVI*, *NDWI* and SWCC. The model determines the effect factor and mechanism, and at the same time, can be dependent on the retrieval of satellite albedo information. In addition, with the development of satellite detection technologies, hyper-spectral remote sensing has good prospects. This work can support the application of hyper-spectral remote sensing techniques to scale conversion and scale coupling of land process parameters over inhomogeneous surfaces.

**Key Words:** albedo; continuum spectral reflectance; scale conversion and scale coupling; *NDVI*; *NDWI*; inhomogeneous surface

地表反照率是表征地球表面对太阳辐射的反射能力的参数,是一个广泛应用于地表能量平衡、中长期天气预测和全球变化研究的重要参数<sup>[1-4]</sup>。反照率主要受下垫面物理状况、入射辐射光谱分布、太阳天顶角等因素影响。定点观测的反照率可以为认识单一、均匀下垫面反照率特征提供依据,但由于实际下垫面的非均匀性,导致定点观测结果与卫星像元尺度和模式尺度反照率之间存在较大的差异<sup>[3]</sup>,差异的存在在一定程度上影响了陆面过程模式和气候模式的发展,因此,有必要进行反照率参数的空间尺度耦合和尺度转化<sup>[1-2]</sup>。随着遥感技术的发展,反照率遥感反演的方法逐渐取代传统的通过实测资料结合地表覆盖类型推算的方法,成为监测全球地表短波反照率唯一可行的方法<sup>[2]</sup>。目前,基于遥感资料进行陆面参数的尺度分析方法通常有图示法、回归分析、变异函数、自相关分析、谱分析、分形和小波变换<sup>[4-8]</sup>等。但是,上述方法在实现参数空间尺度耦合和转换方面,不能满足模式尺度划分的需求,因此,对反照率进行尺度耦合还需要从影响地物反照率差异的因子和机理方面进一步分析探究。

进行反照率遥感反演所涉及的核心问题是确定入射、反射角和保证观测光谱的连续性<sup>[9]</sup>。搭载在Terra卫星上的多角度成像光谱辐射计(The Multiangle Imaging SpectroRadiometer, MISR) MISR可同时进行4个波段9个角度的观测,为多角度反照率的反演和验证提供了新的途径<sup>[10-11]</sup>。然而,由于卫星传感器仅能收集有限离散光谱波段的信息,难以直接获取地物的连续光谱,所以用有限波段权重表示反照率也存在一定的缺憾<sup>[12-13]</sup>。为弥补光谱信息的不足,Zhao等<sup>[14]</sup>采纳光谱弥补的方法和6S模式模拟方法得到光谱反射率,这一结果不仅可以得到宽波段反照率,而且可以通过分析光谱反射率的曲线变化揭示影响光谱反射率差异和反照率空间尺度耦合、尺度转换的决定因素。由于陆面参数尺度转化在发展数值模式中具有重要意义,本文将重点研究尺度转化问题。

本研究将在考虑太阳天顶角和观测角度的基础之上,从光谱反射率特征出发,应用高光谱反射仪进行各种植被覆盖度的地物反射率光谱同期观测,分析不同地物连续光谱反射率的差异,寻找光谱反射率的转换关系,以用于遥感像元尺度的升尺度和降尺度转换,力求满足各种尺度的模式应用。

## 1 观测及方法

国家自然科学基金重点项目“黄土高原陆面过程观测试验研究”为了探索空间尺度耦合和升尺度转化过程<sup>[1]</sup>,主要选择黄土高原的董志塬作为典型试验区域(107.73°E, 35.3°N)。位于黄土高原上的董志塬是目前世界上保存最完整、面积最大的黄土塬区,其空间尺度在100 km左右,面积近1000 km<sup>2</sup>,地形平坦,是较为理想的尺度转化试验区(图1a)。区域内植被稀少,其非均匀性特征主要体现在植被覆盖度低、植被含水量受外界条件影响较敏感、土壤湿度日变化显著等。同时,该项目以中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(104.62°E, 35.58°N)和兰州榆中(104.14°E, 35.95°N)为辅助站,同步进行了为期2a的局地观测和试验、LAS平均通量观测、MODIS卫星遥感反演等工作。项目观测区设有16 m高的气象观测塔,塔上安装了常规气象梯度、开路涡动相关观测系统及其数据采集器(CR5000,为美国Campbell公司生产);CO<sub>2</sub>和土壤热通量、地表温度观测等设备;同时配备的辐射观测系统(美国Eppley公司生产)可以观测包括太阳总辐射、反射辐射、地表长波辐射、大气长波辐射等辐射,通过反射辐射与太阳总辐射比值可得到全波段反照率。所选取的研究区域属于半干旱雨养农业区,年降水量300 mm左右,植被覆盖度小,为了便于观测不同覆盖度的作物光谱特征,对该地区适宜种植的土豆、小麦、玉米等农作物分别进行分块种植,每块面积约666.7 m<sup>2</sup>,同时增加了5 m×10 m大小的对比区域。对作物的光谱观测采用美国ASD(AutomaticSpectral Device)公司的ASD FieldSpec Pro FRTM高光谱地物波谱仪,光谱波段包括了大部分太阳短波和近红外波段,波段值为350—2500 nm。其中,350—1000 nm光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm;1000—2500 nm光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm,可以用于全波段反照率的研究。本研究采用2009年7月16至8月14晴空每日白天时隔1 h不同覆盖度土豆共600个样本的光谱观测资料、300个土壤光谱观测样本和每30 min的辐射观测资料,研究不同覆盖度土豆的光谱反射率特征,进行基于光谱反射率的宽带反照率估算。图1b给出28个样本的光谱曲线,其中细线代表的光谱曲线为研究参考样本,用于光谱曲线估算模型应用,粗线代表的光谱曲线为模型估算结果的检验样本,各样本光谱曲线差异波动显著,反映了该时间段里不同覆盖度的土豆生长状况,所取样本具有一定的代表性。

归一化植被指数NDVI在一定程度上消除了云等因素的影响,能较真实地反映植被叶绿素含量和健康状况:

$$NDVI = \frac{R_n - R_r}{R_n + R_r} \quad (1)$$

式中,NDVI、R<sub>n</sub>、R<sub>r</sub>分别为归一化植被指数、近红外波段(841—876 nm)和红光波段(620—670 nm)的反射率,两个波段范围与MODIS卫星设置的波段相同,波段光谱较窄,避开了近红外波段的水汽吸收带,对稀疏植被区域更加敏感。

通过研究分析发现:植被细胞结构对水分变化较为敏感,主要表现为一个近红外波段1(750—950 nm)与另一个近红外波段2(1220—1280 nm)之间的相对变化。在MODIS卫星传感器上,设置了波段5(1230—1250 nm)反射率反映大气中水分吸收特征<sup>[16-17]</sup>,用近红外波段2(841—876 nm)反应植被生长状况。为了利用卫星资料反映细胞结构对水分变化的敏感性,本研究采用Gao等<sup>[18]</sup>方法将两个波段反射率构建了一个反映该特征的指标,即归一化植被水分指数:

$$NDWI = \frac{R_n - R_w}{R_n + R_w} \quad (2)$$

式中,NDWI、R<sub>n</sub>、R<sub>w</sub>分别为归一化植被水分指数、近红外波段(841—876 nm)和水分吸收波段(1230—1250 nm)的辐射值。图1给出NDWI与裸地、低覆盖度土豆、高覆盖度土豆区域土壤体积含水量的关系及趋势线分布,二者有较好的散点关系,但是也存在差异。说明该指数可以大体反映土壤和植被水分的特征,也能反映植被细胞结构的波段反射率对水分变化有响应。

为了便于理解,在对比分析植被反射率变化曲线时分别给出研究样本的覆盖度,覆盖度的计算采用Gutman G等<sup>[19]</sup>提出的公式:

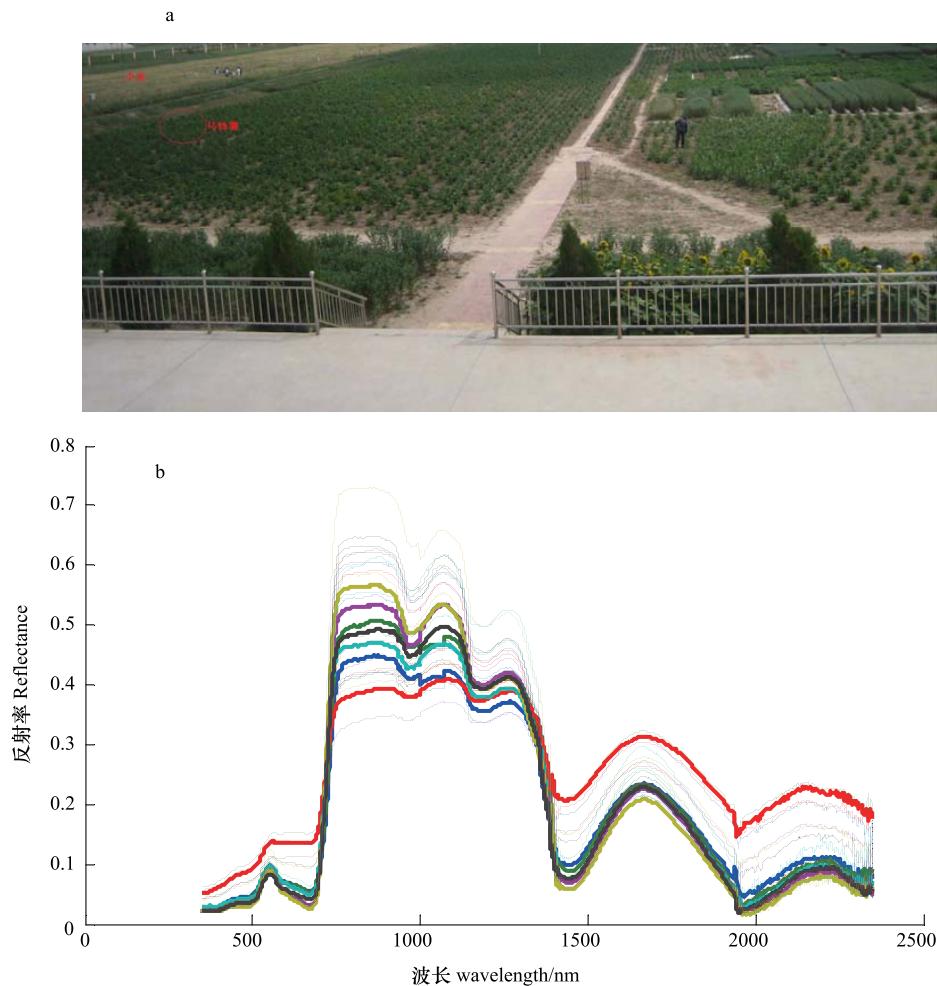


图1 试验地概况和土豆光谱特征(粗线是估算所需的参考样本,实线是检验样本)

Fig. 1 Survey of experiment region and tomato spectrum (thick line is for reference and thin line is for testing of estimated result)

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} + NDVI_{\min}} \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 典型地物光谱反射率的特征

图3给出2009年7月27日观测的土壤、两种覆盖度土豆的日平均光谱反射率特征。裸地、低覆盖度植被、高覆盖度植被的归一化植被指数分别为0.10、0.51、0.87,对应的覆盖度分别为0.02、0.44、0.81。由图可见:不同覆盖度植物的光谱曲线变化趋势有一致性;土壤光谱曲线不同于植被光谱曲线,在可见光、近红外波段上都有很大差异。由于色素吸收决定着植被可见光波段的光谱反射率,而400—450 nm、650—700 nm谱段是叶绿素的强吸收带,故该波段植被的反射率很低;细胞结构决定近红外波段的光谱反射率,所以植被在750—1300 nm谱段具有强烈反射的特性,同时,因为水分吸收,出现了两个低反射率区域;水汽吸收决定了

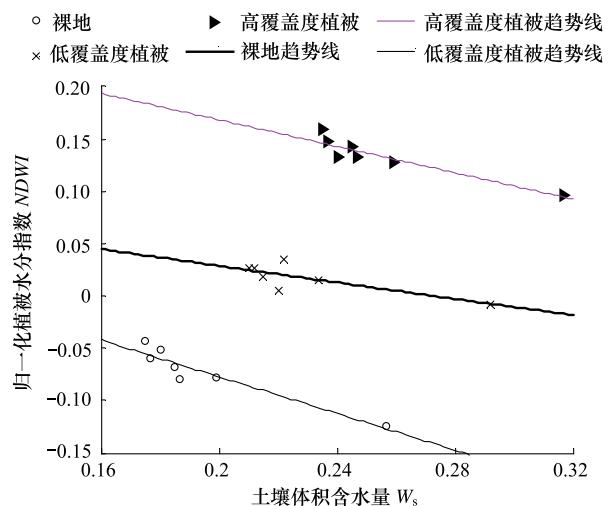


图2 NDWI与土壤体积含水量 Ws 的散点关系

Fig. 2 relation of vegetation water index and soil water content capacity

短波红外的光谱反射率特性,因此,在1360—1470 nm、1830—2080 nm、2350—2500 nm谱段的低反射率与含水量的强吸收有关。由上述分析可知,决定绿色植物反射率的因素主要是叶绿素、细胞构造和含水量;不同种类植物反射光谱曲线的变化趋势相同,而植物与其它地物的反射光谱曲线显著不同,这也是遥感估测生物量的基础。

与高覆盖度植被相比,低覆盖度植被在近红外波段750—1300 nm光谱反射率偏低,而在可见光和其它近红外波段光谱反射率偏高,说明低覆盖度相对高覆盖度的土豆含水量有所减少,叶绿素含量也有所减少,细胞的结构有明显差别。受此影响,由可见光和近红外波段产生的归一化植被指数也会显著减小,进一步分析可以看出:归一化植被指数能反映植物的覆盖度和生长状况。低覆盖度植被的光谱反射率里包括大量土壤的光谱反射率特征,属于非均一下垫面的反射率特征。这种非均匀下垫面是自然界存在的主要形式,卫星遥感和数值模式所需要的像元尺度和模式尺度信息包括类似的结构。

## 2.2 植被光谱反射率的时间变化特征

图4是2009年7月27日11:00—19:00每2 h的高覆盖度土豆的光谱反射率曲线,土豆的覆盖度为0.81。由图可以看出,一天中,光谱曲线变化趋势既有一致性又有差异:在近红外波段的光谱反射率差异较大,具体表现为光谱反射率从早上开始逐渐减小,15:00达到最低值,然后开始增加,说明反射率的变化与太阳高度角的变化有密切关系;在可见光波段的光谱反射率变化较小。据此可得:太阳高度角对反射率有很大影响。与15:00之前的波谱反射率相比,15:00之后的水汽吸收波段和色素吸收波段的光谱反射率差异较小;植物波谱曲线在近红外波段(750—950 nm)与近红外波段(1220—1280 nm)之间有显著不同,前者反射率偏高,后者反射率偏低。出现这种情况的原因可能是午后太阳辐射较强,植被有明显的水分变化,而半干旱区植被水分较少,为了保持自身的水分,植物通过气孔活动来调节自身与外界的水分、二氧化碳、氧气交换,将水分保持在体内,导致了水分对太阳光吸收增加,从而造成了近红外反射率变化差异较大,也说明细胞波段的变化较水分反射波段变化更为敏感。MODIS卫星传感器上设置了1280 nm的光谱波段用于观测水汽的吸收特征,在地物的波谱特征方面也可以反映地物的水分状况。

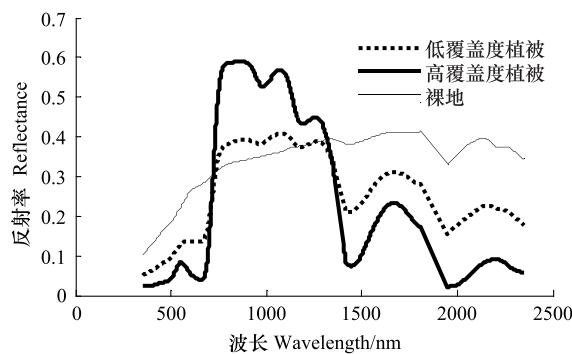


图3 不同植被覆盖度的土豆日平均光谱反射率曲线

Fig. 3 Daily spectrum reflectance of potato with different vegetation cover

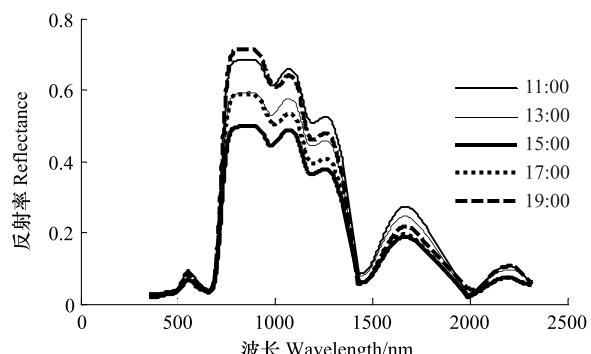


图4 不同太阳高度角观测的2009年7月27日土豆光谱反射率特征

Fig. 4 Spectrum reflectance of potato under different zenith angle on July 27 2009

假设在连续4 d之内植被光谱反射率的变化主要是由植被细胞结构变化、土壤水分与植被体内水分变化引起的。图5给出不同土壤湿度下土豆光谱反射率特征。四天的土壤体积含水量分别为0.220、0.202、0.195、0.190,最大土壤含水量差为0.03,由于连续几日太阳辐射较强,土壤蒸发和植物蒸腾较强,土壤逐日体积含水量分别减少0.018、0.007、0.005,相应地,植被的含水量也有所减少。土豆逐日的平均光谱曲线变化趋势有一致性和差异,在可见光和大于1300 nm的近红外波段的光谱反射率略有增加,在1360—1470 nm、1830—2080 nm、2350—2500 nm等主要水汽吸收波段上反射率也略有增加;在750—1300 nm近红外波段光谱反射率差异较大,有明显的增加,其中,在近红外波段(750—950 nm)的反射率增加趋势明显大于近红外波段

(1220—1280 nm)的反射率。这种差异说明植被细胞结构有明显的日变化,一方面是因为植被生长旺盛,细胞结构日变化显著,另一方面是因为植被生长与土豆生长的土壤水分供给、植物含水量等很多因素有关,随着土壤和植被水分的减少,两个近红外波段的反射率差异有增大趋势。据此,基于上述两个波段的反射率建立的NDWI(公式(2))较好地反映了植被水的吸收特性;较单一的水分吸收波段的反射率更能反映植被光谱对水分的响应的敏感性。

### 2.3 影响地物反照率的因素

由上述光谱反射率分析可得:除了太阳高度角对反射率有影响外,绿色植物光谱反射率的变化与植物生长的土壤水分供给、植被细胞变化、叶绿素、植物含水量等很多因素有关;单位面积上叶绿素含量的多少与植被的覆盖度和归一化指数NDVI以及植被的健康状况有关;土壤体积含水量可以间接地反应出植被含水量大小。同时由图2可以看出植被细胞结构对水分变化较为敏感,可根据相应的近红外和水分吸收波段构建NDWI(Normalized Difference Water Index)来反映。这些因素通过影响波谱反射率,进而影响到全波段的反照率。

图6 给出观测的反照率与归一化植被指数的散点

关系,由图可以看出:除部分样本较为离散外,大部分散点反映出二者的对数关系,复相关系数达0.84;另外,对于不完全植被覆盖区,土壤也是反照率的主要贡献者,这也可能是部分反照率与归一化植被指数离散的原因之一。图6给出反照率与土壤体积含水量的散点关系,可以看出:反照率与土壤体积含水量也呈现出对数关系,但是,在土壤体积含水量低于0.2时,二者关系较差,复相关系数达0.34。说明当土壤体积含水量大于0.2时对反照率的影响比较显著。图6给出反照率与NDWI的散点关系,图中反映出反照率与NDWI呈相关关系,有个别点较为离散,复相关系数达0.83。由上述可知,归一化植被指数、土壤体积含水量、NDWI等因素也会影响地物反照率,以上因素可用于估算和模拟植物光谱反射率和全波段反照率。

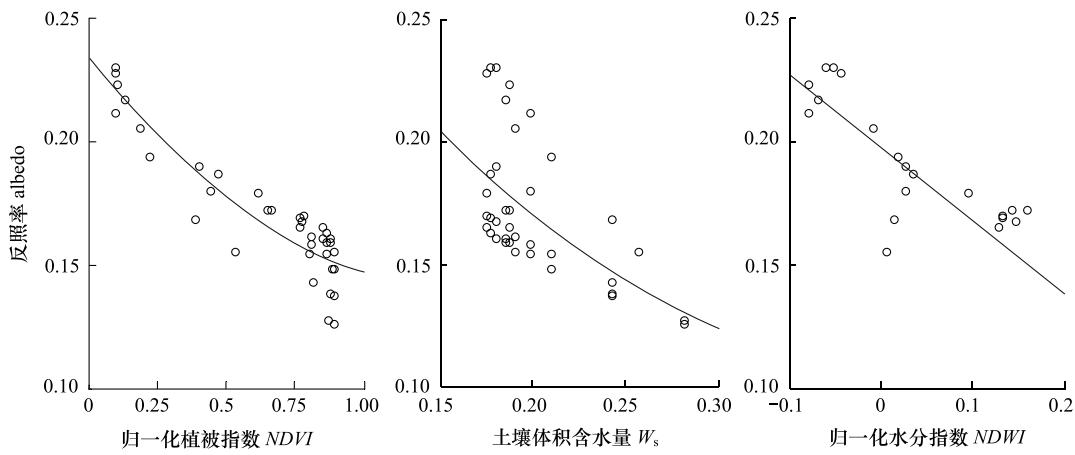


图6 反照率与归一化植被指数和土壤体积含水量NDWI的散点关系

Fig. 6 Relation of albedo with NDVI, soil water content capacity and normalized difference water index

### 2.4 光谱反射率和全波段反照率的估算

由上述光谱反射率的变化趋势和全波段反照率的影响因素可以看出:反射率的变化与植物生长的土壤水分供给、生育期所决定的植被细胞变化、叶绿素、植物含水量等很多因素有关。因此,土壤体积含水量、NDWI和反映植被叶绿素的归一化植被指数可以作为估算植物光谱反射率和全波段反照率的主要参考依据。反照

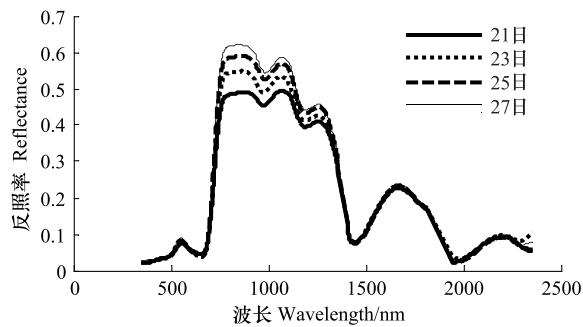


图5 不同土壤湿度下土豆光谱反射率曲线

Fig. 5 Spectrum reflectance of potato under different soil humidity

率是包括了可见光波段、近红外和中红外波段的反射率, TM、NOAA/AVHRR、EOS/MODIS 卫星的反照率产品都是基于这些波段的光谱反射率转换而来。稀疏植被区下垫面边界条件复杂, 植被作为土壤背景基质上的异质, 其形态、温度、湿度等性质在空间上有系统性不均匀分布, 造成了地表反照率等分布不均匀性<sup>[4]</sup>。将植被光谱反射率与土壤光谱反射率进行对比分析发现, 植物的波谱曲线表现为两大特征: 一种是在 750—1300 nm 波段上植物的波谱反射率大于裸地反射率, 反映了植物的细胞结构独有的高反射特性; 另一种是波谱反射率在可见光和近红外波段上土壤反射率大于植被反射率, 反映了植被叶绿素和水分的吸收特性。本研究基于同期土壤和已知的不同覆盖度土豆光谱反射率估算不同覆盖度土豆的反射率光谱, 建立关系如下:

$$R_x = a \frac{\left( \frac{NDVI_x}{NDVI_a} (R_g - R_s) + R_s \right)}{\left( \frac{Ws_x}{Ws_a} \right)} \left( 1 - \frac{NDWI_x}{NDWI_a} \right) \quad (4)$$

式中,  $R_g$ 、 $R_s$ 、 $R_x$  分别代表参考的植被光谱反射率、植被区域土壤光谱反射率、待估对象的光谱反射率;  $NDVI_a$ 、 $NDWI_a$ 、 $Ws_a$ 、分别为参考对象的归一化植被指数、归一化植被水分指数、植被区土壤体积含水量;  $NDVI_x$ 、 $NDWI_x$ 、 $Ws_x$  分别为待估对象的归一化植被指数、归一化植被水分指数和植被区土壤体积含水量。在估算大范围反射率时, 前二者可以由 MODIS 卫星遥感反演得到, 本研究采用与 MODIS 光谱波段一致的光谱反射率计算得到, 后者用当地观测资料代替;  $a$  为修正函数, 当参考对象和待估对象不属于同一植被类型时考虑, 根据植被类型确定。公式 4 的意义是地物光谱反射率与待估对象归一化植被指数呈正比、与植被水分指数呈反比、与土壤体积含水量呈反比、与待估对象相对于土壤反射率的差异呈正比。

图 1b 中是以 11 个高覆盖度、10 个低覆盖度土豆的光谱反射率作为参考样本(细线), 7 个低覆盖度土豆光谱曲线作为估算检验样本(粗线)。从 28 个样本中计算得到  $NDVI$  和  $NDWI$ , 并收集 28 个样本的土壤含水量资料, 运用公式(4)与参考样本的光谱曲线, 结合参考样本和估算样本的土壤含水量、 $NDVI$  和  $NDWI$ , 分别模拟 7 个低覆盖度土豆的光谱反射率曲线, 共得到  $21 \times 7 = 147$  个模拟结果, 对 7 组样本的结果进行平均, 最终得到 7 个模拟样本曲线, 将模拟结果与实际观测结果进行对比, 所得结果见图 7。图 7(a) 为基于一个高覆盖度和一个低覆盖度土豆样本模拟的一个典型晴天的光谱反射率曲线分别为(c2) 和(c1), 将他们与观测得到的光谱反射率(o) 进行对比(高、低覆盖度的平均值分别为 0.80 和 0.46, 观测样本的覆盖度为 0.51)可以看出: 两种样本的估算结果都非常接近, 特别是和观测个例覆盖度比较接近的样本的估算误差很小, 植被覆盖度较高的样本的估算误差在可见光和部分近红外波段上误差较小, 在近红外波段上误差偏大, 最大绝对值为 0.015。图 7(b) 和(c) 给出基于高覆盖度和低覆盖度土豆共 21 个样本对低覆盖度的 7 个样本估算结果的方差分布和平均光谱曲线, 可以看出: 植被覆盖度较高的参考样本得到的估算误差在可见光和部分红外波段上误差较小, 在 750—1000 nm 近红外波段上误差略大, 最大绝对值为 0.013; 低覆盖度植被参考样本得到的估算结果的误差最大绝对值为 0.009, 也位于 750—1000 nm 近红外波段上。由此说明该公式基本能反映植物的光谱反射率分布, 但不能很好地反应植被细胞结构特征, 有待进一步改进。

太阳辐射的能量主要集中在可见光区, 其中 0.38—0.76 μm 的可见光能量占太阳辐射总能量的 46%, 到达地面的太阳辐射主要集中在 0.3—3.0 μm 波段, 包括近紫外、可见光、近红外和中红外波段。阿布都瓦斯提吾拉木和秦其明<sup>[10]</sup> 将 0.3—4 μm 波段分成 13 个连续波谱区域, 采用 6S 辐射传输模式和 ETM 资料模拟了研究区域的光谱反射率, 并计算了 13 个区域反射率权重, 实现了宽波段反照率的反演。其表达式为:

$$A = \sum_{i=1}^{13} \omega_i R_i + R_0 \quad (5)$$

式中,  $\omega_i$ 、 $R_i$ 、 $R_0$  分别为第  $i$  个波段(μm)的权重和反射率以及反射率常数项,  $R_0 = 0.002$

本研究采用该方法将高光谱波段分为 12 个部分, 根据其在 0.3—4 μm 的光谱波段所占的权重关系估算出宽波段反照率。由图 8(a) 可知, 由上述方法估算的宽波段反照率与实际观测的光谱反射率转换得到的宽

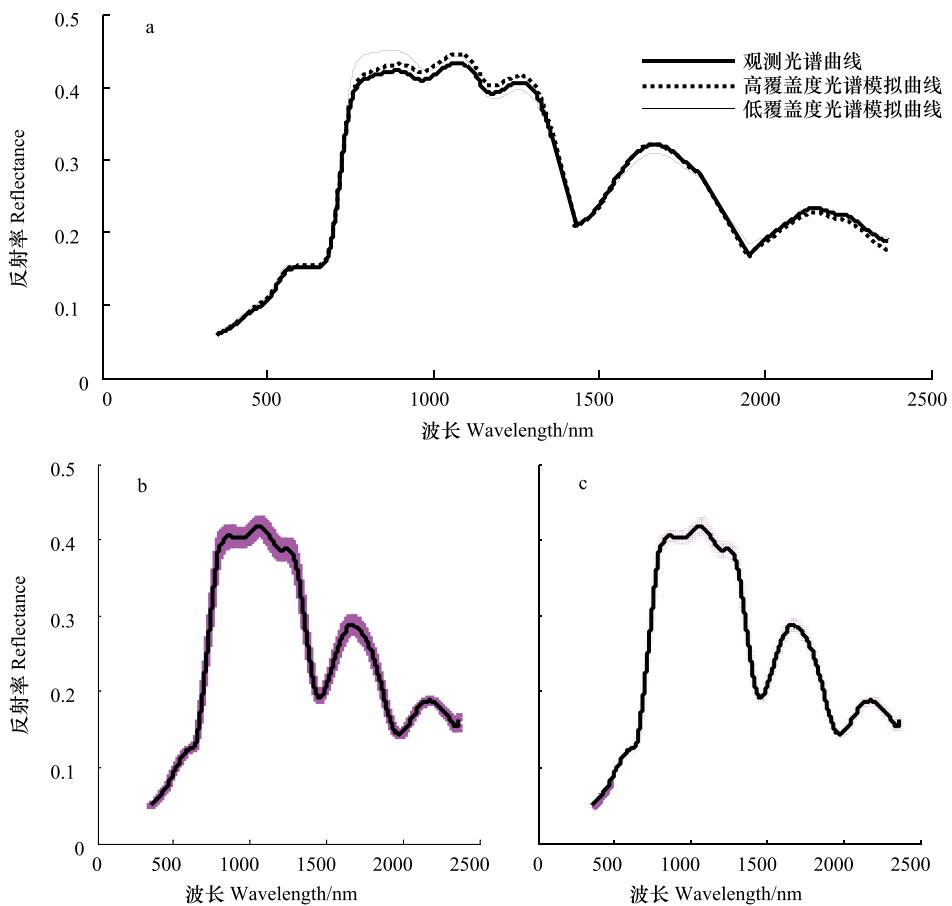


图7 土豆反射率光谱曲线估算个例的结果对比(a)及基于高覆盖度(b)和低覆盖度(c)土豆共21个样本估算结果的方差分布

Fig. 7 The contrast of estimation reflectance with observed reflectance of a case (a) and the average spectrum reflectance and variance distribution from high vegetation cover (b) and low vegetation cover (c)

表1 宽波段反照率的转换的各波段反射率权重<sup>[10]</sup>

Table 1 Wavelength weight for broad albedo conversion

$\omega_i$	0.3—0.45	0.45—0.515	0.515—0.525	0.525—0.606	0.605—0.63	0.63—0.69
$R_i$	0.133	0.095	0.013	0.109	0.031	0.069
$\omega_i$	0.69—0.775	0.775—0.9	0.9—1.55	1.55—1.75	1.75—2.09	20.9—2.35
$R_i$	0.083	0.097	0.25	0.033	0.034	0.015

波段反照率结果很相近,散点分布在 $\pm 0.015$ 的范围内,平均误差为0.007。将模拟和观测的光谱反射率得到的宽波段反照率与定点观测的反照率对比得到的散点图见图8(b),二者的结果也比较相近,散点分布在 $\pm 0.02$ 的范围内,平均误差为0.011,本研究所测得的反照率在0.15与0.25之间,因此,散点分布在8%—13%范围内,平均误差为5.5%。由此可见,基于光谱反射率能够较好地估算宽波段反照率,ASTER光谱库提供了0.3—14 μm范围的各类地表类型BRDF和方向半球反照率数据,有助于得到不同植被类型的波谱反射率和宽波段反照率。

### 3 结论与讨论

本研究通过应用高光谱波谱仪进行各种植被覆盖度地物的同期观测、分析不同地物光谱反射率的差异、寻找光谱反射率的影响因素并建立了光谱反射率和宽反照率的估算关系,得出以下结论:

除了太阳高度角外,决定绿色植物光谱反射率的主要因素有叶绿素、细胞构造、含水量以及植物生长的土壤水分、物理和化学属性等;根据植物波谱特征的时间变化的差异,本研究用以归一化植被指数、归一化植被

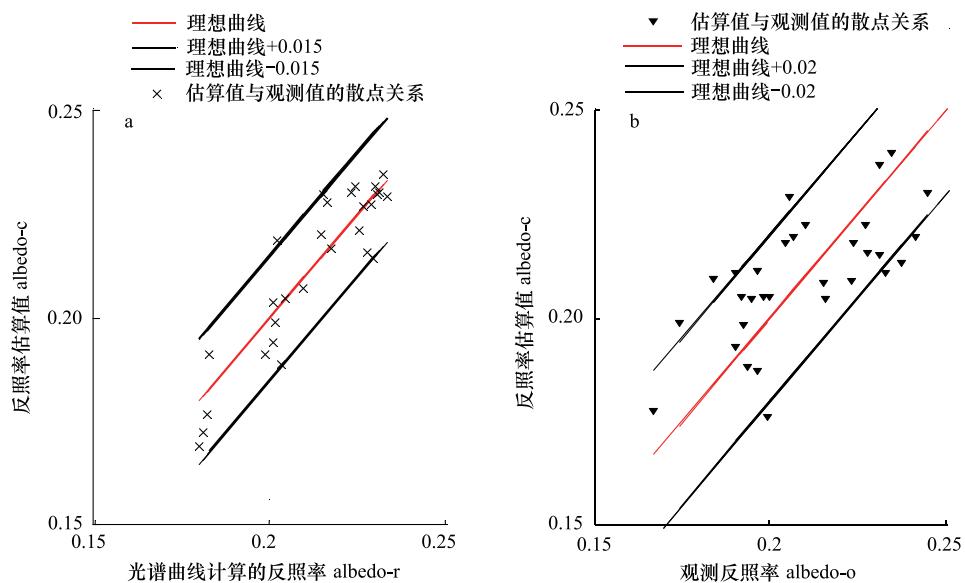


图8 基于估算光谱反射率与观测光谱反射率得到的全波段反照率结果(a)及其与观测的反照率(b)的散点关系( $m_0$ 和 $m_1$ 为理想曲线)

Fig. 8 relation of albedo from estimation reflectance and observed reflectance (a) and estimated albedo and observed albedo (b) ( $m_0$  and  $m_1$  are ideal line)

水分指数以及土壤体积含水量作为稀疏植被区光谱曲线的判别指标。

根据植被与土壤光谱反射率差异,以及归一化植被指数、归一化植被水分指数以及土壤体积含水量与全波段反照率的关系,建立了基于已知植被波谱反射率和土壤波谱反射率曲线的波谱反射率估算模型,估算结果与观测结果基本接近,虽然在近红外波段上存在一定的误差,但并没有影响全波段反照率的估算。

非均匀下垫面的反照率等陆面过程参数是进行尺度耦合和尺度转换中有待解决的主要问题。在假定光谱观测的低植被覆盖度区域为小的混合像元的基础上,本研究用已知植物和土壤波谱结合待估对象的土壤含水量、NDVI和NDWI将低植被覆盖度混合像元的波谱反射率表示出来,揭示影响全波段反照率的因子的作用机理,为推广应用到卫星像元尺度上的波谱反射率和全波段反照率估算方面奠定了基础,有助于接触波谱库资料和卫星资料获得的NDVI和NDWI反演不同尺度的陆面过程参数。另外,随着卫星探测技术的发展,高光谱卫星遥感发展前景良好,基于光谱反射率的估算方法可以实现高光谱遥感在反照率等陆面过程参数尺度耦合和转换过程中的应用。

**致谢:**感谢王胜、王小平和李宏宇对资料处理的帮助。

#### References:

- [1] Zhang Q, Hu X J, Wang S, Liu H Y, Zhang J, Wang R Y. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loess Plateau (LOPEX). *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 363-371.
- [2] Li X W. Review of the protect of quantitative remote sensing of major factors for spatial-temporal heterogeneity on the land surface. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 771-779.
- [3] Zhang X, Zhang B, Zheng L F, Tong Q X, Wang J F, Shu R, Xue Y Q. Study on the retrieval of emissivity spectra from airborne thermal infrared data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 19(5): 361-365.
- [4] Su L, Li X, Liang S, Strahler A H. Simulation of scaling effects of thermal emission from non-isothermal pixels with the typical three-dimensional structure. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(19): 3743-3753.
- [5] Su L H, Li X W, Friedl M, Strahler A, Gu X F. A kernel-driven model of effective directional emissivity for non-isothermal surfaces. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(8): 603-607.
- [6] Zhang H, Jiao Z T, Yang H, Li X W, Wang J D, Su L H, Yan G J, Zhao H R. Research on scale effect of histogram. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(10): 949-960.

- [ 7 ] Li X W, Wang J D, Strahler A H. Scale effects and scaling-up by geometric-optical model. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2000, 43(Supp 1) : 17-22.
- [ 8 ] Li S C, Cai Y L. Some scaling issues of geography. *Geographical Research*, 2005, 24(1) : 11-17.
- [ 9 ] Meng B, Zhang B, Ding W H, Zhang H. A hypothetic investigation about the uncertainty principle in the geography scale. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(6) : 29-32.
- [ 10 ] Abduwasit G U, Qin Q M. Calculation of ETM+ broadband albedos by radiative simulations. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis On Line*, 2007, 43(4) : 474-483.
- [ 11 ] Jin Y F, Gao F, Schaaf C B, Li X W, Strahler A H, Bruegge C J, Martonchik J V. Improving MODIS surface BRDF albedo retrieval with MISR multiangle observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(7) : 1593-1604.
- [ 12 ] Fang H, Liang S, Chen M, Walther C, Daughtry C. Statistical comparison of MISR, ETM + and MODIS land surface reflectance and albedo products of the BARC land validation core site, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(2) : 409-422.
- [ 13 ] Knap W H, Brock B W, Oerlemans J, Willis I C. Comparison of Landsat TM-derived and ground-based albedos of Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(17) : 3293-3310.
- [ 14 ] Liang S L. A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1) : 136-145.
- [ 15 ] Zhao W J, Tamura M, Takahashi H. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data using 6S code. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76 : 202-212.
- [ 16 ] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, Tanre D. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1) : 2-27.
- [ 17 ] Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5) : 871-884.
- [ 18 ] Gao B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3) : 257-266.
- [ 19 ] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8) : 1533-1543.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张强,胡向军,王胜,刘宏谊,张杰,王润元. 黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)有关科学问题. *地球科学进展*,2009, 24(4) : 363-371.
- [ 2 ] 李小文. 地球表面时空多变要素的定量遥感项目综述. *地球科学进展*, 2006, 21(8) : 771-779.
- [ 8 ] 李双成,蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. *地理研究*, 2005, 24(1) : 11-17.
- [ 9 ] 孟宝,张勃,丁文晖,张华. 地理尺度问题中不确定性原理的假设探讨. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(6) : 29-32.
- [ 10 ] 阿布都瓦斯提·吾拉木,秦其明. 基于辐射模拟反演ETM+数据宽波段反照率. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(4) : 474-483.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 24 December, 2011 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants .....	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing .....	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS) .....	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island .....	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope .....	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province .....	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan .....	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China .....	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau .....	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ... ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)	
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique .....	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes .....	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China .....	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviventris</i> .....	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i> .....	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey .....	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i> .....	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity .....	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes .....	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands .....	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilingoule steppe zone .....	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress .....	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation .....	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitraria Tangutorum</i> .....	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter .....	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides .....	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass ( <i>Lolium perenne</i> L.) .....	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus ( <i>Aspergillus niger</i> ) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubilization .....	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope .....	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergency analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergency indices .....	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
<b>Review and Monograph</b>	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China .....	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area .....	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity .....	GAO Dong, HE Xiaohong, ZHU Shusheng (7617)
<b>Scientific Note</b>	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems .....	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i> .....	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

## 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 24 2011

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
行 销 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044  
广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China

