

文章编号: 1007-4619 (2000) 04-0279-05

高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析

刘伟东¹, 项月琴², 郑兰芬¹, 童庆禧¹, 吴长山¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院 地理研究所, 北京 100101)

摘 要: 分析了北京大屯科技站水稻叶面积指数(LAI)、叶绿素密度(CH. D)与高光谱分辨率遥感数据在整个生育期内的变化过程。利用微分技术处理水稻群体反射光谱以减少土壤等低频背景光谱噪音的影响。通过单相关分析和逐步回归方法研究水稻 LAI、CH. D 分别与光谱反射率、反射率的一阶微分光谱的相关关系, 并建立预测回归方程。结果表明, 微分技术能够改善光谱数据与 LAI、CH. D 的相关性, CH. D 与光谱数据的相关明显优于同 LAI 的。

关键词: 光谱微分技术; 叶面积指数; 叶绿素密度; 相关分析

中图分类号: TP701/TP722.4 **文献标识码:** A

1 引 言

通过监测作物生育期内的光谱变化, 研究作物的反射光谱与叶面积指数 (Leaf Area Index, 简称为 LAI)、叶绿素密度 (Chlorophyll Density, 简称为 CH. D) 等农学参数之间的关系, 使人们能够定性描述和定量分析作物的生长与遥感光谱数据之间的关系。

以往对植被的遥感研究多致力于建立植被生物物理参数 (LAI、生物量、叶绿素含量) 与宽波段遥感植被指数 (仅具有少数几个光谱波段得到) 的简单关系^[1-3]。随遥感技术的迅速发展, 高光谱分辨率遥感成像光谱技术使得遥感应用于植被地学分析可以在光谱维上展开, 准实时地获取地物的影像和每个像元的光谱分布, 以允许从空中对地面目标物进行直接识别和微弱光谱差异的定量分析, 在植被遥感研究中表现出强大优势^[4]。利用高光谱分辨率遥感技术对植被进行生长监测和研究光谱与植被生物物理参量之间的关系, 在农业中具有广泛的应用前景。

通常, 使用高光谱分辨率遥感数据估计作物农学参数主要有两类方法: 一是通过多元回归方法建立光谱数据或由此衍生的植被指数与作物农学参量之间的关系^[5-6]; 二是通过作物的红边参数描述作物的物候变化及其农学参数^[7-10]。本文结合水稻

的生长发育规律, 对水稻进行多时相的光谱反射率和农学参量测量, 分析水稻光谱反射率的物候变化规律, 并且分析遥感光谱数据和水稻农学参数之间的关系, 利用微分技术处理水稻群体光谱, 通过相关分析方法研究水稻叶面积指数、叶绿素密度与群体光谱反射率、反射率的一阶微分光谱的相关关系, 促进高光谱分辨率遥感技术在作物的生长监测和产量估测中的应用。

2 试验方法及数据获取

试验于 1998 年在北京市大屯乡科技站 (104.6°E, 40°N) 水稻试验田内进行, 供试水稻为两种播期的水稻, 早播稻为中作 93, 5 月下旬插秧, 晚播稻为秋光, 6 月下旬插秧。试验区土壤为壤质褐潮土, 肥力水平中等。插秧后约每 10 天取有代表性的样方 0.5 m², 测定密度, 取其水稻植株测定根、茎、叶的鲜重、干重。同时, 利用长宽法测叶面积指数。

光谱测定采用 SE590-CCD 硅阵列便携式光谱仪, 该仪器具有 256 个光谱通道, 光谱范围从 0.38—1.1 μm, 光谱分辨率约为 3 nm, 仪器视场角 15°, 经严格的室内定标, 仪器在 0.4—0.9 μm 波长范围, 性能稳定。为获得稳定的水稻群体反射率数据, 作物群体反射率的测定, 选择在晴朗无云、无风或静风的天

收稿日期: 1999-06-21; 修订日期: 1999-09-10

基金项目: 国家“九五”科技攻关计划“新型遥感技术的应用开发”及中国科学院重大项目“数字多光谱相机试验”资助项目。

作者简介: 刘伟东, (1973—) 男, 1999 年毕业于中国农业大学农业气象系, 获硕士学位, 现于中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位, 主要从事植被高光谱遥感研究。

气进行, 观测时间为北京时间 10:00—14:00, 仪器探头垂直向下, 每次测定扫描 4 次, 探头距离水稻冠层顶部与标准灰板的距离一致, 冠层与标准板的反射光谱测定交替进行, 每个样区观测 8 次, 取平均值代表每点的光谱反射率值, 群体光谱测定后, 取样测定叶片叶绿素含量, 并对农学参量测量。

由于天气条件限制, 1998 年 6—10 月, 对早播稻群体反射光谱与农学参量观测了 9 次, 对晚播稻观测了 7 次, 观测期覆盖了水稻的整个生育期。

3 数据处理与分析

应用微分技术处理这种“连续”的光谱是遥感中常用的数学方法, Demetriades 等^[1]综述了遥感中高光谱分辨率微分光谱的应用潜力, 并且指出, 如果目标物的光谱由不同成分的贡献构成, 则使用微分技术能部分消除低频光谱成分的影响。土壤等背景的光谱信息相对于植被光谱的变化较平缓, 故认为微分技术能够部分去除土壤等背景的影响, 而植被的光谱信息能得到较好的保留。

SE590 光谱仪采集的是离散型数据, 因此, 光谱数据的微分可以用如下公式近似计算:

$$R'(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (1)$$

R' 为反射率的一阶微分光谱, R 为反射率, λ 为波长, i 为光谱通道。

相关分析用于计算每个光谱通道的原始光谱反射率以及一阶微分光谱数据与 LAI、CH.D 的相关系数。

3.1 水稻叶面积指数与叶绿素密度在其生育期内的变化

图 1 所示为早播稻 LAI 变化曲线, LAI 呈抛物线变化规律, 晚播稻 LAI 变化曲线相似, 从移栽到始穗阶段, 由于水稻分蘖数量增加, 单叶面积持续增长, 促使 LAI 不断增加, LAI 增加的速率由快至慢, 至抽穗后期, 无效分蘖死亡, 而单叶面积仍然增加, LAI 达到最大值。到灌浆期以后, 由于叶片已经不能够进行较强的光合作用, 叶片不断将养分转移到穗部, 叶片逐步衰老, 植株下部的叶片逐渐枯黄以至干死, LAI 迅速减小。叶绿素是作物生产干物质的基质, 单位面积绿色体及叶绿素的含量将影响经济产量的高低。通常, 把叶片叶绿素含量与单位面积总绿叶鲜重的乘积定义为叶绿素密度(CH.D), 图 2 所示, 开花期前后群体的 CH.D 最高, 虽然叶片叶绿

素含量持续稳定到生育后期, 但是开花后期叶面积指数的下降使单位土地面积的叶绿素含量下降, 即 CH.D 的降低, 晚播稻 CH.D 也有类似的变化规律。从季节变化趋势来看, 群体的 CH.D 与叶面积指数变化规律相似, 这是因为群体的 CH.D 包含有 LAI 与单叶叶绿素含量的信息, 是二者的综合体现。

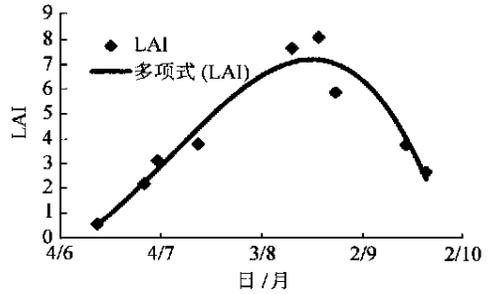


图 1 早播稻 LAI 随时间变化曲线(北京大屯乡, 1998 年)
Fig. 1 The variation of early rice LAI with time (Beijing, 1998)

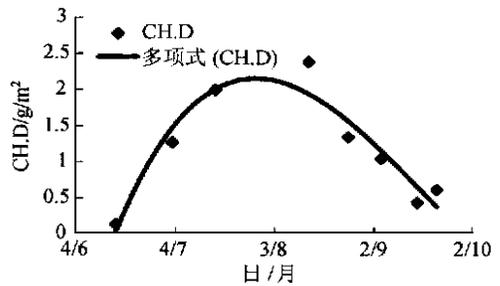


图 2 早播稻 CH.D 随时间变化曲线 (北京大屯乡, 1998 年)

Fig. 2 The variation of early rice CH.D with time (Beijing, 1998)

3.2 水稻光谱变化规律

如图 1—图 3 所示, 从水稻移栽后到始穗(6 月 10 日—8 月 16 日), 水稻植株的持续生长, 促使 LAI 与 CH.D 不断增加, 因而整个群体的光合能力不断增强, 对红光、蓝光的吸收增强, 红光与蓝光波段的反射率逐渐减小, 始穗期(约 8 月 11 日)时达到最小值, 红光与蓝光波段的强吸收使绿色波段的反射逐渐突出, 形成一个小的反射峰。在抽穗(约 8 月 18 日)后, 叶片的养分开始向穗部转移, 冠层的 CH.D 不断减小, 此时, 位于红波段、蓝波段的反射率开始上升, 在乳熟期(约 9 月 4 日)之后, 下部叶片不断衰老、死亡, LAI 持续下降, 绿色叶片内的营养物质向穗部转移, 叶绿素分解, 叶片转黄, 叶片已不能够进行较强的光合作用, 而且继续向穗部提供养分, 冠层

CH. D 迅速减少, 红波段、蓝波段的反射率上升加快。此时, 水稻在绿色波段的反射率仍然比在红光和蓝光波段的反射率大, 在可见光区域仍有一个小

的反射峰, 随水稻生育进程的推进, 红光与蓝光波段的反射率逐渐增加, 在 550 nm 的绿色反射峰逐渐变得不明显。

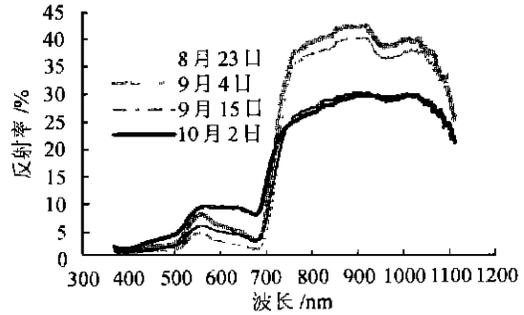
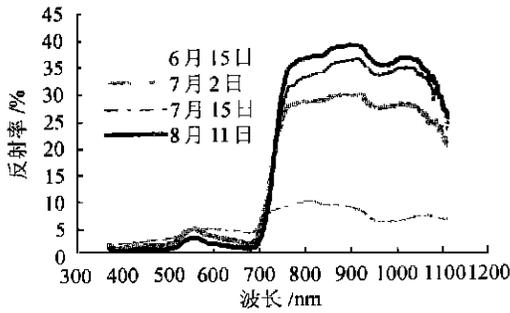


图 3 早播稻反射率光谱曲线随时间变化曲线(北京, 1998)

Fig. 3 The variation of early rice reflectance curves with time (Beijing, 1998)

从水稻移栽后, 随 LAI 的增加, 叶层增多, 近红外的反射率不断增大, 当 LAI 达到一定值时, 近红外反射率趋向稳定。灌浆时(约 9 月 4 日), 因叶片向穗部提供大量的养分, 叶片的内部组织结构开始发生变化, 近红外的反射率也开始逐渐下降, 持续到水稻成熟。可以看出, 早播稻光谱反射率曲线变化的规律性与其生长发育的群体变化特征是对应的, 另外通过对晚播稻光谱数据的分析, 也得到类似的结论, 故可以认为水稻在其全生育期内的光谱反射率变化具有一定的规律性。

对应的波长。研究表明红边斜率主要与作物的覆盖度或 LAI 有关, 红边位置与叶片的叶绿素含量有关。在水稻的整个生育期内, 一阶微分光谱的变化也具有一定的变化特征。早播稻水稻生长初期, LAI 低, 叶绿素密度较小, 红边斜率较小, 红边位置靠短波方向, 随生育期的推进, 水稻植株逐渐长大, LAI 逐渐增加, 冠层的 CH. D 也逐渐增加, 红边斜率缓慢增加, 红边的位置向近红外波段移动。到水稻生长的旺盛时期, LAI 达到最大, 冠层的 CH. D 也达到最大, 叶绿素对红光波段的吸收加宽、加深, 此时, 红边斜率达到最大值, 红边位置很靠近红外波段。随着物候期的推进, 冠层下部叶片逐渐衰老、死亡, LAI 与冠层 CH. D 都缓慢下降, 使红边斜率降低, 红边的位置向短波方向移动, 晚播稻的红边变化类似。随水稻物候生育期的推进, 红边的位置和斜率变化呈现出一定的规律性。

由于部分地减弱了背景因素的影响, 光谱反射率的一阶微分变化能清晰地反映出作物光谱的变化特征。如图 4, 一阶微分变化最大的波段位于红边区域, 红边是由于植被在红光波段强烈地吸收与近红外波段强烈地反射造成的, 通常采用两个因子描述红边特征, 红边斜率和红边位置, 即图中所示 650—800 nm 之间反射率微分光谱的最大值与其所

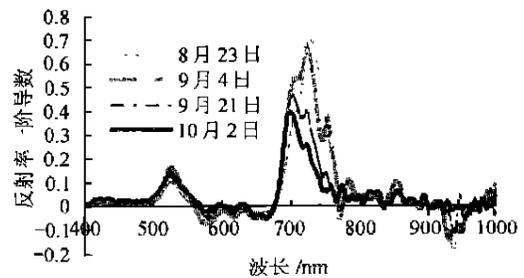
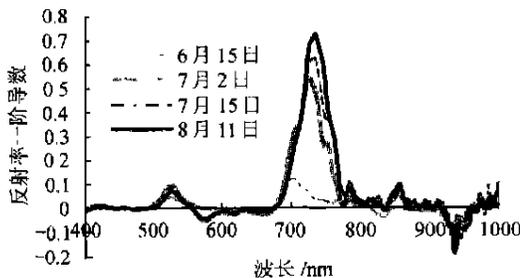


图 4 早播稻反射率一阶微分随时间变化曲线(北京, 1998)

Fig. 4 The variation of early rice first-order derivative spectra with time in 1998 (Beijing, China)

3.3 水稻光谱与其农学参数的相关分析

本试验对早播稻在全生育期内进行了 9 次平行观测(光谱观测同时, 进行农学参量的测量), 晚播稻进行了 7 次, 采用观测的光谱数据计算 252 个光谱波段各光谱波段的反射率和反射率一阶微分分别与

水稻光谱反射率与一阶微分光谱同 LAI 在生育期内的相关分析

LAI 的相关系数, 即早播稻生育期内 9 次观测的光谱数据与 LAI 求相关, 晚播稻生育期内 7 次观测的光谱数据与 LAI 求相关。图 5(a)所示为早播稻 LAI 与光谱数据的相关分析(样本数 9), 可以看出, 早播稻 LAI 与群体光谱反射率在叶绿素吸收带 400—500 nm、630—680 nm 和 740 nm 以后的近红外的波段内有较好的相关关系, 达到 95%置信度下的显著相关, 400—500 nm、630—680 nm 相关显著是叶绿素在这两个波段的强烈吸收造成的, 740 nm 后的近红外波段相关显著则是叶片结构和作物叶片在近红外波段的多次反射造成的。图 5(b)所示为晚播稻 LAI 与光谱数据的相关性曲线(样本数 7), 在 95%的置信度水平下相关性较差, 这与样本数少、随机误差的影响是有联系的, 但总体线型与早播稻曲线相似, 都表现出在 700—730 nm 光谱范围内的低相关, 而二者在 550 nm 波段附近相关性相差较大, 在 700—730 nm 范围拟合度(相关系数的平方, R^2)明显降低的原因是此处光谱范围正处于叶绿素等色素吸收波段与植物细胞结构散射引起的近红外高反射区的交接区

域内。

由于相似的反射率光谱曲线导致微分光谱的相似值或零交叉点, 而微分光谱处理对高频噪音较敏感, 这都将减弱 LAI 与一阶微分光谱的相关性^[2]。通过早播稻和晚播稻一阶微分光谱与 LAI 的相关分析可知, 在某些波段 LAI 与一阶微分的相关性比反射率的好, 如 730—770 nm 光谱范围, 而在某些较窄的光谱波段相关性极好(如 830 nm), 这意味着一阶微分光谱在一些特殊的波长处估计 LAI 时具有高的窄光谱波段的预测能力, 这与浦瑞良等对森林叶面积指数与高光谱数据的相关分析的结果一致^[2]。

水稻反射率与反射率一阶微分同冠层 CH. D 在生育期内的相关分析

如图 6(a)与图 6(b)所示, 为早播稻、晚播稻反射率与反射率的一阶微分与 CH. D 相关分析, 可以看出, 反射率和反射率一阶微分与 CH. D 的相关曲线类似于同 LAI 的, 但相关性明显好于同 LAI 的, 特别在 740—760 nm 光谱波段, 早播稻、晚播稻反射率的一阶微分与 CH. D 都具有置信度为 95%下的显著

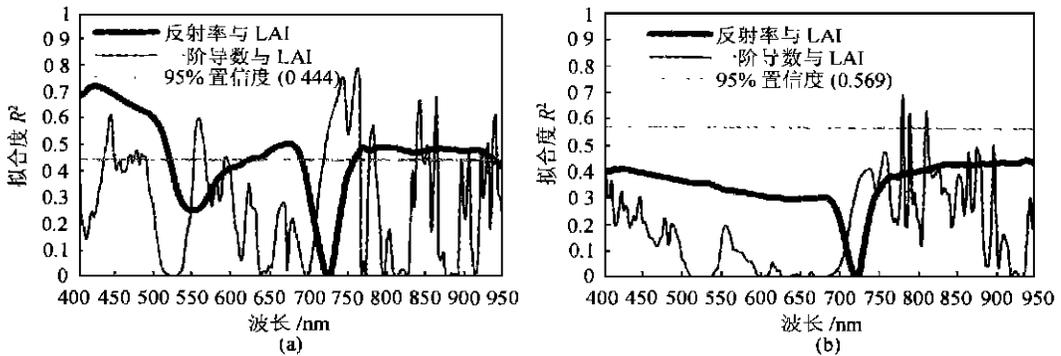


图 5 水稻反射率、一阶微分光谱与 LAI 相关关系拟合度的比较

Fig. 5 Comparison of goodness-of-fit (R^2) from the relationships of reflectance and first-order derivative spectra of early rice and late rice with LAI (Beijing, China, 1998)

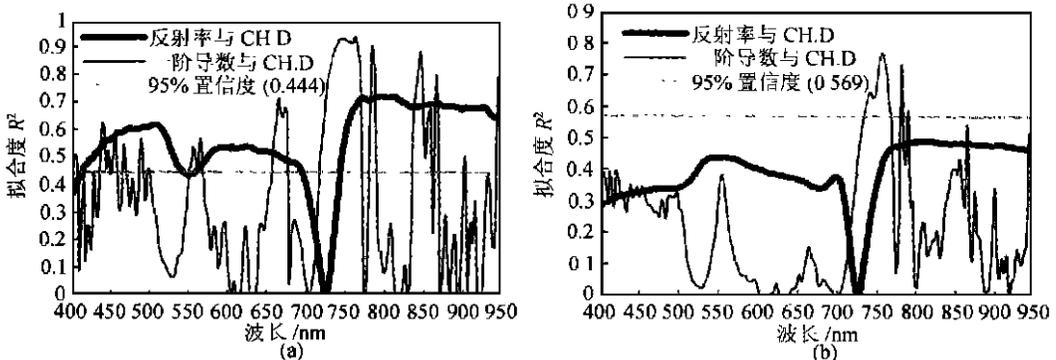


图 6 水稻反射率、一阶微分光谱与 CH. D 相关关系拟合度的比较

Fig. 6 Comparison of goodness-of-fit (R^2) from the relationships of reflectance and first-order derivative spectra of early rice and late rice with CH. D (Beijing, China, 1998)

相关,且一阶微分与CH.D的相关性在某些波段明显高于反射率与CH.D的。图5所示光谱数据与LAI的相关性在750 nm附近也相对较好,这说明对于不同品种、不同播期、不同生长条件下的水稻,该光谱波段的一阶微分能够用于分析水稻的群体生长状况、监测水稻长势和评价水稻的生长条件等。同时说明了CH.D包含有LAI的信息,能反映水稻群体的光合作用能力,通过遥感信息更直接地表达出来。

4 结论与讨论

光谱微分技术能够部分消除背景噪音的影响,分析作物的光谱特征,如红边位置,红边峰值,红边位置的偏移等。通过对水稻光谱与农艺参量的相关分析表明,微分光谱在某些波段与叶面积指数、群体的CH.D具有比原始反射率好的相关关系,比原始反射率光谱具有较好的单变量(光谱通道)预测作物生物物理参数的能力。光谱数据与群体CH.D的相关关系又明显优于与叶面积指数的,群体CH.D比LAI与辐射的联系更为密切。

由于天气条件限制,所取光谱资料样本较少,另外受仪器稳定性的影响,限制在某些光谱波段对作物农学参量预测潜力的研究,特别是此处采用的CH.D仅为叶片部分的,减弱了CH.D与光谱数据的相关性,为此,需要增加样本量和用群体CH.D(包括茎、叶、穗等)来研究作物的生物物理参量与高光谱分辨率遥感数据的关系,提取对作物生化成分敏感的光谱波段,研究高光谱分辨率遥感数据在农业中估计农学参量的潜力。

Relationships between Rice LAI, CH.D and Hyperspectra Data

LIU Wei-dong¹, XIANG Yue-qin², ZHENG Lan-fen¹, TONG Qing-xi¹, WU Chang-shan

(1. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China; 2. Institute of Geography, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The paper studied the variational process of leaf area index (LAI), leaf chlorophyll density (CH.D) and Hyperspectral data with growing period. The correlation between the hyperspectral data and LAI, CH.D of rice was also analyzed. Spectral derivative technique was used to suppress the effects of low frequency spectral noises on background (such as Soil and so on). The derivatives of reflectance spectrum can enhance the correlation and improve the precision of predicting LAI and CH.D. Results show that the derivatives of reflectance spectrum and CH.D more markedly correlate with LAI at some wavelength; CH.D is more available to express crop canopy spectral information than LAI.

Key words: spectral derivatives; LAI; CH.D; regression analysis

参考文献 (References)

- [1] Choudhury, B. J. Relationships between Vegetation Indices, Radiation Absorption and Net Photosynthesis Evaluated by Sensitivity Analysis [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1987, **22**(2): 209—233.
- [2] Hvet, A. R. A Soil-adjusted vegetation Index (SAVI) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1988, **25**(3): 295—309.
- [3] Goward, S. N., Hvenmrich K. F. Vegetation Canopy PAR Absorption and the Normalized Difference Vegetation Index; An Assessment Using the SAII Model [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **32**(1): 47—54.
- [4] Vane, G. et al., Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **44**(2): 109—127.
- [5] Shibayama et al. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1989, **27**(2): 119—127.
- [6] Shibayama et al. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **36**(1): 45—53.
- [7] Danson, F. M. Red edge response to leaf area index [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, **16**(1): 183—188.
- [8] Pinar, A., Grass chlorophyll and the reflectance red edge [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, **17**(2): 351—357.
- [9] Filelia, I. et al. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, **15**(7): 1459—1470.
- [10] Railyan, V. Y. Red edge structure of canopy reflectance spectra of triticale [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **46**(2): 173—182.
- [11] Demetriades et al. High resolution derivative spectra in remote sensing [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **33**(1): 55—64.
- [12] Pu Ruiliang et al. Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pinewith Hyperspectral CASI Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **8**(2): 112—124. (In Chinese) [浦瑞良等. 美国西部黄松叶面积指数与高光谱分辨率CASI数据的相关分析 [J]. 环境遥感, 1993, **8**(2): 112—124.]