

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0228-05

# 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究

吴长山<sup>1</sup>, 项月琴<sup>2</sup>, 郑兰芬<sup>1</sup>, 童庆禧<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 地理研究所, 北京 100101)

**摘要:** 叶绿素是农作物生长中重要的因素。叶绿素含量既表明作物生长的状况, 又表征了作物的生产能力。而叶绿素密度(单位面积农作物的叶绿素含量)是估计农作物群体生产力的重要指标。对早播稻、晚播稻和玉米的多时相的群体光谱测量数据和相应的叶片叶绿素密度的测量数据进行了相关分析, 结果表明早播稻、晚播稻和玉米的群体光谱的反射率数据以及其导数光谱数据与叶绿素密度具有很好的相关性, 并且可以对这几种农作物建立统一的线性回归关系。利用这几种农作物的导数光谱在近红外波段 762nm 处与叶绿素密度的高相关性, 选取样本建立了回归方程。并利用其余样本对估计方程进行检验, 结果表明估计的标准偏差为  $0.272\text{g}/\text{m}^2$ , 估计精度约为 80.6%。

**关键词:** 高光谱; 导数光谱; 叶绿素密度

**中图分类号:** TP19/S511 **文献标识码:** A

## 1 引言

由于高光谱分辨率遥感技术的发展, 利用高光谱数据对植被的生物化学成分和农学参数的估计也随之发展起来。Horler 等研究了植被光谱与叶绿素浓度的关系, 并提出了光谱“红边”位置(植被的导数光谱在 700nm 附近的极大值位置的波长值)在植被叶绿素浓度估计中的作用<sup>[1-3]</sup>。Michio Shibayama 等利用多元回归方法分析了水稻多时相的可见光、近红外和中红外光谱与叶面积指数、干生物量以及产量的关系<sup>[4,5]</sup>。F·M·Danson 等比较“红边”位置与叶面积指数、归一化植被指数 NDVI 与叶面积指数的相关关系, 提出“红边”位置与叶面积指数高度相关<sup>[6]</sup>。A·Pinar 等比较了草丛群体光谱“红边”位置与叶片叶绿素浓度、叶绿素密度的关系, 表明群体植被光谱“红边”位置能够更好地反映草丛的叶绿素密度信息<sup>[7]</sup>。植被光谱中的特征波段也能反映水分、木质素、淀粉、蛋白质等的信息<sup>[8,9]</sup>。导数光谱分析技术能够去除背景噪音或不理想的信息影响, 因而

可能得到更好的精度。Wessman 等使用森林光谱的一阶、二阶导数对树冠化学成分进行研究, 并确定树冠化学成分与生物量以及导数光谱数据相关最密切的波段组合<sup>[10,11]</sup>。童庆禧等利用导数光谱分析方法对鄱阳湖湿地进行了生物量填图<sup>[12]</sup>。浦瑞良、宫鹏等人利用导数光谱分析和相关分析方法研究针叶树种的识别、叶面积指数预测<sup>[13,14]</sup>等。

然而, 利用群体光谱数据对农作物叶绿素密度(即单位土地面积叶绿素的含量)的估算研究工作还做得很少。叶绿素密度是反映植被群体光合作用强弱、植被长势的重要参量, 它与叶面积指数、生物量与叶片叶绿素浓度等参量共同反映了农作物的生长状况和生产能力, 而且它具有几个方面的优越性: (1) 克服了叶面积指数主要反映植被的叶面积多少而忽略了单株植被的成长状况的缺点; (2) 弥补了叶片叶绿素浓度只能反映单个植株的长势, 而不能表达植被群体的长势的不足, 反映了单位面积农作物群体的特征; (3) 农作物的群体光谱的典型特征在可见光—近红外波段主要受叶绿素吸收的影响, 而叶绿素密度恰恰反映了农作物群体所含叶绿素的

收稿日期: 1999-04-15; 修订日期: 1999-06-03

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”资助项目。

作者简介: 吴长山(1972-) 男(满族), 内蒙古通辽人, 1996年毕业于北京大学城市环境系地貌专业, 1999年毕业于中国科学院遥感应用研究所地图学与地理信息系统专业, 获硕士学位。

总量,因而作物的群体光谱与叶绿素密度的相关性要好于群体光谱与叶面积指数和叶绿素浓度的相关性要好得多<sup>[7]</sup>。

本研究将水稻(早播稻、晚播稻)和玉米这两种在植株形态、叶片特征、生长环境等很不相同的作物结合在一起分析,主要有以下两个原因:(1)如果能根据群体光谱特征数据对不同植被的叶绿素密度进行统一的估算,进行宏观的初级生产力计算,对植被与环境的相互作用的研究有很大的作用,并且可以免去有些不必要的植被精细分类工作而直接计算植被的生物物理参量;(2)植被叶绿素的吸收作用是植被在可见光—近红外波段光谱特征的主要影响因素,而且对于某些特征波段来说,植被叶绿素的作用相当大,因而我们可以利用光谱分析的方法,找出光谱特征受叶绿素密度的影响,远远超过不同植被之间的差异对植被光谱影响的波段,这样就可以实现对不同农作物叶绿素密度采用统一的公式来估算。

为了去除背景噪音的影响,我们对水稻、玉米群体的导数光谱与叶绿素密度的相关关系进行了分析,并得出其导数光谱数据在720—770nm之间与叶绿素密度具有很好的相关性。因而本文选取一部分数据建立叶绿素密度估计方程,并采用其他的数据进行验证,结果表明可以利用这一方法对水稻、玉米的叶绿素密度建立统一的估计方程。

## 2 试验区及数据采集

### 2.1 试验区

试验区设在北京市朝阳区大屯乡大屯科技站试验田内,大屯乡是北京市主要的水稻丰产区(116°24'E,40°00'N,海拔高度45m),该试验区属于华北北部的山前冲积平原区,为暖温带半湿润大陆性季风气候,土壤为中壤土,土质肥沃,有机质含量丰富,多年平均降水量为640mm,以地下水灌溉为主,大于10°C的活动积温为4630°C,主要农作物有早播稻、晚播稻、夏玉米、冬小麦、大豆、棉花等。

### 2.2 光谱数据测量

水稻和玉米的群体光谱测量采用便携式SE-590地物光谱仪(SPECTRON ENGINEERING, INC., USA),该仪器具有252个光谱通道,光谱范围为400—1100nm,光谱分辨率约为3nm,仪器视场角为15°,采用自动电子快门,以微型盒式磁带记录,通过

RS232通讯接口输入外设计算机,再经过计算可以得到地物的光谱反射率。该仪器在400—950nm波长范围内性能稳定。

在1998年6月到10月之间,我们对早播稻、晚播稻和玉米的群体光谱进行了测量,测量间隔为10天左右,对早播稻共进行了8次测量,晚播稻进行了5次测量,玉米进行了6次测量。野外植被群体光谱测量选择在晴朗无云的天气进行,风力约1—2级,观测时间为北京时间10:00—14:00之间,测量时仪器探头垂直向下,每次测量扫描4次。为了使测量数据具有代表性,每次选择不同的、均匀的、有代表性的测量点对同种植被测量8次,并将这8次的光谱数据进行比较,并通过实地勘察剔除代表性差的数据,之后取平均值代表该天光谱测量值。

### 2.3 叶绿素密度的测量

与光谱测量同步,我们对水稻和玉米的鲜叶生物量、叶绿素含量进行了测量。叶绿素含量为单位重量叶片中的叶绿素的重量。它的测定方法为用80%的丙酮提取叶片的总叶绿素,用分光光度计测定各种叶绿素的含量。鲜叶生物量的测量方法为选择有代表性的样本区进行采样,测量样本区的鲜叶重量,并且测量样本区的面积,从而估算鲜叶生物量。叶片叶绿素密度为单位土地面积的叶片中所含的叶绿素重量。叶片的叶绿素密度等于叶绿素含量与鲜叶生物量的乘积。

## 3 数据分析

### 3.1 植被群体反射光谱及其导数光谱与叶绿素密度的相关分析

将早播稻、晚播稻和玉米的群体反射率光谱数据及其导数光谱数据分别与叶绿素含量、叶绿素密度进行单相关分析(图1),可以看出,早播稻、晚播稻和玉米的反射率光谱数据与叶绿素密度的相关性曲线具有相同的特征:在波长400—700nm之间保持稳定的较高相关性,而在波长700nm处相关性下降,并在波长730nm左右达到最低点,然后开始上升,在765nm处达到稳定的较高相关拟合度,并持续至950nm。早播稻、晚播稻和玉米的群体光谱与叶绿素密度的相关曲线特征可以解释为:在400—700nm光谱曲线与叶绿素密度的高相关是因为此波段的光谱特征主要受叶绿素的吸收影响,而在700—765nm之间正处于叶绿素吸收和叶片反射以及叶片的多次

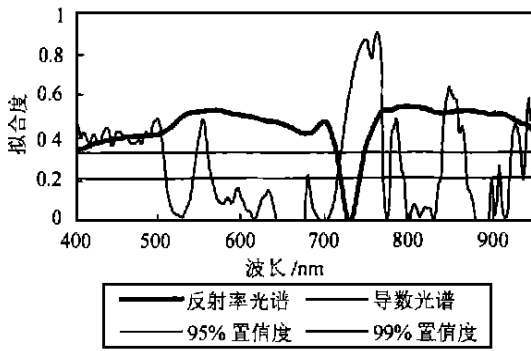


图 1 早播稻、晚播稻和玉米的群体反射率光谱以及导数光谱数据与叶绿素密度的相关分析

Fig. 1 Correlation relationship between the canopy reflectance spectral data, derivative spectral data and the chlorophyll concentration of early-plant rice, late-plant rice, and maize

散射的交界处,因而相关性小,而在波长 765nm 之

后,光谱数据和叶绿素密度都反映了叶片的反射和多次散射的信息,所以二者的相关性较好。水稻、玉米的群体导数光谱在波长 400—500nm, 720—770nm, 840—870nm 处与叶绿素密度的相关性比较好,特别是在 720—770nm 处的相关性比反射率光谱与叶绿素密度的相关性好得多,拟合度达到了 0.89。浦瑞良、宫瑞等对森林冠层的叶绿素进行的研究中得出了类似的结论<sup>[13,14]</sup>。

### 3.2 利用导数光谱数据对叶绿素密度进行估计

为了利用导数光谱数据对叶绿素密度进行估计并检验估算结果,我们将早播稻、晚播稻和玉米分成两组,一组为训练样本,用于建立回归关系,另一组用于进行精度检验。训练样本的选择主要考虑到其在时间上和农作物种类上的代表性,主要样本的具体选择如表 1、表 2:

表 1 训练样本和检验样本的选择(1998 年)

Table 1 The selection of training and testing samples

	训练样本			检验样本		
	早播稻	晚播稻	玉米	早播稻	晚播稻	玉米
样本采样日期	6 月 15 日	7 月 2 日	7 月 2 日	7 月 2 日	7 月 19 日	7 月 19 日
	7 月 15 日	8 月 11 日	8 月 23 日	8 月 11 日	8 月 23 日	9 月 4 日
	9 月 4 日	9 月 21 日	9 月 21 日	8 月 23 日		9 月 15 日
	9 月 15 日			9 月 21 日		

表 2 训练样本的实验数据(1998 年)

Table 2 Experimental data of training samples

日期	早播稻				晚播稻			夏玉米		
	6 月 15 日	7 月 15 日	9 月 4 日	9 月 15 日	7 月 2 日	8 月 11 日	9 月 12 日	7 月 2 日	8 月 23 日	9 月 21 日
762 nm 处反射率导数光谱值	2.53	28.00	18.38	8.81	3.46	31.17	11.29	4.40	15.91	7.15
叶绿素密度/ $\text{g}/\text{m}^2$	0.13	2.01	1.23	0.44	0.03	2.99	1.74	0.05	1.84	0.28

我们选取农作物群体导数光谱与叶绿素密度的相关关系最高的波段 762nm 处的导数光谱数据与叶绿素密度建立线性相关关系,其相关公式为:

$$CHD = a * R' + b$$

其中 CHD 为农作物的叶绿素密度;  $R'$  为农作物群体导数光谱在 762nm 处的数值(我们采用导数光谱公式为:  $R' = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta \lambda}$ ; 由于仪器获取的植被的光谱数据为离散的数据,因而我们采用差分方程来代替微分计算导数光谱:  $R'_i = (R_{i+1} - R_{i-1}) / (\lambda_{i+1} -$

$\lambda_{i-1})$ , 其中  $R$  为反射率,  $\lambda$  为波长,  $i=762\text{nm}$ );  $a, b$  为回归系数。

基于以上假设,我们对训练区样本进行与叶绿素密度的回归分析,结果如图 2。

利用图 2 对叶绿素密度进行估计的线性回归方程,经过检验样本进行验证,结果表明估计的标准差为  $0.272\text{g}/\text{m}^2$ 。相对误差为 19.4%(表 3),这说明可以利用导数光谱来对早播稻、晚播稻和玉米的叶绿素密度进行统一的估算。

表3 利用线性回归方程对叶绿素密度进行估算的检验结果(1998年)(g/m<sup>2</sup>)

Table 3 The testing result for the estimation of chlorophyll density (g/m<sup>2</sup>) by the linear regression equation

日期	早播稻				晚播稻		夏玉米		
	7月2日	8月11日	8月23日	9月21日	7月19日	8月23日	7月19日	9月4日	9月15日
762 nm 处反射率导数光谱值	15.64	25.28	21.43	6.88	9.64	32.51	0.82	18.14	8.29
实际测量	1.60	2.40	2.32	0.63	0.59	3.23	0.12	1.31	0.43
估计值	1.31	2.22	1.86	0.49	0.75	2.89	0.00	1.55	0.63
误差值	-0.29	-0.18	-0.46	-0.13	0.16	-0.34	-0.12	0.24	0.19
标准差	0.272								
估算精度	80.6%								

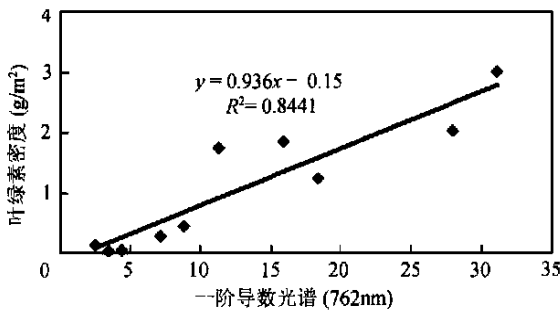


图2 早播稻、晚播稻和玉米的群体导数光谱在762 nm波段的数值与叶绿素密度的相关分析

Fig. 2 Correlation relationship between the first derivative spectra at 762 nm and chlorophyll concentration of early-plant rice, late-plant rice, and maize

## 4 结论

(1) 叶绿素是农作物生长中重要的因素。叶绿素含量既表明作物生长的状况，又表征了作物的生产能力。而叶绿素密度(单位面积农作物的叶绿素含量)是估计农作物群体生产力的重要指标，而且与叶片叶绿素浓度、叶面积指数相比，叶绿素密度更容易利用遥感数据进行估算。

(2) 早播稻、晚播稻和玉米的群体反射率光谱、导数光谱与叶绿素密度具有较高的相关性，特别是导数光谱在720—770 nm波段与叶绿素密度的相关关系拟合度达到了0.89。

(3) 通过对水稻、玉米的导数光谱数据与叶绿素密度的相关性分析，我们可以找到与叶绿素密度相关性最高并且受作物种类影响很小的特征波段(762 nm)，建立早播稻、晚播稻以及玉米的导数光谱与叶绿素密度的统一的线性相关关系，以后可进行进一步分析研究这一关系对其他种类的农作物是否适合。

(4) 根据建立的相关关系对叶绿素密度的估算精度检验结果表明，叶绿素密度的标准差为0.272g/m<sup>2</sup>，相对误差为19.4%。

## 参考文献 (References)

- [1] Horler, D. N. H., Barber, J. P., Ferns, D. C., Barringer, A. R. Approaches to detection of geochemical stress in vegetation [J]. *Advanced Space Research*, 1983, **3**: 175—179.
- [2] Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J., Barringer, A. R. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content [J]. *Advanced Space Research*, 1983, **3**: 273—277
- [3] Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J. The red edge of plant leaf reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**: 273—288.
- [4] Michio Shibayama, Tsuyoshi Akiyama. Estimating Grain Yield of Maturing Rice Canopies Using High Spectral Resolution Reflectance Measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **36**: 45—53.
- [5] Michio Shibayama, Tsuyoshi Akiyama. Seasonal Visible, Near-Infrared and Mid-Infrared Spectra of Rice Canopies in Relation to LAI and Above-Ground Dry Phytomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **27**: 119—127.
- [6] F. M. Danson. Red-edge response to forest leaf area index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, **16**(1): 183—188.
- [7] A. Pinar. Grass chlorophyll and the reflectance red edge [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(2): 351—357.
- [8] Compton J. Tucker, Remote Sensing of Leaf Water Content in the Near Infrared [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, **10**: 23—32.
- [9] Carol A. Wessman, John D. Aber, David L. Peterson. An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**(8): 1293—1316.
- [10] Wessman C. A., Aber J. D., Peterson D. L. An Evaluation of Imaging Spectrometry for Estimating Forest Canopy Chemistry [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**: 1293—1316. <http://www.cnki.net>
- [11] Wessman C. A., Aber J. D., Peterson D. L., Melillo J. M. Remote Sensing of Canopy Chemistry and Nitrogen Cycling in Temperate

- Forest Ecosystems[J]. *Nature*, 1988, **335**: 154—156.
- [12] Tong Qingxi, Zheng Lanfen, Wang Jinnian *et al.* Study on Imaging Spectrometer Remote Sensing Information for Wetland Vegetation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(1): 50—57. [童庆禧, 郑兰芬, 王晋年等. 湿地植被成像光谱遥感研究[J]. 遥感学报, 1997, **1**(1): 50—57.]
- [13] Pu Ruiliang, Gong Peng. Relationships between Forest Biochemical Concentrations and CASI Data along the Oregon Transect[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(2): 115—123. [浦瑞良, 宫鹏. 森林生物化学与 CASI 高光谱分辨率遥感数据的相关分析[J]. 遥感学报, 1997, **1**(2): 115—123.]
- [14] Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with Hyperspectral CASI Data[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1993, **8**(2): 112—125. [浦瑞良, 宫鹏. 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—125.]

## Estimating Chlorophyll Density of Crop Canopies by Using Hyperspectral Data

WU Chang-shan<sup>1</sup>, XIANG Yue-qin<sup>2</sup>, ZHENG Lan-fen<sup>1</sup>, TONG Qing-xi<sup>1</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

*2. Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** The correlative relationship in the reflectance spectra, first derivative spectra of canopies and the chlorophyll content of early-planted rice, late-planted rice, and maize has been discussed. It shows that their correlative relationship is good, especially for the first derivative spectral data at the waveband 762 nm. Therefore, the same regression equation can be calculated for different crops. The linear regression equation has been built by using the first derivative spectral data of a part of samples at waveband 762 nm to estimate the chlorophyll content. Through the test of the other part of samples, it shows that the standard error is  $0.272\text{g}/\text{m}^2$ , and the estimated accuracy is about 80%.

**Key words:** hyperspectral reflectance; chlorophyll content; derivative spectra