

## 高光谱技术分析茶树叶片中叶绿素含量及分布

赵杰文<sup>1</sup>, 王开亮<sup>1</sup>, 欧阳琴<sup>1</sup>, 陈全胜<sup>2\*</sup>

1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划所, 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081

**摘要** 植物叶片叶绿素含量及分布是植物营养信息表达的一个重要指标。以茶树为研究对象, 利用高光谱技术分析茶树叶片中叶绿素含量及其分布。通过采集茶树鲜叶的高光谱图像, 利用7种不同的算法从高光谱数据中提取相应的特征参数, 并根据特征参数和叶绿素含量的参考测量值分别拟合出相应的预测模型。结果显示, 二次土壤调节植被指数算法提取的特征参数最佳, 预测模型校正集和预测集的相关系数  $R$  分别为 0.843 3 和 0.832 3, 最小均方根误差分别为 9.918 和 8.601。最后根据预测模型估计叶片上任意像素下叶绿素的含量, 并通过伪彩手段描述叶片中叶绿素含量的分布。研究结果表明, 利用高光谱成像技术分析茶树叶片中叶绿素含量及其分布是可行的。

**关键词** 高光谱成像技术; 茶树叶片; 叶绿素; 二次土壤调节植被指数

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)02-0512-04

### 引言

叶绿素是植物体进行光合作用、进行第一性生产的重要物质, 叶绿素含量能间接反映植物的生长状况与光合作用能力<sup>[1]</sup>; 同时, 叶片中叶绿素含量及其分布与植物的营养缺乏状况密切相关, 因此, 植物叶片中叶绿素含量及分布可作为评判植物营养生理状态的一个重要指标。常规的叶绿素测定方法是分光光度计法, 但该方法步骤繁琐, 费时费力。近年来, 便携式叶绿素仪和遥感技术在叶绿素含量的检测上得到越来越多的关注<sup>[2-4]</sup>。尽管这些方法与传统的叶绿素检测方法相比具有显著优势, 但也表现出一定的缺陷。

高光谱成像技术集光谱分析和图像处理于一身, 现已在军事、医药和精细农业领域得到了广泛的应用。由于高光谱成像技术是光谱分析技术和图像处理技术在技术层面上的融合技术, 基于这两种技术的优势, 高光谱成像技术不仅能研究对象的内部成分含量, 还可对其分布进行可视化分析。本研究以茶树为研究对象, 采集茶树叶片高光谱图像数据, 提取相应的光谱特征变量, 并与常规方法检测得到的叶绿素含量相关联, 建立茶树叶片叶绿素含量预测模型; 最后通过模型估计出叶片上任意像素下的叶绿素含量, 通过伪彩手段描

述叶片上叶绿素的分布状况, 以便于从图像角度更直观分析茶树营养状况<sup>[3]</sup>。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

试验所用的样本茶树叶片, 分别从镇江市京口区3个不同茶园中的不同茶树上随机采集得到的, 剔除了病虫害叶片, 一共采集了90个叶片样本。其中60个样本校正集用于模型校正, 另外一组为30个样本用于模型的验证。

#### 1.2 数据采集

高光谱图像数据是基于光谱仪的高光谱图像系统采集得到的。基于图像光谱仪的高光谱图像采集系统由基于图像光谱仪的高光谱摄像机(ImSpector, V10E, 芬兰), 一套150 W 光纤卤素灯(Fiber-Lite DC950 Illuminator, DolanJenner Industries Inc, MA, 美国), 一套包括控制装置的移动平台(Zolix, SC30021A, 北京)和计算机等部件组成, 如图1所示。

试验数据采集过程中, 将茶树叶片平铺在白色底板的输送台上进行高光谱图像采集。设定高光谱系统摄像机曝光时间为50 ms, 输送装置的速度为 $1.25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验采用的

收稿日期: 2010-05-16, 修订日期: 2010-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800666, 30971685), 江苏省自然科学基金项目(BK2009216)和农业部作物营养与施肥重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 赵杰文, 1945年生, 江苏大学食品与生物工程学院教授

\* 通讯联系人 e-mail: chenjiang0518@yahoo.com.cn

高光谱摄像头的图像分辨率为  $400 \times 1\ 280$ ，光谱范围是  $408 \sim 1\ 117\ \text{nm}$ ，采样间隔为  $0.67\ \text{nm}$ 。

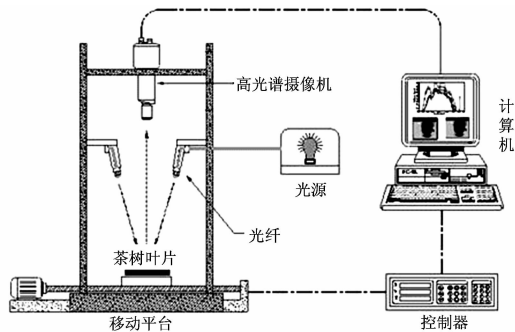


Fig. 1 Hyperspectral image system based on spectrometer

### 1.3 高光谱图像标定

由于光源的强度分布不均匀及暗电流噪音的存在，造成在光源强度分布较弱的波段下获得的图像含有较大的噪音。因此，需要对所获得的高光谱图像进行黑白标定<sup>[3,5,6]</sup>。在与样品采集相同的系统条件下，扫描标准白色校正板得到全白的标定图像  $W$ ，关闭相机快门进行图像采集得到全黑的标定图像  $B$ ，完成高光谱图像的标定，使采集得到的绝对图像  $I$  变成相对图像  $R$

$$R_{\lambda} = \frac{I_{\lambda} - B_{\lambda}}{W_{\lambda} - B_{\lambda}} \quad (1)$$

### 1.4 数据计算

表 1 列出波段比植被指数 ratio vegetation index (RVI)、归一化植被指数 normalized difference vegetation index (NDVI)、重归一化植被指数 renormalized difference vegetation index (RDVI)、叶绿素吸收比指数 chlorophyll absorption ratio index (CARI)、二次土壤调节植被指数 Modified second soil-adjusted vegetation index (MSAVI2)、三角植被指数 triangular vegetation index (TVI) 和四点线性内插法 four-point interpolation method (FPD) 等七种不同的高光谱图像数据处理算法。本研究通过这七种算法分别提取相应的特征参数，并与叶绿素参考测量结果进行拟合建立叶绿素含量的回归模型。试验以叶绿素含量参考测量值与模型预测值之间的相关系数 ( $R$ ，如式(2))和均方根误差 (RMSE，如式(3))作为评价各种方法的有效指标。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (3)$$

Table 1 Algorithm of different spectral parameters

算法	计算公式
RVI	$RVI = \frac{NIR}{Red}$
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
RDVI	$RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI}$
CARI	$CARI = CAR \frac{R700}{R670}$ $CAR =  (a + 670 + R670 + b) / (a^2 + 1)^{0.5} $ $a = (R700 - R550) / 150, b = R550 - a \times 550$
MSAVI2	$MSAVI2 = \frac{1}{2} [2(NIR + 1) - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}]$
TVI	$TVI = 0.5 [120(NIR - Green) - 200(Red - Green)]$
FPI	$FPI = 695 + 45 \left( \frac{Rre - R695}{R740 - R695} \right)$ $Rre = (R665 + R786) / 2$

注：NIR、Green 和 Red 分别为近红外、绿光和红光波段。R700 为 700 nm 波段的反射率光谱数据，以此类推。

## 2 数据处理和分析

### 2.1 高光谱图像信息选择

针对每个样本的高光谱图像，为了避开茶树叶片的主脉，在主叶脉的一侧选取一个  $50 \times 100$  像素的矩形作为感兴趣区域 Region of Interesting (ROI)，如图 2(a) 所示。然后再计算该 ROI 内的平均光谱，如图 2(b) 所示。从图 2(b) 可以

看出在 450 nm 以下和 850 nm 以上光谱值超过检测器的范围存在能量溢出，并且呈现一定的噪音。另外，叶绿素的吸收光谱主要集中在 400~700 nm 范围内。综上所述，本研究选取 450~850 nm 范围内的平均光谱进行下一步分析。

### 2.2 叶绿素含量参考测定结果

叶绿素含量的测定与高光谱图像的同步采集。采用紫外分光光度计测量法<sup>[7,8]</sup>。表 2 列出了叶绿素含量均值、范围和标准偏差。

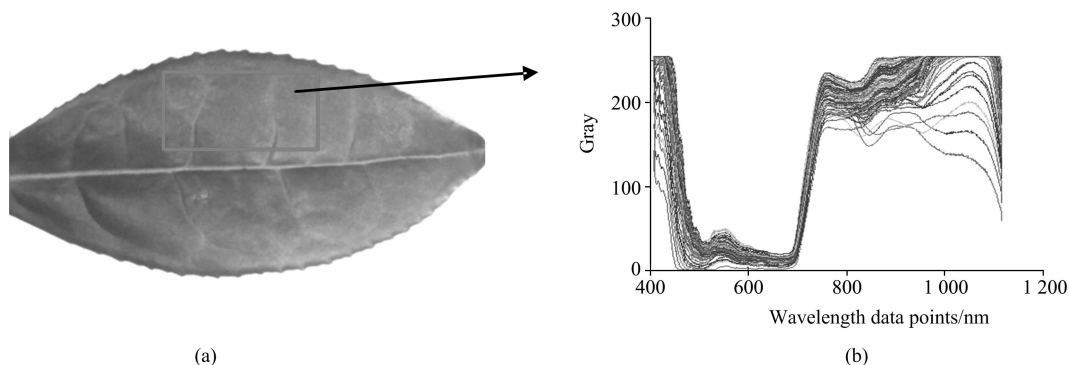


Fig. 2 Spectral profile from the hyperspectral image of some region in tea plant's leaves

Table 2 Descriptive statistics for sample measurement

	样本数	范围/ $[\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}]$	均值/ $[\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}]$	标准偏差
校正集	60	49.060 7~121.384 5	85.747 8	18.298 0
预测集	30	60.312 6~121.146 4	82.426 2	15.248 4

### 2.3 预测模型建立及比较

在叶绿素含量预测模型建立前,首先通过 RVI, FPI 和 MSAVI2 等七种算法分别提取相应的特征参数,再与叶绿素参考测量结果进行拟合建立叶绿素含量的回归模型。拟合模型的方程及其校正和预测的结果如表 3 所示。综合比较模型预测集中相关系数( $R$ )与最小均方根误差 root mean square

error (RMSE)。从表 3 可以看出,MSAVI2 模型预测集中  $R$  值最高, RMSE 值最低;同时,该模型校正和预测的结果较为接近,因此 MSAVI2 模型不仅预测精度高,且稳定性好。因此 MSAVI2 模型作为本试验的最佳模型被用来估计叶绿素含量。

Table 3 Chlorophyll content model of tea leaves

方程类型	拟合模型	校正集		预测集	
		$R$	RMSE	$R$	RMSE
CARI	$f(\text{CARI}) = -0.351 \times \text{CARI} + 125.7$	0.812 6	10.75	0.730 2	10.6
FPI	$f(\text{FPI}) = 8.53 \times \text{FPI} - 6.073$	0.777 2	11.61	0.743 0	10.39
MSAVI2	$f(\text{MSAVI2}) = -50.2 \times \text{MSAVI2} + 69.97$	0.843 3	9.918	0.832 3	8.601
NDVI	$f(\text{NDVI}) = -350.9 \times \text{NDVI} - 0.415 2$	0.846 4	9.828	0.832 1	8.607
RDVI	$f(\text{RDVI}) = 16.89 \times \text{RDVI} - 52.52$	0.843 5	9.913	0.794 9	9.415
RVI	$f(\text{RVI}) = -270.9 \times \text{RVI} + 250.4$	0.846 6	9.820	0.829 0	8.680
TVI	$f(\text{TVI}) = -0.079 24 \times \text{TVI} + 118.3$	0.845 9	9.842	0.797 2	9.369

### 2.5 叶绿素含量分布预测

试验提取茶树叶片高光谱三维数块中任意像素下的光谱信息,将其代入 MSAVI2 模型估算出该像素的叶绿素含量值。计算出茶树叶片中每个像素下的叶绿素含量,不同叶绿素含量利用不同的色泽加以描述,以形成一张伪彩图片如图 3 所示。从图 3,叶绿素较均匀的分布在叶脉两侧,叶脉中叶绿素含量低于叶肉中叶绿素含量。叶片首端叶绿素含量高于末端叶绿素含量。由于茶树叶片本身叶脉较为细密,且表面含有蜡质层,再加高光谱图像本身分辨率等问题,因此该伪彩图片仅能区分出其主叶脉分布情况。另外,叶片边缘蓝紫色部分并不仅仅是叶绿素含量的真实估计,其主要是由叶片边缘起伏造成光反射不均等原因所致。从总体上看,根据 MSAVI2 预测模型可以较为准确地估算出叶片表面叶绿素的分布情况。叶片上叶绿素含量的分布研究可以为进一步为分析植物的营养信息服务。

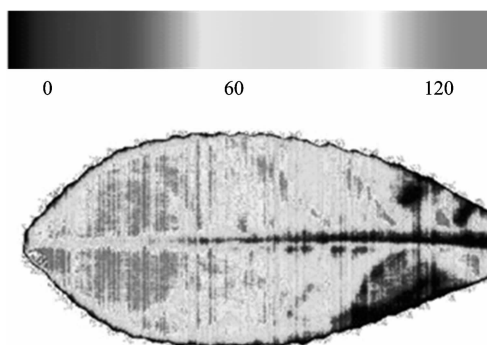


Fig. 3 Distribution of the chlorophyll on the leaf

## 3 结论<sup>[7,8]</sup>

利用实验室自主研发的高光谱图像采集系统获取茶树叶

片样本的高光谱图像信息,选择指定区域并提取指定区域内的平均光谱信息。通过 RVI、FPI 和 MSAVI2 等 7 种算法分别提取相应的特征参数,进而同样本所对应的叶绿素浓度建立拟合模型并比较结果。建模结果表明,MSAVI2 预测模型

结果最好。利用 MSAVI2 预测模型计算出茶树叶片每一像素点下的叶绿素浓度并画出叶绿素含量分布图。为进一步利用图像处理判断植物的营养信息提供参考依据。

## References

- [1] Manetas Y, Grammatikopoulos G, Kyparissis A. *Journal of Plant Physiology*, 1998, 153; 3.
- [2] XUE Li-hong, YANG Lin-zhang(薛利红, 杨林章). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2008, 24(9): 165.
- [3] CHEN Quan-sheng, GUO Zhi-ming, ZHAO Jie-wen, et al(陈全胜, 郭志明, 赵杰文, 等). *J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报)*, 2009, 28(5): 357.
- [4] Gerrit Polder, Gerie W A M, Van Der Heijden, et al. *J. Near Infrared Spectroscopy*, 2003, 11 (3): 193.
- [5] CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, CAI Jian-rong, et al(陈全胜, 赵杰文, 蔡健荣, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2008, 28(4): 669.
- [6] XU Wei, WANG Dong-feng. (徐 玮, 汪东风). *Food Chemistry(食品化学)*. Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2008. 45.
- [7] Brogea N H, Leblanc E. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76; 156.
- [8] Moses Azong Cho, Andrew K Skidmore. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101; 181.

## Measurement of Chlorophyll Content and Distribution in Tea Plant's Leaf Using Hyperspectral Imaging Technique

ZHAO Jie-wen<sup>1</sup>, WANG Kai-liang<sup>1</sup>, OUYANG Qin<sup>1</sup>, CHEN Quan-sheng<sup>2\*</sup>

1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Agricultural Recourses and Regional Planning, Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

**Abstract** Chlorophyll content and distribution in plant's leaves is an important index in estimation of plant nutrition information. In the present work, chlorophyll content and distribution in tea plant's leaves were measured by hyperspectral imaging technique. First, hyperspectral image data were captured from tea plant's leaves; then seven kinds of algorithms were used to extract the characteristic parameters from hyperspectral image; finally, seven fitted models were developed using the characteristics vectors and the reference measurements of chlorophyll contents respectively. Experimental results showed that the MSAVI2 model is superior to other models, and the results of the MSAVI2 model was achieved as follows;  $R=0.843\ 3$  and  $RMSE=9.918$  in the calibration set;  $R=0.832\ 3$  and  $RMSE=8.601$  in the prediction set. Finally, the chlorophyll content of each pixel in image was estimated by the fitted model, and the distribution of chlorophyll content in the tea plant's leaf was described by pseudo-color map. This study sufficiently demonstrated that the chlorophyll content and distribution in tea leaf can be measured by hyperspectral imaging technique.

**Keywords** Hyperspectral image; Tea leaves; Chlorophyll; Modified second soil-adjusted vegetation index(MSAVI2)

(Received May 16, 2010; accepted Aug. 22, 2010)

\* Corresponding author