

# 基于 RGB 模型的苹果叶片叶绿素含量估测

程立真<sup>1</sup>, 朱西存<sup>1,2,\*</sup>, 高璐璐<sup>1</sup>, 李程<sup>1</sup>, 王凌<sup>1</sup>, 赵庚星<sup>1</sup>, 姜远茂<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; <sup>2</sup> 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018; <sup>3</sup> 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018)

**摘要:** 为了快速、无损地获得苹果叶片叶绿素含量与其表面颜色特征之间的关系, 为诊断苹果树生理状况提供科学依据。以新梢旺长期的红富士苹果树为研究对象, 应用数码相机采集叶片图像, 利用图像处理技术, 采集叶片图像的红 (R)、绿 (G) 和蓝 (B) 值, 通过运算组合构造颜色特征参数, 建立基于苹果叶片颜色特征参数的叶绿素含量估算模型, 并对其精度进行评价和验证。结果表明, 叶绿素含量敏感的颜色参数分别为 B、B/R、B/G、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)、(R-B)/(R+B)、(G-B)/(G+B)、(R-B)/(R+G+B) 和 (G-B)/(R+G+B) 值; 基于以上 9 个敏感颜色参数分别建立单变量回归模型和支持向量机回归模型 (SVM), 估测叶片 Chl.a、Chl.b、Chl.(a+b) 和 SPAD 值, 其中单变量回归模型决定系数 ( $R^2$ ) 均在 0.6 左右; SVM 回归模型的决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.8754、0.8374、0.8671 和 0.8129, 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.0194、0.0350、0.0497 和 0.9281, 相对误差 (RE) 分别为 0.8059%、1.7540%、1.1224% 和 1.1894%, 尤以对 Chl.a 的估测效果最佳, SVM 的估测精度高于单变量回归模型。模型验证取自 1/4 同样本数据, 验证结果表明基于 SVM 的 Chl.a 稳定性更佳,  $R^2 = 0.8275$ ,  $RMSE = 0.0293$ ,  $RE = 1.8529\%$ 。应用数码相机并基于 RGB 颜色模型可快速估测苹果叶片叶绿素含量, 可对果园水肥的精确管理提供技术支持。

**关键词:** 苹果; 叶片; 颜色参数; 叶绿素含量; SPAD 值; 支持向量机 SVM; 数码相机

**中图分类号:** S 661.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2017) 02-0381-10

## Estimation of Chlorophyll Content in Apple Leaves Based on RGB Model Using Digital Camera

CHENG Lizhen<sup>1</sup>, ZHU Xicun<sup>1,2,\*</sup>, GAO Lulu<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>1</sup>, ZHAO Gengxing<sup>1</sup>, and JIANG Yuanmao<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>2</sup>National Engineering Laboratory on Efficient Utilization of Soil and Fertilization, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>3</sup>College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** Chlorophyll content is an important index of characterization for plant growth. The traditional chlorophyll content determination methods mainly include spectrophotometry and chlorophyll meter method (SPAD-502). The spectrophotometric method can determine chlorophyll content accurately but time-consuming, laborious and damaged blades; the chlorophyll meter method acquire chlorophyll

**收稿日期:** 2016-09-22; **修回日期:** 2017-02-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41671346, 42171369); 山东农业大学农业大数据项目 (75016); 国家自然科学基金青年基金项目 (41301482)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: zxc@sdau.edu.cn)

content rapidly but the measurement area is limited and repeatedly. Digital image processing technology emerges in response to the needs of times, which provides a scientific basis for diagnosis of the apple tree physiology. The apple leaves were collected from 60 new shoots prosperous long-term apple trees in Mengyin of Shandong Province, and on the same night, the image were taken using a digital camera. The chlorophyll contents were measured by the traditional chemical analysis in laboratory, including Chl.a, Chl.b, Chl.(a + b) and the SPAD value. There was a certain degree difference in the correlation analysis of chlorophyll content with color data, in order to increase the accuracy of chlorophyll content estimation for apple trees, the color parameters were combined based on the RGB values extracted from histogram in Photoshop CS6.0 (Adobe System, Inc.) . Then the correlation analysis method was used to select the sensitive color parameters (R, red; G, green; B, blue) . Compared to the trichromatic color values, the combination of RGB values considerably improved the correlation coefficients. Among the color parameters, B, B/R, G, B/G, G/ (R + G + B), B/ (R + G + B), (R - B) / (R + B), (G - B) / (G + B), (R - B) / (R + G + B) and (G - B) / (R + G + B) values were correlated significantly with chlorophyll content respectively. The correlation coefficients ( $R$ ) of these essential color parameters were almost above 0.325, which suggested that leaf color parameters were significantly correlated with chlorophyll content ( $P = 0.01$ ) . According to the result of systematic analysis and diagnosis, the univariate regression model and support vector machine (SVM) regression model method acts as a non-parametric regression technique, which analyzes the fitting the degree of relationship between predicted values and measured values using the determination coefficient( $R^2$ ), root mean square error( $RMSE$ )and relative error ( $RE$ ) . In the univariate regression model, the fitting coefficients of the chlorophyll content based on the G/ (R + G + B) color parameter achieved the highest  $R^2 = 0.736$ , as Chl.(a + b) > Chl.b > Chl.a > SPAD; the  $R^2$  of other color parameters differed from 0.482 to 0.742, the improvement of the univariate regression model stability were needed. The SVM model has the advantage of minimized parameter setting and model structure risk. The effect of the SVM model was good for the estimation of chlorophyll content of apple trees, including the fitting coefficients ( $R^2$ ) between estimated and measured value were 0.8754, 0.8374, 0.8671 and 0.8129, respectively,  $RMSE$  were 0.0194, 0.0350, 0.0497 and 0.9281, respectively,  $RE$  were 0.8059%, 1.7540%, 1.1224% and 0.8059%, respectively, which demonstrated that the SVM estimation had a higher accuracy. By the verification analysis, the SVM based on sensitive color parameters for Chl.a had the best estimation, including  $R^2 = 0.8275$ ,  $RMSE = 0.0293$  and  $RE = 1.8529\%$ . The conclusion were drawn that application of digital cameras based on RGB color model can estimate apple leaf chlorophyll content rapidly. The potential of the imaging system with apple leaves has been discussed in the article. The results can provide the technical support for precise management of orchard.

**Keywords:** apple; leaf; color parameter; chlorophyll content; SPAD value; support vector machine (SVM); digital camera

叶绿素含量是表征植物生长状况的重要指标。传统叶绿素含量测定方法主要有分光光度法和叶绿素仪 (SPAD-502) 法。分光光度法虽能精确地测定叶绿素含量, 但费时费力, 且破损叶片; 叶绿素仪虽能够快速测定叶绿素含量, 但测量面积较小, 且需重复测量才可得到较好的效果。而数码相机作为可见光成像传感器最为便捷的工具之一, 可以在不破损样本的前提下, 根据红、绿、蓝 3 个

波段, 利用不同的颜色模型量化数字图像的颜色信息 (Gonzalez & Woods, 2002), 实现快速、无损地估测植物叶绿素含量。利用数码相机进行农业信息研究始于 20 世纪 90 年代, 除了应用于农产品自动分级 (蒋焕煜 等, 2002)、杂草识别、病虫害监测 (Steddom et al., 2005; Zhang et al., 2014) 等以外, 在估测作物叶绿素含量和氮素方面也得到了广泛应用, 如棉花 (雷咏雯 等, 2004; 王克如 等, 2006; 王方永 等, 2010; 张若宇 等, 2010; 王娟 等, 2013;)、小麦 (Kawashima & Nakatani, 1998; Adamsen et al., 1999)、水稻 (贾良良 等, 2009; 王远 等, 2012)、大豆 (费丽君和谭峰, 2010)、油菜 (袁道军 等, 2009)、番茄 (李艳 等, 2007; 柴阿丽 等, 2009) 及其他作物 (睦晓蕾 等, 2007; Su et al., 2008; 李利敏 等, 2010; Yadav et al., 2010; Moghaddam et al., 2011; Wang et al., 2011; Guputa et al., 2013)。前期的研究表明, 在限定的气象条件下颜色参数  $R - B$  (红 - 蓝) 和  $G - B$  (绿 - 蓝) 与小麦和黑麦叶片的叶绿素含量相关性最好, 但在不同的气象条件下  $(R - B) / (R + B)$  是最好的指标 (Kawashima & Nakatani, 1998)。当小麦冠层群体图像的颜色参数  $< 1.2$  时,  $G/R$  指标和 SPAD 值 (叶绿素仪值) 呈显著正相关, 可利用 RGB 值测定小麦的衰老状况 (Adamsen et al., 1999)。以上研究表明, 利用数码相机获取叶片图像颜色参数 (如比值、差值和标准化值等运算), 并构建颜色参数 (如  $G/R$ 、 $(R - B)$ 、 $(R - B) / (R + B)$  等) 能有效地估测叶绿素含量。本研究中将在统一光源条件下获取叶片图像, 综合分析苹果叶片的 RGB 颜色参数, 建立叶绿素的估测模型, 为有效地对苹果树进行快速无损长势监测提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集

研究对象为红富士苹果树, 在新梢旺长期 (2015 年 5 月) 对成熟叶片取样。在试验区随机选取 15 个果园, 每个果园随机选择 4 株生长状况良好的树, 共计 60 株; 在树四周生长枝中部采集外形规则 8 片无损健康的叶片, 每株树的叶片作为 1 个样本, 迅速装入保鲜袋, 密封、编号后放入黑色袋中带回实验室。

### 1.2 叶绿素含量的测定

#### 1.2.1 分光光度法

称取苹果叶片 (去除叶脉) 0.2 g 并剪碎, 置于研钵中, 加入少量石英砂和碳酸钙粉以及 95% 乙醇溶液 2 ~ 3 mL, 研磨至匀浆; 经过滤、反复冲洗研钵和玻璃棒确保叶片色素全部进入容量瓶, 再用乙醇溶液定容至 25 mL; 将叶绿素溶液倒入比色皿, 岛津 UV-3600 分光光度计测得叶绿素溶液在 665、649 和 470 nm 处的吸光度, 计算叶绿素浓度 (李合生, 2001)。每个样本重复 4 次, 浓度值取平均值。

#### 1.2.2 叶绿素仪法

采用 SPAD-502 叶绿素计测量。为了减少测量误差, 每片叶片至少测量 3 个点 (避开叶脉), 每株样本测 4 片, 然后取其平均值作为该样本的 SPAD 值。试验共测得 60 株样本。

### 1.3 叶片图像的采集

于采叶当日 19: 00 在实验室用数码相机 (Canon SX720HS) 拍摄叶片图像。用三脚架固定相机, 保持镜头与叶片之间呈  $90^\circ$  垂直, 并于距叶片高 50 cm 处进行拍摄。相机设置调整镜头焦距为 50 mm,

采用白平衡模式及自动对焦。为保证外界环境稳定，图像采集环境设置为全黑暗背景，仅使用 2 个 50 W 卤素灯作为集中光源。为保证光源一致，保持卤素灯在叶片 40 cm 两侧，调整角度使光源均匀照射在底部背景为白板的叶片上。每次拍摄前进行白板校正。拍摄图像的像素为 1 920 × 1 080，以 JPEG 格式储存。

#### 1.4 叶片图像颜色特征参数的提取

通过 Photoshop CS6.0 (Adobe System, Inc.) 软件将苹果叶片图像进行分割，去除背景，仅保留叶片主体部分 (不含叶脉)。RGB 颜色模型中波长为 700 nm (红)、546 nm (绿) 和 435.8 nm (蓝) 的光谱色为三原色。在软件的直方图中采集叶片图像的红光值 (R)、绿光值 (G) 和蓝光值 (B)。根据 R、G、B 算法组合得出 28 种颜色参数 (张若宇 等, 2010)。

#### 1.5 模型的建立与精度检验

分别采用单变量回归模型和支持向量机回归模型对苹果叶片叶绿素含量进行估测。在 DPS 系统 中对支持向量机回归模型的参数设置如图 1。第 1 个选项, SVM 的分类类型: 即  $\epsilon$ -SVR 分类和  $\nu$ -SVR 分类, 默认为  $\epsilon$ -SVR 分类; 第 2 个选项是核函数类型: 包括线性、多项式、RBF 函数和 sigmoid 函数, 系统默认为 RBF 函数; 其他选项有: ①Degree, 核函数为多项式时, 满足分类面对所有样本 正确分类并且具备最大的分类间隔, 默认 3; ②Gamma, 核函数为 RBF 时, 最优分类函数的常值, 默认 0.5; ③Coef0, 核函数为多项式获 sigmoid 时, 分类器公式中的取值, 默认 0; ④Nu, 支持向 量  $\nu$ -SVR 分类中的参数, 默认 0.5; ⑤Epsilon ( $\epsilon$ ), 设置允许的种植迭代计算的精度, 默认 0.001; ⑥cachesize, 设置内存大小, 以 MB 为单位, 默认 100; ⑦Cost, 支持向量  $\epsilon$ -SVR 分类中的惩罚系 数, 默认 1; ⑧shrinking, 对否使用启发式, 0 或 1 (默认 1); ⑨Prob., 是否计算配对二分类海旅信 息的 logistic 分布参数; ⑩P 设置为相关显著水平, 0.01 水平为极显著相关。

试验中的 60 个样本数据随机分为 45 个训练集和 15 个验证集, 采用决定系数 ( $R^2$ )、均方误差 ( $RMSE$ )、相对误差 ( $RE$ ) 指标对预测模型进行精度检验。



图 1 支持向量机回归模型的参数设置

Fig. 1 Parameter settings in SVM

## 2 结果与分析

### 2.1 颜色参数与叶绿素含量相关性分析

本试验中采集的样本叶绿素含量和 SPAD 值统计描述如表 1 所示, 用于图像研究的叶绿素含量和 SPAD 值标准差差异较小, 变异系数普遍较小, 说明了在同一个生长环境的苹果树在吸收营养成分方面以及叶片叶绿素含量大体一致。

**表 1 苹果叶片叶绿素含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和 SPAD 值统计**  
**Table 1 The statistics description of chlorophyll content and SPAD of apple leaves**

叶绿素 Chlorophyll	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数% CV
Chl.a	1.5851	0.0576	1.5026	1.6888	3.6368
Chl.b	1.3701	0.0865	1.2258	1.5604	6.3151
Chl.(a + b)	2.9553	0.1329	2.7385	3.2456	4.4985
SPAD	51.0625	1.8415	46.8000	55.0000	3.6064

将苹果叶片 R、G、B 组合得到的 28 种颜色参数分别与 Chl.a、Chl.b、Chl.(a + b)和 SPAD 数据进行相关性分析, 由表 2 可见, 绝大部分颜色参数与 Chl.a、Chl.b、Chl.(a + b)和 SPAD 数据呈显著相关 ( $r = \pm 0.325$ ), 且每一参数的相关系数极其相似, 均在 B 值、B/R、B/G、G/ (R + G + B)、B/ (R + G + B)、(R - B) / (R + B)、(G - B) / (G + B)、(R - B) / (R + G + B)、(G - B) / (R + G + B) 达到较高的相关系数。在 RGB 三原色中, R 和 G 值与叶绿素含量的相关系数较低, B 值与

**表 2 颜色参数与叶绿素含量的相关系数 ( $r$ )**  
**Table 2 The correlation between the color parameters and the chlorophyll content and SPAD of apple leaves**

颜色参数 Color parameter	Chl.a	Chl.b	Chl.(a + b)	SPAD
(R + G + B) / 3	0.3283	0.5650	0.5101	0.3593
R	0.2026	0.4732	0.3959	0.2323
G	0.2099	0.4580	0.3892	0.2555
B	0.6768	0.7560	0.7855	0.6758
R - B	- 0.1811	0.1107	- 0.0065	- 0.1429
R - G	0.0899	0.3457	0.2640	0.0403
G - B	- 0.2449	0.0233	- 0.0910	- 0.1836
R/G	0.0532	0.0843	0.0318	- 0.1327
R/B	- 0.5354	- 0.4682	- 0.5369	- 0.6095
G/B	- 0.5495	- 0.4895	- 0.5569	- 0.6235
G/R	0.0347	- 0.0950	- 0.0467	- 0.1294
B/R	0.7369	0.7264	0.7923	0.7424
B/G	0.7538	0.7502	0.8151	0.7479
R/ (R + G + B)	- 0.6121	- 0.5493	- 0.6230	- 0.6488
G/ (R + G + B)	- 0.7360	- 0.8001	- 0.8405	- 0.6948
B/ (R + G + B)	0.7411	0.7293	0.7961	0.7465
(R - B) / (R + B)	- 0.7282	- 0.7065	- 0.7776	- 0.7428
(R - G) / (R + G)	- 0.0435	0.0899	0.0397	- 0.1309
(G - B) / (G + B)	- 0.7434	- 0.7318	- 0.7987	- 0.7495
(R - B) / (R + G + B)	- 0.7019	- 0.6692	- 0.7399	- 0.7200
(R - G) / (R + G + B)	0.1256	0.0062	- 0.0504	- 0.2054
(G - B) / (R + G + B)	- 0.7656	- 0.7783	- 0.8386	- 0.7560
(G + B - R) / 2R	0.6183	0.5635	0.6349	0.6566
(G + B - R) / 2G	0.6314	0.5736	0.6472	0.6583
(G + B - R) / 2B	0.4289	0.3285	0.3998	0.4992
(R - G - B) / (R + B)	- 0.6249	- 0.5687	- 0.6411	- 0.6577
(R - G - B) / (R + G)	- 0.5967	- 0.5303	- 0.6039	- 0.6408
(R - G - B) / (G + B)	- 0.6044	- 0.5345	- 0.6099	- 0.6398

叶绿素含量的相关系数最高，相关系数依次为，与 Chl.(a + b) > 与 Chl.b > 与 Chl.a > 与 SPAD 值，最高相关系数 0.7855；颜色差值参数 (R - B、R - G 和 G - B) 与叶绿素含量相关性多不显著，最高相关系数 0.3457；在颜色比值参数中，B/R、B/G 的相关系数较高，B/G 与叶绿素的相关系数最高，相关系数绝对值依次为，与 Chl.(a + b) > 与 Chl.a > 与 Chl.b > 与 SPAD 值，最高相关系数绝对值为 0.8151；在标准化颜色参数中，G/ (R + G + B) 和 B/ (R + G + B) 与叶绿素的相关系数较高，G/ (R + G + B) 相关系数绝对值依次为，与 Chl.(a + b) > 与 Chl.b > 与 Chl.a > 与 SPAD 值，最高相关系数绝对值为 0.8405，B/ (R + G + B) 相关系数依次为，与 Chl.(a + b) > 与 SPAD 值 > 与 Chl.a > 与 Chl.b，最高相关系数 0.7961；在归一化颜色参数中，(G - B) / (G + B) 和 (G - B) / (R + G + B) 与叶绿素的相关系数较高，(G - B) / (G + B) 相关系数绝对值依次为，与 Chl.(a + b) > 与 SPAD 值 > 与 Chl.a > 与 Chl.b，最高相关系数绝对值为 0.7987，(G - B) / (R + G + B) 相关系数绝对值依次为，与 Chl.(a + b) > 与 Chl.b > 与 Chl.a > 与 SPAD 值，最高相关系数绝对值为 0.8386。因此，采用以上颜色参数建立苹果树叶片叶绿素含量估测模型，在统计学意义上是可行的。

## 2.2 苹果叶片颜色参数与叶绿素含量的单变量模型

基于颜色参数与叶绿素含量相关系数的分析结果，选取 9 个相关系数较高的颜色参数作为叶片颜色的敏感参数，使用 SPSS 软件建立线性、对数、指数和二次曲线模型。经计算，建立的二次曲线估测模型优于线性、对数和指数模型，得出叶片颜色参数与叶绿素含量的最高决定系数 ( $R^2$ ) 见表 3。以 G/ (R + G + B) 颜色参数建立的叶绿素含量预测模型的决定系数最高，依次为，与 Chl.(a + b) > 与 Chl.b > 与 Chl.a > 与 SPAD 值，最高  $R^2 = 0.736$ ，表明单变量的数学模型拟合精度达到极显著水平，颜色参数 G/ (R + G + B) 可作为诊断和评价苹果叶片叶绿素含量的核心颜色参数；其他颜色参数与叶绿素含量的单变量模型的拟合系数介于 0.482 ~ 0.724，差异性较大。因此，依据单变量建立的回归模型的可靠性需改善。

表 3 核心颜色参数与叶绿素含量之间的单变量模型的决定系数 ( $R^2$ )

Table 3 The correlation coefficients between core color parameters and chlorophyll content in the univariate model

颜色参数 Color parameter	Chl.a	Chl.b	Chl.(a + b)	SPAD
B	0.483	0.610	0.646	0.504
B/R	0.526	0.572	0.658	0.561
B/G	0.533	0.610	0.698	0.568
G/ (R + G + B)	0.581	0.653	0.736	0.485
B/ (R + G + B)	0.539	0.588	0.666	0.563
(R - B) / (R + B)	0.523	0.562	0.652	0.553
(G - B) / (G + B)	0.551	0.580	0.688	0.563
(R - B) / (R + G + B)	0.482	0.511	0.597	0.522
(G - B) / (R + G + B)	0.575	0.631	0.724	0.574

## 2.3 苹果叶片叶绿素含量的支持向量机模型

使用多变量的支持向量机回归模型 (SVM)，在 DPS 系统中选取 v-SVR 类型与核类型 RBF，以与叶绿素含量相关系数较高的 9 个颜色参数 (表 3) 为自变量综合预测叶片叶绿素含量。

从图 2 中可以看出，45 个样本基于 9 个敏感颜色参数建立的叶片 Chl.a、Chl.b、Chl.(a + b) 和 SPAD 支持向量机模型 (SVM) 的估测效果比单变量好，决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.8754、0.8374、0.8671 和 0.8129，均方根误差 (RMSE) 分别为 0.0212、0.0350、0.0497 和 0.9281，相对误差 (RE) 分别为 0.8059%、1.7436%、1.1224% 和 1.1894%，模型评估指标均通过了  $P = 0.01$  极显著检验水平。在对 4 个叶绿素含量的估测中，尤其是依据 9 个核心颜色参数建立的对 Chl.a 的估测模型效果最佳。

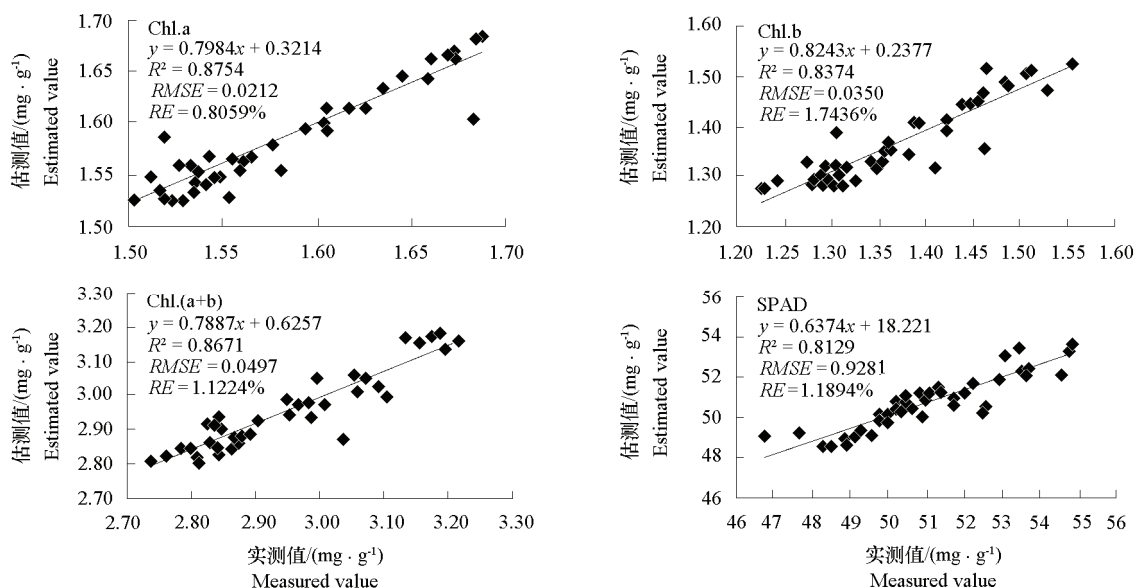


图 2 苹果叶片叶绿素含量的支持向量机回归模型的估测值和实测值对比

$n = 45$ ;  $R^2$  为决定系数;  $RMSE$  为均方根误差;  $RE$  为相对误差。下同。

Fig. 2 Comparisons of the estimated and measured value of apple leaf chlorophyll content in SVM regression model

$n = 45$ ;  $R^2$  represents the determination coefficient;  $RMSE$  represents the root mean square error;

$RE$  represents relative error. The same below.

## 2.4 苹果叶片叶绿素含量支持向量机预测模型的精度检验

为检验估测模型的适应性和可靠性, 利用同期 15 组独立样本数据, 采用决定系数、均方根误差和相对误差, 对实测值和预测值之间的拟合程度进行精度检验。从图 3 可以看出, Chl.a、Chl.b、Chl.(a + b)

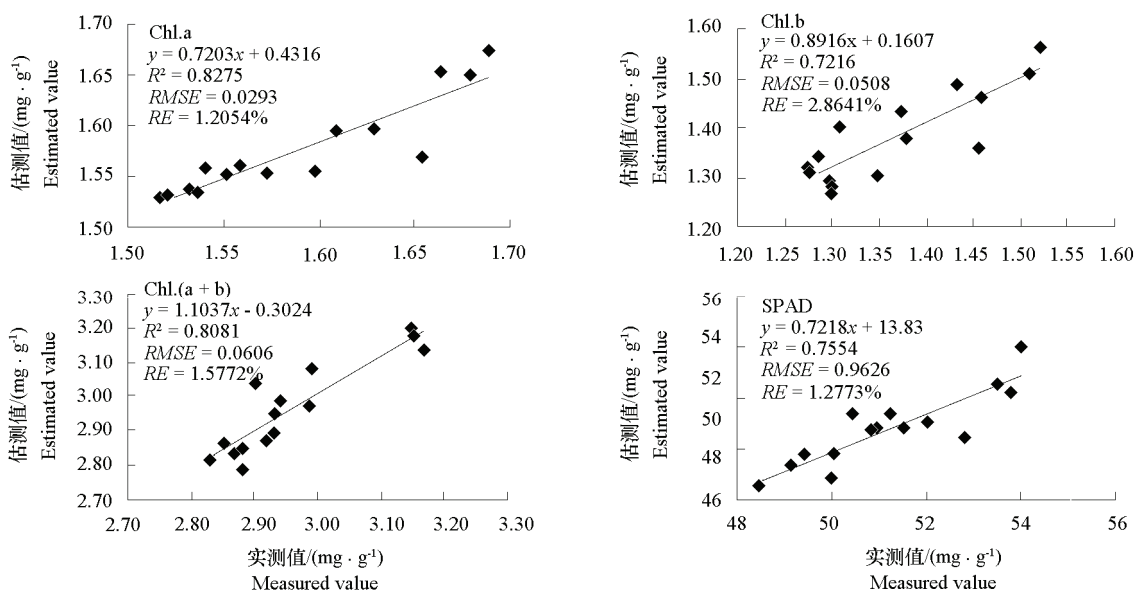


图 3 估测值和实测值验证对比图

Fig. 3 Comparisons between estimated and measured value in verification

$n = 15$ .

和 SPAD 的预测值与实测值取得了理想的拟合效果: 决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.8275、0.7216、0.8081 和 0.7554, 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.0293、0.0508、0.0606 和 0.9626, 相对误差 (RE) 分别为 1.2054%、2.8641%、1.5772%和 1.2773%。结果表明, 训练模型和验证模型都有理想的估测效果, 验证模型的评估指标与训练模型不存在大的差别, 训练模型和验证模型都有理想的估测效果, 说明了验证模型的可靠性和准确性。

### 3 讨论

研究从数码相机的颜色值角度出发, 认为 RGB 颜色模型中的 R、G、B 值为叶片反射的红、绿、蓝可见光的颜色参数, 试验结果显示, B 值 (蓝值)、B/R、B/G (比值) 以及  $G/(R+G+B)$ 、 $B/(R+G+B)$  (归一化值) 与叶绿素含量及 SPAD 值的相关性最好。这与用机器视觉获取的棉花叶片的叶绿素含量 B 值、B/R 比值与叶绿素含量极显著相关的结果 (王克如 等, 2010) 一致, 说明该参数具有一定的普适性和可靠性。本结果显示, R - B (差值) 与苹果叶片叶绿素含量并没有取得显著的相关系数 ( $r = -0.1811$ ), 这与 Kawashima 和 Nakatani (1998) 在限定的气象条件下, R - B 与小麦叶片的叶绿素含量相关性最好的结果不一致, 可能是由于颜色参数对于不同作物有不同的适应性, 易受到拍摄环境、背景和相机类型等因素的影响。

此外, 支持向量机回归模型 (SVM) 是 20 世纪 90 年代由 Vapnik 提出的, 是目前发展最快的机器学习方法。它基于结构风险小的优势, 较好地解决了非线性、过学习、维数灾难、局部极小点、小样本等实际问题。本研究依据核心颜色参数建立的苹果叶片叶绿素含量的 SVM 估测模型, 估测精度和稳定性均取得了良好效果。但是, 对于 SPAD 值的 SVM 验证精度低于其他叶绿素含量指标, 说明 SPAD 值作为叶绿素含量的另一种方法的测定值, 在测定精度方面不如实验室化学测定方法更加精确。

本研究基于数码相机获取苹果叶片颜色值, 并基于 RGB 颜色模型利用颜色参数建立了可行的叶绿素含量预测模型, 说明使用低成本的数码相机可估测果树营养状况, 并对果园水肥的精确管理提供技术支持。本研究的试验数据来源于山东蒙阴苹果园, 研究结论能否推广至其他地区, 还需要进一步探索和研究。数码相机操作简便, 且性价比和精确像素在不断提高, 可利用数码相机图像分析作物营养缺失和生长状况, 因此在农业发展中具有良好的推广和应用前景。

### 4 结论

新梢旺长期的苹果叶片叶绿素含量与基于 RGB 颜色系统的颜色参数 B 值、B/R、B/G、 $G/(R+G+B)$ 、 $B/(R+G+B)$ 、 $(R-B)/(R+B)$ 、 $(G-B)/(G+B)$ 、 $(R-B)/(R+G+B)$ 、 $(G-B)/(R+G+B)$  的相关性均达到极显著水平, 说明基于 RGB 颜色系统可以估测叶片叶绿素含量。基于核心颜色参数建立的单变量回归模型预测精度低于支持向量机回归模型的预测精度, 基于 9 个敏感颜色参数建立的叶片 Chl.a、Chl.b、Chl.(a+b) 和 SPAD 支持向量机模型 (SVM), 决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.8754、0.8374、0.8671 和 0.8129, 均方根误差 RMSE 分别为 0.0194、0.0350、0.0497 和 0.9281, 相对误差 RE 分别为 0.8059%、1.7540%、1.122%和 1.1894%, 模型评估指标均通过了  $P = 0.01$  极显著性检验水平。结果说明依据核心颜色参数对 Chl.a 的估测效果最佳。叶片叶绿素含量受多个颜色参数综合影响, 同时也体现了支持向量机模型在小样本应用的优势。



## References

- Adamsen F J, Pinter P J Jr, Barnes E M, LaMorte R L, Wall G W, Leavitt S W, Kimball B A. 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Sci*, 39 (3): 719 - 724.
- Chai A-li, Li Bao-ju, Wang Qian, Shi Yan-xia, Huang Hai-yang. 2009. Detecting chlorophyll content of tomato leaves with technology of computer vision. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (1): 45 - 52. (in Chinese)
- 柴阿丽, 李宝聚, 王倩, 石延霞, 黄海洋. 2009. 基于计算机视觉技术的番茄叶片叶绿素含量的检测. *园艺学报*, 36 (1): 45 - 52.
- Fei Li-jun, Tan Feng. 2010. The application of computer vision technology in measured of chlorophyll of soybean leaves. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, (3): 199 - 201. (in Chinese)
- 费丽君, 谭峰. 2010. 机器视觉技术在大豆叶片叶绿素含量测算上的应用. *农机化研究*, (3): 199 - 201.
- Gonzalez R C, Woods R E. 2002. *Digital image processing*. 2nd ed. Pearson Education, Inc, Publishing as Prentice Hall: 4 - 10.
- Guputa S D, Ibaraki Y, Pattanayak A K. 2013. Development of a digital image analysis method for real-time estimation chlorophyll content in micro propagated potato plants. *Plant Biotechnology Reports*, 7 (1): 91 - 97.
- Jia Liang-liang, Fan Ming-sheng, Zhang Fu-suo, Chen Xin-ping, Lü Shi-hua, Sun Yan-ming. 2009. Nitrogen status diagnosis of rice by using a digital camera. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29 (8): 2196 - 2179. (in Chinese)
- 贾良良, 范明生, 张福锁, 陈新平, 吕世华, 孙彦铭. 2009. 应用数码相机进行水稻氮营养诊断. *光谱学与光谱分析*, 29 (8): 2196 - 2179.
- Jiang Huan-yu, Ying Yi-bin, Wang Jian-ping, Rao Xiu-qin, Xu Hui-rong, Wang Mao-hua. 2002. Real time intelligent inspecting and grading line of fruits. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 18 (6): 158 - 160. (in Chinese)
- 蒋焕煜, 应义斌, 王剑平, 饶秀勤, 徐惠荣, 汪懋华. 2002. 水果品质智能化实时检测分级生产线的研究. *农业工程学报*, 18 (6): 158 - 160.
- Kawashima S, Nakatani S. 1998. An algorithm for estimating chlorophyll content in using a video camera. *Annals of Botany*, 81 (1): 49 - 54.
- Lei Yong-wen, Wei Chang-zhou, Ye Jun, Hou Zhen-an, Li Jun-hua, Jia Liang-liang. 2004. Application of computer aided cotton leaf color analysis in nitrogen status diagnosis in cotton plants. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 22 (4): 113 - 119. (in Chinese)
- 雷咏雯, 危常州, 冶军, 侯振安, 李俊华, 贾良良. 2004. 计算机辅助叶色分析进行棉花氮素营养诊断的初步研究. *石河子大学学报 (自然科学版)*, 22 (4): 113 - 119.
- Li He-sheng. 2001. *Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments*. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2001. *植物生理生化实验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社.
- Li Li-min, Wu Liang-huan, Ma Guo-rui. 2010. Studies on year-cycle changes of leaf nutrient status from camphor tree. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (2): 277 - 282. (in Chinese)
- 李利敏, 吴良欢, 马国瑞. 2010. 樟树正常叶片与黄化叶片营养状况的周年变化. *园艺学报*, 37 (2): 277 - 282.
- Li Yan, Wang Juan, Ma Teng-fei, Zhu Jian, Wei Chang-zhou, Chu Gui-xin. 2007. A primary study on N evaluating of processing tomato leaves based on color features. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 63 (3): 175 - 179. (in Chinese)
- 李艳, 王娟, 马腾飞, 朱健, 危常州, 褚贵新. 2007. 基于颜色特征的加工番茄叶片氮素评价初步研究. *西北农业学报*, 63 (3): 175 - 179.
- Moghaddam P A, Derafshi M H, Shirzad V. 2011. Estimation of single leaf chlorophyll content in sugar beet using machine vision. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 35 (6): 563 - 568.
- Steddom M W K, Bredhoeft M, Khan M, Rush M C. 2005. Comparison of visual and multispectral radiometric disease evaluation of *Cercospora* leaf spot of sugar beet. *Plant Disease*, 89 (2): 1123 - 1130.
- Su C H, Fu C C, Chang Y C, Nair C R, Ye J L, Chu I M, Wu W T. 2008. Simultaneous estimation of chlorophyll a and lipid contents in microalgae by three color analysis. *Biotechnol Bioeng*, 99 (4): 1034 - 1039.
- Sui Xiao-lei, Mao Sheng-li, Wang Li-hao, Zhang Bao-xi, Zhang Zhen-xian. 2007. Effects of low light intensity on gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of *Capsicum* seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (3): 615 - 622. (in Chinese)
- 眭晓蕾, 毛胜利, 王立浩, 张宝玺, 张振贤. 2007. 弱光条件下辣椒幼苗叶片的气体交换和叶绿素荧光特性. *园艺学报*, 34 (3): 615 -

622.

- Wang Fang-yong, Wang Ke-ru, Li Shao-kun, Chen Bing, Chen Jiang-lu. 2010. Estimation of chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaves using digital camera and imaging spectrometer. *Acta Agronomica Sinica*, 36 (11): 1981 - 1989. (in Chinese)
- 王方永, 王克如, 李少昆, 陈兵, 陈江鲁. 2010. 利用数码相机和成像光谱仪估测棉花叶片叶绿素和氮素含量. *作物学报*, 36 (11): 1981 - 1989.
- Wang J, Wei C Z, Guo J Q, et al. 2011. A method based on digital image analysis for estimating crop canopy parameters. 2011 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2: 7 - 10.
- Wang Juan, Wei Chang-zhou, Wang Xiao-juan, Zhu Qi-chao, Zhu Jin-long, Wang Jin-xin. 2013. Estimation of chlorophyll contents in cotton leaves using computer vision based on gray board. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29 (24): 173 - 180. (in Chinese)
- 王娟, 危常州, 王肖娟, 朱齐超, 朱金龙, 王金鑫. 2013. 采用灰板校正的计算机视觉预测棉花叶绿素含量. *农业工程学报*, 29 (24): 173 - 180.
- Wang Ke-ru, Li Shao-kun, Wang Chong-tao, Yang Lei, Xie Rui-zhi, Gao Shi-ju, Bai Jun-hua. 2006. Acquired chlorophyll concentration of cotton leaves with technology of machine vision. *Acta Agronomica Sinica*, 32 (1): 34 - 40. (in Chinese)
- 王克如, 李少昆, 王崇桃, 杨蕾, 谢瑞芝, 高世菊, 柏军华. 2006. 用机器视觉技术获取棉花叶片叶绿素浓度. *作物学报*, 32 (1): 34 - 40.
- Wang Yuan, Wang De-jian, Zhang Gang, Wang Can. 2012. Digital camera based image segmentation of rice canopy and diagnosis of nitrogen nutrition. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28 (17): 131 - 136. (in Chinese)
- 王远, 王德建, 张刚, 王灿. 2012. 基于数码相机的水稻冠层图像分割及氮素营养诊断. *农业工程学报*, 28 (17): 131 - 136.
- Yadav S P, Ibaraki Y, Guputa S D. 2010. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based on image analysis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 100 (2): 183 - 188.
- Yuan Dao-jun, Liu An-guo, Yuan Bao-zhong, Hu Li-yong, Liu Zhi-xiong, Zhang Fang-fang. 2009. Nutrition information extraction of rape canopy based on computer-vision technolog. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25 (12): 174 - 179. (in Chinese)
- 袁道军, 刘安国, 原保中, 胡立勇, 刘志雄, 张方方. 2009. 基于计算机视觉技术的油菜冠层营养信息监测. *农业工程学报*, 25 (12): 174 - 179.
- Zhang Jie, Wang Rujing, Xie Chengjun, Li Rui. 2014. Crop pests image recognition based on multi-features fusion. *Journal of Computational Information Systems*, 10 (12): 5121 - 5129.
- Zhang Ruo-yu, Kan Za, Ma Rong, Cao Wei-bin, Li Jiang-bo. 2010. Relationship between color features and germination of delinted cottonseed based on RGB color model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26 (10): 172 - 177. (in Chinese)
- 张若宇, 坎杂, 马蓉, 曹卫彬, 李江波. 2010. 基于RGB模型的脱绒棉种颜色特征与发芽状况的关系. *农业工程学报*, 26 (10): 172 - 177.