

便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验

杨彪¹ 杜荣宇¹ 杨玉¹ 朱德宽¹ 郭文川^{1,2} 朱新华¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了快速、无损检测植物叶片叶绿素含量,基于叶绿素 a 和叶绿素 b 在光波长约 660 nm 和 460 nm 处有最大吸收峰的现象,设计了一种便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪。该检测仪主要由单片机、光源模块、光传感器、电源模块和输入输出模块等组成;其软件采用 Keil C51 编写,主要包括主函数、按键子函数、光采集子函数、数据处理子函数、显示子函数等。以菠菜、大青菜和油麦菜为试验对象,研究了 460 nm 和 660 nm 处植物叶片的吸光度与叶绿素含量之间的关系,结果表明,随着叶绿素含量的增加,吸光度增大,其关系可用二元一次方程描述(决定系数为 0.80)。与分光光度法相比,本文设计检测仪的叶绿素含量检测误差为 $-0.32 \sim 0.20$ mg/g,平均绝对误差为 0.14 mg/g;与 SPAD-502 型叶绿素仪相比,本文设计检测仪的 SPAD 值绝对测量误差为 $-3.3 \sim 1.8$,平均绝对误差为 1.1,且成本低,响应时间小于 2 s。

关键词: 叶绿素;无损检测;吸收峰;检测仪;便携式

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0180-07

Design of Portable Nondestructive Detector for Chlorophyll Content of Plant Leaves

YANG Biao¹ DU Rongyu¹ YANG Yu¹ ZHU Dekuan¹ GUO Wenchuan^{1,2} ZHU Xinhua¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: As the most essential pigment included in green plants, chlorophyll content is an important indicator in monitoring the growth of plants. The traditional spectrophotometric method used to measure the chlorophyll content of plant leaves has the advantages of high measurement accuracy and good repeatability, but the measurement process are time-consuming. Therefore, developing a portable rapid chlorophyll detector with simple operation and low cost, and could be used in-situ measurement will be appreciated by agricultural and forestry practitioners. Since the absorption peaks of chlorophyll a and b appeared at 660 nm and 460 nm, a portable chlorophyll content detector was developed based on this phenomenon. The hardware of the detector consisted of a single chip microcomputer, light sources module, light sensors, power module, and input and output module. The software, developed by using Keil C51 language, including main function and several sub-functions to detect the light, process data, calculate the chlorophyll content and display the values on screen. The leaves of spinach, big green vegetables and lettuce were used as samples, and the relationship between their chlorophyll contents and light absorbance at 460 nm and 660 nm were studied. It was found that the absorbance was increased with the increase of chlorophyll content, and their relationship could be described by first degree in two variable equation with the coefficient of determination of 0.80. The validation experiment on the developed detector showed that contrasted with the spectrophotometer method, the absolute measurement error of the developed detector was within the range of $-0.32 \sim 0.20$ mg/g, and its mean absolute error was 0.14 mg/g. Contrasted with the measured SPAD values by using SPAD-502 chlorophyll meter, the measurement error of the SPAD values measured by the developed detector was within the range of $-3.3 \sim$

收稿日期: 2019-05-06 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503137)和国家级大学生创新创业训练计划项目(201710712051)

作者简介: 杨彪(1993—),男,博士生,主要从事智能化检测技术与装备研究,E-mail: yangbiao8169@foxmail.com

通信作者: 郭文川(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事智能化检测技术与装备研究,E-mail: guowenchuan69@126.com

1.8, and its mean absolute error was 1.1. Moreover, the measurement time of the detector was less than 2 s and the cost of the detector was not high.

Key words: chlorophyll; nondestructive detect; absorption peak; detector; portable

0 引言

叶绿素是植物进行光合作用不可或缺的基础物质^[1]。植物叶片中的叶绿素含量与植被的光合能力、发育阶段以及氮素状况有着良好的相关性^[2],能够反映植物的生理状况^[3],因此,叶绿素含量的检测备受农业科技工作者关注^[4]。文献[5]规定了植物叶片中叶绿素含量的检测方法为分光光度法。该方法具有检测结果稳定且精确的优点^[6],但其操作步骤繁琐、耗时长、需要破坏待测样本,同时,检测中使用有毒物质丙酮,对操作者身体健康有严重的危害,且实验废液若处理不当会污染水资源^[7]。

为了设计方便、快捷、无损的叶绿素含量检测方法,国内外科研工作者先后采用原子吸收光谱技术^[8]、高光谱技术^[9-11]、反射光谱技术^[12]、多光谱图像技术^[13-15]、机器视觉技术^[16-18]以及可见和近红外光的吸收特性^[19-20]等检测叶绿素含量,取得了良好的效果。但原子吸收光谱法、高光谱法、反射光谱法、多光谱图像技术所使用的仪器价格昂贵,并且采集到的光谱数据需要经过复杂计算才能得到叶绿素含量^[21]。机器视觉法受光照条件影响较大,测量稳定性较差^[22]。目前,基于叶绿素在可见光(波长 650 nm)和近红外光(波长 940 nm)波长的吸收特性开发出了一些叶绿素检测仪,如 SPAD-502 型叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)^[19],小麦叶绿素、氮素、水分一体化测定仪^[20]等。与光谱法相比,这些仪器虽具有成本较低、操作简便的优点,但由于需要检测近红外波段的吸光度,而植物叶片在近红外波段的反射率很高^[23],导致该波段的透射光信号比较微弱,因此需要加大光源功率,并使用近红外波段的传感器,最终导致仪器价格较高,较难大规模推广使用。

叶绿素主要吸收蓝紫光(波长 400~500 nm)和红光(波长 600~700 nm)。植物叶片中的叶绿素分为叶绿素 a 和叶绿素 b,两种叶绿素在蓝紫光和红光波段的吸收峰不同。在红光波段,叶绿素 a 具有相对更强的吸收峰(波长 660 nm),而在蓝紫光波段,叶绿素 b 具有相对更强的吸收峰(波长 460 nm)^[24]。通常叶片中的叶绿素含量指的是叶绿素 a 和叶绿素 b 之和^[5]。对于不同的植物叶片,或者不同生理状况下的同一种植物叶片,其叶绿素 a、b 的比例并不相同^[25],因此使用 650 nm 作为检测波长仅能输出与叶绿素 a、b 的总含量相关的某一值,

如 SPAD 值。有研究表明,虽然不同叶片的 SPAD 值与叶绿素含量有较好的相关性,但对于不同的植物,其 SPAD 值与叶绿素含量之间的关系模型却不尽相同^[26]。导致这种现象的原因可能在于未考虑叶绿素 a、b 各自的吸收特性。目前广泛使用的叶绿素仪输出的是 SPAD 值,而并非植物叶片的叶绿素含量。因此,基于叶绿素 a、b 的最大吸收峰开发一款检测速度快、成本低廉、操作简单,且可以直接输出叶绿素含量值的植物叶片叶绿素含量无损检测仪,对于指导农作物生产具有重要的意义。

本文以 51 单片机为控制器,基于叶绿素 a、b 分别在光波长约 660 nm 和 460 nm 处具有最大吸收峰的原理,设计一款便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪,并对检测仪的性能进行试验测试。

1 仪器设计

1.1 硬件设计

如图 1 所示为便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪的硬件结构图。该检测仪主要由单片机、光源模块、光传感器、电源模块和输入输出模块组成。单片机负责控制其他模块并处理数据;光源模块负责发出光照强度稳定且中心波长为 460 nm 和 660 nm 的光;光传感器将检测到的光信号转换为可供单片机读取的数字信号,并将该信号发送给单片机;电源模块为整个系统稳定供电;输入输出模块负责处理用户输入指令并将测量结果通过显示器显示出来。

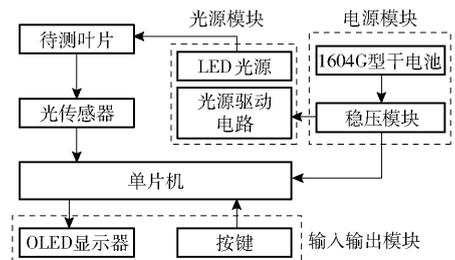


图 1 植物叶片叶绿素含量检测仪硬件结构图
Fig. 1 Structure diagram of portable nondestructive detector for chlorophyll content

1.1.1 单片机

采用 STC12C5A60S2 单片机作为检测仪控制器,其内部数据存储器为 1 280 B,程序存储器为 60 KB。与其配套外围电路有时钟电路、复位电路和串口通讯电路,时钟电路晶振的频率为 11.059 2 MHz。单片机的引脚分配如图 2 所示。

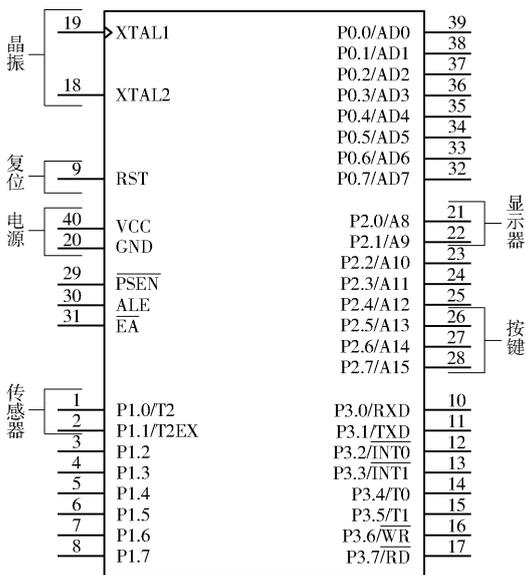


图2 单片机引脚分配图

Fig. 2 Pin assignment diagram of STC12C5A60S2 single-chip micro-computer

1.1.2 光源模块

由于叶绿素 a 和叶绿素 b 在光波长 660 nm 和 460 nm 左右有最大吸收峰。因此采用了两个发光二极管作为光源,并为其配备了恒压驱动电路,使其可以发出光照强度稳定且中心波长为 460、660 nm 的光。发光二极管的最大工作电流为 500 mA,发光强度与电源电压有关。

1.1.3 光传感器

由于待测光信号的中心波长为 460、660 nm,均处于可见光波段。综合考虑成本和精度,采用以 BH1750FVI 数字光照传感器芯片为核心的 GY-30 型数字光照传感器模块检测待测光照强度。该传感器的分辨率为 16 位,响应波段为 300~800 nm,输入电压为 3.3~5 V,满足设计要求。该传感器模块共有 5 个引脚,其中 VCC 和 GND 用于供电;ADDR 为片选端口,低电平有效;SCL 为串行时钟信号线,SDA 为串行数据信号线。SCL 引脚和 SDA 引脚分别连接单片机的 P1.0 和 P1.1 引脚。

1.1.4 电源模块

为降低仪器成本,提高仪器便携性,采用 1604G (6F22) 型 9 V 干电池配合 LM2596S 型 DC-DC 直流可调降压稳压模块给整个仪器供电。降压稳压模块负责将干电池产生的 9 V 左右电压转换为稳定的 5 V 电压,供整个仪器使用。

1.1.5 输入输出模块

考虑到便携性和实用性,检测仪共有 4 个按键,其中包括电源键、测量键、显示数据选择键和数据查询键。其中电源键控制整个系统的供电,测量键控制仪器开始检测叶绿素含量,显示数据选择键用于

选择需要显示的数据,例如光照强度、叶绿素含量。为了同市场上常用的 SPAD 仪的测量结果进行比较,也可以选择显示 SPAD 值。数据查询键用于查询历史测量数据。

输出模块采用 0.96 英寸的 OLED 显示器。该显示器共有 4 个引脚,其中 VCC 和 GND 用于供电,SCL 为串行时钟信号线,SDA 为串行数据信号线,SCL 引脚和 SDA 引脚分别连接单片机的 P2.0 和 P2.1 引脚。显示器与单片机之间采用 I²C 协议通信。

1.1.6 整体结构

检测仪整体结构采用 Creo 软件设计,尺寸为 80 mm × 90 mm × 44 mm,外壳用 3D 打印技术制作,材料为树脂。为减少环境光对检测结果的影响,将壳体内部涂成黑色。检测时,将植物叶片插于仪器检测区域。图 3 为开发的植物叶片叶绿素含量无损检测仪的样机。

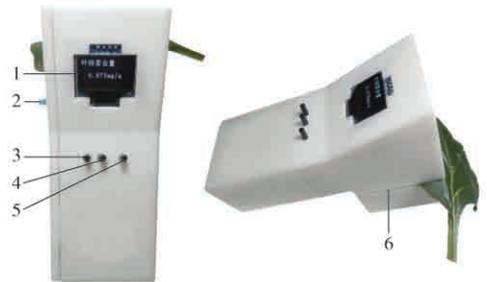


图3 叶绿素含量无损检测仪样机

Fig. 3 Prototype of developed portable nondestructive chlorophyll content detector

1. 显示屏
2. 电源开关
3. 上翻查询按键
4. 下翻查询按键
5. 检测按键
6. 叶片检测区域

1.2 软件设计

检测仪的控制软件在 Keil uVision4 中采用 C51 语言编写。主要包括主函数、按键子函数、光采集子函数、数据处理子函数、显示子函数等部分。主函数主要完成光传感器、显示器等元器件的初始化,并协调其他各个子函数的运行;光采集子函数负责控制 GY-30 型光传感器模块,根据测量得到的光照强度,计算叶片的吸光度;按键子函数负责响应用户的操作;数据处理子函数根据光传感器采集的数据计算出叶片的叶绿素含量和 SPAD 值。显示子函数负责显示采集到的光照强度、计算的叶绿素含量和 SPAD 值。检测仪的控制软件流程如图 4 所示。

2 试验材料与方法

2.1 材料

试验所用的植物叶片样本为菠菜、大青菜和油麦菜。样品采自于杨凌周边的蔬菜园以及西北农林科技大学的园艺农场。为了保证所用样品的叶绿素

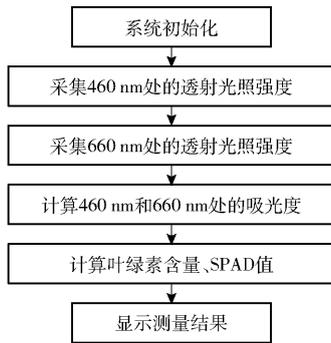


图 4 叶绿素含量检测软件流程图

Fig. 4 Program flow chart of developed software for chlorophyll content detector

含量有一个比较大的范围,避免某一个范围叶绿素含量值比较集中,采摘前先用 SPAD-502 型叶绿素仪测量叶片的 SPAD 值,初步筛选需要的叶片。然后采摘叶片,并密封于自封袋内于 20 min 内带回实验室,用自制的叶绿素含量检测仪测量 460 nm 和 660 nm 处的吸光度,随后进行叶绿素含量的检测。每天随机采集不同地块、不同植物的叶片 10~15 个,共采集样品 70 个。

2.2 试验方法

2.2.1 植物叶片吸光度测量

打开自制的叶绿素含量检测仪的电源,然后按测量键后,读取未放置植物叶片时光传感器的输出光照强度 I_{460} 和 I_{660} 。随后,将植物叶片放于自制的叶绿素含量检测仪的测量区域,接着按测量键,读取此时光透过植物叶片后光传感器的输出光照强度 I_{460} 和 I_{660} 。为了减少叶绿素分布不均对测量结果的影响,测量时避开主叶脉。每个叶片取 4 个不同部位进行测定,4 个部位的平均值作为每个叶片的测量结果。

吸光度计算公式为

$$A_{460} = \lg \frac{I_{460}}{I_{460}} \quad (1)$$

$$A_{660} = \lg \frac{I_{660}}{I_{660}} \quad (2)$$

式中 I_{460} 、 I_{660} ——无植物叶片时 460、660 nm 下的光照强度, lx

I_{460} 、 I_{660} ——透过植物叶片时 460、660 nm 下的光照强度, lx

A_{460} 、 A_{660} ——植物叶片在 460、660 nm 下的吸光度

2.2.2 叶绿素含量测量

在用自制的叶绿素含量检测仪测量完叶片的吸光度后,使用 FA004 型电子分析天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)准确称取 0.2 g 待测叶片放入研钵中,称取 2.5 mL 体积分数为 80% 的丙酮溶

液加入研钵中,取 CaCO_3 约 0.002 g 加入研钵中,并加入适量石英砂。当叶片样品被研磨至匀浆状态时,再量取体积分数 80% 的丙酮溶液 3 mL 加入研钵中,继续研磨,直到叶片组织变为灰白色停止研磨。为了使叶绿素的提取更加充分,将研磨好的样品静置在黑暗处约 5 min。使用快速滤纸过滤并清洗滤渣,直至滤渣变为灰白色,再将滤液定容到 25 mL 的棕色容量瓶中^[27]。测量时,选用厚度为 10 mm 的石英比色皿为样品池,将 UV2310 II 型紫外-可见分光光度计(北京天美(中国)科学仪器有限公司)的波长分别设定为 663 nm 和 645 nm^[28]。将体积分数 80% 的丙酮溶液作为空白对照放置在参比池中,将待测叶绿素溶液放置在样品池中,分别测量叶绿素溶液在 663 nm 和 645 nm 下的吸光度。计算叶绿素的质量浓度^[5]

$$\omega = 20.29A_{645} + 8.05A_{663} \quad (3)$$

式中 A_{645} ——叶绿素溶液在 645 nm 下的吸光度

A_{663} ——叶绿素溶液在 663 nm 下的吸光度

ω ——叶绿素溶液的叶绿素质量浓度, mg/L
换算成叶绿素含量为^[5]

$$C = \frac{\omega V}{m} \quad (4)$$

式中 C ——植物叶片的叶绿素含量, mg/g

m ——材料质量, g V ——提取液总体积, L

3 试验分析与建模

图 5a 是 70 个植物叶片的叶绿素含量与检测仪测得的吸光度之间的关系。由图 5a 可知,吸光度随叶片中叶绿素含量的增加而增大,说明叶片中的叶绿素含量越高,460 nm 和 660 nm 下光的吸收作用越强,吸光度越大。用 Matlab(美国 MathWorks 公司)对植物叶片的叶绿素含量与其在 460 nm 与 660 nm 处吸光度 A_{460} 和 A_{660} 进行多项式拟合,拟合关系式为

$$C = -0.814 + 0.332A_{460} + 0.502A_{660} \quad (R^2 = 0.80) \quad (5)$$

说明植物叶片在 460 nm 和 660 nm 处的吸光度与叶绿素含量间有很好的相关性。对回归方程进行 F 检验, $P = 4.56 \times 10^{-24} < 0.01$,说明回归方程显著有效。对回归方程的 3 个解释变量进行 t 检验, P 值分别为 1.43×10^{-9} 、0.000 3、0.002 3,均远小于 0.01,说明 3 个解释变量都在 99% 的水平下显著,都通过了 t 检验。

根据式(5)编写基于植物叶片的吸光度计算其叶绿素含量的程序,并下载到单片机中,从而可直接给出叶绿素含量的检测结果。

为了同市场上常用的叶绿素仪的检测结果进行比

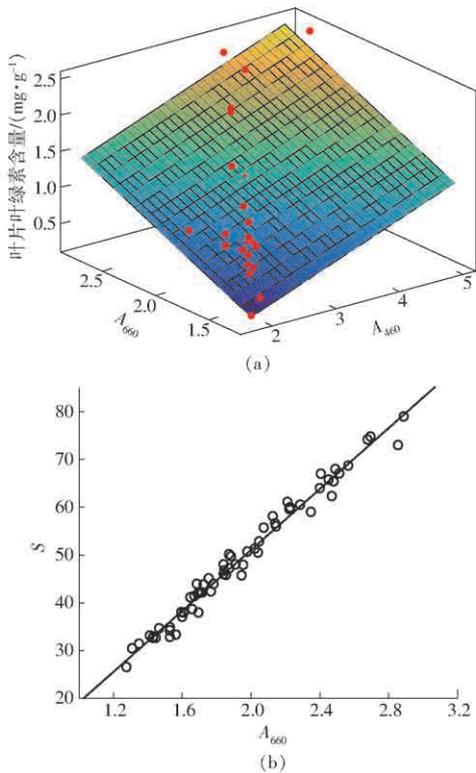


图5 吸光度与叶绿素含量、SPAD 值的关系图

Fig.5 Relationships of light absorbance with chlorophyll content and SPAD values

较,同样对 460 nm 和 660 nm 下的吸光度与 SPAD-502 型叶绿素仪测得的 SPAD 值进行了拟合,拟合关系式为

$$S = -12.8 + 0.437A_{460} + 31.3A_{660} \quad (R^2 = 0.98)$$

(6)

式中 S ——植物叶片 SPAD 值

对回归方程进行 F 检验, $P = 5.9 \times 10^{-56} < 0.01$,说明回归方程显著有效。对回归方程的 3 个参数进行 t 检验, P 值分别为 1.99×10^{-18} 、0.555、 9.77×10^{-38} ,其中 A_{460} 的 t 检验 P 值大于 0.01,未通过 t 检验,因此需要重新建立模型,原因是 460 nm 与 SPAD-502 型叶绿素仪的工作波长差异较大。因此,对 660 nm 下的吸光度与 SPAD-502 型叶绿素仪测得的 SPAD 值进行了回归分析,拟合关系式为

$$S = -12.8 + 31.9A_{660} \quad (R^2 = 0.98) \quad (7)$$

由于解释变量只有 A_{660} ,因此只需要对模型进行 F 检验, $P = 9.27 \times 10^{-61} < 0.01$,说明回归方程显著有效,因此检测仪用式(7)计算 SPAD 值。图 5b 为 A_{660} 与 SPAD 值关系,由图 5b 可知 A_{660} 随 SPAD 值的增大而增大。

4 性能测试与验证

4.1 稳定性测试

4.1.1 光源驱动电路稳定性

供电电压是影响光源稳定性的最重要因素。为

了验证光源驱动电路的稳定性,用直流稳压电源给仪器稳压模块供电,测量光源驱动电路的带载输出电压,驱动电路的输出电压如图 6 所示。当输入电压为 6~10.8 V 时,输出电压的变化范围为 5.04~5.06 V,标准偏差为 0.007 V,变异系数为 0.1%。可见,光源驱动电路稳定性较好,满足设计需求。

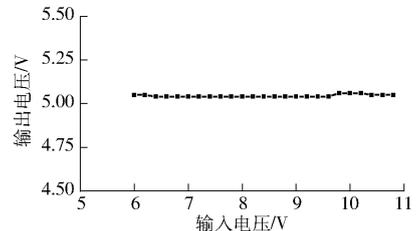


图6 光源驱动电路输入输出电压

Fig.6 Input and output voltages of light source driving circuit

4.1.2 植物叶片吸光度测量结果稳定性

测量位置等其他干扰因素的改变都会影响仪器工作的稳定性,这些因素综合起来影响仪器对植物叶片吸光度测量的稳定性。为了验证设计的仪器对植物叶片吸光度测量的稳定性,取 5 组叶绿素含量不同的叶片,每个叶片测 10 次,测量结果的标准差和变异系数如表 1 所示。由表 1 可见,变异系数的变化范围为 1.5%~6.2%,平均值约为 3.5%。该结果说明,本检测仪测量植物叶片吸光度结果比较稳定。

表1 A_{460} 和 A_{660} 测量的标准差和变异系数Tab.1 Standard deviations and coefficients of variation of A_{460} and A_{660}

测试编号	标准差		变异系数/%	
	A_{460}	A_{660}	A_{460}	A_{660}
1	0.033	0.040	1.5	2.5
2	0.045	0.044	2.2	2.8
3	0.035	0.073	1.9	4.6
4	0.050	0.025	3.9	3.2
5	0.140	0.100	5.9	6.2

4.1.3 叶绿素含量和 SPAD 值测量结果稳定性测试

为了验证仪器对植物叶片叶绿素含量和 SPAD 值测量的稳定性,取 5 组叶绿素含量不同的叶片,每个叶片测 10 次,测量结果的标准差和变异系数如表 2 所示。由表 2 可见,变异系数的变化范围为 2.1%~8.1%,平均值约为 4.7%。可见本检测仪测量得到的植物叶片的叶绿素含量和 SPAD 值较稳定。

4.2 测量精度测试

为了对设计的便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪的性能进行验证,另取 27 组植物叶片,分别

表 2 叶绿素含量和 SPAD 值测量标准差和变异系数

Tab.2 Standard deviations and coefficients of variation of chlorophyll content and SPAD value

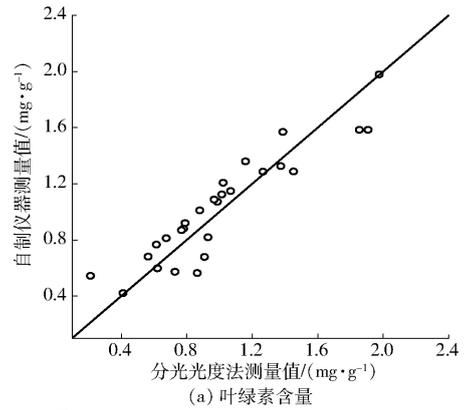
测试 编号	标准差		变异系数/%	
	SPAD	叶绿素含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	SPAD	叶绿素 含量
1	1.3	0.020	3.4	2.7
2	1.4	0.021	3.6	2.7
3	2.3	0.032	6.1	4.2
4	0.8	0.012	6.4	2.1
5	3.2	0.059	8.1	7.4

用自制的仪器测量叶绿素含量,用 SPAD-502 型叶绿素含量检测仪测量 SPAD 值,再按分光光度法测量叶绿素含量的实际值。图 7a 是实测的叶绿素含量与开发的叶绿素含量检测仪测量结果的对比。由图 7a 可知,测量结果均匀地分布在 45° 线的附近。同分光光度法相比,当叶片的叶绿素含量在 $0.21 \sim 1.97 \text{ mg/g}$ 范围内时,设计的叶绿素含量检测仪的绝对测量误差为 $-0.32 \sim 0.20 \text{ mg/g}$,平均绝对误差是 0.14 mg/g 。可见,本仪器对于植物叶片叶绿素含量具有良好的检测精度。

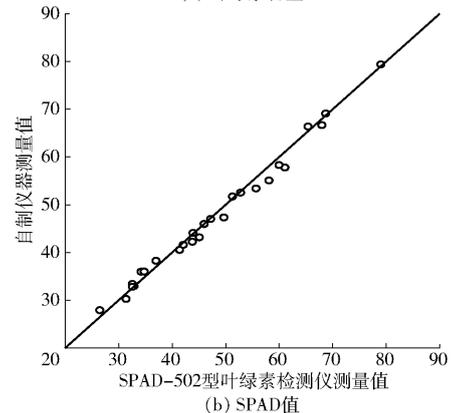
此外,将本仪器的 SPAD 值测量结果与市售的 SPAD-502 型叶绿素含量检测仪的测量结果进行比较,结果如图 7b 所示。同 SPAD-502 型叶绿素检测仪相比,自制检测仪测量叶片 SPAD 值的绝对测量误差为 $-3.3 \sim 1.8$,平均绝对误差为 1.1。同市售的 SPAD-502 型叶绿素含量检测仪相比,本文所开发检测仪的成本很低(硬件成本约 100 元)。此外,该仪器既可以直接输出叶绿素含量,也可以输出 SPAD 值,且响应时间小于 2 s。

5 结论

(1) 基于叶绿素 a 和叶绿素 b 分别在波长 660、460 nm 左右具有光的最大吸收峰的现象,设计了一款便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪。该检测仪的硬件系统由单片机、光源模块、光传感器、电源模



(a) 叶绿素含量



(b) SPAD值

图 7 自制仪器测量的叶绿素含量和 SPAD 值分别同分光光度法和 SPAD-502 型叶绿素仪测量结果的比较

Fig.7 Comparison of measured chlorophyll content and SPAD value by using developed detector with values obtained by spectrophotometry and SPAD-502 chlorophyll meter

块和输入输出模块组成,其软件采用 C51 语言编写。

(2) 植物叶片的叶绿素含量与 460、660 nm 处吸光度之间的关系可用二元一次关系式表达,该关系式的决定系数为 0.80。

(3) 与分光光度法相比,当叶片叶绿素含量在 $0.21 \sim 1.97 \text{ mg/g}$ 时,本检测仪的叶绿素含量测量绝对误差为 $-0.32 \sim 0.20 \text{ mg/g}$,平均绝对误差是 0.14 mg/g 。与 SPAD-502 型叶绿素仪相比,本检测仪的 SPAD 值绝对测量误差为 $-3.3 \sim 1.8$,平均绝对误差为 1.1,且响应时间小于 2 s。

参 考 文 献

- [1] LIMANTARA L, DETTLING M, INDRAWATI R, et al. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables[J]. Procedia Chemistry, 2015, 14: 225 - 231.
- [2] 王伟, 彭彦昆, 马伟, 等. 冬小麦叶绿素含量高光谱检测技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 172 - 177. WANG Wei, PENG Yankun, MA Wei, et al. Prediction of chlorophyll content of winter wheat using leaf-level hyperspectral data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 172 - 177. (in Chinese)
- [3] CROFT H, CHEN J M, LUO X Z, et al. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity[J]. Global Change Biology, 2017, 23(9): 3513 - 3524.
- [4] 郑涛, 刘宁, 孙红, 等. 基于高光谱成像的马铃薯叶片叶绿素分布可视化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 153 - 159, 340. ZHENG Tao, LIU Ning, SUN Hong, et al. Visualization of chlorophyll distribution of potato leaves based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 153 - 159, 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s025&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.025. (in Chinese)

- [5] NY/T 3082—2017 水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定分光光度法[S]. 2017.
- [6] 潘玲玲, 徐晓洁, 谭晶晶, 等. 分光光度法快速测定玉米叶片中的叶绿素[J]. 分析化学, 2007, 35(3): 413–415.
PAN Lingling, XU Xiaojie, TAN Jingjing, et al. Spectrophotometric determination of chlorophyll concentrations in maize leaves [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(3): 413–415. (in Chinese)
- [7] 吉海彦, 王鹏新, 严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 514–516.
JI Haiyan, WANG Pengxin, YAN Tailai. Estimations of chlorophyll and water contents in live leaf of winter wheat with reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3): 514–516. (in Chinese)
- [8] 刘辉, 贺菊萍, 秦杰, 等. 海带中叶绿素的提取及间接测定方法研究[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 178–181.
LIU Hui, HE Juping, QIN Jie, et al. Extraction and indirect measurement of chlorophyll in kelp[J]. Food Science, 2010, 31(18): 178–181. (in Chinese)
- [9] 刘京, 常庆瑞, 刘森, 等. 基于SVR算法的苹果叶片叶绿素含量高光谱反演[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 260–265, 272.
LIU Jing, CHANG Qingrui, LIU Miao, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for apple leaves based on support vector regression algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 260–265, 272. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160834&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.034. (in Chinese)
- [10] YU K Q, ZHAO Y R, ZHU F L, et al. Mapping of chlorophyll and SPAD distribution in pepper leaves during leaf senescence using visible and near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(1): 13–24.
- [11] FENG H, CHEN G, XIONG L, et al. Accurate digitization of the chlorophyll distribution of individual rice leaves using hyperspectral imaging and an integrated image analysis pipeline[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:1238.
- [12] 毛博慧, 孙红, 刘豪杰, 等. 基于正交变换与SPXY样本划分的冬小麦叶绿素诊断[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 160–165.
MAO Bohui, SUN Hong, LIU Haojie, et al. Prediction of winter wheat chlorophyll content based on gram-schmidt and SPXY algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 160–165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s026&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.026. (in Chinese)
- [13] 孙红, 赵毅, 张猛, 等. 玉米拔节期冠层叶绿素含量多光谱图像检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 186–192.
SUN Hong, ZHAO Yi, ZHANG Meng, et al. Multi-spectral image detection for maize canopy's chlorophyll content in jointing stage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 186–192. (in Chinese)
- [14] PAN Wenjuan, WANG Xia, DENG Yongren, et al. Nondestructive and intuitive determination of circadian chlorophyll rhythms in soybean leaves using multispectral imaging[J]. Scientific Reports, 2015, 5:11108.
- [15] ELARAB M, TICLAVILCA A M, TORRES-RUA A F, et al. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 43:32–42.
- [16] HAO H, ZHANG G, ZHENG K. Modeling leaf image, chlorophyll fluorescence, reflectance from spad readings[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 7(11): 4368–4373.
- [17] YADAV S P, IBARAKI Y, GUPTA S D. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2010, 100(2): 183–188.
- [18] AGARWAL A, GUPTA S D. Assessment of spinach seedling health status and chlorophyll content by multivariate data analysis and multiple linear regression of leaf image features[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152:281–289.
- [19] COSTE S, BARALOTO C, LEROY C, et al. Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 chlorophyll meter; a calibration test with thirteen tree species of tropical rainforest in French Guiana[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(6): 607.
- [20] 于渤, 孙明, 韩书庆, 等. 小麦叶绿素、氮素、水分一体化测定仪的开发与测试[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2294–2297.
YU Bo, SUN Ming, HAN Shuqing, et al. Development and test of wheat chlorophyll, nitrogen and water content meter [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2294–2297. (in Chinese)
- [21] KIM T, KIM J I, ONUFRAK M, et al. Nonspectroscopic imaging for quantitative chlorophyll sensing[J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(1): 016008.
- [22] 李友永. 基于色调差的苹果树叶氮含量检测研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
LI Youyong. Detection of nitrogen content in apple leaves based on hue difference [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [23] 胡永光, 陈培培, 赵梦龙. 绿茶杀青叶料含水率可见-近红外光谱检测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 174–179.
HU Yongguang, CHEN Peipei, ZHAO Menglong. Determination of water content in de-enzyming green tea leaves based on visible-near infrared spectroscopy [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 174–179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130829&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.029. (in Chinese)
- [24] 卢东昱, 崔新图, 黄镜荣, 等. 叶绿素吸收光谱的观测[J]. 大学物理, 2006, 25(1): 50–53, 63.
LU Dongyu, CUI Xintu, HUANG Jingrong, et al. Investigation on absorption spectrum of chlorophyll[J]. College Physics, 2006, 25(1): 50–53, 63. (in Chinese)
- [25] 魏混诺, 王雯皓, 史暖暖, 等. 五种观赏草叶绿素a与叶绿素b比值的探讨[J]. 现代园艺, 2017(5): 10.
- [26] LING Q, HUANG W, JARVIS P. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana* [J]. Photosynthesis Research, 2011, 108(1): 89.
- [27] ZHOU X, HUANG W, KONG W, et al. Assessment of leaf carotenoids content with a new carotenoid index: development and validation on experimental and model data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 57:24–35.
- [28] ZHOU X, HUANG W, ZHANG J, et al. A novel combined spectral index for estimating the ratio of carotenoid to chlorophyll content to monitor crop physiological and phenological status[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 76:128–142.