

# 农产品光学参数测量的双积分球系统及其应用

徐志龙<sup>1,2</sup>, 王忠义<sup>1\*</sup>, 黄 岚<sup>1</sup>, 刘志存<sup>1</sup>, 侯瑞锋<sup>1,2</sup>, 王 成<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

**摘 要:** 为了得到农产品生物组织光学参数, 设计了一套双积分球系统实验测量装置。文中描述了其测量原理、系统组成和测量技术, 采用 650 nm 的半导体激光器作为光源, 对 Intralipid 溶液和 Evans Blue 溶液进行了实际测量, 验证了该测量系统的准确性。通过实测, 纯牛奶的散射系数为  $27.719 \pm 0.836$ , 吸收系数为  $0.014 \pm 0.001$ , 各向异性因子  $g = 0.846 \pm 0.002$ 。通过与其它测量方法对照, 相对误差小于 5%, 该装置能够较准确地获得样品的散射与吸收系数, 使之适用于农产品(如果品蔬菜、动物肉、牛奶等)光学参数的测量。

**关键词:** 农产品; 光学参数; 双积分球系统; 逆倍增算法

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)11-0244-06

徐志龙, 王忠义, 黄 岚, 等. 农产品光学参数测量的双积分球系统及其应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 244-249.

Xu Zhilong, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Double-integrating-sphere system for measuring optical properties of farm products and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 244-249. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

利用近红外光谱技术对谷物、水果、肉品等农产品进行定量分析已经十分普遍<sup>[1,2]</sup>, 这种定量方法是基于化学计量学的思想建立化学值与光谱数据间的关系。随着应用和研究的不断深入, 针对其适用性和分析精度, 研究人员进行了一些探索<sup>[3]</sup>, 鉴于农产品是对光具有吸收、散射作用的多组分复杂体系, 目前对其组织内部光传输规律研究不多, 一般是将散射等引起的变化(光学路径变化)归结到光谱形状的变化<sup>[4]</sup>, 由于散射作用将引起模型不稳定和较大的误差。为了进一步提升近红外光谱技术在农产品品质分析领域应用的适用性和准确性, 应从生物组织内部入手来研究光和样品的相互作用, 直接或间接地得到吸收系数  $\mu_a$ 、散射系数  $\mu_s$  和各向异性因子  $g$  等光学参数, 将散射与吸收系数分开, 进而计算出物质含量<sup>[5,6]</sup>。本研究的目的是要设计一套双积分球系统来实现对农产品生物组织光学参数的测量, 解决目前积分球系统造价昂贵、测量操作步骤复杂且采集与计算程序不规范的问题, 设计使用方便、适应于农产品光学参数检测的装置, 为研究光在农产品生物组织中的传输规律打下基础。

## 1 测量系统

### 1.1 测量原理

光在生物组织中的传输过程中包含吸收和散射作

用两个部分, 研究光在生物组织中输运要解决两方面的问题: 1) 描述在光学参数已知条件下, 研究光子在组织内部的输运过程和规律, 例如, 漫射方程及在一定边界条件下的解<sup>[7]</sup>、Monte Carlo 仿真模型<sup>[8]</sup>等; 2) 由测试数据反演出组织的吸收系数、散射系数和各向异性因子等光学参数。为了得到农产品的光学参数, 采用双积分球系统的测量方法<sup>[9-11]</sup>, 其原理是将一片薄片样品(如鲜肉组织)置于两个积分球之间(图 1), 当一束激光入射样品的时候, 同时对两个积分球内所收集的漫反射光和漫透射光进行检测; 此外, 还要同步检测激光传播方向上距离漫透射积分球 60 cm 以外的准直透射光信号, 这样同时得到漫反射率  $R_d$ 、漫透射率  $T_d$  和准直透射率  $T_c$  三个物理量, 进而运用一种光传输模型的逆算法反演出组织的吸收系数  $\mu_a$ 、散射系数  $\mu_s$  和各向异性因子  $g$  等光学参数, 逆倍增(Inverse Adding-Doubling, IAD)算法<sup>[12,13]</sup>是其最常用也是最快速准确的一种算法。

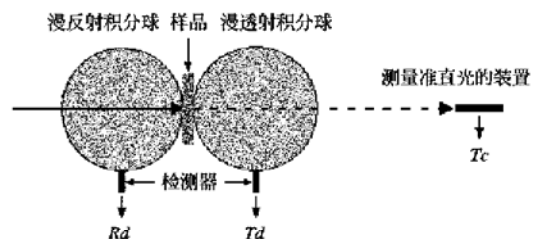


图 1 测量生物组织光学参数的双积分球系统原理示意图

Fig. 1 Diagram of double-integrating-sphere system for measuring optical properties of biological tissue

IAD 算法是 AD 算法(一种正向光传输模型, 称之为倍增模型)的求逆算法, AD 倍增模型的基本思想是: 对于一片已知光学参数的光学薄层  $S_1$  来说, 若它的漫反射率和漫透射率是已知的, 那么对于两倍于它厚度的同样光学性质的另一光学薄层  $S_2$  来说, 其漫反射率和漫透射率就相当于把原来两片相同的光学薄层  $S_1$  并置

收稿日期: 2006-08-10 修订日期: 2006-10-18

基金项目: 科技部“十五”攻关(02EFN216900720)及(2004BA210A03); 中国农业大学信电学院科研基金项目(KY-06)  
作者简介: 徐志龙(1981-), 研究方向农业生物信息检测与处理。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: zhilongxu@126.com

\*通讯作者: 王忠义(1968-), 副教授, 工学博士, 研究方向农业生物信息检测与处理。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: cau\_wzy@vip.sohu.com

在一起进行加倍(Doubling)计算得到的漫反射率和漫透射率,通过这种处理,薄层厚度即可成倍地增加,一直达到所期望的组织厚度为止,同时计算出该组织的总漫反射率和总漫透射率;对于不同光学性质的其他介质层也可以采用同样的方法来处理,然后将几个介质层的漫反射率分量和漫透射率分量进行相加(Adding)计算,这样得到包含若干层结构的总漫反射率和总漫透射率。“玻璃-样品-玻璃”就是这样一个典型的 3 层结构。

IAD 算法主要包含四个步骤: 1) 根据实测的漫反射率、漫透射率和准直透射率来估计一组光学参数,把它们作为迭代初始值; 2) 将这组光学参数代入 AD 算法来计算实测物理量所对应的理论值; 3) 通过实测值和理论值两者之间的比较来确定下一步骤的操作; 4) 如果已经达到设定的精度,那么当前所设定的光学参数就是最后的输出结果; 否则,根据比较结果重新设定一组光学参数,然后重复这个过程,直到输出最后结果或者超出迭代最大步骤为止(图 2)。

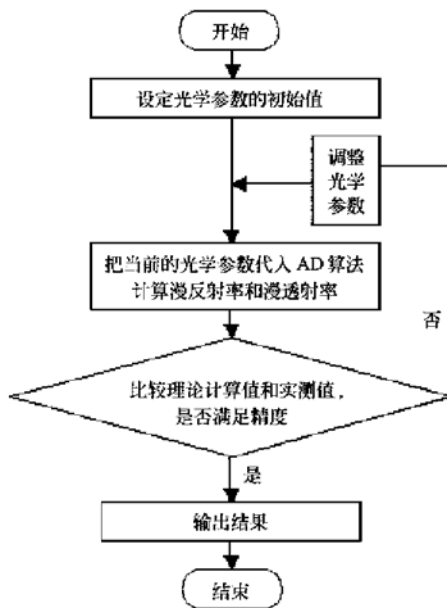


图 2 IAD 算法的基本流程图

Fig. 2 Flow chart of IAD algorithm

## 1.2 系统组成

用于生物组织光学参数测量的双积分球系统最早是由 Pickering 等人<sup>[9,10]</sup>所设计的,为了更加准确地测量各个物理量,提高测量精度,国内有研究者<sup>[11]</sup>将 Pickering 等人的双积分球系统进行了一些有益的改进,主要是增加了对光源的监测。在前人研究基础上,为了满足农产品生物组织的光学参数测量需求,本文对前述的双积分球系统也进行了一些改进(图 3、图 4)。主要改进的地方有如下四个方面: 1) 采用半导体激光器(Laser Diodes, LD)来代替 He-Ne 激光器,使得光源的体积和成本都大幅度地降低; 2) 检测器接口可以根据需要更换各种检测器,也可连至光纤光谱仪来接收全光谱光信号,为将来采用复色光源时同时测量多个波长下的光学参数做好准备; 3) 将整套系统置于密封黑箱中以防

止外界光源对系统的干扰,另外采用了抗噪声设计,简化了系统的检测电路和调试的工作; 4) 将整个系统的测量、光学参数计算和分析集成到一个界面友好的计算机控制软件中(计算机软件著作权登记号: 2005SRBJ2003)。

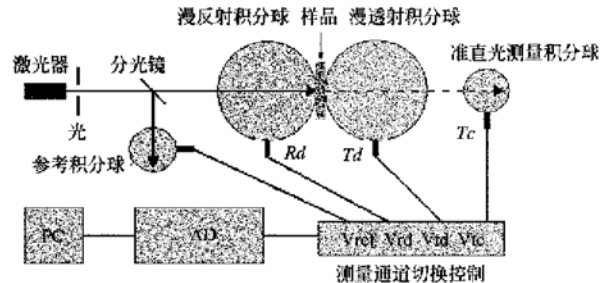


图 3 双积分球系统示意图

Fig. 3 Diagram of double-integrating-sphere system

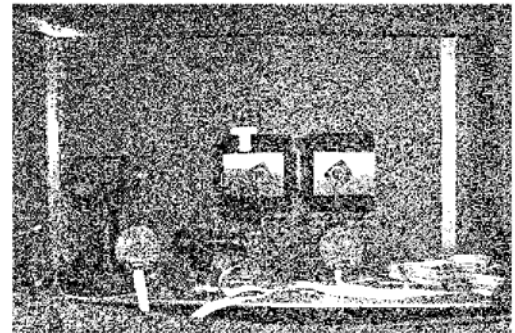


图 4 双积分球系统实物图

Fig. 4 Outline of double-integrating-sphere experimental apparatus

## 1.3 光学参数测量

双积分球系统得到的样品漫反射率  $R_d$ 、漫透射率  $T_d$  和准直透射率  $T_c$  均为相对测量值,即相对于某个基准的测量结果。公式(1)表示了准直透射率  $T_c$  的计算方法

$$T_c = \frac{Vs3 - Vs30}{Vref3 - Vref30} \quad (1)$$

式中  $Vs30 = Vref30$ , 表示光源被挡光板遮挡时准直透射积分球的检测值,见图 5a;  $Vref3$ ——光源直射时的检测值,见图 5b;  $Vs3$ ——光源准直入射样品时的检测值,见图 5d。同理,对于漫反射率  $R_d$  和漫透射率  $T_d$  来说,也有类似的公式

$$R_d = \frac{Vs1 - Vs10}{Vref1 - Vref10} \quad (2)$$

$$T_d = \frac{Vs2 - Vs20}{Vref2 - Vref20} \quad (3)$$

式中  $Vs10, Vs20$ ——光源直射时漫反射积分球和漫透射积分球的检测值,见图 5b;  $Vs1, Vs2$ ——光源准直入射样品时漫反射积分球和漫透射积分球的检测值,见图 5d;  $Vref1, Vref10$ ——漫反射积分球相对于标准漫反射板的基准检测值,见图 6 所示;  $Vref2, Vref20$ ——

漫透射积分球相对于标准漫反射板的基准检测值。

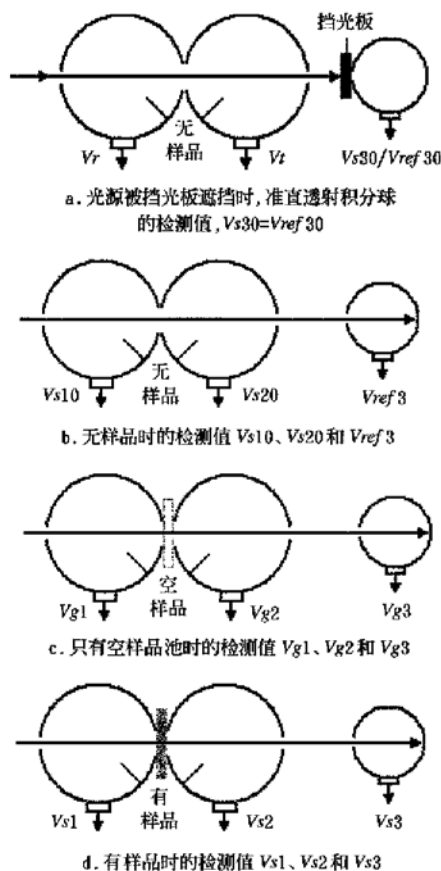


图5 双积分球系统测量步骤

Fig. 5 Process of measurement by using double-integrating-sphere system

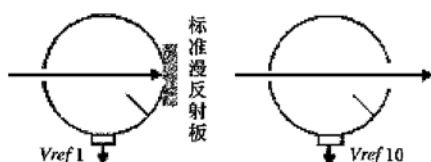


图6 对于标准板的基准测量

Fig. 6 Measurement with or without a reflectance standard

在测量过程中, 激光光源的波动会引起测量误差<sup>[11]</sup>, 所以要对参考光源进行跟踪监测, 并且将其校正到公式(1)~(3)中, 得到

$$Tc = \frac{Vs3/Vs3_{I0} - Vs30/Vs30_{I0}}{Vref3/Vref3_{I0} - Vref30/Vref30_{I0}} \quad (4)$$

$$Rd = \frac{Vs1/Vs1_{I0} - Vs10/Vs10_{I0}}{Vref1/Vref1_{I0} - Vref10/Vref10_{I0}} \quad (5)$$

$$Td = \frac{Vs2/Vs2_{I0} - Vs20/Vs20_{I0}}{Vref2/Vref2_{I0} - Vref20/Vref20_{I0}} \quad (6)$$

式中  $Vs3_{I0}$ 、 $Vs30_{I0}$ 、 $Vref3_{I0}$ 、 $Vref30_{I0}$ ——分别表示在检测  $Vs3$ 、 $Vs30$ 、 $Vref3$ 、 $Vref30$  时所对应的参考光源的监测值; 下标为  $I0$  的变量其含义与前述相同。

半导体激光器光束经过 1 mm 光栏时会发生衍射现象, 衍射光斑在样品池表面发生镜面反射, 反射光照射到漫反射积分球中, 会影响测量结果, 因此需要先将

空样品池进行测量并记录下来(图 5c), 这样在测量样品时, 将此影响消除掉, 以保证正确测试。通过上述分析, 可对公式(5)作进一步校正

$$Rd = \frac{Vs1/Vs1_{I0} - Vg1/Vg1_{I0} - Vs10/Vs10_{I0}}{Vref1/Vref1_{I0} - Vref10/Vref10_{I0}} \quad (7)$$

实验表明, 经过这些校正, 是符合实际情况的, Intralipid-1% 溶液和 Evans blue 溶液的测量结果与文献公布的值相近<sup>[17]</sup>。

## 2 测量结果

### 2.1 材料与方法

采用波长为 650 nm 的半导体激光器作为光源, 激光光束经 1 mm 光栏后输出功率约在 0.5 mW 左右, 分光镜透过率为 85%, 漫反射积分球和漫透射积分球内径为 100 mm, 样品口孔径为 20 mm, 入光口和出光口孔径为 8 mm, 检测器口孔径为 10 mm, 入光口、样品口和出光口圆心在一条直线上, 并且和样品表面垂直。参考光源积分球和准直透射积分球内径为 50 mm, 入光口孔径为 6 mm, 检测器口孔径为 10 mm。标准漫反射板和四个积分球内壁漫反射材料均为聚四氟乙烯悬浮树脂涂料(安徽光机所加工), 在 400~1100 nm 波长范围内其漫反射率稳定在 96% 以上。

Intralipid-10% 溶液(500 mL 封装, 成分为 1000 mL 注射用水中含有注射用大豆油 100 g, 注射用卵磷脂 12 g, 注射用甘油 22 g)和 Intralipid-20% 溶液(100 mL 封装, 成分为 1000 mL 注射用水中含有注射用大豆油 200 g, 注射用卵磷脂 12 g, 注射用甘油 22 g)来自于深圳华瑞制药有限公司, Evans blue 固体粉末(10 g 进口分装)来自于国药集团化学试剂有限公司(上海)。将 Intralipid-10% 溶液和 Intralipid-20% 稀释成 Intralipid-1% 溶液作为强散射物质, Evans blue 溶液是取 515 mg Evans blue 固体粉末加生理盐水至 1000 mL 配制而成, 作为纯吸收物质的母液。

采用伊利(243 mL)袋装全脂灭菌纯牛奶进行测试, 其营养成分标为每 100 g 内含: 脂肪  $\geq 3.2$  g, 蛋白质  $\geq 2.9$  g, 非脂乳固体  $\geq 8.2$  g。

### 2.2 结果与分析

图 7a 是将纯 Intralipid-10% 溶液配制 1%、0.5%、0.33%、0.25%、0.2% 5 个不同浓度时所测得的散射系数, 其斜率即为纯 Intralipid-1% 溶液单位浓度对应的散射系数  $\mu_s = (2.568 \pm 0.085) \text{ mm}^{-1}$ ; 由 Intralipid-20% 配制成的 Intralipid-1% 溶液所测散射系数  $\mu_s = (3.739 \pm 0.061) \text{ mm}^{-1}$ , 尽管都是 Intralipid-1% 溶液, 但是 Intralipid-20% 的原液中油脂与卵磷脂的比例不同于 Intralipid-10% 的原液。表 1 中为其他研究者的测量数据<sup>[9, 14-18]</sup>, 结果间的差异主要是由溶液自身的性质差异和变化引起的<sup>[19]</sup>。卵磷脂分子构成单层膜包裹着油脂分子形成了产生散射的粒子<sup>[15]</sup>, 粒子直径分布在 0.1~1.1  $\mu\text{m}$  之间<sup>[15, 16]</sup>, 于是每瓶 Intralipid 溶液的颗粒尺寸分布也就不会完全一致, 而且溶液还受存放时间、存放环境的影响<sup>[19]</sup>, Intralipid 溶液容易变质, 通常保存

期限较短。每瓶 Intralipid 溶液的颗粒尺寸分布不会完全相同,其光学参数也不可能完全一致<sup>[19]</sup>。本文所使用的 Intralipid-10% 溶液已存放 18 个月,其性质变化较大,样品光学参数受到了存放时间的影响。实验中使用分光光度计 TU-1800SPC 对溶液进行了对比测量,两种方法对于同一样品的测量相对误差在 5% 以内,另外还使用了基于稳态空间分辨的漫反射光谱分析方法<sup>[20]</sup>来测量 Intralipid-1% 溶液,结果与积分球测试数据相一致,表明积分球测试结果可靠。

图 7b 是取 Evans blue 母液按不同配比(100% (母液)、50%、33%、25%、20%)形成的 5 个不同浓度时所测得的吸收系数,其斜率即为纯 Evans blue 溶液单位浓度对应的吸收系数  $\mu_a = (1.389 \pm 0.034) \text{ mm}^{-1}$ ;取纯 Evans blue 母液和纯 Intralipid-1% 溶液按如下配比 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5 的 5 个不同浓度混合溶液,测得其散射系数和吸收系数,理论上其值可分别由图 7a 和图 7b 回归直线计算出来。图 7c 所示的是对混

合液散射系数实测值和理论值的比较结果,  $x$  轴 是不同配比下纯 Intralipid 溶液的散射系数理论值,  $y$  轴是混合液散射系数实测值,图中显示实测值和理论值吻合较好(标准差  $\sigma = 0.14$ ),图 7d 所示的是吸收系数实测值和理论值比较结果(标准差  $\sigma = 0.026$ )。

表 1 不同研究者的 Intralipid-1% 溶液的散射系数  
Table 1 Scattering coefficients of Intralipid-1% from different research groups

波长/nm	$\mu_s/\text{mm}^{-1}$	文献
632.8	$5.61 \pm 0.28$	[9]
632.8	$3.4 \pm 0.30$	[14]
632.8	$4.76 \pm 0.09$	[15]
632.8	$3.86 \pm 0.04$	[16]
650.0	$3.78 \pm 0.07$	[17]
650.0	$2.568 \pm 0.085$	本研究
650.0	$3.739 \pm 0.061$	本研究
780.0	2.9(未给标准差)	[18]

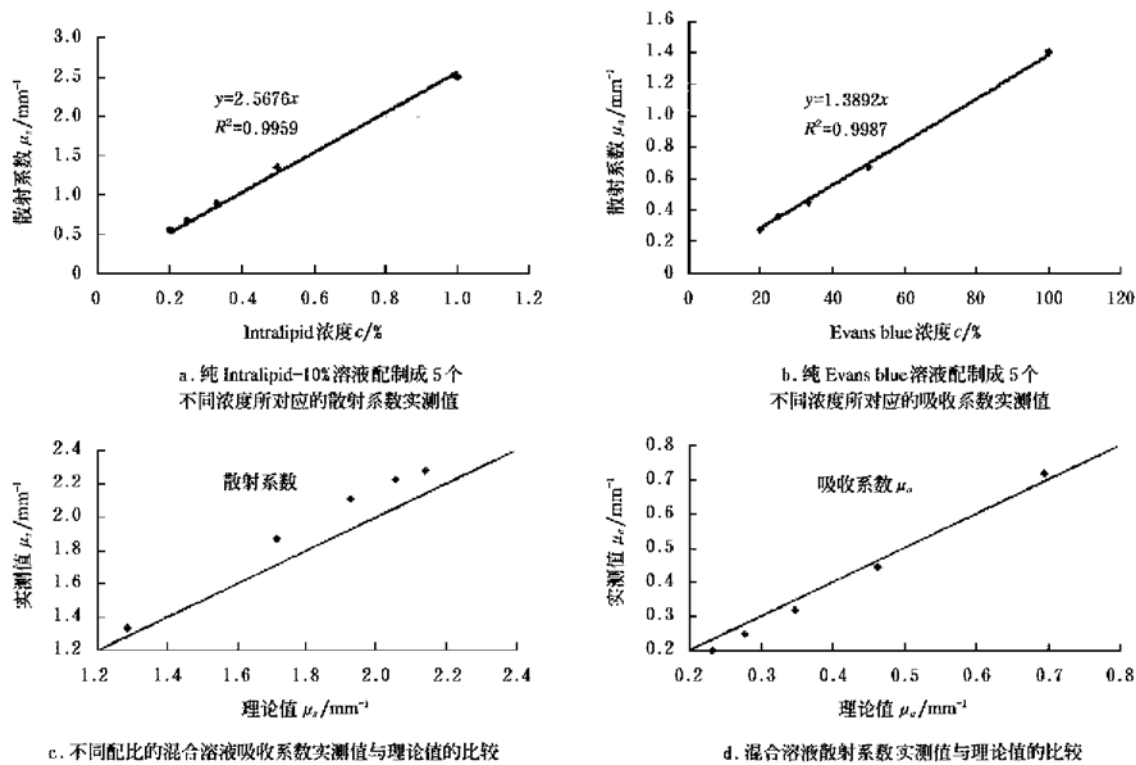


图 7 液体模型光学参数的测量结果

Fig. 7 Measured values of the optical parameters on phantoms sample

通过对两种纯溶液及其混合溶液的测量,结果显示,实验系统所测的数据是合理的。

在验证了系统准确性的基础上,对纯牛奶进行了实测,测量结果见表 2。

牛奶的散射系数差异最主要在于脂肪含量和非脂乳固体的多少<sup>[22]</sup>,牛奶中的脂肪球和酪蛋白胶束对于光散射的影响较大,在牛奶的脂肪球表面附着乳清蛋白和酪蛋白。牛奶经过不同的处理其脂肪球粒径会发生变化<sup>[23]</sup>,而牛奶对于可见光的吸收能力较弱且不同的

表 2 牛奶光学参数

Table 2 Optical properties of pure milk

$\mu_a/\text{mm}^{-1}$	$\mu_s/\text{mm}^{-1}$	$g$	波长/nm	来源
0.05	40	0.7	632.8	[21]
0.079	28.1	0.73	632.8	[22]
$0.014 \pm 0.001$	$27.719 \pm 0.836$	$0.846 \pm 0.002$	650.0	本研究

波长吸收有差异<sup>[24]</sup>,测量结果与其他研究者所提供数据的差异则是由于样品本身的差异及变化所致。通过对

纯牛奶的实际测量,进一步验证了系统的可用性。

### 3 结 论

在国内外研究者的基础上改进了用于农产品生物组织光学参数测量的双积分球系统,通过与其他测量方法对照,相对误差小于 5%,能够较准确地获得样品的散射与吸收系数,使之适用于农产品(如果蔬、畜禽肉等切片组织、叶片、牛奶等)生物组织的光学参数测量。该装置为测量农产品生物组织的光学参数提供了条件,进而为在食品安全中的应用奠定了基础。

#### [参 考 文 献]

- [1] 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [2] Cozzolino D, Murray I. Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2004, 37(4): 447– 452.
- [3] Blanco M, Coello J, Iturriaga H, et al. Calibration in non-linear near infrared reflectance spectroscopy: a comparison of several methods [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 384(2): 204– 207.
- [4] Kenichi Isobe, Takashi Kusaka. Changes in cerebral hemoglobin concentration and oxygen saturation immediately after birth in the human neonate using full-spectrum near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2000, 5(3): 283– 286.
- [5] 侯瑞锋, 黄 岚, 王忠义, 等. 农产品组织中光输运规律的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 12– 19.
- [6] 徐志龙, 王忠义, 黄 岚, 等. 农产品生物组织的光学参数测量方法研究[J]. *激光杂志*, 2005, 26(6): 87– 89.
- [7] Akira Ishimaru. Wave propagation and scattering in random media[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [8] Wang L, Jacques S L, Zheng L Q. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, 47, 131– 146.
- [9] Pickering J M, Prah S A, Wieringen N V, et al. Double-integrating-sphere system for measuring the optical properties of tissue[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(4): 399– 410.
- [10] Pickering J M, Moes C J M, Sterenborg H J C M, et al. Two integrating spheres with an intervening scattering sample[J]. *J Opt Soc Am A*, 1992, 9(4): 621– 631.
- [11] 朱 丹, 骆清铭, 曾绍群, 等. 用于组织光学特性参量测量的改进型双积分球系统[J]. *光子学报*, 2001, 30(10): 1175– 1181.
- [12] Prah S A. Optical property measurements using the inverse adding-doubling Program, Oregon medical laser center[EB/OL]. 1999. 1, <http://omlc.ogi.edu>.
- [13] Prah S A, Gemert M J C V, Welch A J. Determining the optical properties of turbid media using the adding-doubling method[EB/OL]. Oregon Medical Laser Center. 1996. 12, <http://omlc.ogi.edu>.
- [14] Flock S T, Jacques S L, Wilson B C, et al. Optical properties of Intralipid: a phantom medium for light propagation studies[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1992, 12(5): 510– 519.
- [15] Staveren H J V, Moes C J M, Marle J V, et al. Light scattering in Intralipid-10 % in the wavelength range of 400– 1100 nm[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(31): 4507– 4514.
- [16] Moes C J M, Gemert M J C V, Star W M, et al. Measurements and calculations of the energy fluence rate in a scattering and absorbing phantom at 633nm [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(12): 2292– 2296.
- [17] 许 棠, 张春平, 王新宇, 等. 650nm 光在 Intralipid-10% 中分布的测量和分析[J]. *光散射学报*, 2003, 15(2): 115– 120.
- [18] 王 峰. 近红外无损检测组织氧含量技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [19] 赵 军, 丁海曙, 赵忠耀, 等. 生物组织光学参数的校准模型及测量[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(4): 496– 500.
- [20] Farrell T J, Patterson M S, Wilson B C. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vitro[J]. *Med Phys*, 1992, 19(4): 879– 888.
- [21] Wilson Brian C, Jacques Steven L. Optical reflectance and transmittance of tissues: Principles and application [J]. *Quantum Electronics*, 1990, 26(12): 2186– 2199.
- [22] 韩永辉, 徐可欣, 贺忠海, 等. 牛奶光学特性参数的单积分球法测量[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(9): 1079– 1082.
- [23] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.
- [24] 郭本恒. 乳品化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.

## Double-integrating-sphere system for measuring optical properties of farm products and its application

Xu ZhiLong<sup>1,2</sup>, Wang Zhongyi<sup>1\*</sup>, Huang Lan<sup>1</sup>, Liu Zhicun<sup>1</sup>, Hou Ruifeng<sup>1,2</sup>, Wang Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to obtain optical properties of farm products, the double-integrating-sphere system was designed. The principle of measurement and configuration of system was described. The mixed solution of Intralipid and Evans Blue was detected to verify the veracity of the system by using a diode laser at 650 nm. Corresponding values of the optical properties for scattering coefficient  $\mu_s$ , absorption coefficient  $\mu_a$ , anisotropy coefficient  $g$  measured on pure milk sample were  $27.719 \pm 0.836$ ,  $0.014 \pm 0.001$ ,  $0.846 \pm 0.002$ , respectively. The authors compared the values of optical parameters based on the double-integrating-sphere system with other measuring methods and obtained a  $< 5\%$  relative deviation. It is concluded that the method for determining the optical properties in agriculture products (vegetables, leaf, tissue of animals, milk etc.) based on double-integrating-sphere system is feasible.

**Key words:** farm products; optical properties; double-integrating-sphere system; inverse adding-doubling algorithm