

苹果组织中光传输的漫射近似方程的推导与验证

战 钱¹, 唐春晓¹, 李恩邦^{1,2*}, 王世军³, 李鸿强¹

(1.天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. School of Physics, Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522; 3.国家农产品保鲜工程中心, 天津 300384)

摘要: **目的** 研究光在苹果组织中的漫反射规律, 推导出漫射近似方程并通过实验进行验证。 **方法** 在理论推导方面, 采用漫射近似理论得到漫射近似方程, 利用外延边界条件对漫射近似方程进行求解, 得到漫反射率; 在实验验证方面, 采用积分球实验测量得到不同糖度苹果样品的漫反射率和光学参数。 **结果** 利用外延边界条件求解漫反射率, 不但计算过程简便, 而且和实验测得的漫反射率相差很小, 二者的最大绝对误差为 0.00801, 最大的相对误差为 9.35%。 **结论** 利用漫射近似方程求解漫反射率或反演求其光学参数都是可行的。这一方程为水果内部品质的无损检测提供了理论基础。

关键词: 组织光学; 漫射近似; 光学参数; 积分球; 蒙特卡罗

Derivation and validation of the optical transmission diffusion approximation equation in apple tissue

ZHAN Qian¹, TANG Chun-Xiao¹, LI En-Bang^{1,2*}, WANG Shi-Jun³, LI Hong-Qiang¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. School of Physics, Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia; 3. National Engineering Center for Preservation of Agriculture Products, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: Objective To study the optical diffuse regular in apple samples, diffusion approximation equation was obtained and validated by experiment. **Methods** In terms of theoretical derivation, diffusion approximation equation was derived from the diffusion approximation theory, extension of the boundary condition was applied to solve diffusion approximation equation and obtain diffuse reflectance; in term of experimental verification, diffuse reflectance and optical parameters were measured by integrating sphere experiment under the different brix of apple samples. **Results** Epitaxial boundary condition was used for solving the diffuse reflectance, and the results showed it was not only calculated simply, but also had small difference compared to the experimental results. The absolute maximum error was 0.00801, the maximum relative error was 9.35%. **Conclusion** It is feasible to solve diffuse reflectance or seek inversion optical parameters by using the diffusion approximation equation in the apple tissue. The diffusion approximation equation provides theoretical foundation to realize the nondestructive detection of apple brix.

KEY WORDS: tissue optics; diffusion approximation; optical parameters; integrating sphere; Monte Carlo

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271871, 61177078)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20120609)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20101201120001)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31271871, 61177078), the Tianjin City High School Science and Technology Fund Planning Project (20120609) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20101201120001)

*通讯作者: 李恩邦, 教授, 主要研究方向为光纤光学与光纤传感、激光测试、光通信技术与器件的研究及产品开发。E-mail: Enbang@tju.edu.cn

*Corresponding author: LI En-Bang, Professor, Tianjin Polytechnic University & Electronics and Information Engineering, No.399, Binshuixi Road, Xiqing District, Tianjin 300387, China. E-mail: Enbang@tju.edu.cn

1 引言

中国是水果生产大国,水果产量逐年递增,且稳居世界首位。近年来,水果产量在世界总产量中所占的比例在20%左右^[1]。但是,在我国水果产量迅速增长的同时,因为采后处理、分级技术落后、规格不统一等,造成了我国水果在国际市场上的竞争状况并没有得到相应的改善^[2]。在国内市场上,随着生活水平的提高,消费者购买水果的关注点已经从外观品质转移到内部品质中。研究水果的内部品质无损检测已成为国内外研究的一个热点问题。无损检测技术是在不破坏样品条件下对其进行品质评价的方法^[3]。国内已经展开水果内部品质的无损检测研究,刘木华等^[4]对采集到的不同波长的光谱图像灰度分布进行洛伦茨分布拟合函数。杨健^[5]通过一定的光谱通道组合,将光谱反射率同牧草的生物量建立多元回归方程,有效地对牧草品质进行了检测。孙炳新^[6]等建立苹果有效酸度模型性能较为稳定,满足实际应用的要求。王加华^[7]研究苹果糖分含量近红外模型受温度变化的影响。Lu^[8]建立了5个光学滤波器组成的多光谱图像检测苹果内部品质的方法。丁永军^[9]等利用多光谱图像技术对番茄的营养素进行检测。崔丰娟^[10]应用近红外检测苹果糖度,分析运动速度对模型适用性的影响。

在上述现有的研究中,大多数研究者直接利用近红外光谱或多光谱图像对水果品质进行检测,并没有讨论光在水果内部传输特性。面对这一现象的缺失,本文通过理论对光在水果内部的传输方程进行推导,并且通过实验对其验证。漫反射率是光与样品发生作用后在样品表面单位面积上漫反射出光的概率,漫反射光就会形成漫反射图像,首先需要研究光在样品中的传输漫反射率。本文从光在样品中的传输特性出发,研究在漫射近似理论下,对辐射传输方程进行简化得到漫射近似方程,求解漫反射率,从而对光在苹果样品中的传输途径和光场分布研究提供了很好的帮助。

2 材料与方法

2.1 漫射近似方程推导

光在生物组织中传播时经历多次随机散射,对于多次散射问题,历史上曾经提出过两种不同的理论^[11]来解释,即解析理论和辐射传输理论。解析理论

是从Maxwell方程出发,考虑粒子的散射和吸收特性,求出某些统计量的微分方程和积分方程。解析理论的推导非常复杂,限制了其使用范围。辐射传输理论广泛用于处理光子与组织的相互作用研究,是研究光进入组织时的光能传输问题,该输运理论不是在波动方程基础上的解析理论,而是借鉴已有的中子输运理论^[12]。辐射传输理论没有解析理论在数学上的严谨性,但辐射传输理论直接处理随机散射组织中传输能量,解决很多实际问题,因此应用范围广泛,研究过程比较直观。

但是,辐射传输理论的解还是十分复杂,Cheong等^[13]根据生物组织是一种高散射随机介质对其做了一系列简化,得到光在生物组织内部传输过程中稳态辐射传输漫射方程:

$$D\nabla^2\Phi(\vec{r})-\mu_a\Phi(\vec{r})=S(\vec{r})+S_{r_i}(\vec{s}) \quad (1)$$

其中 $\Phi(\vec{r})$ 为组织在 \vec{r} 方向的光能流率, μ_a 为吸收系数, $S(\vec{r})$ 为点光源在 \vec{r} 方向上总辐射强度变化率, $S_{r_i}(\vec{s})$ 为已知点光源在 \vec{s} 方向上总辐射强度变化率, D 为漫射系数,在漫射理论中其有两种定义,分别是^[14]:

$$D_1 = \frac{1}{3(\mu_a + \mu_s)} \quad (2)$$

$$D_2 = \frac{1}{3\mu_s} \quad (3)$$

如果想得到漫射方程的解(即漫反射率),需要知道漫射方程中各个参数。这些参数依据所采用的边界条件的不同而有所差别,目前这一研究领域内常用的边界条件主要有三种:零边界条件(ZBC)、外延边界条件(EBBC)和分流边界条件(PCBC)^[15]。

(1) 零边界条件(ZBC):假设所有入射到组织表面上的光子在组织内一个平均自由程MEP处开始发生第一次散射事件,这时光的平均漫射强度 $\Phi(r, t)=0$ 。

所以零边界条件下解得漫射近似方程的解为:

$$R(\rho) = \frac{1}{2\pi} \left[z_0 \left(\mu_e + \frac{1}{r_1} \right) \frac{\exp(-\mu_e r_1)}{r_1^2} \right] \quad (4)$$

因为组织边界上的平均漫射强度不可能为零,零边界只有在精度要求不高情况下使用。

(2) 外延边界条件(EBBC):假设光的平均强度 $\Phi(r, t)$ 在边界上不为零,而在组织外的平均漫射强度为零。因此,在外延边界条件下解得漫射近似方程的解为:

$$R(\rho) = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{z_0 \left(\mu_{eff} + \frac{1}{r_1} \right) \frac{\exp(-\mu_{eff} r_1)}{r_1^2} + \left(z_0 + 2z_b \right) \left(\mu_{eff} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{\exp(-\mu_{eff} r_2)}{r_2^2} \right] \quad (5)$$

外延边界条件得到的精度很高, 和实际情况相差不大, 而且计算过程又不太复杂。一般情况下都使用外延边界条件来求解漫反射率。

(3)分流边界条件(PCBC): 当组织与其周围介质的折射率不匹配时, 假设边界面上内的辐射强度等于由组织内部光子入射到边界被反射回的部分辐射强度。

$$R(\rho) = \frac{0.170}{4\pi D} \left\{ \frac{\exp\left\{-\mu_e \sqrt{(z-z_0)^2 + \rho^2}\right\}}{\sqrt{(z-z_0)^2 + \rho^2}} + \frac{\exp\left\{-\mu_e \sqrt{(z+z_0)^2 + \rho^2}\right\}}{\sqrt{(z+z_0)^2 + \rho^2}} \right\} \quad (6)$$

$$- \frac{0.340}{4\pi D z_b} \int_0^\infty dl \exp\left\{-\mu_e \sqrt{(z+z_0+l)^2 + \rho^2}\right\} \frac{1}{\sqrt{(z+z_0+l)^2 + \rho^2}}$$

从式 6 也可以看出分流边界条件的解法过于复杂, 而且得到漫反射率的精度和外延边界条件得到漫反射率的精度相差不大, 所以没有得到推广。

公式 (4)(5)(6) 中: $z_0 = \frac{1}{\mu_s}$, $\mu_{eff} = \sqrt{3\mu_a\mu_s}$,

$r_1 = \sqrt{z_0 + \rho}$, $z_b = \frac{2(1+R_{eff})}{3\mu_s(1-R_{eff})}$, $r_2 = \sqrt{(z_0+z_b)^2 + \rho}$ 。当

$n=1.38$, $R_{eff}=0.493$, $\rho = 10 \text{ mm}$ 。 ρ 为组织表面上漫射光点到光入射点的垂直距离, R_{eff} 为组织内表面的有效反射系数, z_0 为光子传输的平均自由程, μ_{eff} 为有效衰减系数, z_b 为介质表面外的光子传输的平均自由程^[15]。

经过文献^[16]证明和上述各边界条件得出的结果可以看出, 用零边界条件下的方程求解时, 所计算得到的结果误差很大, 与事实不符, 同时也不符合漫射近似假设, 无实际意义; 用分流边界条件的方程求解

需要进行实质积分, 计算起来比较复杂; 利用外延边界条件方程求解时, 计算得到的结果误差比较小, 本文选择外延边界条件求解漫反射率作为理论结果。

2.2 水果样品光学参数测量

从上面的公式可以看出, 漫射近似方程的解依赖确切的组织光学参数, 光学参数的正确测量成为关键。积分球法测量组织光学参数是目前国内外研究学者普遍采用的方法。实验原理图如图 1 所示, 半导体激光器(波长 850 nm)发出的光经过衰减器衰减, 再经过凸透镜聚焦垂直进入积分球, 光电探测器将探测到的光信号送入光电转换器, 光电转换器将光信号转化为电信号输出, 通过在积分球不同位置放置样品得到同一样品下不同测量值, 再通过逆蒙特卡罗得到光学特性参数。图 2 为积分球测量的三种位置关系, 积分球与同一样品的不同位置测量得到漫反射率、漫透射率以及准直透射率, 通过逆蒙特卡罗法得到样品的光学参数。

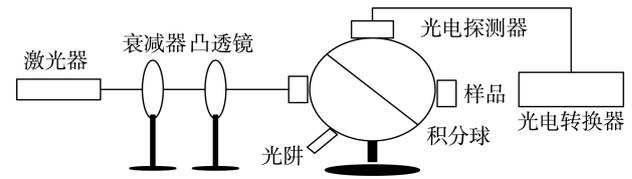


图 1 光学特性参数的单积分球测量系统

Fig. 1 Single integrating measuring system of the optical parameters

$$\text{漫反射率 } R_d = \frac{I_{rs}}{I_{rr}} R_{dr} \quad (7)$$

$$\text{漫透射率 } T_d = \frac{I_{ts}}{I_{tr}} T_{dr} \quad (8)$$

$$\text{准直透射率 } T_c = \frac{I_{cs}}{I_{cr}} T_{cr} \quad (9)$$

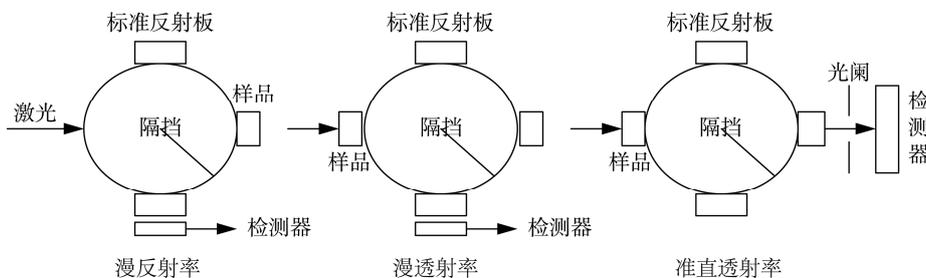


图 2 三种参量测量示意图

Fig. 2 Three kinds of parameters measurement schematic

公式(7)、(8)、(9)中 I_{rs} 、 I_{ts} 、 I_{cs} 为漫反射、漫透射、准直透射情况下光照射到样品检测器接收到的能量值; I_{rr} 、 I_{tr} 、 I_{cr} 为用标准反射板替代样品进行漫反射、漫透射、准直透射测量得到的能量值; R_{dr} 、 T_{dr} 、 I_{cr} 为标准反射板的漫反射率、漫透射率、准直透射率。对同一样品先后进行积分球漫反射、漫透射、准直透射实验可以得到一组 (R_d, T_d, T_s) , 再利用逆蒙特卡罗方法就可以求出样品光学参数。

蒙特卡罗方法是一种统计随机抽样的方法, 通过大量采样的随机抽样来仿真一种过程, 最终获得一定的统计规律。光子在生物组织内部的传播是一个随机迁移过程, 因而可以通过产生一个均匀随机数来模拟产生一个与光子传播行为相似的事件, 然后通过观察模拟过程或抽样试验计算出所求参数统计特性。实质上蒙特卡罗模拟就是用计算机模拟跟踪入射光每一份能量在生物组织中的吸收和散射过程, 光子在每一个随机位置会发生散射和吸收作用, 这由光子的权重来决定, 重复以上行走直到满足某种终止条件而使光子消亡, 通过对大量光子的追踪得到光子在组织中传输行为的统计结果^[17]。

逆蒙特卡罗的原理: 先给出一组预估的 (μ_a, μ_s) 进行蒙特卡罗模拟, 得到一组 (R_d, T_d, T_s) 。给定误差范围, 如果计算得到的 (R_d, T_d, T_s) 不在给定的误差范围之内, 则重新选择 (μ_a, μ_s) 继续计算, 直到计算和测量得到的 (R_d, T_d, T_s) 在误差范围之内为止。因此初始选择的 (μ_a, μ_s) 很重要, 它直接影响到计算能否收敛及收敛速度。

基于 Monte Carlo 统计模拟的思想, Wang LH 博士用 C++ 编写了 Monte Carlo 模拟程序, 模拟程序过

程如下: 建立组织光学模型, 在组织光学模型里可以设置吸收系数、散射系数、平均散射余弦和光子数等光学参数; 把组织光学模型文件输入到 Mcml.exe 程序并运行; 把 Mcml.exe 程序输出的 1.mco 文件添加到 Conv.exe 程序并运行 Conv.exe 程序, 这样就可以模拟获得光在生物组织中的漫反射率和透射率^[18]。如果模拟得到的漫反射率和透射率在给定误差范围之内, 我们就认为组织光学模型中设置的光学参数是正确的, 否则修改组织光学模型中的光学参数, 继续上述的步骤执行程序直到模拟和测量得到的漫反射率和透射率在误差范围之内为止, 通过反复地运行 Monte Carlo 模拟程序就可以求出全部样品光学参数。

各个苹果样品的吸收系数和散射系数是不一样的, 这种差别是由苹果的营养成分不同引起的。所有营养成分中糖份的含量对吸收系数和散射系数影响最大。苹果样本选取市面上成熟的山东红富士苹果作为研究对象, 将苹果进行榨汁离心处理, 用吸管吸取少量苹果汁放在带有编号比色皿中, 用手持糖度计进行标准法求糖度, 将剩余的苹果汁中加入 5 mL 的蒸馏水稀释样品, 用标准法测量糖度, 重复上述步骤, 实验对 8 个苹果进行榨汁, 每个苹果各稀释 20 次, 共取得 160 组样品, 由于篇幅有限, 这里只列举具有代表性的糖度值。

3 结果与分析

3.1 光学参数测量结果与分析

用不同糖度的苹果汁进行积分球实验得到了其光学参数, 单积分球测量实验得到了不同糖度苹果组织的光学参数结果见表 1。

表 1 不同糖度下的吸收系数、散射系数
Table 1 Absorption and scattering coefficients of the different sugar content

SC	R_d	T_d	T_c	吸收系数	散射系数
13%	0.07768	0.06361	0.84946	0.492	0.763
12%	0.07928	0.06400	0.85872	0.4914	0.7779
11.2%	0.08004	0.06479	0.86654	0.49102	0.788
10.3%	0.08153	0.06597	0.87545	0.49038	0.8011
9.8%	0.08194	0.06479	0.88061	0.4901	0.8072
8.9%	0.08287	0.06558	0.88994	0.48957	0.8205
7.5%	0.08462	0.06617	0.90508	0.4886	0.8411
6.8%	0.08572	0.06558	0.91304	0.48828	0.8496

将苹果糖度为 13% 在 850 nm 波长处的光学特性参数与其他文献^[19,20]对比, 结果见表 2。从表 2 中看出, 单积分球测量系统得到的光学特性参数和其他文献不同, 分析原因: 一是所选的激光器波长不同; 二是苹果样品的种类、产地不同导致了糖度含量不同, 从而光学特性参数不同。总之, 由于光学特性的复杂性以及对微弱信号检测的困难, 不同文献中所报道的结果均存在着一定的差异, 但这种差异相差不大, 所以不同文献光学参数的差异是合理的。

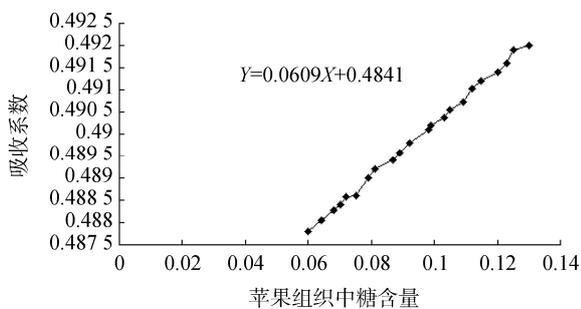
表 2 不同文献中苹果样品的光学特性参数
Table 2 The optical parameters of apples sample in different literatures

	μ_a	μ_s
文献 1 ^[19] (632.8 nm)	0.5544	0.8500
文献 2 ^[20] (750.0 nm)	0.86	0.94
本文(850 nm)	0.492	0.763

用积分球实验结果来分别绘制吸收系数、散射系数与糖度含量的关系曲线如图 3 所示。从苹果组织内部糖份含量与吸收系数、散射系数的关系曲线可以得到以下结论: 糖份含量与吸收系数、散射系数都成线性关系, 吸收系数与苹果组织中糖含量的相关系数 $R=0.998$, 散射系数与苹果组织中糖含量的相关系数 $R=0.9996$, 糖份含量与光学特性参数的线性关系可以应用在以后的研究中。

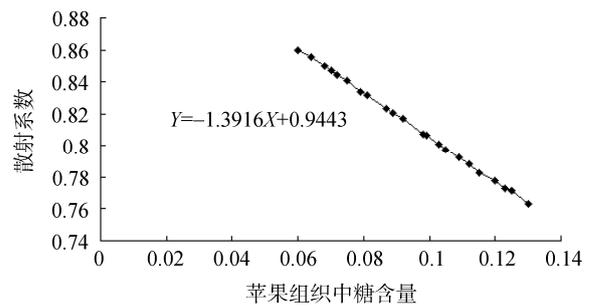
3.2 理论与实验的对比结果与分析

通过实验测出 8 组不同糖度苹果的光学参数之后, 本文将 8 组光学参数代入公式(5)求解漫反射率, 把利用漫射近似方程得到的漫反射率和积分球实验得到的漫反射率进行对比分析, 具体数据见表 3。



a 吸收系数与糖分含量的关系

a Relationship between the absorption coefficient and the sugar content



b 散射系数与糖分含量的关系

b Relationship between the scattering coefficient and the sugar content

图 3 光学参数与糖分含量的关系

Fig. 3 Relationship between the optical parameters and the sugar content

表 3 漫射近似理论与实验的误差结果
Table 3 The error results between the diffusion approximation theoretical and experiment value

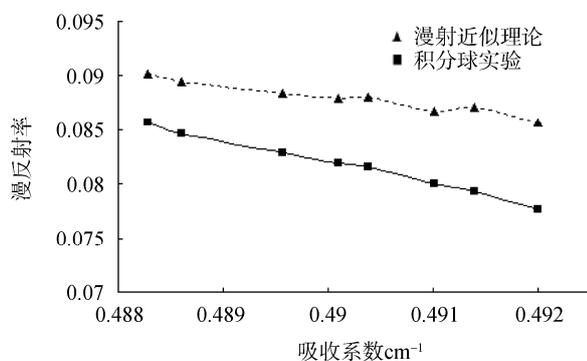
糖度	漫射理论值	实验值	绝对误差	相对误差
13%	0.08569	0.07768	0.00801	9.35%
12%	0.08713	0.07928	0.00785	9.01%
11.2%	0.08671	0.08004	0.00667	7.69%
10.3%	0.08809	0.08153	0.00656	7.45%
9.8%	0.08790	0.08194	0.00596	6.78%
8.9%	0.08835	0.08287	0.00548	6.20%
7.5%	0.08951	0.08462	0.00489	5.46%
6.8%	0.09017	0.08572	0.00445	4.94%

表 3 的结果说明, 漫射近似理论结果与积分球结果的最大绝对误差为 0.00801, 最大相对误差为 9.35%, 两者有很好的吻合性。产生误差的原因可能是实验过程中读数的准确率、入射光会发生镜面发射影响到漫反射光; 漫射近似理论方程本身就是近似的, 会产生一定的误差。积分球法是当今被广泛应用于测量各种生物组织的反射率和透射率的一个非常有效的方法, 用积分球的实验数据验证漫射近似方程的可行性。

根据表 3 绘制了苹果组织的吸收系数和散射系数下的积分球实验得到的漫反射率和通过漫射近似理论得到的漫反射率的关系曲线, 如图 4 所示。

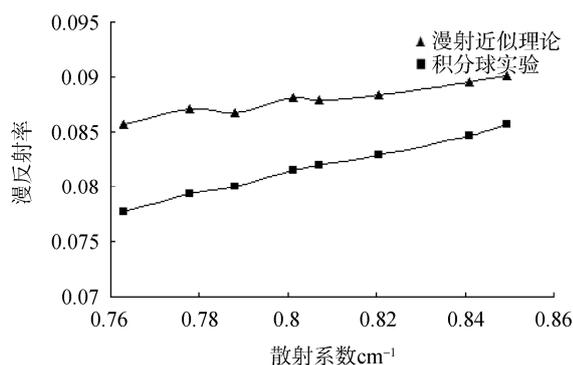
从图 4 可以看出, 利用漫射近似方程求解苹果样品的漫反射率和实验测量得到的漫反射率, 二者之

间的误差非常小,具有很好的吻合性,证明利用漫射近似理论求解辐射传输方程和积分球实验直接测量得到的漫反射率之间误差很小,从而可以说明通过漫射近似方程求解光在苹果样品的漫反射率或者反演获得光学特性参数都是可行的。



a 吸收系数下实验与理论的结果

a Under the absorption coefficient of experimental and theoretical value



b 散射系数下实验与理论的结果

b Under the absorption coefficient of experimental and theoretical value

图4 积分球实验与漫射近似理论比较

Fig. 4 Integrating sphere experiment and diffusion approximation theory results

4 结论

苹果内部品质与光学参数是密切相关的,苹果糖份含量的变化必然会引起苹果组织的吸收系数、散射系数变化,导致光在苹果组织中的传输路径变化,从而导致漫反射率发生变化,漫反射率是统计出漫反射在样品表面的概率,漫反射率的求解成为关键,求解漫反射率不是用复杂的辐射传输方程,而应该用更简单的漫射近似方程求解。本研究证明完全可以用简单的漫射近似方程来代替复杂的辐射传输方程

来求解漫反射率,且误差很小,这是本研究的意义所在。本文的推导与验证为水果的无损检测打下了坚实的理论基础并提供很好的帮助和参考价值。

参考文献

- [1] 中国农业信息网-水果数据库[EB/OL]. <http://2zys.agri.gov.cn/shuiguocx.asp>. China agricultural information network-fruits database [EB/OL]. <http://2zys.agri.gov.cn/shuiguocx.asp>.
- [2] 汪良驹, 章镇, 姜卫兵. 加入 WTO 后中国果树业发展对策[J]. 果树学报, 2001, 18(5): 295-199. Wang LJ, Zhang Z, Jiang WB. The development strategy of fruit industry in China after joining the WTO [J]. Fruit Sci, 2001, 18(5): 295-199.
- [3] 韩东海, 刘新鑫, 涂润林. 果品无损检测技术在苹果生产和分级中的应用[J]. 世界农业, 2003,(1): 42-44. Han DH, Liu XX, Tu RL. The application of fruit non-destructive testing technology in apple production and grading [J]. World Agric, 2003,(1): 42-44.
- [4] 刘木华, 赵杰文, 江水泉, 等. 高光谱图像在农畜产品品质与安全性检测中的研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151-155. Liu MH, Zhao JW, Jiang SQ, et al. The research status and prospect of agricultural livestock quality and safety of detection based on hyper spectral imaging technology [J]. China Confer, 2011, 10-22.
- [5] 杨健. 草地资源的底面多光谱测定[J]. 中国草地, 1990, 141: 67-68. Yang J. The determination of ground multi-spectral on grassland resources [J]. Chin Grass, 1990, 141: 67-68.
- [6] 孙炳新, 匡立学, 徐方旭, 等. 苹果有效酸度的近红外无损检测研究[J]. 食品工业科技, 2013, 15: 298-301. Sun BX, Kuang LX, Xu FX, et al. Non-destructive detection of valid acidity of apple by near-infrared [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 15: 298-301.
- [7] 王加华, 戚淑叶, 汤智辉, 等. 便携式近红外光谱仪的苹果糖度近红外分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1431-1434. Wang JH, Qi SY, Tang ZH, et al. Temperature compensation for portable Vis/NIR spectrometer measurement of apple fruit soluble solids contents [J]. Spectros Spect Anal, 2012, 32(5): 1431-1434.
- [8] Lu R. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit [J]. Posth Biol Technol, 2004, 31: 147-157.
- [9] 丁永军, 李民赞, 孙红, 等. 基于多光谱图像技术的番茄营养素诊断模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 175-180.

- Ding YJ, Li MZ, Sun H, *et al.* Diagnosis model of tomato nutrient content based on multi-spectral images[J]. *China Confer*, 2012, 28(8): 175–180.
- [10] 崔丰娟, 阚建文. 近红外透射苹果运动速度模型适用性的研究[J]. *农机化研究*, 2010(11): 170–173.
- Cui FJ, Zha JW. Study on the influence of detection speed in quality of apple on the applicability of the model [J]. *J Agric Mech Res*, 2010, (11): 170–173.
- [11] Akira I. *Wave propagation and Scattering in random media* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [12] Kahneman, Daniel, Tversky. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*. 1979, 47: 263–291.
- [13] Cheong WF, Prael SA, Welch AJ. A review of the optical properties of biological tissues [J]. *IEEE J Quant Elect*, 1990, 26: 2166–2185.
- [14] Richard CH, Lars OS. Boundary conditions for the diffusion equation [J]. *Rad Transf*, 1994, 11: 2727–2741.
- [15] Alwin K, Michael SP. Improved solutions for the steady-state and the time-resolved diffusion equations for reflectance from a semi-infinite turbid medium [J]. *Opt Soc Am*, 1997, 14: 246–254.
- [16] Zhang LS, Zhang CP. Experiment research for non-invasive measurement of optical parameters of biological tissue [J]. *Optoelect Laser*, 1999, 70: 360–364.
- [17] 张连顺, 张春平, 等. 生物组织光学特性参数无损测量的模拟研究[J]. *量子电子学报*, 2002, 19(4): 318–322.
- Zhang LS, Zhang CB, *et al.* Simulation study for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue [J]. *Chin J Quant Elect*, 2002, 19(4): 318–322
- [18] Wilson BC, Adam G. A monte carlo model for the absorption and flux distribution of lighting in tissue [J]. *Med Phys*, 1983, 10(6): 824–830.
- [19] 吴彦红, 赵杰文, 陈全胜, 等. 水果组织光学参数的激光图像无损测量技术[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2007, 01: 8–11.
- Wu YH, Zhao JW, Chen QS, *et al.* Nondestructive measurement of optical properties of fruit by laser imaging [J]. *J Jiangsu Univ (Nat Sci Edit)*, 2007, 01: 8–11.
- [20] 刘木华, 李细荣, 黎静, 等. 水果组织光学传输的蒙特卡罗模拟研究[J]. *农业机械学报*, 2007, 06: 103–106.
- Liu MH, Li XR, Li J, *et al.* Monte carlo simulate the light migration in fruit tissue [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2007, 06: 103–106.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



战 钱, 硕士研究生, 主要研究方向为电子技术与光电检测。
E-mail: dsq53293914@163.com



李恩邦, 教授, 主要研究方向为光纤光学与光纤传感、激光测试、光通信技术与器件的研究及产品开发等。
E-mail: Enbang@tju.edu.cn