

# 农产品组织中光输运规律的初步研究

侯瑞锋, 黄 岚, 王忠义, 徐志龙

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 目前对农产品近红外无损检测中的光输运规律研究较少, 该文主要从光的辐射传输方程出发, 简析了基于该理论的几种相关模型及Monte Carlo (蒙特卡罗) 仿真方法, 讨论了各种模型适用条件和范围。应用Monte Carlo 仿真方法, 选择目前已知的肌肉组织光学参数进行了仿真计算, 给出光源到检测距离与穿透深度的计算结果。研究表明, 光传输理论和蒙特卡罗仿真方法在农产品无损检测领域将有良好的应用前景。

**关键词:** 光输运规律; Monte Carlo 方法; 农产品无损检测

**中图分类号:** S123; O439

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)09-0012-04

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- 15

Hou Ruifeng, Huang Lan, Wang Zhongyi, et al Preliminary study of the light migration in farm product tissue[J] Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 12- 15 (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

当代光学技术的飞速发展及其在工业、农业、医疗和军事等方面的应用不断深入, 人们对于光在生物组织中输运规律的研究越来越感兴趣, 确定生物组织中光的分布以及传播路径、穿透深度、吸收剂量和组织表面的光分布等情况对于光学应用的各个领域都有着十分重要的意义。特别在农产品检测领域, 光谱学技术以其独特的优势占有重要的地位, 如近红外光谱学技术被广泛的用来测定谷物、水果、肉品等农产品中的蛋白质、脂肪、淀粉、含水量、氨基酸等成分, 但由于对农产品组织中光输运规律的研究还不深入, 故而影响了光谱学检测方法在农产品检测领域里的进一步应用。因而对于农产品组织中光输运规律的研究必然有助于我们更加有效、精确、广泛地将光谱学技术应用于农产品研究领域, 特别是为改善无损快速检测仪器设计, 提高检测仪器的分析精度提供理论依据。

描述光在生物组织中光传输规律的理论可分为两大类, 第一类是解析理论, 它以Maxwell 方程或波动方程为基础, 在引进生物组织散射和吸收特性的同时考虑介质和波的统计特征, 考虑光的多次散射效应以及衍射和干涉效应, 在数学上来说是严格的, 在理论上它也是最基本的方法。然而当需要推导出解析解时, 却非常复杂, 这使得在实际应用中受到了很大的制约。另一类是输运理论也称为辐射传输理论, 它忽略了光的波动性与生物组织结构的特殊性, 直接讨论光能量在通过吸收、散射介质时光子的传输过程, 虽然它没有解析理论的严格性, 但实验表明其适用于大多数实际情况, 并且预测

效果是令人满意的<sup>[1]</sup>。本文的目的在于, 从光的辐射传输方程出发, 研究基于该理论的几种相关模型及Monte Carlo (蒙特卡罗) 仿真方法, 讨论这些方法的适用条件和范围, 并基于已知的肌肉组织光学参数用Monte Carlo 方法进行仿真计算。

## 1 辐射传输理论

辐射传输理论考察的是光能量在生物组织中的传播行为, 光子与生物组织的相互作用只包括散射与吸收, 而忽略了光在组织内部的辐射和感应效应。光辐射传输方程为<sup>[1]</sup>

$$\frac{\partial L(r, s, t)}{c \partial t} = -s \nabla L(r, s, t) - \mu L(r, s, t) + \int_{4\pi} \mu_s L(r, s', t) P(s, s') d\Omega + \Omega(r, s, t) \quad (1)$$

式中  $\mu_t = \mu_s + \mu_a$ ,  $\mu_a$ ——组织的吸收系数,  $\text{mm}^{-1}$ ;  $\mu_s$ ——组织的散射系数,  $\text{mm}^{-1}$ ;  $L(r, s, t)$ ——光源辐射在  $r$  处  $s$  方向单位立体角内的能量, 即辐射强度,  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ;  $P(s, s')$ ——散射相位函数, 表示  $s$  方向的光子散射到  $s'$  方向的概率密度;  $\Omega(r, s, t)$ ——光源函数。

从公式(1)可以看出, 辐射传输方程是一个较为复杂的微分积分方程, 除了几种特定条件<sup>[2]</sup>, 一般很难求出解析解。因而在实际研究应用中只能通过近似的方法来求解, 下面我们简单介绍几种近似方法。

### 1.1 一级散射近似

考虑一种简单的情况, 即仅仅考虑准直光束垂直入射混浊介质时的情况。在混浊介质中光的辐射强度可分成相干项( $I_c$ )和散射项( $I_s$ ), 即

$$I = I_c + I_s \quad (2)$$

其中  $I_c = I_0 \exp(-\tau)$ ;  $\tau$ ——光学厚度,  $\tau = \int_0^l (\mu_s + \mu_a) dl$ 。当散射辐射强度远小于相干辐射强度时, 我们可

收稿日期: 2005-01-08 修订日期: 2005-06-01

基金项目: 科技部“十五”攻关(021FN216900720)资助项目

作者简介: 侯瑞锋(1981-), 硕士生, 北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083

通讯作者: 黄 岚, 工学博士, 副教授, 北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: biomed\_hl@263.net



以假设总的辐射强度近似等于相干辐射强度, 即:  $I = I_c$  时, 则可以得到距离生物组织表面  $z$  处的辐射强度:

$$I(z) = I_0 \exp[-(\mu_a + \mu_s)z] \quad (3)$$

$z$  是入射光束的光轴, 这就是一级散射近似(First-Order Scattering)<sup>[3]</sup>, 从(3)式可以看出它适用于平面入射波且生物组织内部的吸收远大于散射的情况。但是大多数生物组织都是光的浑浊介质, 如动物皮肤组织、植物叶片组织、牛奶等对于入射光都有着较强的散射, 即散射系数远大于吸收系数, 而此时一级散射近似方法通常不满足假设条件, 因而不适用的。

### 1.2 Kubelka-Munk 的二流理论

一级近似方法中我们将组织中的散射辐射强度近似为零, 这里考虑另外一种情况, 即忽略相干辐射强度, 也就是说只考虑当生物组织中的辐射强度全部是由散射提供的情况。此时, 我们研究生物组织中光的传输可采用 Kubelka-Munk (KM) 方程, 即二流理论, 从传输方程出发推导出二流理论的过程可详见相关文献<sup>[1]</sup>。当采用漫射光源, 且生物组织中光辐射强度几乎是完全漫射时, 二流理论可以较好的描述试验结果。但在目前农产品检测领域中多采用的是准直入射光束, 并且, 所研究的大多数农产品组织中吸收与散射都是并存的, 所以在这种情况下二流理论应用于实际研究之中具有局限性。

### 1.3 漫射近似理论

由于大多数生物组织是光的浑浊介质, 光在生物组织中的传播以多次散射效应为主导, 光学无损检测中的光子传输问题在大多数情况都满足漫射近似条件。对方程(1)的  $P^{-1}$ <sup>[4]</sup> 近似可得漫射近似方程, 漫射近似方程处理的是强散射介质中光能量的传输, 结合不同的边界条件, 对于大多数实际问题都可快速得到解析解。但漫射近似理论只在强散射且远离边界和光源的区域成立, 并且只适用于单层无限大介质。当光源与探测器的间距  $d$  不满足  $d \gg 1/[\mu_s(1-g)]$  ( $g$  为各向异性因子, 称  $\mu_s = \mu_s(1-g)$  为约化散射系数) 或组织为非强散射强吸收介质时漫射近似将不再适用。

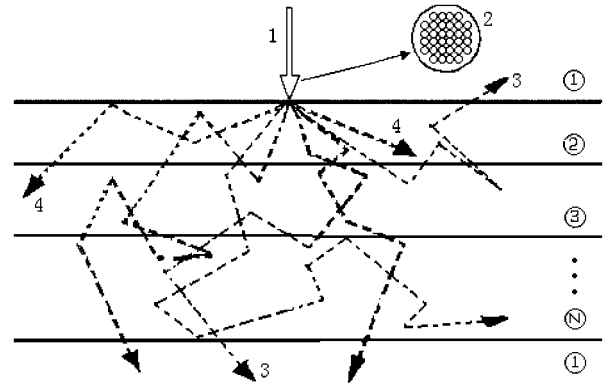
## 2 蒙特卡罗仿真模型及应用

### 2.1 蒙特卡罗仿真模型

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分布随机数来模拟产生一个与光子传播行为相似的事件, 然后通过观察仿真过程或抽样试验计算出所求参数统计特征, 最后给出所求解的近似值。实质上蒙特卡罗仿真就是用计算机来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, 因而它可以仿真任意吸收和散射条件下光在生物组织中的传播。概率统计和光辐射传输方程是蒙特卡罗仿真的理论基础。

蒙特卡罗仿真的基本思想: 是将入射光看成是能量可分的光子包粒子, 光子包是包含很多光子 ( $h\nu$ ) 的能量的集合体, 代表着入射光中一份能量。生物组织可被视为各层相异但每一层均匀分布着中性粒子的介质。光与生物组织的相互作用可以视为是光子包与相对固定粒

子的碰撞, 并发生吸收和散射事件。光子包在组织中传播时, 由于散射和吸收作用因而使得能量持续减少, 移动步长的大小和方向改变遵循统计规律。当光子包逃逸出生物组织, 或者当它的能量小于所设定的阈值时停止跟踪。但为了提高仿真的稳定性, 当能量小于阈值时, 往往采用“轮盘赌”的方法来决定是否终止对光子包的跟踪。通过对大量光子包迁移轨迹的逐个跟踪计算, 便可以获得光子轨迹和光子密度分布的宏观结果。具体的算法流程可参考相关文献<sup>[5,6]</sup>。图1 是多层生物组织模型中光子包在其中传播示意图。



1 入射光线 2 光子包 3 逃逸 4 吸收  
空气 组织第一层 组织第二层 N 组织第N层

图1 多层生物组织中光子的运输模型

Fig 1 Photon propagation models in the multi-layered biological tissues

在蒙特卡罗仿真研究中, 对每一个光子包随机行走的每一步都进行跟踪处理, 光子包在组织中经过一系列随机的散射和吸收事件后, 有少数从组织界面逃逸或在组织内部被吸收, 形成如图1所示的随机迁移路径。通过对大量光子包的跟踪, 不但会得到在组织中光子权重的累积分布情况, 而且可以得到光子包在组织各层中迁移路径的规律, 以及最大穿透深度。从而即可以分析得到组织的反射和吸收特性, 也可以得到组织内部光分布等我们所关心的相关信息<sup>[7]</sup>。

从蒙特卡罗仿真的过程分析来看, 蒙特卡罗仿真精度和参与仿真的光子包数量有很大关系, 光子包数量越多则得到的结果越稳定精确, 并且由于蒙特卡罗仿真模型不受生物组织几何形状的限制, 只要我们给定生物组织内部各层的光学参数, 就可以对各类光入射下生物组织内的光分布进行仿真。当前蒙特卡罗方法在物理学、生物医学等方面应用非常广泛<sup>[8-10]</sup>, 在此方面国内外都做了相当多的研究, 通常被作为评价其他近似方法准确性的标准。

### 2.2 蒙特卡罗仿真在农产品无损检测领域应用初探

蒙特卡罗仿真以其独特的优越性在很多研究领域都有着极其重要的地位, 大多数的应用主要集中在生物医学方面, 在农产品无损检测领域的应用未见报道。

在农产品无损检测领域, 光学方法业已有了广泛的应用, 成为农产品品质分析鉴定不可或缺的手段, 特别

是近红外光谱分析技术更是占有着重要的地位。但由于对光在农产品组织内部光输运规律研究不多,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>[11]</sup>,由此会引起模型不稳定的问题。为了保证模型预测的精度必然要求收集更多有代表性的样品,但要挑选大批量代表性的样品,不但挑选难度大,耗时、费力,且建立起来的模型也只能针对这种仪器本身,即便是采用相同规格的器件所组成的新仪器,由于被测样品的物理状态与所处的环境不同,原模型不能直接使用,而要针对新的仪器进行相应的模型校正,或者重新对新仪器建立符合它本身的模型。虽然已经在这方面作了大量的研究工作<sup>[12]</sup>,但效果并不十分理想。基于以上考虑,本文拟将蒙特卡罗仿真方法应用到农产品无损检测领域中。

虽然国内外很早就展开了光在人体生物组织中传播规律的研究,但由于农产品样品具有特异性和复杂性,因此还需要做大量的研究工作。采用蒙特卡罗仿真方法来研究光在农产品组织中的传播,有助于我们获知光在农产品组织中的平均光程以及最大穿透深度、漫反射率、漫透射率以及吸收率与组织散射系数、吸收系数的关系,从而在机理上对当前农产品检测中所面临的问题进行分析研究,以求找到改善方案。继而用来指导当前农产品无损检测仪器的研制与开发。我们选择人体组织光学参数进行了Monte Carlo 仿真。所用的被测组织用三层结构描述,各层光学参数见表1。采用107个光子进行Monte Carlo 方法进行仿真,研究了外层组织厚度在5~12 mm 范围内,光源与检测器的距离为20~40 mm 所对应检测深度的变化规律,仿真结果如图2所示。

表1 光学参数(各层折射率为1.4,  $g = 0$  各向同性)

组织分层	光学参数		
	吸收系数 /mm <sup>-1</sup>	约化散射系数 /mm <sup>-1</sup>	各向异性因子 g
皮层(第1层)	1.3	0.025	0
脂肪层(第2层)	1.2	0.003	0
肌肉层(第3层)	0.9	0.004	0

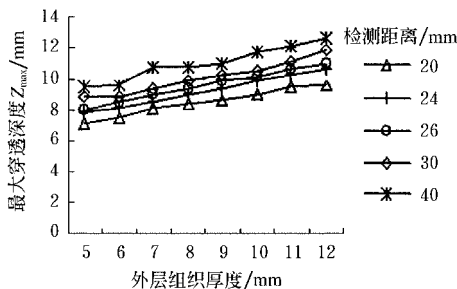


图2 由Monte Carlo 仿真得到的检测深度与检测距离、外层组织厚度的关系

Fig. 2 Relations between the detection depth and measuring distance, thickness of overlying tissue by Monte Carlo

当前,基于Lambert-Beer 定律的化学计量学方法是近红外光谱分析的基础,但由于大多数生物组织是浑

浊介质,Lambert-Beer 定律已经不能准确描述光在其中的传输规律,而常采用的是修正的Lambert-Beer 定律

$$OD = \epsilon cdB + G \tag{4}$$

式中  $OD$  —— 光密度(无量纲参数);  $\epsilon$  —— 消光系数;  $c$  —— 物质浓度;  $d$  —— 光源与检测器距离;  $B$  —— 差分路径因子;  $G$  —— 光散射引起的背景项。而反映光在生物组织中传播的平均路径长度的差分路径因子  $B$  在不同的波长时,其值与组织的散射、吸收相关,这可以由蒙特卡罗仿真方法得到。

在农产品检测领域,检测深度也是我们关心的重要问题。若光学无损检测采用漫反射形式,光在生物组织内的传播路径将呈现香蕉状,而目前在这种情况下光源与检测器距离2 mm,检测深度只有1 mm 左右,很难检测到农产品生物组织深层信息,因此寻找光源与检测器距离的最佳位置对于我们检测仪器的设计来说有着非常重要的意义。距离太近则检测深度不够,光谱携带的深层组织信息太少;如果太远则对于检测器的灵敏度要求较高,灵敏度不足则很难检测到有用信息。因此需要应用蒙特卡罗仿真方法来研究光源与检测器距离的最佳位置。

深入研究光在农产品组织内部的传输规律,必将对于解决农产品无损检测领域应用有很大的帮助。

### 3 结 论

通过对辐射传输理论的几种相关模型及Monte Carlo (蒙特卡罗)仿真方法的对比研究,明确了各种模型在农产品检测中的适用条件和范围;应用Monte Carlo 方法仿真计算,在相同的检测条件下,当光源与检测器距离变大时,检测深度也随之增加。因此,借鉴漫射近似理论,蒙特卡罗仿真模型在生物医学方面成功应用的经验,将光输运规律的研究方法引进至农产品无损检测领域,必将有助于在理论上进一步研究农产品中光输运特性,继而用来指导农产品快速无损检测仪器的研制与开发,因此,建立和研究农产品的光输运模型在农产品无损检测领域将会有广阔的发展前景。

#### [参 考 文 献]

[1] Akira Ishinaru Wave propagation and scattering in random media[M]. New York: Academic Press, 1978

[2] Ben Salah M, Askri F, Slimi K, et al Numerical resolution of the radiative transfer equation in a cylindrical enclosure with the finite-volume method[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2004, 47, 2501- 2509

[3] Roggan A, Dorschel K, Inet O M, et al The optical properties of biological tissue in near infrared wavelength range—review and measurements [A]. Laser-induced interstitial thermo-therapy, Proc SPIE[C]. 1995: 66- 80

[4] Bonner R F, Nossal R, Havlin S, et al Model for photon migration in turbid biological media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, 4(3): 423- 432

[5] Wang Lihong, Steven L Jacques, Zheng Liqiong MCML-

- Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, 47, 131- 146
- [6] Wang Lihong, Steven L Jacques, Zheng Liqiong. CONV-convolution for responses to finite diameter photon beam incident on multi-layered tissues[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1997, 54, 141- 150
- [7] Chenglun Tsai, Yang Yifong, Chichiang Han, et al. Measurement and simulation of light distribution in biological tissues[J]. *Applied Optics*, 2001, 40, 5770- 5777.
- [8] 黄 岚, 丁海曙, 王广志. 用近红外漫反射光谱无损检测血糖的初步研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 6, 387- 391.
- [9] Huang Lan, Ding Haishu, Hou Xinling, et al. Assessment of the hypoxic-ischemic encephalopathy in neonates using non-invasive near-infrared spectroscopy[J]. *Physiol Meas*, 2004, 25, 749- 761.
- [10] 黄 岚, 田丰华, 丁海曙, 等. 用近红外光谱对组织氧测量方法的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(5): 379- 383
- [11] 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
- [12] Jeongah Yoon, Byungwoo Lee, Chonghun Han. Calibration transfer of near-infrared spectra based on compression of wavelet coefficients[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 2002, 64, 1- 14

## Preliminary study of the light migration in farm product tissue

Hou Ruifeng, Huang Lan, Wang Zhongyi, Xu Zhilong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Light migration in nondestructive detection of farm products by using near infrared spectroscopy was little investigated, the theory based on the radiative transfer equation, and several models of this theory and the Monte Carlo method were described in this paper. Moreover, the applicability of these models was also analyzed. Based on known tissue optical parameters, the relations between the detection depth and measuring distance, thickness of overlying tissue were discussed by using Monte Carlo. It showed that the radiative transfer equation and Monte Carlo method was very useful in the field of nondestructive detection of farm product.

**Key words:** photon migration rule; Monte Carlo method; nondestructive measuring method of the farm product