

近红外光在柑橘内的传播与多功能光纤探测器设计

刘睿奇, 刘真民, 商娅娜, 陈振宜, 陈娜, 刘书朋*

特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444

摘要 柑橘是我国总种植面积最大的水果,改进其品质筛选方法能够降低劳动成本并有效提升产业经济收益。本文利用蒙特卡罗法对柑橘的近红外光检测进行模拟仿真,根据柑橘三层结构建立了具有不同吸收系数、散射系数、折射率和各向异性因子的三层球形光学模型。同时,综合考虑光子入射轨迹、曲面边界对光子运动轨迹的影响以及收集的反馈信息,搭建了柑橘品质近红外检测的仿真系统,并设计了一种收发一体的多功能光纤探测器。结果表明,所设计的光纤探测器可以实现对果肉层光子的选择性探测,有效提高了柑橘内部品质信息的检测灵敏度。

关键词 光纤光学; 光纤探头; 蒙特卡罗模拟; 柑橘无损检测; 近红外光谱技术; 球形模型

中图分类号 Q436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220788

1 引言

近年来,国内市场对水果品质的要求越来越高,消费者也更加关注水果的品质。柑橘是一种经济价值较高的常见水果,我国是其主要原产国之一,在种植面积和产量上均居世界之首^[1-2]。柑橘类水果的内部品质评价指标主要包括糖度、酸度、固酸比等,这些指标决定了水果的品质,也是水果成熟度的重要判断标准^[3]。然而,水果内部品质的常规检测方式是破坏性的有损抽样检测,这种检测方式存在费时、费力等缺点。因此,实现对水果理化指标的无损实时检测成为科学工作者的研究方向。

近红外光谱技术以操作简单、取样方便、结果准确等优势在医学、农业、食品等领域得到了广泛应用^[4-5]。近年来,柑橘类水果的近红外光谱无损检测取得了一定进展,但仍存在一些问题:1) 该类水果为多层结构,其中外果皮和中果皮具有一定厚度,而近红外辐射的穿透深度有限,难以确定检测到的光谱是否携带着内部果肉信息;2) 该类水果表面为曲面,在检测时一般对赤道部位进行采样,而样本形状会给数据采集带来一定干扰,从而使得柑橘类水果的近红外光谱存在一定的不稳定性^[6]。

1995年,Wang等^[7]建立了光子在生物组织中传播的蒙特卡罗(MC)模型,随后,MC方法被用在更多的研究中^[8-9]。2003年,Fraser等^[10]对柑橘内部的光照水平进行了研究,结果显示:在808 nm波长下,入射光子在果皮中产生了较为明显的内部反射,最终提升了光纤收集到的果肉信息。Chugunov等^[11]采用MC模型

模拟了可见-近红外范围内光子在18层洋葱鳞茎模型中的传播,并根据模拟结果实现了健康鳞茎和病害鳞茎的区分。Sun等^[12]对葡萄柚、橙子、柠檬、酸橙这4种柑橘类水果的整体光学特性(BOP)进行了研究,并建立了柑橘组织光学特性与理化指标之间的关联。Sun等^[13]在随后的研究中针对上述4种柑橘类水果建立三层平面模型进行MC模拟,结果发现在800 nm波长下光子能够深入到果肉层;他们建议最佳的源-探测器距离不应大于0.56 cm。高静等^[14]建立了人体皮肤组织模型,对光子在皮肤中的运动路径长度、穿透深度以及归一化能量值进行了研究,并根据研究结果设计了一种含有18根发射光纤和4根接收光纤的光纤探头。杨明等^[15]采用MC模型模拟了光子在7层人体皮肤组织中的传输规律,探究了纤芯直径、激发光纤与收集光纤的近边缘距离、探头与皮肤间距对荧光光谱检测的影响,并根据仿真结果设计了一套可用于皮肤烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)快速无创检测的光纤探头。本团队针对柑橘类水果的组织结构特点及光学特性,提出了一种光纤探头设计方案。该方案可以提升检测系统的总体精度,并可为后续无损装置的开发提供参考。

结合实际光谱检测场景,本团队对柑橘组织模型进行适当简化,建立了光子从光纤发射后经三层球形柑橘组织传播进而被光纤接收的检测系统;采用该系统对近红外光在柑橘中的传播过程进行模拟,得到了相对漫反射率、光子平均运动路径长度和果肉层有效光子占比;分析不同光纤结构参数(包括发射光纤与接收光纤的纤芯半径、数值孔径和轴间距离)对光谱检测的影响,并根据仿真结果设计了相应的光纤探头。本

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-07-04; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(62175142, 61875118)

通信作者: liusp@shu.edu.cn

文可为柑橘类水果的无损检测提供理论参考。

2 基本原理

2.1 柑橘的三层结构模型

柑橘可以简化为三层球形组织结构,即外果皮、中果皮和果肉。其中:外果皮(或油胞层)是最外面的组织层,包括表皮和薄壁细胞,其表面粗糙坚韧,并分布有油腺^[16],叶绿素、胡萝卜素和类胡萝卜素等决定果实外观色泽的色素类物质在这一层分布;中果皮(或白皮

层)是一层白色海绵状组织;果肉层水分充足,可食用,该层富含大量甜味和酸味物质。外果皮携带外观颜色信息,果肉携带内部品质信息,中果皮则会对柑橘类水果的光谱信号产生干扰。各层组织结构可以用厚度(d)、吸收系数(μ_a)、散射系数(μ_s)、折射率(n)和各向异性因子(g)来描述。本次实验选择 800 nm 作为近红外仿真的特征波长,以夏橙为例进行研究。夏橙的具体光学参数见表 1^[12]。在通用 MC 模型的基础上,本文重点考虑光子在收发光纤以及曲面边界附近的传输。

表 1 柑橘组织的光学参数
Table 1 Optical parameters of citrus tissue

Tissue	Thickness / cm	Absorption coefficient / cm^{-1}	Scatter coefficient / cm^{-1}	Refractive index	Anisotropic factor
Flavedo	0.190	0.012	245.512	1.369	0.933
Albedo	0.254	0.012	346.896	1.389	0.694
Vesicle	5.000	0.013	20.006	1.350	0.954

2.2 光子在光纤附近的传输

在 MC 模拟中,光子被视为独立的中性粒子,不考虑光的偏振和相位问题,不考虑组织内辐射能量分布细节。假设光子的初始权重为 $w = 1$ 。假设发射光纤纤芯的数值孔径为 NA , 折射率为 n_m , 半径为 r_1 , 圆心坐标为 $(0, 0, 0)$, 那么入射光子应均匀分布在发射光纤的开口范围内^[17], 即

$$\begin{cases} x_0 = \sqrt{\xi_1} r_1 \cos(2\pi\xi_2) \\ y_0 = \sqrt{\xi_1} r_1 \sin(2\pi\xi_2) \\ z_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ξ 为均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的伪随机数; (x_0, y_0, z_0) 为入射光子的初始位置, 且 x_0 和 y_0 满足 $x_0^2 + y_0^2 \leq r_1^2$ 。

入射光子的初始方向余弦 \mathbf{u} 应均匀分布在由数值孔径定义的发射锥内, 即

$$\begin{cases} u_x = \sin(\theta_a) \cos(2\pi\xi_3) \\ u_y = \sin(\theta_a) \sin(2\pi\xi_3) \\ u_z = \cos(\theta_a) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $2\theta_a$ 为光纤的发射锥角, 其与数值孔径、折射率相关, 即

$$\theta_a = \arcsin\left(\frac{NA}{n_m}\right) \xi_4 \quad (3)$$

假设接收光纤的纤芯半径为 r_2 , 类似地, 能被接收光纤检测到的光子应满足

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq r_2^2, z = 0 \\ \alpha_i \leq \theta_a \\ w \geq w_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_i 为光子的出射角; w 为光子的初始权重; w_0 为阈值权重。

光子在收发光纤附近的运动轨迹如图 1 所示。

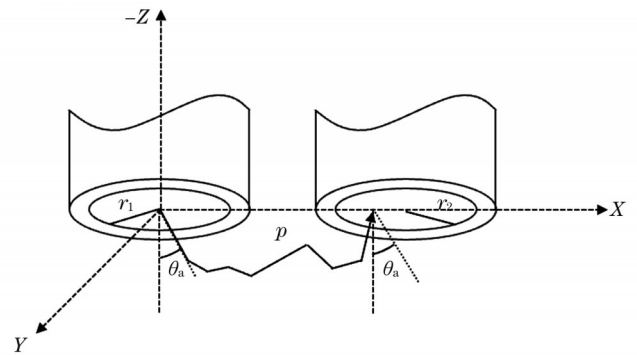


图 1 收发光纤附近的光子传输

Fig. 1 Photon transmission near transmitting and receiving fiber

2.3 光子在曲面边界附近的传输

对于球形组织而言, 当光子即将穿过其曲面边界时, 将光子移动到当前层和目标层的边缘。连接光子-组织曲面的交点 A 与组织的球心 O , 建立一个新坐标系, 新坐标系以直线 OA 为新的 Z 轴。如图 2 所示, 新坐标系是原坐标系先绕 Y 轴逆时针旋转角度 α 得到坐标系 $OX'YZ'$, 再绕 X 轴逆时针旋转角度 β 得到的, 即新坐标系为目标坐标系 $OX''Y''Z''$ 。其中,

$$\sin \alpha = \frac{x_i}{\sqrt{z_i^2 + x_i^2}}, \cos \alpha = \frac{z_i}{\sqrt{z_i^2 + x_i^2}}, \quad (5)$$

$$\sin \beta = \frac{-y_i}{r}, \cos \beta = \frac{\sqrt{z_i^2 + x_i^2}}{r}, \quad (6)$$

式中: r 为光子-组织边界交点与组织球心之间的距离; (x_i, y_i, z_i) 为入射点在原坐标系中的坐标。根据空间坐标变换原理, 光子在新坐标系中的方向余弦 \mathbf{u}' 为

$$\mathbf{u}' = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ \sin(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta) & -\sin\beta\cos(\alpha) \\ -\cos(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\beta) & \cos\beta\cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

光子发生透射或反射后,根据平面组织模型中的传输规律计算得到 u'_R 或 u'_T , 然后通过式 (8-1) 或式 (8-2) 将方向余弦转换到原坐标系中。

$$u'' = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ \sin(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ -\cos(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\beta) & \cos(\beta)\cos(\alpha) \end{bmatrix} u'_R, \quad (8-1)$$

$$u'' = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ \sin(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ -\cos(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\beta) & \cos(\beta)\cos(\alpha) \end{bmatrix} u'_T. \quad (8-2)$$

根据更新后的方向余弦 u'' , 光子继续在层内传输。

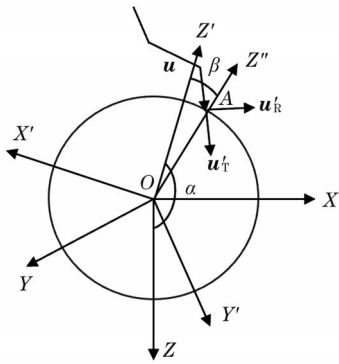


图 2 曲面边界附近的光子传输

Fig. 2 Photon transmission near sphere boundary

2.4 MC 模型及检测指标

本文使用 C/C++ 对 Wang 等^[7]发布的通用 MC 程序进行修改,引入收发光纤,并假设光子在三层球形组织模型中传输,建立了基于真实场景的柑橘近红外光谱检测系统。带有光纤的三层球形组织如图 3 所示。其中,发射光纤放置在正对柑橘样本赤道位置的系统原点处,接收光纤位于发射光纤右侧。样本与光纤不紧贴,设置厚度为 0.3 cm 的空气层,以模拟真实的检测情况。定义待检测柑橘样本为三层球形结构,包括外果皮、中果皮和果肉,各层均为同心球体,厚度有限且有界。仿真程序的输出被修改成相对漫反射率 R_d 、光子平均运动路径长度 \bar{D} 和果肉层有效光子占比 P_e 。漫反射率为接收光纤处累积的光子权重。为消除量纲和数量级对数据分析的影响,将原始数值进行归一化处理,转换到 $[0, 1]$ 区间,得到相对漫反射率 R_d 。对于被检测到的光子,计算其平均运动路径长度 \bar{D} , 计算公式为

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^N \frac{s_j}{N}, \quad (9)$$

式中: N 为有效出射光子在组织内传输的总次数; s_j 为第 j 次传输的实际步长。

考虑到内部果肉信息对近红外光谱检测的重要

性,定义果肉层有效光子占比 P_e 为

$$P_e = \frac{N_v}{N_d} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: N_v 为来自果肉层的光子总数; N_d 为光纤检测到的光子总数。

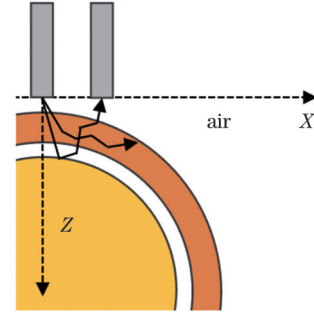


图 3 带有光纤的三层球形组织

Fig. 3 Three-layer citrus model with sphere interface and fiber probe

3 仿真结果与分析

令输入的光子总数为 1×10^8 , 将之前的柑橘组织光学参数代入改写后的 MC 程序中。仿真的初始参数设置为: 发射光纤的纤芯半径 $r_1 = 100 \mu\text{m}$, 接收光纤的纤芯半径 $r_2 = 100 \mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.22$ 。仿真时遵循单一变量原则。发射光纤纤芯半径 r_1 的取值范围为 $50 \sim 400 \mu\text{m}$, 仿真步距为 $50 \mu\text{m}$; 发射光纤数值孔径 NA_1 的取值分别 $0.17, 0.22, 0.30, 0.50$ 。接收光纤纤芯半径 r_2 、数值孔径 NA_2 的取值同上。轴间距离 p 的取值范围为 $0 \sim 0.1 \text{ cm}$, 仿真步距为 0.004 cm 。

由图 4 可知, 对于柑橘球面模型来说, 相对漫反射率主要受轴间距离 p 和接收光纤纤芯半径 r_2 的影响。在不同的光纤结构参数下, 相对漫反射率随轴心距离变化的趋势类似。考虑到绝大多数光子的出射位置都集中在发射光锥附近^[18], 随着轴间距离的变化, 接收光锥与发射光锥的重叠面积先增大后减小, 相应的接收光强也先增大后减小^[19]。当 $r_1 + r_2 \leq p$ 时, 相对漫反射率随着轴间距离的增大而逐渐衰减。对于发射光纤, 其数值孔径 NA_1 、光纤纤芯半径 r_1 越小, 检测到的相对漫反射率越大。这与文献^[19]得到的结论(在近红外光谱检测中, 应选择小芯径、小数值孔径的发射光纤)一致。对于接收光纤, 其数值孔径 NA_2 越大, 相对漫反射率越大。此外, 接收光纤的纤芯半径 r_2 对相对漫反射率具有显著影响, 随着 r_2 增大, 接收光纤收集光信号的能力逐渐增强。因此, 在制作工艺与成本允许的情况下, 应尽量选择较大的接收光纤半径。当 $p = 0.06 \text{ cm}$ 、 $r_2 = 400 \mu\text{m}$ 时, 相对漫反射率可达到 0.7606。

图 5 是不同光纤探头结构参数下光子的平均运动路径长度。光子的平均运动路径长度主要受轴间距离 p 的影响, 轴间距离越大, 平均运动路径长度越长, 这意味着距离发射光纤较远位置出射的光子携带着更深

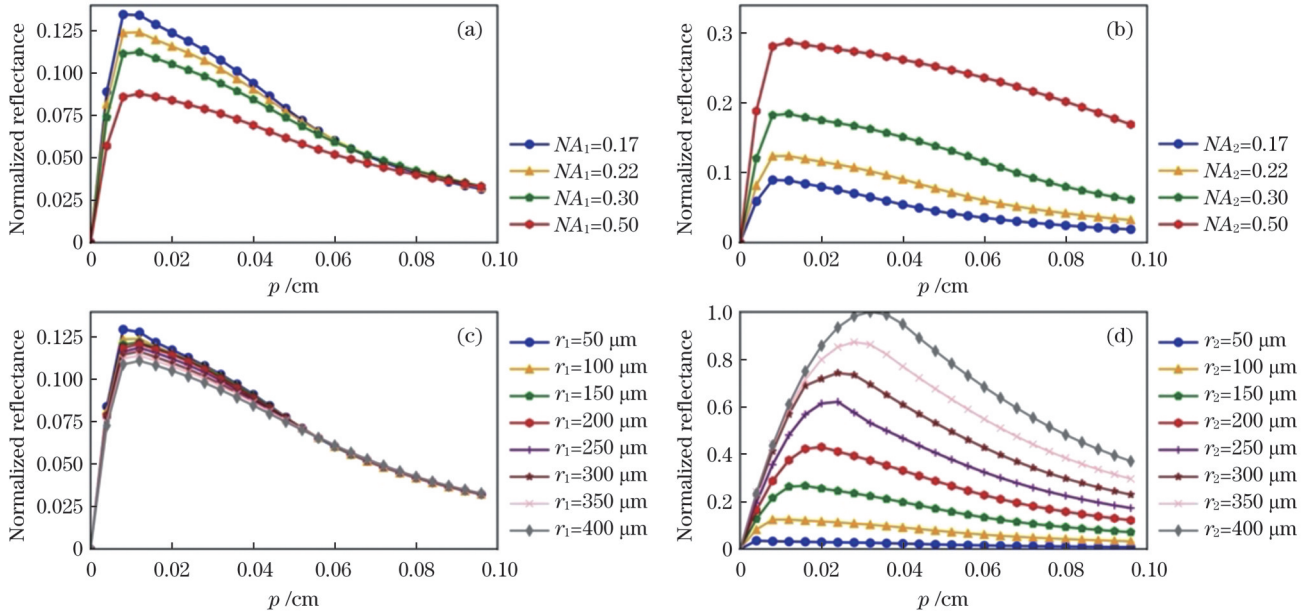


图 4 不同光纤探头结构参数下的归一化相对漫反射率。(a)不同 NA_1 下的归一化相对漫反射率; (b)不同 NA_2 下的归一化相对漫反射率; (c)不同 r_1 下的归一化相对漫反射率; (d)不同 r_2 下的归一化相对漫反射率
 Fig. 4 Normalized relative diffuse reflectance at different structural parameters of fiber probe. (a) Normalized relative diffuse reflectance at different NA_1 values; (b) normalized relative diffuse reflectance at different NA_2 values; (c) normalized relative diffuse reflectance at different r_1 values; (d) normalized reflectance at different r_2 values

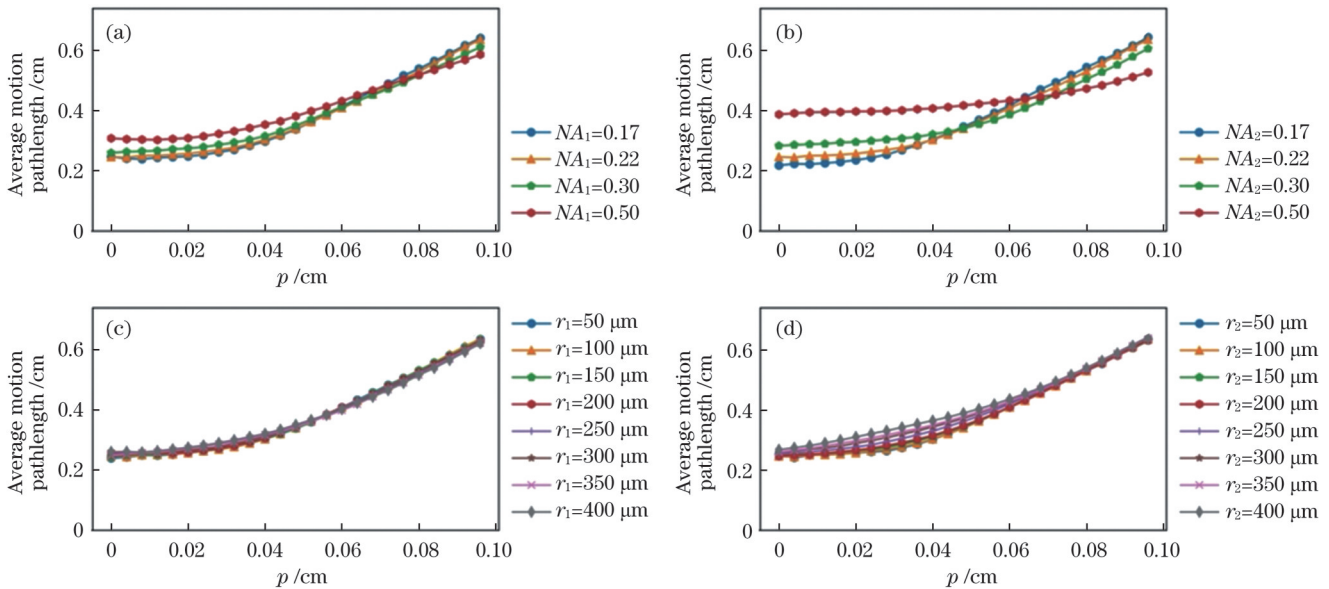


图 5 不同光纤探头结构参数下光子的平均运动路径长度。(a)不同 NA_1 下的光子平均运动路径长度; (b)不同 NA_2 下的光子平均运动路径长度; (c)不同 r_1 下的光子平均运动路径长度; (d)不同 r_2 下的光子平均运动路径长度
 Fig. 5 Average motion pathlength of photon at different structural parameters of fiber probe. (a) Average motion pathlength at different NA_1 values; (b) average motion pathlength at different NA_2 values; (c) average motion pathlength at different r_1 values; (d) average motion pathlength at different r_2 values

层次的信息。在不同的数值孔径下,光子的平均运动路径长度随轴间距离的变化呈相似的趋势。对于发射光纤,当数值孔径 NA_1 取 0.50 时,光子的平均运动路径长度相比 0.17、0.22、0.30 数值孔径下的平均运动路径长度有一定增加。当轴间距离在 0.07~0.10 cm 这一区间时,随着数值孔径增大,光子的平均运动路径长度减小。对于接收光纤,当轴间距离较小时,0.50 数值孔径

下光子的平均运动路径长度显著增加;当轴间距离在 0~0.048 cm 范围时,随着数值孔径 NA_2 由 0.17 增大到 0.22 再增大到 0.30,平均运动路径长度增加;当轴间距离在 0.048~0.100 cm 范围内时,呈现相反的趋势。

总体来说,若要获得更多的深度信息,应当考虑设置相对较大的轴间距离(如 0.048~0.100 cm)。光纤的数值孔径对光子平均运动路径长度有一定影响,考虑到光纤

制备的可行性,0.22的数值孔径是比较合适的数值。

由图 6 可以看出,果肉层有效光子占比受光纤半径、数值孔径的影响较小,但受轴间距离的影响较大。若要达到 0.01% 以上的占比,轴间距离应大于 0.08 cm。

同时,接收光纤纤芯半径 $r_2 \geq 250 \mu\text{m}$ 时,果肉层有效光子占比随轴间距离的变化更稳定。根据仿真结果,柑橘在 800 nm 处的近红外光谱信息主要来自外果皮,仅有极少部分(0.02%)的光子来自内部果肉。

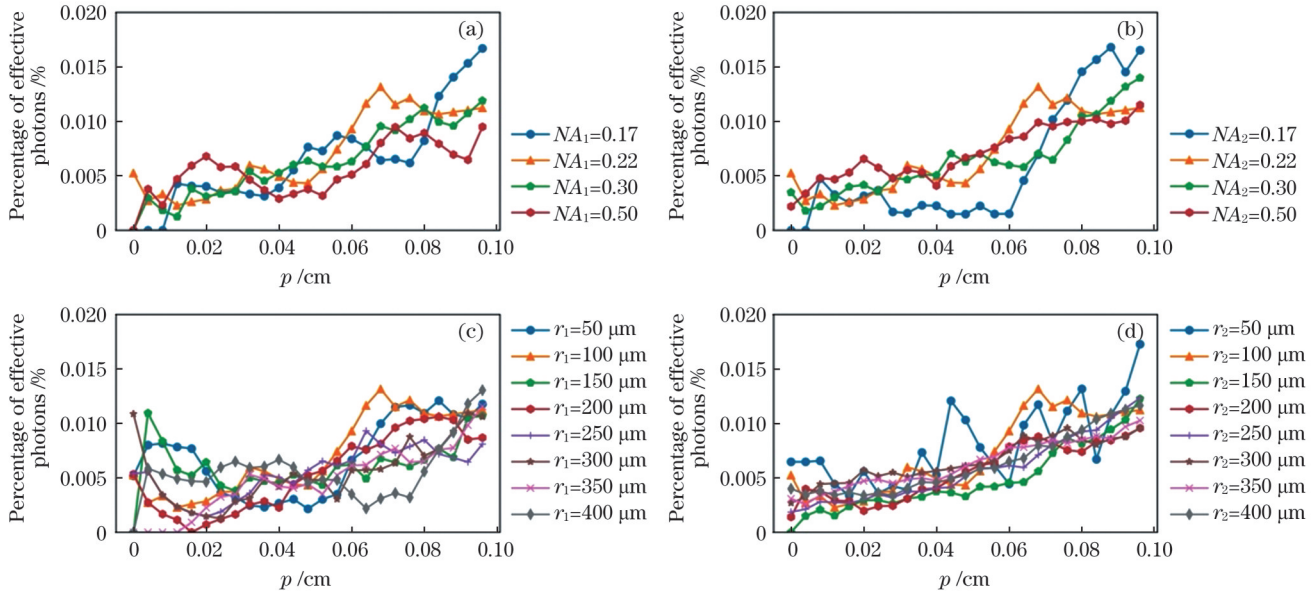


图 6 不同光纤探头结构参数下果肉层的有效光子占比。(a)不同 NA_1 下的有效光子占比;(b)不同 NA_2 下的有效光子占比;(c)不同 r_1 下的有效光子占比;(d)不同 r_2 下的有效光子占比

Fig. 6 Percentage of effective photons in vesicle layer at different structural parameters of fiber probe. (a) Percentage of effective photons at different NA_1 values; (b) percentage of effective photons at different NA_2 values; (c) percentage of effective photons at different r_1 values; (d) percentage of effective photons at different r_2 values

4 光纤探头设计

MC 仿真结果表明,光纤探头结构参数会对柑橘类水果的检测带来不同程度的影响。因此,应当有针对性地选择结构参数,以提高光谱质量。轴间距离和接收光纤半径对检测结果有较大影响。当轴间距离较小时,系统采集到的信号较强,但果肉层的有效光子占比较小,光子平均运动路径较短;当轴间距离较大时,系统采集到的信号较弱,但果肉层的有效光子占比增大,光子平均运动路径增加,获取的组织内部信息更丰富。选择纤芯半径较大的接收光纤会大幅度提高光的采集效率,获得更稳定的检测结果,但同时也增加了光纤制造加工的难度。根据以上指导原则,本团队使用 Y 形光纤束采集柑橘的近红外光谱,通过设置多组轴间距离来满足信号强度和内部信息的检测需求。所设计的光纤探头结构如图 7 所示,其中心是一根发射光纤,内圈是交错分布的收发光纤,外圈为大芯径接收光纤,所有光纤均等间隔、等角度紧密排布。其中,中心及内圈光纤的纤芯半径为 $100 \mu\text{m}$,包层半径为 $110 \mu\text{m}$,外圈光纤的纤芯半径为 $300 \mu\text{m}$,包层半径为 $330 \mu\text{m}$,所有光纤的数值孔径均为 0.22。对于最外圈的接收光纤来说, $300 \mu\text{m}$ 的纤芯半径极大地提升了收集效率,增加了光谱信号强度。其与内圈及中心发射光纤的轴间距离为 $0.044 \sim 0.088 \text{ cm}$ 。在综

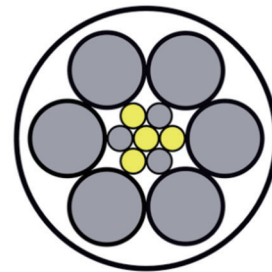


图 7 光纤结构示意图

Fig. 7 Schematic of optical fiber structure

合仿真实验结论、光纤包层半径和实际制作工艺后可知,所设置的多组收发光纤的轴间距离可以在保证一定采集效率的前提下获取更多的内部果肉信息。内圈接收光纤在不额外增加光纤束总外径的情况下,可在尽可能多的空间接收反射光,同时其排布有利于光纤束的定位与固定。与单光纤对相比,该同轴光纤束能够提供更均匀的照明条件和更理想的检测结果。对该结构进行 MC 仿真,仿真结果显示,光子收集效率可达到 3.24%,果肉层的有效光子占比为 0.07%。

5 结 论

本团队针对近红外光在柑橘中的传输进行了研究。结合真实的检测场景,在传统 MC 仿真方法的基础上,建立带有空气层的三层柑橘球形模型,并进一步分析了收

发光纤探头结构参数对检测结果的影响。通过仿真实验得到了光子在组织模型中的相对漫反射率、平均运动路径长度以及果肉层的有效光子占比,同时分析比较了不同参数下光纤的检测表现。发射光纤与接收光纤的轴间距离以及接收光纤半径对目标光学参数的影响较大:采集信号强度随轴间距离的增大而减小,平均运动路径长度以及果肉层的有效光子占比随轴间距离的增大而增大;接收光纤半径越大,结果越理想。通过对比分析可知,当接收光纤的纤芯半径大于 $250\ \mu\text{m}$,轴间距离 $p \geq 0.048\ \text{cm}$ 时,接收到的柑橘内部品质信息更丰富。根据模拟结果,本团队设计了一种反射式 Y 形光纤探头,实现了对果肉层光子的有效采集。本研究可为柑橘类水果无损检测的后续研究和仪器开发提供参考。

参 考 文 献

- [1] 沈兆敏. 世界柑橘产销现状及做强我国柑橘产业的建议[J]. 果农之友, 2020(3): 1-3.
Shen Z M. Present situation of citrus production and marketing in the world and suggestions on strengthening citrus industry in China [J]. Fruit Growers' Friend, 2020(3): 1-3.
- [2] 邓秀新. 柑橘产业发展趋势与桂林柑橘品种结构调整[J]. 南方园艺, 2020, 31(6): 1-4.
Deng X X. The development trend of citrus industry and the adjustment of citrus variety structure in Guilin[J]. Southern Horticulture, 2020, 31(6): 1-4.
- [3] Magwaza L S, Opara U L, Nieuwoudt H, et al. NIR spectroscopy applications for internal and external quality analysis of citrus fruit: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(2): 425-444.
- [4] Xie L J, Wang A C, Xu H R, et al. Applications of near-infrared systems for quality evaluation of fruits: a review[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 399-419.
- [5] Walsh K B, Blasco J, Zude-Sasse M, et al. Visible-NIR 'point' spectroscopy in postharvest fruit and vegetable assessment: the science behind three decades of commercial use[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111246.
- [6] Cayuela J A. Vis/NIR soluble solids prediction in intact oranges (*Citrus sinensis* L.) cv. Valencia Late by reflectance[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(1): 75-80.
- [7] Wang L H. Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 4: 131-146.
- [8] 姜紫翔, 刘婷婷, 孙清心, 等. 基于蒙特卡罗模拟的热电子器件注入效率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0504001.
Jiang Z X, Liu T T, Sun Q X, et al. Injection efficiency in hot-electron devices based on Monte Carlo simulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0504001.
- [9] 原静, 赵跃进, 孔令琴, 等. 血液成分变化对皮肤漫反射光谱及肤色的仿真分析[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0817001.
Yuan J, Zhao Y J, Kong L Q, et al. Simulation analysis of skin diffuse reflectance spectroscopy and skin color with blood component change[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0817001.
- [10] Fraser D G, Jordan R B, Künemeyer R, et al. Light distribution inside mandarin fruit during internal quality assessment by NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 27(2): 185-196.
- [11] Chugunov S, Li C Y. Monte Carlo simulation of light propagation in healthy and diseased onion bulbs with multiple layers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 91-101.
- [12] Sun C J, van Beers R, Aernouts B, et al. Bulk optical properties of citrus tissues and the relationship with quality properties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 163: 111127.
- [13] Sun C J, Aernouts B, van Beers R, et al. Simulation of light propagation in citrus fruit using Monte Carlo multi-layered (MCML) method[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 291: 110225.
- [14] 高静, 韩光, 卢启鹏. 近红外光在皮肤组织中的传播和光纤探测结构设计[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 0129002.
Gao J, Han G, Lu Q P. Propagation of near-infrared light in skin tissue and the design of optical fiber detection structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0129002.
- [15] 杨明, 孙全昌, 候华毅. 基于 Monte-Carlo 模拟的光纤探头的设计以及探头在皮肤 NADH 荧光光谱测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2217002.
Yang M, Sun Q C, Hou H Y. Design of fiber-optics probe based on Monte-Carlo simulation and application of the probe in fluorescence spectrum measurement of nicotinamide adenine dinucleotide in skin [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2217002.
- [16] 李永杰, 金国强, 淳长品, 等. 柑橘果皮的发育特征及 GA₃ 的防裂效果[J]. 果树学报, 2021, 38(7): 1092-1101.
Li Y J, Jin G Q, Chun C P, et al. Developmental characteristics of citrus peel and the effect of gibberellic acid on fruit cracking[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(7): 1092-1101.
- [17] Naglič P, Pernuš F, Likar B, et al. Limitations of the commonly used simplified laterally uniform optical fiber probe-tissue interface in Monte Carlo simulations of diffuse reflectance[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(10): 3973-3988.
- [18] 杨华勇, 吕海宝, 徐涛, 等. 反射式光纤传感器光纤参量对调制系数的影响[J]. 光子学报, 2002, 31(1): 74-78.
Yang H Y, Lü H B, Xu T, et al. Effects of optical fiber parameters on the intensity modulation property of the reflective fiber optic sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(1): 74-78.
- [19] 黄昆鹏. 羊肉新鲜度参数近红外光谱检测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
Huang K P. Study on the parameters of mutton freshness by near infrared spectroscopy[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.

Propagation of Near-Infrared Light in Citrus Fruit and Designing of Versatile Optical Fiber Detector

Liu Ruiqi, Liu Zhenmin, Shang Yana, Chen Zhenyi, Chen Na, Liu Shupeng*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective The citrus industry, one of the most important fruit industries in China, is currently focusing on

nondestructive internal quality grading. Near-infrared (NIR) spectroscopy has been widely used to provide accurate analysis of the material components of agricultural products, owing to its advantages of convenience and efficiency. Among different measurement setups, optical fiber probes are frequently used as a key optics accessory for collecting the NIR spectrum. The Monte Carlo (MC) method offers an accurate description of light propagation in the fruit tissue using a multilayer sample model, which provides the theoretical basis for the design of a more effective optical fiber probe in fruit-quality inspection. However, in the MC model, the target sample is usually described as a combination of multiple semi-infinite turbid mediums, which simplifies the structural characteristics of the tissue. Moreover, the structure and geometry of optical fiber probes are also ignored in most cases, which may lead to deviations in the simulation results. This study develops a more detailed description of light propagation in citrus tissues by analyzing the photon transmission near the optical fiber probe as well as the surface boundary of the sphere sample and suggests a probe design for reflectance-based detection.

Methods Based on the characteristics of citrus fruits, a three-layered optical model in the shape of a sphere is established, which includes flavedo, albedo, and vesicle layers with different absorption coefficients, scatter coefficients, refractive indices, and anisotropy factors. A simulation system of citrus-quality detection is developed, comprehensively considering the injection near the source fiber, the photon track near the surface boundary, and the information collected by the detector fiber. The corresponding changes are implemented in the general MC code for the simulation of transmission characteristics in the citrus tissue, including normalized relative diffuse reflectance, average motion pathlength of photons, and the percentage of effective photons in vesicles. Then, MC models with specific parameters of the optical fiber probe, including the numerical aperture and radius of both the source and detector fibers, and the source - detector distance are established for MC simulation.

Results and Discussions Based on the simulation results at a wavelength of 800 nm, the guiding principle of the optical fiber probe design suitable for citrus spectrum acquisition is determined. As shown in Fig. 4, the normalized relative diffuse reflectance increases with an increase in the radius of the detector fiber and decreases with an increase of source-detector distance, while other parameters show no significant influence. The average motion pathlength of the received photons increases with increasing source-detector distance (Fig. 5). In this case, the acquired spectrum carries more internal information about the citrus sample. For the percentage of effective photons in vesicles, a large detector fiber radius of 250 μm or more is recommended to achieve a stable result (Fig. 6) as well as a longer source-detector distance. Based on the simulation results, a new structure of “4 in 9 out” coaxial fiber probe is designed to direct light emitted by the light source and to receive the feedback signal (Fig. 7). This versatile fiber probe achieves a collecting efficiency of 3.24% and a percentage of effective photons of 0.07% in MC simulation.

Conclusions Nondestructive inner quality inspection techniques play an important role in the fruit industry. In this study, light propagation through the citrus tissue is simulated by the MC method to determine the relationships between fiber probe geometry parameters and the detected optical signal. A three-layered media model in the shape of sphere is established for further simulation and analysis. The optical fiber probe parameters that are closely related to NIR spectrum measurement are explained and introduced into the general MC model, and corresponding simulations are performed to determine the basic designing principles of the fiber probe in citrus tissues. Based on the simulation results, the radius of the detector fiber probe and the source-detector distance can be optimized to obtain more information of interest, while other parameters including the radius of the source fiber and the numerical aperture show limited impact on the simulation results. To achieve higher collection efficiency, a larger detector radius and smaller source-detector distance are recommended. Moreover, the photons received by the detector fiber are found to carry more information on the inner citrus tissue when the source-detector distance increases. A versatile optical fiber detection structure is designed with a large detector fiber radius and multiple source-detector distances to increase the level of received information of the citrus sample. The MC simulation result of the fiber probe indicates that the photons from the vesicle layer can be efficiently collected and the sensitivity of citrus inner quality detection is further improved, which provides a theoretical reference for designing a new detection accessory of nondestructive quality evaluation by NIR spectroscopy.

Key words fiber optics; optical fiber probe; Monte Carlo simulation; nondestructive detection of citrus fruit; near-infrared spectroscopy; sphere model