

高分辨率激光散斑成像技术在组织光透明中的应用

黄孝政, 杜功志, 林琳, 柳雨轩, 候华毅*

武汉工程大学光电信息与能源工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月4日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年4月3日

摘要

生物医学成像技术是揭示组织生理功能与诊断疾病的关键工具, 但其应用常受限于生物组织(如皮肤、肌肉)内胶原蛋白、细胞等结构引起的光强散射, 这已成为制约成像深度与分辨率的根本瓶颈。组织光透明技术通过化学试剂调控组织折射率、破坏散射结构, 可显著降低光散射, 从而为深层组织成像提供潜在途径。本文设计实验, 系统比较了甘油、果糖及柠檬黄三种试剂对离体鸡胸肉的光透明效果, 利用USAF 1951分辨率标板定量计算了鸡胸肉样本在甘油、果糖和柠檬黄溶液中浸泡20分钟后的成像分辨率。激光散斑成像(Laser Speckle Imaging, LSCI)作为一种非侵入式血流成像技术, 通过分析散斑动态变化实现血流速度与分布的精准量化, 但其成像质量高度依赖组织透明度——浑浊组织产生的静态散斑会掩盖血流动态信号, 导致分辨率降低。因此, 可以在此基础上结合高分辨率激光散斑成像技术, 通过计算血流灌注量以及对比度噪声比对活体皮肤光透明的效果进行定量评估。

关键词

组织光透明, 激光散斑衬比成像, 柠檬黄, 甘油, 果糖

Application of High-Resolution Laser Speckle Imaging Technology in Tissue Optical Clearing

Xiaozheng Huang, Gongzhi Du, Lin Lin, Yuxuan Liu, Huayi Hou*

School of Optical Information and Energy Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: March 4, 2026; accepted: March 23, 2026; published: April 3, 2026

*通讯作者。

文章引用: 黄孝政, 杜功志, 林琳, 柳雨轩, 候华毅. 高分辨率激光散斑成像技术在组织光透明中的应用[J]. 图像与信号处理, 2026, 15(2): 212-220. DOI: 10.12677/jisp.2026.152018

Abstract

Biomedical imaging technology is a crucial tool for revealing tissue physiological functions and diagnosing diseases. However, its application is often limited by light scattering caused by structures such as collagen and cells within biological tissues (e.g., skin, muscle), which has become a fundamental bottleneck restricting imaging depth and resolution. Tissue optical clearing technology, by using chemical reagents to modulate tissue refractive index and disrupt scattering structures, can significantly reduce light scattering, thereby providing a potential approach for deep tissue imaging. This paper designs experiments to systematically compare the optical clearing effects of three reagents—glycerol, fructose, and tartrazine—on *ex vivo* chicken breast tissue. The USAF 1951 resolution target was used to quantitatively calculate the imaging resolution of chicken breast samples after immersion in glycerol, fructose, and tartrazine solutions for 20 minutes. Laser Speckle Imaging (LSI), as a non-invasive blood flow imaging technique, enables precise quantification of blood flow velocity and distribution by analyzing the dynamic changes of speckles. However, its imaging quality highly depends on tissue transparency—static speckles generated by turbid tissues can mask dynamic blood flow signals, leading to reduced resolution. Therefore, based on this, high-resolution laser speckle imaging technology can be combined to quantitatively evaluate the effects of *in vivo* skin optical clearing by calculating blood perfusion and the contrast-to-noise ratio.

Keywords

Tissue Optical Clearing, Laser Speckle Contrast Imaging, Tartrazine, Glycerol, Fructose

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在生物医学领域，深入研究生物组织的内部结构和生理特性对于理解生命过程、疾病诊断与治疗至关重要。然而大多数生物组织的浑浊高散射特性，严重降低了光学成像的深度，进而严重影响了当前光学成像技术在生物组织器官成像中的应用能力[1]，限制了对组织内部精细结构和功能的研究。生物组织的不透明性是由不同光学特性的非均质成分造成的，如折射率(Refractive Index, RI)和光吸收率，大多数生物组织由高折射率的散射粒子，如脂质、蛋白、髓鞘，弹性纤维，以及低折射率的周围介质，如细胞间质液和细胞质共同组成的。由于每种成分具有不同的折射率，这种非均质物质结构会使入射光发生散射，限制了光学成像深度[2]，例如，生物组织通常由水基物质、脂质、蛋白质以及许多其他成分组成，三者的折射率分别约为 1.33、1.46、1.50 [3]。因为光散射和光吸收阻碍了光在组织中的传播，其中：光散射使光偏离原有的方向，不能径直穿过组织向前方传播；光吸收则会将光能转换为其他形式的能量，导致光强度的衰弱。

光透明技术的出现为解决这一难题提供了有效途径，通过降低组织对光的散射，提高光的穿透深度，从而实现对生物组织更深入、更全面的观察和分析。大量研究已经证明通过引入高渗透性、高折射率、生物相容性较好的光学透明剂(Optical Clearing Agents, OCAs)能够有效降低生物皮肤组织内的随机光散射，通过施加光学透明剂之后引起皮肤组织内部的折射率匹配、脱水作用和胶原蛋白解离三大机制能够实现提升皮下光穿透深度的效果[4]。

然而, 迄今为止, 大多数研究仅限于离体组织。少数能够实现活体组织透明化的研究案例, 要么需要极高浓度(50%以上)的试剂, 要么需要较长时间(40 分钟以上)才能生效, 且缺乏足够的生物相容性和可靠重复的可逆操作[5]。这些因素无疑会对生物体产生一系列副作用, 因此, 这少数几种方法仅适用于皮肤等浅层组织[6]。

甘油、果糖作为常见的化学试剂, 在生物组织光透明研究中被广泛应用。甘油与果糖作为皮肤光透明剂, 其核心机制均基于胶原解离, 即通过分子中的羟基与胶原蛋白特定氨基酸残基(如羟脯氨酸)形成氢键, 竞争性取代胶原表面结合的水分子, 从而破坏维持胶原结构稳定的水合层, 导致胶原纤维解离、散射降低, 实现光学透明[7]。在高浓度的光透明剂浸泡后, 皮肤质量会下降, 这一结果表明在透明化过程中存在通过外流导致的水分流失的现象, 以致脱水现象, 损伤生物组织[8]。有研究发现: 利用在特定波段有强吸收的分子, 通过克莱默-克朗尼格(Kramers-Kronig, K-K)关系改变水介质的折射率, 使之与脂质等成分匹配, 从而减少散射, 实现活体组织的可逆透明[9]。

激光散斑衬比成像(Laser Speckle Contrast Imaging, LSCI)作为一种非扫描全场成像技术, 具有设备简单、非侵入性、无需注入造影剂、成像速度快、分辨率高且可长时间连续测量等优势, 已被广泛应用于视网膜、皮肤、脑部等组织和器官的血管直径、血流速度、血流灌注、血流密度等微循环血流参数的测量[10]。但由于浑浊组织会产生静态散斑, 这种静态散斑会掩盖血流的动态信息, 降低激光散斑衬比成像的分辨率与对比度, 因此该技术的应用仍局限于透明组织[11]。也正因为如此, 激光散斑衬比成像技术被用于评估组织光学透明的效果。

本研究旨在系统探究相同浓度下甘油、果糖、柠檬黄对鸡胸肉的光透明效果。并分别通过 USAF 1951 光学标定板和 LSCI 定量分析三种不同溶液的光透明效果。明确三种试剂光透明效果的差异, 并找出对鸡胸肉光透明效果最佳的试剂, 为生物组织光透明技术的发展和應用提供实验依据。

组织光透明技术作为一种新型的组织学技术。它的出现极大地丰富了组织学研究的手段, 为组织学的研究翻开了新的篇章[8]。提高生物组织的光透明性, 能够增强光学成像的穿透深度和分辨率, 使研究人员能够获取更清晰、更准确的组织内部结构和功能信息, 为疾病的早期诊断、病情监测和治疗效果评估提供有力工具。

2. 材料和方法

2.1. 光透明材料

本研究采用甘油、果糖、柠檬黄作为光透明剂。下图 1 显示了它们的化学结构。

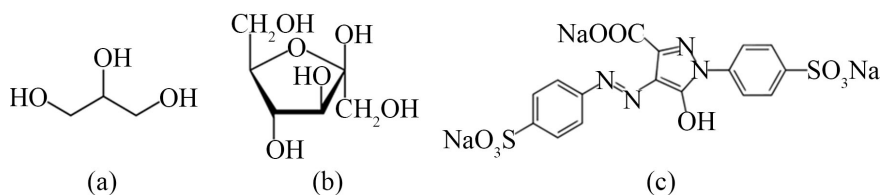


Figure 1. Chemical structures of glycerol (a), fructose (b), and tartrazine (c)

图 1. 甘油(a)、果糖(b)和柠檬黄(c)的化学结构

柠檬黄是偶氮类含有磺酸基团和氮氮双键的小分子染料, 实验中其透明效果最好。柠檬黄的光透明效果并非直接吸收散射光, 而是通过自身光学特性, 借助洛伦兹振子模型描述的响应规律, 结合克拉默斯-克朗尼格关系的因果关联, 提升水溶液折射率以匹配组织高折射率成分, 最终降低光散射。柠檬黄在可见光范围内吸收系数极低, 吸收系数小于 0.1 cm^{-1} , 不会因光吸收导致透过光衰减; 同时其化学性质

稳定, 不会被组织内的酶分解, 也不会与促渗剂发生反应, 适合在体实验。

洛伦兹振子模型将柠檬黄分子视为“受迫振动的电偶极子”, 其核心是描述分子对光的响应, 即折射率的实部 n' 和虚部 n'' 的变化。基于洛伦兹振子模型和克莱默-克朗尼格关系, 强吸收分子溶解于水后, 可改变水相介质的折射率, 使其与脂质等组织成分的折射率匹配, 从而减少光散射[12]。

$$n'(\lambda) = 1 + \frac{2}{\pi} P.V. \int_0^{\infty} n''(\lambda') \left[\lambda' \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda'^2} \right) \right]^{-1} d\lambda' \quad (1)$$

其中, $P.V.$ 为柯西主值, λ 为成像波长, λ' 为积分波长。柠檬黄在短波长的强吸收 n'' 峰值, 通过积分计算会显著提升长波长的 n' 。该方程表明, 染料的光谱位置、光谱宽度以及吸收强度, 均是调控 $n'(\lambda)$ 可实现变化量的关键参数。

柠檬黄的尖锐吸收峰位于 428 nm [13], 接近成像用红光波段, 根据 K-K 关系, 短波长的强吸收会显著提升长波长的水相折射率。柠檬黄的共振频率低, 且吸收峰窄, 半高宽为 94 nm, 根据洛伦兹模型, 这类分子作为“强振子”, 能更高效地通过电子跃迁调节介质的介电常数。

有研究表明, 对于具有多个吸收峰的分子, 多振子洛伦兹模型可简化为单振子模型。洛伦兹振子模型将分子视为“受迫振动的带电粒子系统”, 可定量描述分子对光的吸收和色散特性, 为筛选高效透明剂提供关键指标。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\infty} + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \quad (2)$$

借助该模型, 可将光学透明剂的相对介电常数 ε_r 与其等离子体频率 ω_p 和阻尼常数 γ 直接关联, 对应着吸收峰半高宽。其中 $\omega = 2\pi c/\lambda$ (c 为光速), ε_{∞} 是高平介电常数, ω_0 是分子共振频率。

2.2. 实验方法

2.2.1. 鸡胸肉离体实验

主要选择果糖(天津市科密欧化学试剂有限公司, AR 分析纯化学实验室用药品 D-果糖, $\geq 99.5\%$)、甘油(江西泰馨康实业有限公司, 纯甘油 99.7%)、柠檬黄(山东科源生化有限公司, $>95\%$, HPLC)。

无骨去皮生鸡胸肉购自当地供应商, 于 -10°C 条件下冷冻保存。实验开始前, 将冷冻的生鸡胸肉置于室温下解冻 10 分钟。随后, 沿与胶原纤维平行的方向将鸡胸肉切成 2 mm 厚度, 以确保每块肉的肌纤维走向一致。预实验中, 分别评估了甘油、果糖及柠檬黄溶液在不同浓度下的光透明效果, 并最终确定其各自的最佳浓度为: 6 mol/L、4 mol/L 和 0.6 mol/L。在同一温度下, 将鸡胸肉浸泡在这三种溶液中, 分别观察鸡胸肉初始时和浸泡 5 min、10 min、15 min、20 min 的光透明情况。

2.2.2. 激光散斑衬比成像技术

为评估体内皮肤光学透明的效果, 此次实验采用 LSCI 对皮肤血流进行成像。散斑是由受照表面不同部位反射或散射的光线形成的随机干涉图样。当散射粒子发生移动时, 散斑图样会变得模糊[14]。通过在模糊图像上滑动若干个($N \times N$)通常($N = 5$)的方形窗口进行计算, 或是对一系列时间帧中的单个像素展开分析, 即可得到血流灌注图。这两种方法分别被称为激光散斑空间对比分析法和激光散斑时间对比分析法。

LSCI 系统的原理图如下图 2 所示。实验采用 He-Ne 激光器(波长为 632.8 nm, 功率 3 毫瓦), 经 Thorlabs 公司 GBE15-A 的 15X 消色差伽利略扩束器(拥有 400 nm~650 nm 的增透范围)对目标区域进行照射。随后, 1200 万像素的海康工业相机(曝光时间为 5 毫秒)获取被照射区域的影像并传输至搭载 GeForce RTX

3090 显卡的计算机进行计算成像。由于激光散斑时间对比度分析法可抑制静态散射的影响, 因此研究采用该方法从原始散斑图像中获取血流分布图。

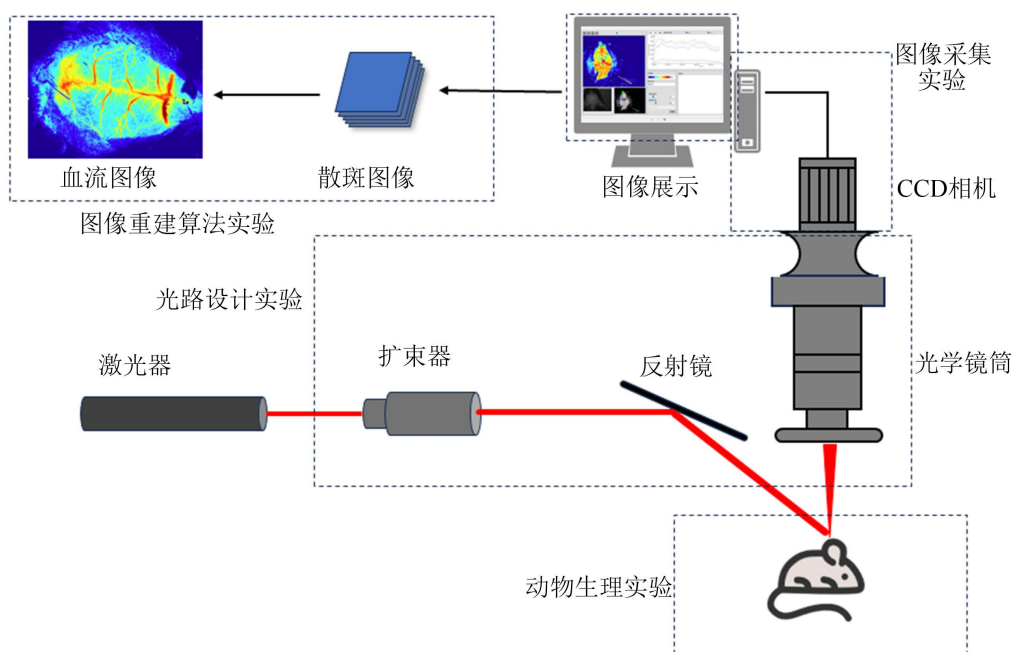


Figure 2. Schematic diagram of the LSCI experimental system

图 2. LSCI 实验系统示意图

2.2.3. 小鼠在体实验

此论文的动物饲养及实验操作均符合《中华人民共和国湖北省实验动物管理条例》。所有小鼠均饲养在无特定病原体级别的环境中, 实验所用的雄性 C57BL/6 小鼠(3~4 周龄)购自三峡大学实验动物中心。

实验前, 通过腹部注射浓度为 1.25% 的三溴乙醇(南京安杰优生物科技有限公司) 0.2 mL 对小鼠进行麻醉处理, 每次补注首次注射剂量的 70%, 并将麻醉后的小鼠放置在加热垫上维持体温。随后, 用手术剪刀减去小鼠头部的毛, 再使用脱毛膏清除残留毛。最后采用胶带剥离法操作 2~3 次, 以去除大鼠皮肤表面的杂质。再剪开小鼠头部的皮肤, 对其头部进行激光散斑实验。接着将柠檬黄溶液滴到去皮头部上。

3. 结果与分析

3.1. 鸡胸肉离体实验结果分析

鸡胸肉实验如下图 3 所示, 高浓度的甘油和果糖溶液会导致鸡胸肉过度脱水, 组织细胞内的水分快速渗出, 细胞内溶质因浓度骤升而析出沉淀, 使鸡胸肉纤维的状态从疏松均匀的质地变硬并且凹凸不平。这种结构变化破坏了组织内部的折射率均匀性, 光线通过时发生多次折射, 导致透过鸡胸肉观察到的标定板直线曲折。由柠檬黄溶液浸泡的鸡胸肉的光透明效果最好, 并且鸡胸肉没有产生脱水、质地变硬的现象。

为定量评价离体鸡胸肉的光透明效果, 分别对甘油、果糖、柠檬黄浸泡 20 min 后的鸡胸肉白光图中的分辨率做了计算: 分辨力的大小分别为 22.4 μm 、39.3 μm 、70.1 μm , 光透明效果最好的是柠檬黄, 接着是果糖, 最后是甘油。

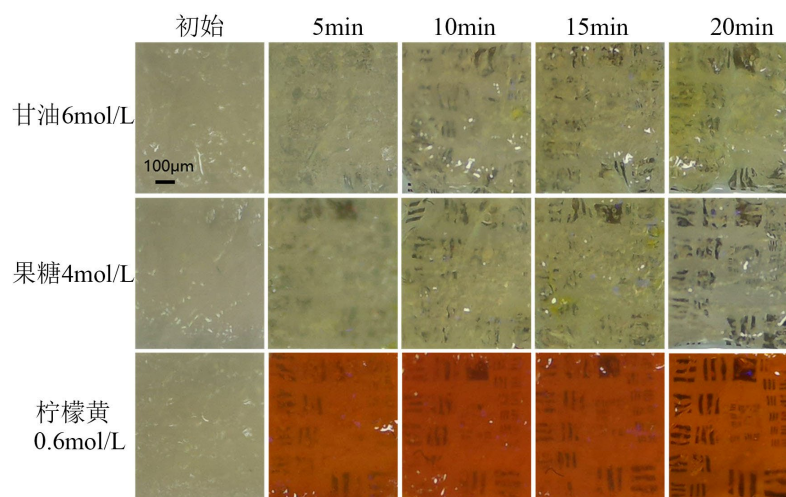


Figure 3. Results of the optical clearing experiment on chicken breast tissue
图 3. 鸡胸肉光透明实验结果图

3.2. 小鼠实验结果分析

实验结果中拍摄的小鼠头部去皮白光图和散斑图以及感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)局部放大图如下图 4 所示。

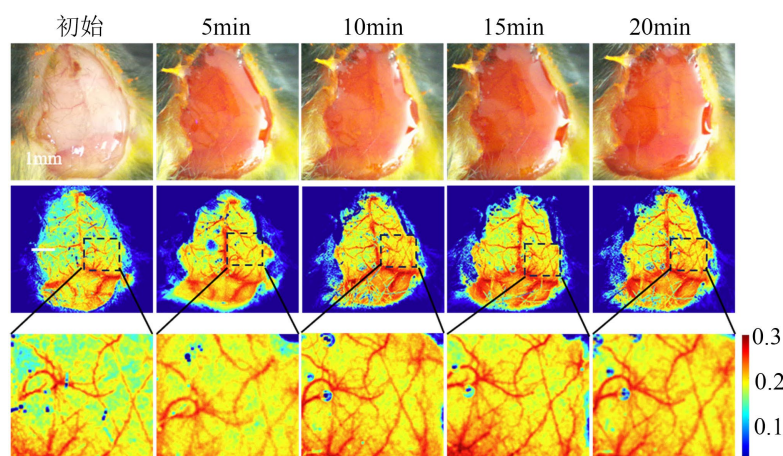


Figure 4. White-light and temporal-contrast images of the *in vivo* mouse head after scalp removal
图 4. 在体小鼠头部去皮的白光图和时间衬比图

3.2.1. 实验前后 CNR 变化

为定量评价各试剂作用于小鼠皮肤组织后的光透明效果，本文用对比度信噪比(Contrast-to-Noise Ratio, CNR)来评价成像质量的改善[15]，CNR 计算公式如下：

$$CNR = \frac{|\mu_{\text{vess}} - \mu_{\text{back}}|}{\sqrt{f_{\text{vess}} \sigma_{\text{vess}}^2 + f_{\text{back}} \sigma_{\text{back}}^2}} \quad (3)$$

其中， μ_{vess} 和 μ_{back} 分别表示构成血管和背景的像素的平均强度； σ_{vess}^2 和 σ_{back}^2 分别表示构成血管和背景的像素的强度方差； f_{vess} 和 f_{back} 分别表示图像中被归类为血管和背景的像素占总像素数的比例。分子反映血管与背景之间的强度差异，分母则是经图像构成比例加权后的图像总噪声度量。

ROI 的 CNR 曲线如下图 5 所示，头部去皮组织的对比度噪声比随时间呈显著上升趋势，与成像结果定性观察一致。这一量化结果直接证明了经过柠檬黄溶液光透明处理后，降低了组织散射，提升了血流信号的信噪比，进而增强了血管结构的可视化效果。

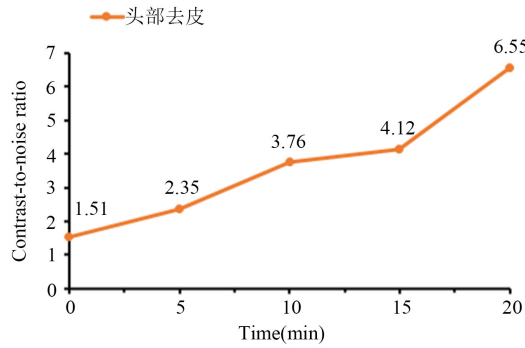


Figure 5. CNR of the ROI
图 5. ROI 的 CNR

3.2.2. 实验前后血流灌注量变化

在散斑分析中，定义衬比度 K 来衡量散斑时间积分后的模糊程度[16]:

$$K = \frac{\sigma}{\mu} \tag{4}$$

其中， σ 为散斑光强的标准差， μ 为光强均值。对衬比度值与相对速断关系的研究表明，散斑的衬比度值是曝光时间 t 的函数:

$$K^2 = \frac{\tau_c}{2t} (1 - e^{-2t/\tau_c}) = \frac{1}{(2ak_0t)v} (1 - e^{-(2ak_0t)v}) \tag{5}$$

其中， t 为图像采集过程中的曝光时间， τ_c 表示相关时间， k_0 为激光的波数，比例系数 a 取决于成像区域颗粒尺寸的洛伦兹长度和散射特性。相关时间 τ_c 与散射颗粒的运动速度 v 成反比。进一步，激光散斑测量血流灌注量可表示为[17]:

$$Q_l = \iint \frac{Rdt ds}{K^2_{(x,y,t)}} \tag{6}$$

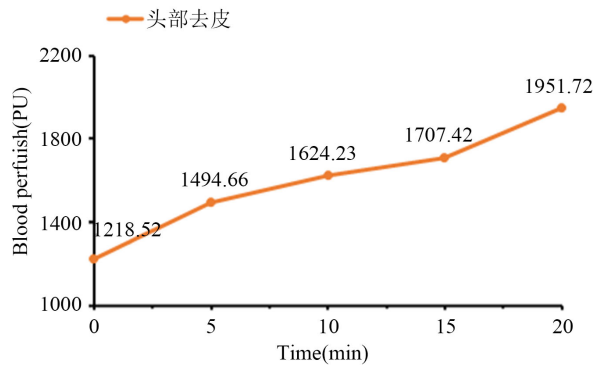


Figure 6. Blood flow perfusion of the ROI
图 6. ROI 的血流灌注量

ROI 的血流灌注量曲线如上图 6 所示, 初始状态时, 组织散射较强, 光子穿透深度有限, 仅能检测到浅表血管的血流信号, 深部血管因散射干扰而信号衰减, 导致测得的血流灌注量偏低。随着光透明试剂渗透, 组织折射率匹配度提高, 散射系数降低, 光子可穿透更深层组织, 使得原本被掩盖的深部血管血流信号被有效采集, 表现为血流灌注量的量化值增加。

血流灌注量的增加与 CNR 的提升呈现同步趋势, 且微血管结构清晰度与血流信号强度正相关, 表明灌注量增加是光学成像质量改善的直接结果, 而非生理干扰, 从而反向验证了光透明试剂仅通过优化光学环境而非改变血流本身提升成像效果。

3.2.3. 蒙特卡洛模拟

本研究观察到小鼠在应用柠檬黄透明剂后, 血流灌注量 Q_i 呈现显著上升趋势。然而, 需深入区分这一增长是源于“深层信号的真实显露”还是“介质改变导致的算法计算偏差”。首先, 组织光透明技术的核心机制在于通过折射率匹配降低散射系数 μ_s 。

蒙特卡洛模拟显示(见图 7), 随着 μ_s 的降低, 光子在组织内的平均自由程增大, 穿透深度显著提升。这意味着原本受限于高散射而无法检测到的深层微血管动能信号, 能够更有效地穿透皮肤层并携带血流动力学信息返回传感器。因此, CNR 的提升及灌注量图谱的细节丰富, 很大程度上归功于光透明技术打破了静态散斑对比度的掩盖效应, 实现了深层血流信息的有效提取。其次, 必须警惕介质光学参数改变对 LSCI 计算公式(公式(5))中比例系数 α 的影响。由于散斑衬比度 K 的计算高度依赖于光子在组织内的多重散射统计特性, 当组织从强散射介质转变为弱散射介质时, 光路分布的变化可能导致即便在血流流速恒定的情况下, 计算出的 K 值也会发生波动, 从而引入非生理性的计算偏差。

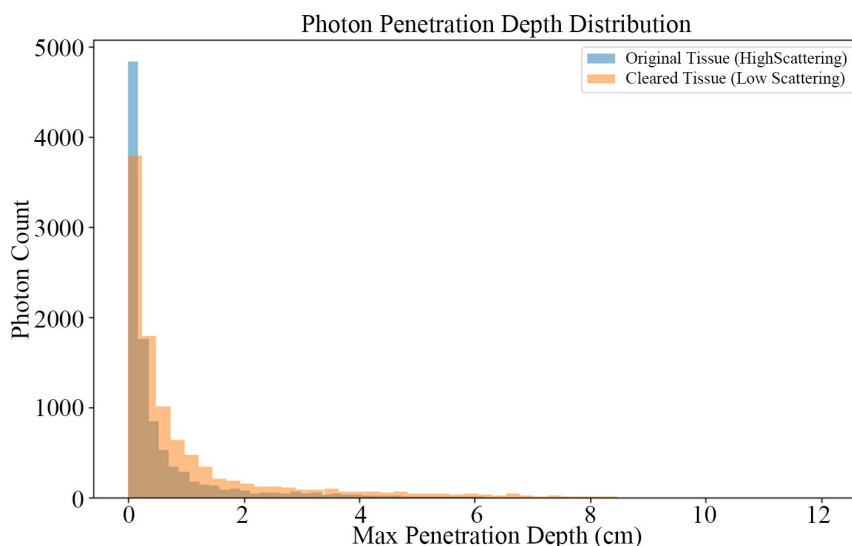


Figure 7. Monte Carlo simulation

图 7. 蒙特卡洛模拟

4. 结论

以 2 mm 厚度鸡胸肉为模型的光透明实验表明: 高浓度的甘油与果糖溶液有一定的光透明效果, 处理 20 min 后仅能较明显降低组织光散射, 可以实现背景信息的有效穿透, 但是会造成生物组织的脱水, 导致鸡胸肉质变硬; 柠檬黄溶液的光透明效率最优, 处理 15 min 即可显著提升鸡胸肉透光性, 20 min 后可清晰观察到背景标识, 其核心机制是柠檬黄通过调节组织内水分折射率, 匹配肌肉中蛋白质与脂质

的光学参数, 从而大幅减少光散射。

将 0.6 mol/L 的柠檬黄溶液应用于小鼠活体散斑实验, 结果显示: 经柠檬黄处理后, 小鼠腹部、头部、大腿区域的散斑成像对比度提升了成像细节的辨识度并且血流灌注量也有了较明显的增加; 该效果源于柠檬黄对活体组织表皮及浅层真皮的光透明作用, 降低了皮肤层对激光的散射干扰, 使散斑信号更精准地反映皮下血流动力学信息。而且, 该技术仍面临一些挑战, 染料的渗透深度和透明化波长范围有待进一步提升。此外, 该方法目前仅适用于小型啮齿动物, 其应用场景仍需拓展。本研究中筛选染料分子的方法在理论上可以进一步拓展, 可以与人工智能和计算模拟相结合[18], 这有望发现更多适用于不同波长或不同组织的最佳分子。并且在技术层面上, 该方法还可以与光纤、微针穿孔和超声波等物理促渗方式相结合, 以进一步提高组织穿透深度[19]。

参考文献

- [1] 周康为, 杨林海, 邱棋, 郑翔隆, 蒋位财, 林李嵩, 赵庆亮. 组织光透明技术在骨透明化中的生物医学成像应用与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 9-22.
- [2] 田婷, 杨朝阳, 李晓光. 组织透明化技术的研究与应用[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(21): 3363-3371.
- [3] Zhu, J., Liu, X., Liu, Z., Deng, Y., Xu, J., Liu, K., et al. (2024) SOLID: Minimizing Tissue Distortion for Brain-Wide Profiling of Diverse Architectures. *Nature Communications*, **15**, Article No. 8303. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52560-7>
- [4] 张凯, 房文汇, 王玥琳, 王紫来. OCT 评估超声介导下表皮真皮层的光学参数变化规律的研究[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 371-381.
- [5] Costantini, I., Cicchi, R., Silvestri, L., Vanzi, F. and Pavone, F.S. (2019) *In-Vivo* and *Ex-Vivo* Optical Clearing Methods for Biological Tissues: Review. *Biomedical Optics Express*, **10**, 5251-5267. <https://doi.org/10.1364/boe.10.005251>
- [6] Xia, Q., Li, D., Yu, T., Zhu, J. and Zhu, D. (2023) *In Vivo* Skin Optical Clearing for Improving Imaging and Light-Induced Therapy: A Review. *Journal of Biomedical Optics*, **28**, Article ID: 060901. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.28.6.060901>
- [7] 马宁. 用分子动力学模拟筛选高效皮肤光透明剂[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [8] Yu, T., Zhu, J., Li, D. and Zhu, D. (2021) Physical and Chemical Mechanisms of Tissue Optical Clearing. *iScience*, **24**, Article ID: 102178. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102178>
- [9] Shabbir, M.W., Phillips, M., Asante-Asare, D., et al. (2025) Transient Optical Clearing Using Absorbing Molecules for *Ex-Vivo* and *In-Vivo* Imaging. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2025.04.02.646849>
- [10] 翟林君, 傅玉青, 杜永兆. 激光散斑衬比血流成像关键技术及应用研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(9): 52-79.
- [11] Ramirez-San-Juan, J.C., Regan, C., Coyotl-Ocelotl, B. and Choi, B. (2014) Spatial versus Temporal Laser Speckle Contrast Analyses in the Presence of Static Optical Scatterers. *Journal of Biomedical Optics*, **19**, Article ID: 106009. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.19.10.106009>
- [12] Ou, Z., Duh, Y., Rommelfanger, N.J., Keck, C.H.C., Jiang, S., Brinson, K., et al. (2024) Achieving Optical Transparency in Live Animals with Absorbing Molecules. *Science*, **385**, eadm6869. <https://doi.org/10.1126/science.adm6869>
- [13] Jia, X., Ma, P., Tarwa, K., Mao, Y. and Wang, Q. (2023) Development of a Novel Colorimetric Sensor Array Based on Oxidized Chitin Nanocrystals and Deep Learning for Monitoring Beef Freshness. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **390**, Article ID: 133931. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133931>
- [14] 李晨曦, 陈文亮, 蒋景英, 等. 激光散斑衬比血流成像技术研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(2): 92-101.
- [15] Murari, K., Li, N., Rege, A., Jia, X., All, A. and Thakor, N. (2007) Contrast-Enhanced Imaging of Cerebral Vasculature with Laser Speckle. *Applied Optics*, **46**, 5340-5346. <https://doi.org/10.1364/ao.46.005340>
- [16] 张言. 基于激光散斑和光谱的小鼠颅脑损伤监测系统研制[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [17] 刘祺, 李源琦. 皮肤血流灌注量的测量方法[P]. 中国专利, 201910119825.8. 2019-02-18.
- [18] Zheng, S., Li, W., Pang, W., Zhong, T. and Lai, P. (2024) Optical Transparency in Live Animals: A Leap toward Deep-Tissue Applications. *Advanced Photonics*, **6**, Article ID: 060504. <https://doi.org/10.1117/1.ap.6.6.060504>
- [19] 张凯. 物理促渗透方法对 OCT 生物组织光透明参数的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2024.