

文章编号: 0253-2239(2007)06-1080-4

温度对生物组织模拟液光学特性影响的研究*

常 敏 彭 丹 徐可欣

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 采用牛奶作为生物组织的模拟液, 研究温度变化对生物组织光学特性的影响。应用双积分球技术对牛奶在光波波长为 1100~1700 nm、温度 25~40 °C 范围内的光学参量进行了测量, 分析光学参量随温度的变化规律。结果表明, 温度对散射作用的影响比吸收作用更大, 随温度的升高, 约化散射系数具有明显减小的趋势。与 25 °C 相比, 40 °C 下的约化散射系数下降了约 10%; 而吸收率的变化趋势不明显且规律复杂。以上研究结果与公开发表的人体离体皮肤组织光学参量随温度变化的研究结果基本一致, 从而为深入研究温度对生物组织光学测量的影响提供了理论和实践上的指导。

关键词: 生物光学; 生物组织模拟液测量; 光学特性参量; 温度

中图分类号: R318.51 文献标识码: A

Study of the Effect of Temperature on Optical Properties of Biological Tissue-simulating Phantom

Chang Min Peng Dan Xu Kexin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The effect of temperature on the optical properties of biological tissue has been studied by using milk as the simulation sample. Optical properties of milk at 1100~1700 nm were measured by using the double integrating sphere technology in the temperature range of 25~40 °C. Then the rule of change of optical properties with temperature was analyzed. The results show that the effect of temperature on scattering is greater than absorption. Obvious decrease can be observed with increasing temperature in the reduced scattering coefficient, which decreases by 10% at 40 °C compared to that at 25 °C. And the change of absorptivity of milk with increasing temperature is small and complicated. The results were consistent with the reported results on the study of ex vivo tissue. This study provides valuable theoretical reference and practical experiences and leads to investigate the effect of temperature on optical properties of biological tissue.

Key words: biological optics; measurement on tissue-simulating phantom; optical properties; temperature

1 引 言

近红外光谱技术已成功应用于组织和大脑中的血氧检测^[1~3], 但对于除血红蛋白外的其他组织和血液成分如血糖等的检测还处于离体样品的测试阶段^[4~7], 研究结果距离实际应用还有一段距离。

在基础研究领域, 大多围绕着温度对模拟样品以及离体组织光学测量的影响展开了研究^[5,8~12]。Tarumi 等^[5]在 1200~1800 nm 波段下采用蒙特卡罗方法模拟研究温度对于血糖浓度测量的影响, 结果发现仅 1 °C 的温度变化将产生 500 mg/dl 的葡萄

糖浓度的预测误差; Nilsson 等^[10]在 633 nm 下, 将人的离体全血制成样品, 采用双积分球技术对 25~55 °C 范围内全血光学特性的变化进行测量, 结果表明吸收率和约化散射系数均随着温度的升高而增加。目前已有的研究大多局限在较小的波长范围和温度范围内, 有必要在更宽的领域开展这类研究。本文选择牛奶作为生物组织的模拟样品开展温度对光学测量影响的研究。牛奶是一种复杂的生物流体, 在一定程度上保持了生物组织的原始特征, 它和生物组织不仅在体系组成上具有一定的相似性^[13],

* 国家“十五”科技攻关(2004BA706B12)资助课题。

作者简介: 常 敏(1978—), 女, 回族, 吉林人, 博士研究生, 主要从事生物光学方面的研究。

E-mail: tjuchangmin@yahoo.com.cn

导师简介: 徐可欣(1956—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事无创血糖检测方面的研究。E-mail: kexin@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-09-11; 收到修改稿日期: 2006-11-15

- 贺忠海,罗云瀚,徐可欣等. 利用散射系数变化测量血糖浓度的研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 591~594
- 5 Masatoshi Tarumi, Mitsunori Shimada, Tomoya Murakami *et al.*. Simulation study of in vitro glucose measurement by NIR spectroscopy and a method of error reduction[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2003, **48**(15): 2373~2390
- 6 Tamara L. Troy, Suresh N. Thennadil. Optical properties of human skin in the near infrared wavelength range of 1000 to 2200 nm[J]. *J. Biomed Opt.*, 2001, **6**(2): 167~176
- 7 Wenliang Chen, Rong Liu, Houxin Cui *et al.*. Application of transcutaneous diffuse reflectance spectroscopy in the measurement of blood glucose concentration[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 411~413
- 8 Kevin H. Hazen, Mark A. Arnold, Gary W. Small. Temperature-insensitive near-infrared spectroscopic measurement of glucose in aqueous solutions[J]. *Appl. Spectrosc.*, 1994, **48**(4): 477~483
- 9 Omar S. Khalil, Shu-jeen Yeh, Michael G. Lowery *et al.*. Temperature modulation of the visible and near infrared absorption and scattering coefficients of human skin [J]. *J. Biomed Opt.*, 2003, **8**(2): 191~205
- 10 A. M. K. Nilsson, G. W. Lucassen, W. Verkrusse *et al.*. Changes in optical properties of human whole blood in vitro due to slow heating [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, **65**(2): 366~373
- 11 Jan Laufer, Rebecca Simpson, Matchias Cope *et al.*. Effect of temperature on the optical properties of ex vivo human dermis and subdermis[J]. *Phys. Med. Biol.*, 1998, **43**(9): 2479~2489
- 12 Zhu Dan, Luo Qingming, Zeng Shaoqun *et al.*. Changes in the optical properties of slowly heated human whole blood and albumen[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 369~373 (in Chinese)
- 朱 , 骆清铭, 曾绍群等. 热作用下蛋白及全血光学特性变化的实验研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 369~373
- 13 Guo Benheng, Wu Hao, Chen Jian. *Dairy Chemistry* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001. 1~7 (in Chinese)
- 郭本恒, 吴昊, 陈剑. 乳品化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001. 1~7
- 14 Judith R. Mourant, Tamika Fuselier, James Boyer *et al.*. Predictions and measurements of scattering and absorption over broad wavelength ranges in tissue phantoms[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 949~957
- 15 S. Prahl. *Optical Property Measurements Using the Inverse Adding-Doubling Program* [M]. <http://omlc.ogi.edu>

在光学特性上也具有一定的相似性,都属于混浊介质^[14]。与其它模拟样品和离体组织相比,牛奶还是一种容易获得的无污染的生物体介质。

选用了环境和人体可能所处的温度 25~40 °C 作为研究的范围,采用双积分球系统测量牛奶样品对光的反射和透射随温度的变化情况,再根据生物组织中特定的光子传输理论,利用逆倍增(Inverse adding doubling, IAD)算法^[15] 计算得到吸收率和约化散射系数随温度变化的规律。在此基础上,对得到的结果进行了分析和讨论。

2 材料与方法

实验采用的双积分球系统如图 1 所示。光源借助了光谱仪的分光作用,系统中所用的光谱仪为美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Spectrum-GX 型傅里叶红外光谱仪。反射镜组的作用是为了将光谱仪发出的光线引入到积分球系统中。双积分球为 Labsphere 公司生产的型号为 IS-060-IG 的积分球,

检测器使用日本滨松(Hamamatsu)公司生产的型号为 G5851-21 的红外检测器,检测的光谱范围为 900~1850 nm。数据采集采用光谱仪自带的采集系统,同时有驱动光谱仪工作的作用。测量的样品厚度为 0.5 mm。

实验测量的牛奶样品为超市购买的纯鲜奶,其中脂肪含量约为 3.4 g/dl,蛋白质含量约为 2.9 g/dl,总固体含量约为 8.1 g/dl。

将牛奶样品放在电热恒温水域锅(北京长安科学仪器厂,温控精度 ± 0.5 °C)中加热到所需的温度,再由蠕动泵将样品输送到样品池中。为了保证和样品池的温度平衡,样品将由蠕动泵连续进样约 5 min,直至和样品池达到温度平衡。实验中设定的温度变化范围为 25~40 °C,温度变化梯度为 5 °C,即依次测量 25 °C、30 °C、35 °C 和 40 °C 下样品的漫反射率、漫透射率和准直透射率。然后利用逆倍增算法计算得到对应于这些温度的吸收率 μ_a 和约化散射系数 μ'_s 。

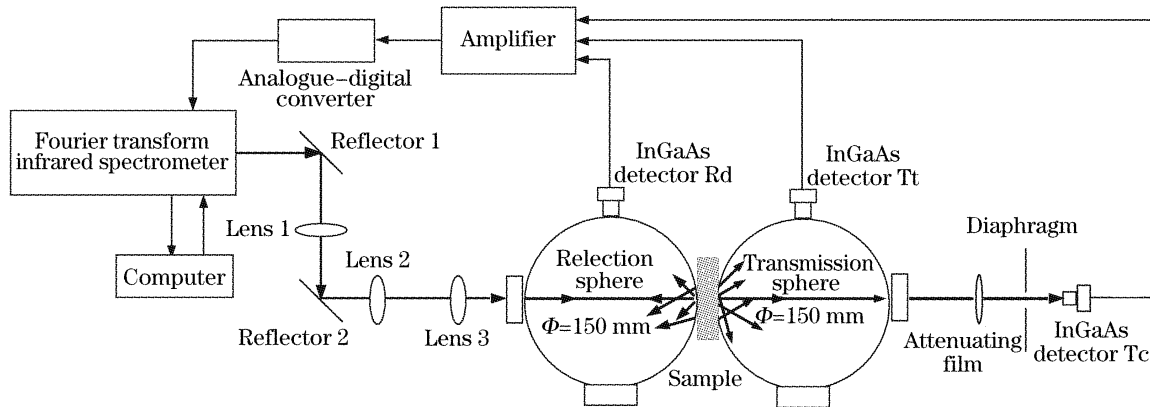


图 1 测量牛奶光学特性的双积分球系统

Fig. 1 Experimental setup of double integrating sphere system for measuring the optical properties of milk

3 测量结果与讨论

3.1 吸收率随温度的变化

实验得出吸收率随温度的变化情况如图 2 所示。由于在波长 1100 nm 以下和 1670 nm 以上的波段范围内,系统信噪比均低于 60。而在 1100~1670 nm 下,仪器的信噪比在 10^3 以上。因此只针对 1100~1670 nm 波段范围的测量结果进行了讨论。可以看出,吸收率随温度的升高发生了轻微的变化,但变化的趋势并不明显,所有数据几乎重叠在一起,难以观察到吸收率随温度变化的幅度和方向。

为了更清楚地认识吸收率随温度变化的规律,将各温度下的吸收率与 25 °C 下的吸收率作比值,得到如图 3 所示的结果。从图 3 中可以看出,在所研究的

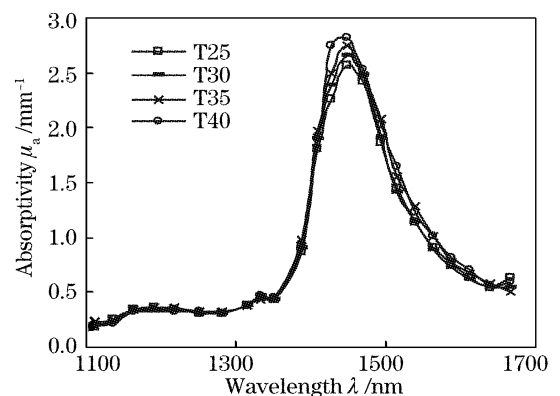


图 2 吸收率随温度的变化

Fig. 2 Change of absorptivity with temperature

波段范围内,吸收率随温度的变化幅度较小,且变化规律复杂。这是由于牛奶的组成极其复杂,产生吸收

的成分较多,吸收率是各吸收成分共同作用的综合贡献,因而使得吸收率表现出复杂的温度效应。

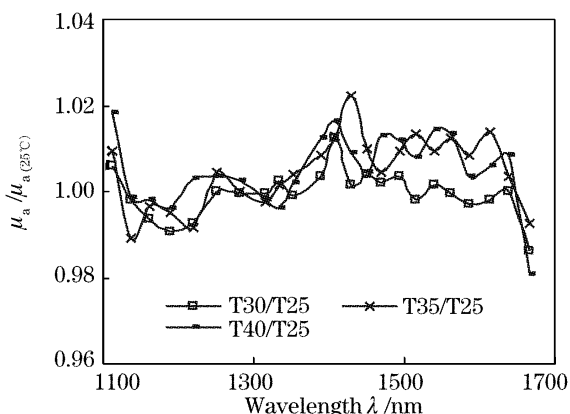


图 3 归一化的吸收率随温度的变化

Fig. 3 Normalized change in absorptivity with temperature

3.2 约化散射系数随温度的变化

实验得出的约化散射系数随温度的变化如图 4 所示。在大部分波段,散射系数随温度的升高呈现下降趋势。为了清晰起见,仍以 25 °C 的散射系数为基准,其它各温度的约化散射系数与其作比值,得到如图 5 所示的结果。可以看出,约化散射系数在

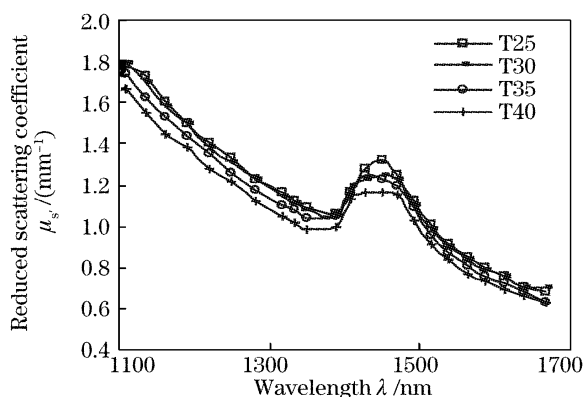


图 4 约化散射系数随温度的变化

Fig. 4 Change in reduced scattering coefficient with temperature

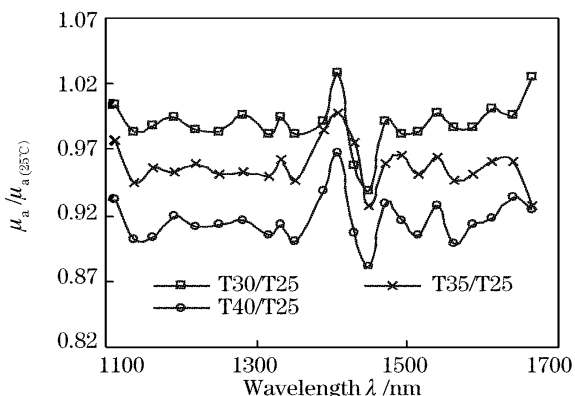


图 5 归一化的约化散射系数随温度的变化

Fig. 5 Normalized change in reduced scattering coefficient with temperature

25~30 °C 的范围内随温度的升高有轻微的下陷,但随着温度的升高,下降的趋势越来越明显。相对 25 °C 的情形,40 °C 下的约化散射系数下降了约 10%。与吸收率随温度变化的情况相比,温度对散射作用的影响更加显著。

3.3 与已有离体组织研究结果的比较

在温度为 25~40 °C 的范围内,研究生物组织光学特性随温度变化的,结果表明^[11],真皮层和皮下组织层的吸收率随温度变化趋势较微弱,且没有固定的变化趋势;真皮层的约化散射系数随温度的升高而增加,而皮下组织层的约化散射系数随温度的升高而降低。与他们的研究结果对比可以发现,得到的吸收率的变化结果与离体皮肤组织的结果基本一致,而约化散射系数的变化结果与皮下组织的变化结果一致。分析皮下组织和牛奶中的散射颗粒可以对二者约化散射系数变化趋势的一致性加以解释。在皮下组织中,主要的散射成分为细胞膜和液泡内部的脂类^[11],而牛奶中的主要散射成分存在于牛奶中的脂肪,二者的主要散射成分具有类似的性质,因此散射特性表现出随温度变化的一致性。

4 结 论

采用牛奶作为生物组织的模拟液,应用双积分球系统对温度在 25~40 °C 范围内的牛奶光学特性参量进行了测量。结果表明,约化散射系数随温度的升高明显下降,而吸收率变化规律复杂。本文的研究结果属于温度对生物组织光学特性影响的前期基础研究,对进一步开展温度对活体生物组织光学测量影响的研究,在理论和实践上都具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Zhao Jun, Ding Haishu, Teng Yichao. Quantitative determination of the tissue oxygen saturation using frequency-domain near-infrared spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 386~389 (in Chinese)
赵 军,丁海曙,腾轶超. 频域近红外光谱方法定量测量组织氧饱和度[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 386~389
- 2 Yu Chen, R. Taylor Dharmesh, Xavier Intes *et al.*. Correlation between near-infrared spectroscopy and magnetic resonance imaging of rat brain oxygenation modulation [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2003, **48**(4): 417~427
- 3 Hanli Liu, Yulin Song, Katherine L. Worden *et al.*. Noninvasive investigation of blood oxygenation dynamics of tumors by near-infrared spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(28): 5231~5243
- 4 He Zhonghai, Luo Yunhan, Xu Kexin *et al.*. A study of blood glucose concentration measurement by scattering coefficient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 591~594 (in Chinese)