

# 近红外光谱无创生化检测中不定光程对模型精度的影响研究

丁海泉 卢启鹏\* 陈星旦

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 利用近红外血流容积光谱相减方法无创定量分析人体血液生化成分时,获得的在体血液光谱对应的样品光程是不确定的。为研究样品间的光程差异对定标模型预测精度的影响,配制了 30 份模拟血清样品,利用可变光程样品池,采用傅里叶光谱仪分别测量了相同光程和不定光程两组样品的近红外光谱。以分析血清白蛋白成分为例,对两组样品的定标模型精度进行比较,结果显示不定光程组的模型精度与相同光程组的模型精度相比明显下降,交叉检验标准差(RMSECV)由 110.0 mg/dL 增大至 156.0 mg/dL。采用多元散射校正算法对上述光谱数据校正后,RMSECV 降低至 98.1 mg/dL。对比分析处理前后两组模型的精度,证实了采用适当的预处理方法能够有效校正不定光程引起的光谱误差,提高模型预测精度。

**关键词** 光谱学;近红外光谱;不定光程校正方法;多元散射校正;无创生化检测;模拟血清

**中图分类号** O657.3; O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0430003

## Effect of Variable Optical Path Length on the Accuracy of the Model in Noninvasive Biochemical Detection by NIR Spectrum

Ding Haiquan Lu Qipeng Chen Xingdan

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** For noninvasive quantitative analysis of blood biochemical components, near infrared (NIR) subtracted blood volume spectrometry is applied. However, the optical path lengths corresponding to *in vivo* blood spectra obtained are uncertain. In order to study the effect of optical path length difference on the prediction accuracy of calibration model, 30 serum samples are simulated. A variable path-length cell is used to produce optical path difference, and spectra of two sample sets, with equal and different path-lengths respectively, are measured by Nicolet 6700 Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometer. As to serum albumin, the calibration accuracies of the two groups are compared. The results show that the samples with uncertain optical path would reduce the calibration accuracy, as the root mean square error of cross validation (RMSECV) of the model increases from 110.0 mg/dL to 156.0 mg/dL. By applying multiplicative scatter correction, RMSECV of the uncertain optical path set reduces to 98.1 mg/L. It indicates that appropriate pretreatment method can effectively correct the error of spectrum caused by uncertain optical path length, thus improve the accuracy of the prediction model.

**Key words** spectroscopy; near infrared spectrum; correction method of uncertain optical path; multiplicative scatter correction; noninvasive biochemical detection; simulated serum

**OCIS codes** 300.1030; 070.4790; 170.1470; 300.6340

收稿日期: 2011-10-14; 收到修改稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(60878052, 60938002, 61078038)、中国科学院知识创新工程领域前沿基金(Y00232Q100)和应用光学国家重点实验室开放基金(Y1Q03FQ113)资助课题。

作者简介: 丁海泉(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事近红外光谱无创生化检测技术方面的研究。

E-mail: haiquan\_ding@163.com

\* 通信联系人。E-mail: luqipeng@126.com

## 1 引言

近红外光谱技术具有无损伤、快速、多组分分析和无需样品前处理等优点,已在食品、农业、环境、石油化工和生物医学等领域<sup>[1~3]</sup>得到广泛应用,并被认为是无创伤检测人体血液生化成分的最有潜力的方法之一<sup>[4]</sup>。多年来报道了大量科学研究工作<sup>[5~13]</sup>。但目前近红外无创伤生化检测研究仍未获得符合临床要求的结果<sup>[14]</sup>。该技术面临的最主要问题在于<sup>[15]</sup>:人体血液生化成分含量较低,而皮肤、肌肉等组织背景吸收很强,严重影响分析结果。为了解决组织背景干扰问题,Yamakoshi等<sup>[16]</sup>提出“脉搏血糖计”理论,刘蓉等<sup>[17]</sup>提出“浮动基准”理论,李刚等<sup>[18]</sup>提出“动态光谱”理论。类似理论目前多处于关键技术攻关阶段。针对组织背景干扰,本小组经过理论分析,提出了血流容积光谱相减方法<sup>[19,20]</sup>。该方法的原理是利用血液生化成分含量、组织背景吸收短期不变而血流容积随时间变化的特点,将两幅不同血流容积下测得的人体光谱做差分,能够较好地消除人体组织背景干扰因素,得到只反映血液组分信息的“纯净”光谱。但是获得的血液“纯净”光谱所对应的样品光程不能确定,光程差异会对定标模型的预测精度产生影响,称之为不定光程影响问题。为了提高模型预测精度,有必要对不定光程干扰进行抑制。目前专门针对不定光程影响及抑制方法方面的研究<sup>[21,22]</sup>并不多见。

本文为讨论不定光程影响问题,配制了30份模拟血清溶液。比较了样品分别在相同光程与不同光程下的建模分析结果,讨论了不定光程对定标模型精度的影响。同时通过理论推导研究了样品光程差异信息的校正方法,并设计实验对方法的校正效果进行了评估。

## 2 实验设置与方法

### 2.1 仪器设备

实验使用热电公司6700型傅里叶变换光谱仪,该仪器配备热电(TE)制冷的InGaAs探测器;光谱采集范围为 $10000\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ;光谱分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ ;每扫描32次获得一幅光谱。室内温度控制在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。样品池选用的是高精度可变光程样品池,精度 $0.001\text{ mm}$ 。

### 2.2 样品组成与制备

实验选取葡萄糖、甘油三酯、尿素、白蛋白和丙氨酸的水溶液来模拟人体血清溶液,其中选用三乙酸甘油酯替代甘油三酯,牛血清白蛋白(BSA)替代

人血清白蛋白,溶剂为蒸馏水。5种主要成分浓度由计算机随机生成,浓度范围接近正常人水平,最终配制出30个浓度各异的人体血清模拟样品,各成分的浓度分布如表1所示。以牛血清白蛋白为例来分析不定光程对定标模型精度的影响。

表1 样品溶液各组分浓度分布

Table 1 Component concentration distribution of sample solutions

	Maximum / (mg/dL)	Minimum / (mg/dL)	Mean / (mg/dL)	Standard deviation / (mg/dL)
Glucose	346	60	199.8	87.1
Triacetin	510.6	119.8	298.4	123.2
Urea	0.562	0.151	0.358	0.116
BSA	2249	1015	1558.1	396
Alanine	1021	545	729.5	145.3

对于多组分样品光谱分析,如果其中两种主要待测成分具有较强相关性,在建模时往往难以判断模型究竟是由哪种成分在起主导作用,会对模型精度与稳定性产生不利影响。为了避免这种情况的发生,配制模拟溶液时对各组分浓度值之间的相关性进行了控制,各成分浓度间的相关系数分别如表2所示。

表2 样品溶液各组分浓度之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between component concentrations

	Triacetin	Urea	BSA	Alanine
Glucose	0.0251	0.0017	0.0085	0.0008
Triacetin		0.0360	0.0893	0.0687
Urea			0.0829	0.0908
BSA				0.0393

### 2.3 模拟溶液的光谱采集

为对光程校正算法处理前后进行比较,设计了两组样品厚度,如表3所示。第一组所有待测样品厚度均为 $1\text{ mm}$ ,即厚度相同;第二组样品厚度由计算机在 $0.5\sim 1.0\text{ mm}$ 间随机生成,30个厚度各不相同。

样品光谱采集过程如下:以空气为背景,首先测量1号样品在 $1\text{ mm}$ 光程下的光谱,然后改变样品池厚度,测量1号样品对应的第二组光程( $0.928\text{ mm}$ )下的光谱。然后重新调整样品池厚度至 $1\text{ mm}$ ,测量2号样品光谱,依此类推。最终,获得30份样品在两组光程下的光谱。

表3 两组样品厚度简表  
Table 3 Two thickness groups of 30 samples

Sample number	1	2	3	4	5	...	29	30
Group 1 /mm	1	1	1	1	1	...	1	1
Group 2 /mm	0.928	0.522	0.846	0.989	0.642	...	0.966	0.918

### 2.4 光程校正算法

多元散射校正 (MSC)算法由 Geladi 等<sup>[23]</sup> 首先提出,可以将散射介质光谱中物理光散射和化学光吸收信息分离,常被用来校正散射影响。尝试采用 MSC 算法对光程差异信息进行校正。

首先计算光谱矩阵的平均光谱,并假设平均光谱  $A^0$  即为“理想”光谱:

$$A^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (1)$$

$A$  为样品原始吸光度光谱矩阵,  $A_i$  为第  $i$  个样品吸光度光谱,“理想”光谱对应的光程用  $\bar{l}$  表示。令每

条光谱与“理想”光谱做一元线性回归,

$$A_i = m_i A^0 + b_i, \quad (2)$$

计算出各条光谱的回归系数  $m_i$  和截距  $b_i$ ,

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^p (A_j^0 - \overline{A^0}) (A_{ij} - \overline{A_i})}{\sum_{j=1}^p (A_j^0 - \overline{A^0})^2}, \quad (3)$$

$$b_i = \overline{A_i} - m_i \overline{A^0}, \quad (4)$$

式中  $j$  为波长编号,“-”为各波长吸光度求平均符号,结合朗伯-比尔定律  $A = \epsilon l c$  ( $\epsilon$  为摩尔吸收系数,  $l$  为光程,  $c$  为成分浓度),可以将  $m_i$  改写为

$$m_i = \frac{\bar{l}_i}{\bar{l}^2} \frac{\sum_{j=1}^p \left[ \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 \right) \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik} - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik} \right) \right]}{\sum_{j=1}^p \left[ \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 \right) \right]^2} = \frac{l_i}{\bar{l}} \alpha, \quad (5)$$

式中  $l_i$  为第  $i$  条样品光谱对应的光程,  $k$  为成分编号。根据 MSC 理论,校正后的光谱矩阵元素可表示为

$$A_{i(\text{MSC})} = \frac{A_i - b_i}{m_i} = \frac{A_i - \overline{A_i} - m_i \overline{A^0}}{m_i} = \frac{l_i \left( \epsilon_k c_{ik} - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik} \right)}{m_i} - \bar{l} \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 = \bar{l} (\beta / \alpha + \gamma), \quad (6)$$

式中  $\alpha = \frac{\sum_{j=1}^p \left[ \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 \right) \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik} - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik} \right) \right]}{\sum_{j=1}^p \left[ \left( \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0 \right) \right]^2}$ ,  $\beta = \epsilon_k c_{ik} - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{ij} c_{ik}$ ,  $\gamma = -\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \epsilon_{jk}^0 c_k^0$ 。 $\alpha, \beta, \gamma$  只与样品的成分浓度和摩尔吸光系数有关,而与光程无关。

从(6)式可看出,经过 MSC 处理后,每条光谱的光程信息校正到同一光程  $\bar{l}$  下,说明利用该算法理论上能够消除不定光程的影响。

### 3 结果与讨论

为了兼顾近红外光的穿透力与吸收特性,实验重点在第一倍频波段的  $6300 \sim 5500 \text{ cm}^{-1}$  谱区讨论。相同光程下的 30 幅样品溶液光谱如图 1 所示。选用的定量分析方法是偏最小二乘算法 (PLS),采用留一交叉检验法 (leave-one-out cross-validation) 对模型精度进行验证。最佳主成分因子数由预测残差平方和 (PRESS) 确定。定标分析结果如图 2(a) 所示,最佳主成分因子数是 5,此时定标相关系数  $R_c$ 。

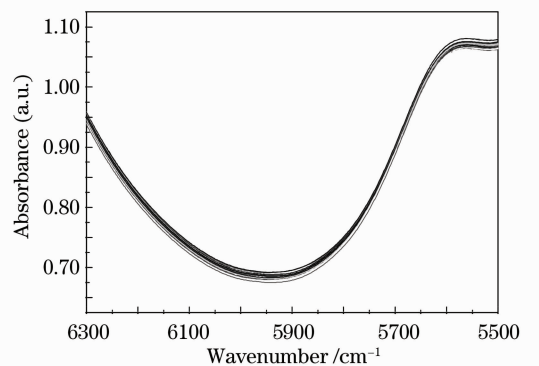
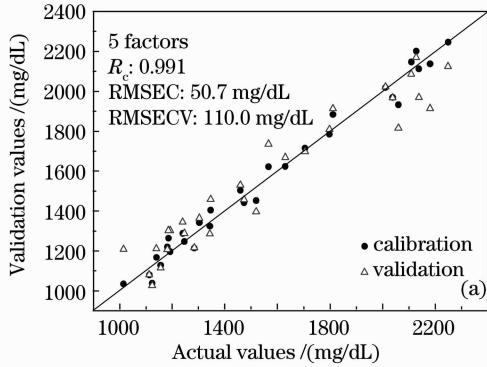


图1 相同光程下样品在  $6300 \sim 5500 \text{ cm}^{-1}$  波段光谱  
Fig.1 Absorbance spectra of samples with the same optical path length over  $6300 \sim 5500 \text{ cm}^{-1}$

为 0.991, 定标标准差(RMSEC)为 50.7 mg/dL, 交叉检验标准差(RMSECV)为 110.0 mg/dL。

对样品光谱进行 MSC 处理后定标, 分析结果如图 2(b)所示。定标相关系数  $R_c$  为 0.992, RMSEC 为 49.6 mg/dL, RMSECV 为 103.0 mg/dL。得到的结



果与 MSC 处理前非常接近, 略有提高。这是因为样品本身是透明溶液, 不存在散射, 而且 30 份样品的结果是在同一光程下测量得到的, 由散射和不同光程引起的光谱差异问题可忽略, 只残余少量由于装样误差引起的基线漂移, 所以 MSC 效果不显著。

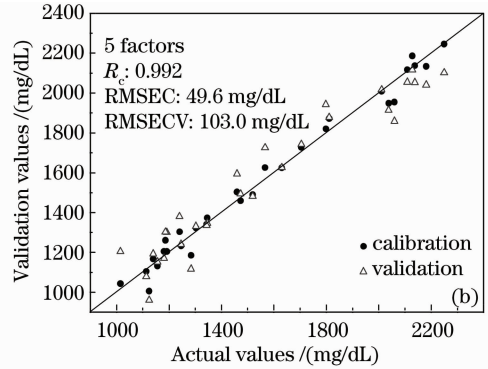


图 2 相同光程下定标结果。(a) MSC 处理前; (b) MSC 处理后

Fig. 2 Concentration correlation plots for samples with the same optical path length. (a) Before MSC treatment; (b) after MSC treatment

加入光程差异信息的 30 幅不同光程的模拟血清样品光谱如图 3 所示。同样采用 PLS 对样品建立模型, 结果如图 4(a)所示。引入不定光程干扰后, RMSECV 由 110.0 mg/dL 升至 156.0 mg/dL, 模型预测精度明显下降。事实上, 第 2 组光谱的样品化学成分含量与第 1 组光谱完全一样, 唯有样品光程信息不同。根据 PLS 算法原理, 当样品光程存在差异时, 光程引起的吸光度变化会影响主成分的计算和模型的建立。然而由朗伯-比尔定律可知, 光程引起的这部分吸光度改变只反映了样品全波段光谱的线性变化, 而与待测样品化学成分浓度无关, 故其会对定标模型精度产生不利影响。从数值上看,

模型精度下降近 50%。

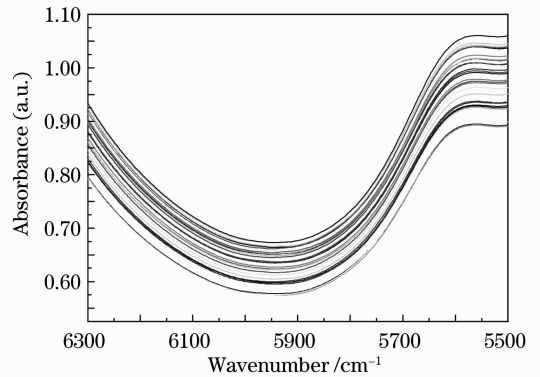


图 3 不同光程下样品在 6300~5500  $\text{cm}^{-1}$  波段光谱  
Fig. 3 Absorbance spectra of samples with different optical path lengths over 6300~5500  $\text{cm}^{-1}$

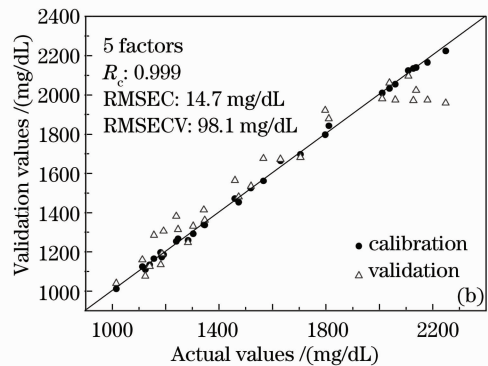
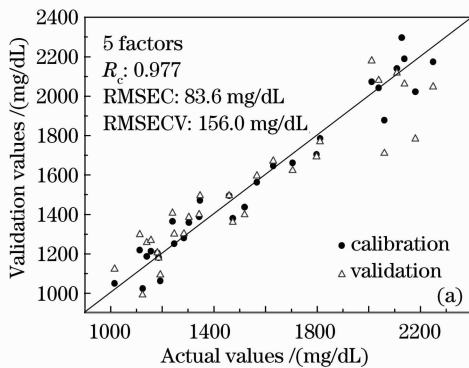


图 4 不同光程下定标结果。(a) MSC 处理前; (b) MSC 处理后

Fig. 4 Concentration correlation plots for samples with different optical path lengths. (a) Before MSC treatment; (b) after MSC treatment

采用 MSC 算法对不定光程光谱进行校正,定标分析结果如图 4(b)所示。主因子数为 5 时定标相关系数  $R_c$  达到了 0.999, RMSECV 下降至 98.1 mg/dL。

根据(6)式,在各条不同光程下的样品光谱向理想光谱  $A^0$  校正的过程中,通过对  $b_i$  的加减运算和对  $m_i$  的乘除运算,理论上能够将每条光谱的光程校正到同一光程  $\bar{l}$  下,消除由光程差异引起的光谱线性变化,校正不定光程影响。图 4 中的结果也证明了这一点, MSC 处理后的模型精度与校正前相比获得了大幅度提升,与相同光程样品定标的模型精度相当。此即表明,完全可以通过 MSC 算法抑制样品光谱中由光程差异信息带来的干扰,解决基于血流容积变化的光谱相减方法面临的不定光程影响问题。

## 4 结 论

为论证不定光程对模型精度的影响,配制了 30 份模拟血清样品,利用可变光程样品池实现 30 份样品的光程控制,通过两组样品的定标结果比较了不定光程对模型精度的影响程度,同时利用光谱预处理算法 MSC 对不定光程样品厚度信息进行了校正,获得了较好的分析结果, RMSECV 由 156.0 mg/dL 降低至 98.1 mg/dL。实验结果表明在近红外光谱无创生化检测中,采用血流容积光谱相减法产生的不定光程影响可以通过适当的光谱预处理算法校正。

## 参 考 文 献

- Huang Furong, Pan Tao, Zhang Ganlin *et al.*. Rapid measurement of zinc contents in soils by near infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 586~592  
黄富荣,潘涛,张甘霖等.应用近红外漫反射光谱快速测定土壤锌含量[J].*光学精密工程*, 2010, **18**(3): 586~592
- Li Gang, Zhao Jing, Li Jiaying *et al.*. Visible-infrared reflectance spectroscopy applied in rapid screen of diseases[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0317001  
李刚,赵静,李家星等.可见-近红外反射光谱用于疾病快速筛查[J].*光学学报*, 2011, **31**(3): 0317001
- Guo Weiliang, Wang Dan, Song Jia *et al.*. Simultaneous and rapid quantitative analysis of four components in cordyceps militaris mycelium powder using near infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0230002  
郭伟良,王丹,宋佳等.近红外光谱法同时快速定量分析蛹虫草菌丝体中 4 种有效成分[J].*光学学报*, 2011, **31**(2): 0230002
- H. M. Heise. Glucose Measurements by Vibrational Spectroscopy. John M. Chalmers ed.. Handbook of Vibrational Spectroscopy [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002. 3280~3294

- S. F. Malin, T. L. Ruchti, T. B. Blank *et al.*. Noninvasive prediction of glucose by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Clinical Chemistry*, 1999, **45**(9): 1651~1658
- V. Saptari, K. Youcef-Toumi. Design of a mechanical-tunable filter spectrometer for noninvasive glucose measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2680~2688
- J. Chen, M. A. Arnold, G. W. Small. Comparison of combination and first overtone spectral regions for near-infrared calibration models for glucose and other biomolecules in aqueous solutions[J]. *Analytical Chemistry*, 2004, **76**(18): 5405~5413
- K. Maruo, T. Oota, M. Tsurugi *et al.*. New methodology to obtain a calibration model for noninvasive near-infrared blood glucose monitoring [J]. *Applied Spectroscopy*, 2006, **60**(4): 441~449
- K. Maruo, T. Oota, M. Tsurugi *et al.*. Noninvasive near-infrared blood glucose monitoring using a calibration model built by a numerical simulation method; trial application to patients in an intensive care unit[J]. *Applied Spectroscopy*, 2006, **60**(12): 1423~1431
- Yang Haomin, Lu Qipeng. Study on measurement of cholesterol in serum by near-infrared spectroscopy and applicability of models [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(2): 375~378  
杨皓旻,卢启鹏.血清中胆固醇的近红外光谱测量及模型适用性研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(2): 375~378
- Huang Furong, Luo Yunhan, Zheng Shifu *et al.*. Near-infrared spectroscopic analysis and model optimization on cholesterol and triglyceride in whole blood [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1030001  
黄富荣,罗云瀚,郑仕富等.全血胆固醇、甘油三酯近红外光谱分析与模型优化[J].*光学学报*, 2011, **31**(10): 1030001
- Chen Xingdan, Wang Dongmin, Lu Qipeng *et al.*. Progress of MIR non-invasive blood glucose determination and effect of stratum corneum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900105  
陈星旦,王动民,卢启鹏等.中红外无创血糖研究进展并论角质层影响[J].*光学学报*, 2011, **31**(9): 0900105
- Li Xiang, Zhang Guangjun, Li Qingbo. An improved wavelet analysis preprocessing method applied to mid-IR blood glucose non-invasive measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 579~584  
李响,张广军,李庆波.一种血糖红外无创检测的改进小波预处理方法[J].*光学学报*, 2010, **30**(2): 579~584
- M. A. Arnold, G. W. Small. Noninvasive glucose sensing [J]. *Analytical Chemistry*, 2005, **77**(17): 5429~5439
- Ding Haiquan, Lu Qipeng, Peng Zhongqi *et al.*. Progress in noninvasive biochemical examination by near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(8): 2107~2110  
丁海泉,卢启鹏,彭忠琦等.近红外光谱技术用于无创生化检验研究的进展[J].*光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(8): 2107~2110
- K. Yamakoshi, Y. Yamakoshi. Pulse glucometry: a new approach for noninvasive blood glucose measurement using instantaneous differential near-infrared spectrophotometry [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2006, **11**(5): 054028
- Liu Rong, Xu Kexin, Chen Wenliang *et al.*. The main problems and research progress of optical non-invasive blood glucose monitoring [J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics, Astronomy*, 2007, **37**(supplement): 124~131  
刘蓉,徐可欣,陈文亮等.光学无创血糖检测中的主要问题及研究进展[J].*中国科学 G 辑:物理学力学天文学*, 2007, **37**(增刊): 124~131
- Li Gang, Li Xiaoxia, Lin Ling *et al.*. Study on dynamic spectrum and its frequency domain extracting method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(2): 263~266  
李刚,李晓霞,林凌等.消除个体条件测量差异的动态光谱

- 及其频域提取法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(2): 263~266
- 19 Chen Xingdan. Possibility of noninvasive clinical biochemical examination by near infrared spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 759~763  
陈星旦. 近红外光谱无创生化检验的可能性[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(5): 759~763
- 20 Ding Haiquan, Lu Qipeng, Wang Dongmin *et al.*. Research on the effective signal extraction in the noninvasive blood glucose sensing by near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(1): 50~53  
丁海泉, 卢启鹏, 王动民等. 近红外光谱无创血糖检测中有效信号提取方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(1): 50~53
- 21 Zhang Qianxuan, Zhang Guangjun, Li Qingbo. A path-length correction method on biochemical parameter nondestructive measuring of folium[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5): 1310~1314  
张倩暄, 张广军, 李庆波. 一种植物叶片生化成分光谱无损检测的光程长校正方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(5): 1310~1314
- 22 Y. Yang, O. O. Soyemi, M. R. Landry. Noninvasive *in vivo* measurement of venous blood pH during exercise using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, **61**(2): 223~229
- 23 P. Geladi, D. MacDougall, H. Martens. Linearization and scatter-correction for near infrared reflectance spectra of meat[J]. *Applied Spectroscopy*, 1985, **39**(3): 491~500

栏目编辑: 李文喆