

基于 NLMS 自适应滤波的近红外光谱去噪 处理方法研究

陈 丛^{1,2} 卢启鹏¹ 彭忠琦¹

(¹ 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)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了去除直接采集的近红外(NIR)光谱中含有的噪声,将归一化最小均方(NLMS)自适应滤波方法引入到 NIR 光谱去噪领域中。以 51 份土壤样品的 NIR 光谱为研究对象,探讨 NLMS 自适应滤波方法在 NIR 光谱预处理中的应用,并将处理后的结果与土壤中有机质的含量相关联,建立模型。结果表明,通过 NLMS 自适应滤波去噪后的光谱,预测集的相关系数 r 由处理前的 0.8284 提高至 0.9654,预测均方根误差(RMSEP)由处理前的 0.3385 降至 0.1606。由此可见,NLMS 自适应滤波对 NIR 光谱的去噪有显著效果,可以有效地提高光谱的分析精度和模型的稳健性,为 NIR 光谱的预处理提供了一种新方法。

关键词 光谱学;预测均方根误差;相关系数;归一化最小均方自适应滤波;去噪

中图分类号 O657.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0530001

Preprocessing Methods of Near-Infrared Spectrum Based on NLMS Adaptive Filtering

Chen Cong^{1,2} Lu Qipeng¹ Peng Zhongqi¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The normalized least mean square(NLMS) adaptive filtering method is introduced to get the preprocessing of near-infrared (NIR) spectrum in order to deduct the noise from Near-infrared spectrum. Fifty-one soil samples are served as the target and the application of NLMS adaptive filtering method in NIR spectrum preprocessing is discussed. The result after denoising is related to the real organic content of soil samples, then constructing a model according to this. Experimental results show that the correlation coefficient of the prediction set is improved from 0.8284 to 0.9654, and the root mean square error of prediction (RMSEP) is reduced from 0.3385 to 0.1606 after denoising with NLMS adaptive filter. So NLMS adaptive filter has a good effect in denoising the NIR spectrum. And it is also very useful to make the final model more representative, stable and robust. NLMS adaptive filter provides a new method for near-infrared spectrum preprocessing.

Key words spectroscopy; root mean square error of prediction; related coefficient; normalized least mean square adaptive filtering; denoising

OCIS codes 300.6340; 070.4790; 070.1170

1 引 言

近年来,近红外(NIR)光谱分析技术以其分析

速度快、无污染和无损伤等优点,被广泛应用于农业、食品和医药等领域^[1~6]。但在分析过程中,由光

收稿日期: 2011-11-10; 收到修改稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(60878052,60938002,61078038)、应用光学国家重点实验室开放基金(Y1Q03FQ113)、中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(Y00232Q100)和吉林省科技发展计划(Y0543UQ100)资助课题。

作者简介: 陈 丛(1986—),女,博士研究生,主要从事近红外光谱分析技术方面的研究。E-mail: ccangel1111@163.com

导师简介: 卢启鹏(1964—),男,研究员,主要从事光谱技术方面的研究。E-mail: luqipeng@126.com

(通信联系人,中国光学学会会员号: 1309129)

谱仪直接获取的光谱经常由于温度、湿度、仪器的不稳定、电阻的热效应及测量的随机误差等因素干扰,使待测样品的光谱含有噪声,最终导致物质成分测量的误差增大^[7~9]。因此对原始 NIR 光谱进行去噪预处理是很有必要的^[10]。

NIR 光谱去噪处理的效果对最终建立光谱预测模型的稳定性和预测精度有重要的意义^[7]。目前,国内外常用的 NIR 光谱去噪预处理方法有微分法、平滑法、傅里叶变换滤波法和小波变换法等^[11]。其中微分法对消除基线漂移、强化谱带特征以及克服谱带重叠有很好的效果,但原始光谱经微分后光谱噪声会增大,需要进一步的光谱去噪处理。平滑法可以有效地平滑信号中的高频噪声,提高信噪比,但也会对分析信号进行平滑,改变了光谱的谱形,造成信号失真^[12]。傅里叶变换滤波法应用于光谱信号预处理,主要有光谱特征提取和滤波的作用,此方法通过傅里叶变换将时域信号与频域信号分开,以信号不变的频率特性为前提,对平稳信号有很好的去噪效果。小波变换法是目前广泛使用的 NIR 光谱预处理方法之一,它可以只对特定频率或时刻的局部信号进行频谱处理,不影响整体信号,去噪效果好,无失真,且对非平稳信号的处理也有独特的优势,但小波变换运算复杂,实现速度较慢^[13~15]。自适应滤波方法是 20 世纪 60 年代由 Kalman^[16] 在卡尔曼滤波的基础上提出的,它兼具了卡尔曼滤波运算量小、速度快、可递推实时处理的优点,并在此基础上加以改进,使其不需要已知信号的统计特性,通过自动调节自身的参数也可以达到最优滤波。正是由于自适应滤波的这些优点,使其现已广泛应用于激光、地质和医学等领域。

本文将自适应滤波方法引入 NIR 光谱的去噪领域,旨在探索 NIR 光谱去噪领域的新方法。以 51 份东北土壤样品的 NIR 光谱为研究对象,采用归一化最小均方(NLMS)自适应滤波方法对其进行处理,并将处理后的光谱与土壤中有机质含量相关联,建立定标模型,计算预测集的相关系数。

2 NLMS 自适应滤波的去噪原理

2.1 NLMS 自适应滤波器的基本原理

最小均方(LMS)误差自适应滤波器是将输入信号 $x(t)$ 通过系数可调的加权滤波器后,与期望的参考信号 $d(t)$ 比较,得到误差信号 $e(t)$ 。采用特定

的滤波算法调节滤波器权系数 $w(t)$,最终使误差信号的均方差 $E[e^2(t)]$ 达到最小值,滤波器的输出更接近期望参考信号,达到最优滤波^[17,18]。

由于均方误差信号 $E[e^2(t)]$ 是滤波器权系数 $w(t)$ 的二次函数,其曲线为二维抛物面。自适应滤波过程,即从抛物面上任意点寻找曲面最低点的过程。LMS 算法是实现这一过程的一种优化方法,它利用瞬时平方误差分析自适应滤波的性能,寻找最佳的滤波状态。由 LMS 可以推出滤波器权系数的递推公式为

$$w(t+1) = w(t) + 2\mu e(t)x(t), \quad (1)$$

式中 μ 为步长因子,用于控制自适应滤波的收敛速度。收敛速度和收敛精度决定了自适应滤波的性能。增大步长因子 μ 可提高收敛速度,但会降低收敛精度;反之减小 μ 会提高收敛精度,降低收敛速度。因此固定的 μ 很难兼顾收敛速度和精度。

NLMS 算法是针对上述矛盾提出的一种变步长自适应滤波算法。它在滤波的初始阶段,步长较大,收敛速度较快;当算法收敛后,减小步长 μ ,以保证较高的收敛精度。由 NLMS 可推出滤波权系数递推公式为

$$w(t+1) = w(t) + \frac{\mu}{\gamma + x^T(t)x(t)} e(t)x(t), \quad (2)$$

式中 γ 是为了避免 $x^T(t)x(t)$ 过小而设定的参数,通常情况下 γ 的取值范围为 $0 \leq \gamma \leq 1$ 。

2.2 NIR 土壤光谱的自适应滤波去噪原理

2.2.1 NLMS 自适应滤波基本原理

由自适应滤波的基本原理可知,NLMS 自适应滤波器的实现需要已知输入信号的期望信号作为参考信号。但在 NIR 土壤光谱的去噪处理中,很难预先已知光谱信息来构建参考信号,因此常规的自适应滤波器很难满足要求。图 1 所示自适应滤波器结构是在传统自适应滤波器的基础上产生的,它不需要已知待测样品的光谱信息,只需已知样品光谱的相关信号,即可达到去噪效果。图 1 中, $x(\lambda)$ 为输入的含噪光谱信号,由实际光谱信号 $s(\lambda)$ 和噪声信号 $n(\lambda)$ 组成, $d(\lambda)$ 为与输入光谱信号相关的参考信号,由实际光谱的相关信号 $s'(\lambda)$ 和噪声信号 $n'(\lambda)$ 组成, $e(\lambda)$ 为误差信号, $y(\lambda)$ 为输出信号。

其中噪声信号 $n(\lambda)$ 和 $n'(\lambda)$ 为不考虑光谱仪器自身的信号失真、仪器探测器的工作点位置和有效动态范围等因素时的白噪声。

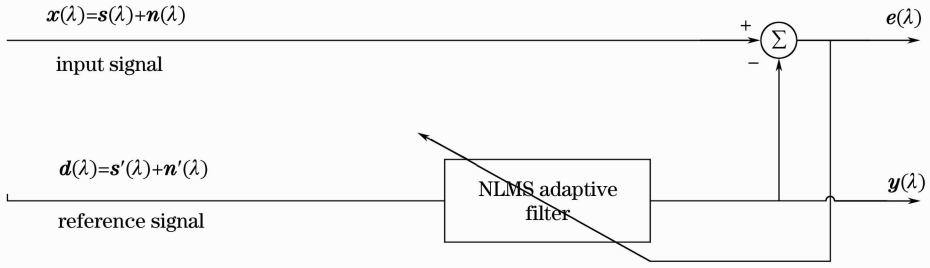


图 1 改进的 NLMS 自适应滤波器原理图

Fig. 1 Principle of the improved NLMS adaptive filter

由图 1 可知

$$\mathbf{x}(\lambda) = \mathbf{s}(\lambda) + \mathbf{n}(\lambda), \quad (3)$$

$$\mathbf{d}(\lambda) = \mathbf{s}'(\lambda) + \mathbf{n}'(\lambda), \quad (4)$$

$$\mathbf{e}(\lambda) = \mathbf{x}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda), \quad (5)$$

可得

$$\mathbf{e}(\lambda) = \mathbf{s}(\lambda) + \mathbf{n}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda). \quad (6)$$

均方误差信号可表示为

$$E[\mathbf{e}^2(\lambda)] = E\{\mathbf{n}^2(\lambda) + [\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]^2 + 2\mathbf{n}(\lambda)[\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]\},$$

展开得

$$E[\mathbf{e}^2(\lambda)] = E[\mathbf{n}^2(\lambda)] + E\{[\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]^2\} + 2E[\mathbf{n}(\lambda)\mathbf{s}(\lambda)] - 2E[\mathbf{n}(\lambda)\mathbf{y}(\lambda)]. \quad (7)$$

(7)式中,由于光谱信号 $\mathbf{s}(\lambda)$ 与噪声信号 $\mathbf{n}(\lambda)$ 不相关,可得 $2E[\mathbf{s}(\lambda)\mathbf{n}(\lambda)] = 0$ 。在参考信号 $\mathbf{d}(\lambda)$ 中, $\mathbf{s}'(\lambda)$ 与光谱信号 $\mathbf{s}(\lambda)$ 相关,则与 $\mathbf{n}(\lambda)$ 不相关。 $\mathbf{n}'(\lambda)$ 与 $\mathbf{n}(\lambda)$ 同为随机噪声,互相也不具有相关性。因此参考信号 $\mathbf{d}(\lambda)$ 与输入的噪声信号 $\mathbf{n}(\lambda)$ 不相关,通过自适应滤波器后的输出信号 $\mathbf{y}(\lambda)$ 也与 $\mathbf{n}(\lambda)$ 不相关。

由此可得, $-2E[\mathbf{n}(\lambda)\mathbf{y}(\lambda)] = 0$ 。则(7)式可简化为

$$E[\mathbf{e}^2(\lambda)] = E[\mathbf{n}^2(\lambda)] + E\{[\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]^2\}. \quad (8)$$

NLMS 自适应滤波过程,即寻找 $E[\mathbf{e}^2(\lambda)]$ 最小值的过程。当自适应调整使 $E[\mathbf{e}^2(\lambda)]$ 为最小值时, $E\{[\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]^2\}$ 取得最小值。理想情况下, $E\{[\mathbf{s}(\lambda) - \mathbf{y}(\lambda)]^2\} = 0$,即 $\mathbf{s}(\lambda) = \mathbf{y}(\lambda)$ 。输出信号即为纯净的光谱信号,输入信号中的噪声得到了有效地去除。

2.2.2 参考信号的获取

自适应滤波实现的关键是参考信号的获取。由上述 NLMS 自适应滤波的基本原理可知,NIR 土壤光谱的去噪需要已知土壤光谱的相关信号作为参考信号。本文根据土壤成分短时间内含量稳定的性

质,采用分时测量的方法获取参考信号。

同一土壤样品在短时间内不改变实验条件时,测得任意时刻 t_1 时刻的 NIR 光谱 $\mathbf{x}_1(\lambda)$ 为 $\mathbf{x}_1(\lambda) = \mathbf{s}_1(\lambda) + \mathbf{n}_1(\lambda)$ 。 $\mathbf{s}_1(\lambda)$ 和 $\mathbf{n}_1(\lambda)$ 分别表示纯净的土壤 NIR 光谱和光谱中含有的噪声。同理,短时间内的另一时刻 t_2 的光谱 $\mathbf{x}_2(\lambda)$ 为 $\mathbf{x}_2(\lambda) = \mathbf{s}_2(\lambda) + \mathbf{n}_2(\lambda)$ 。由于短时间内土壤中各组分的含量不变,因此不同时刻(t_1, t_2)纯净土壤的光谱相关性很高,即 $\mathbf{s}_1(\lambda)$ 与 $\mathbf{s}_2(\lambda)$ 具有很强的相关性,则 $\mathbf{s}_1(\lambda)$ 与 $\mathbf{x}_2(\lambda)$ 也相关。而 $\mathbf{n}_1(\lambda)$ 是随机噪声,与 $\mathbf{x}_2(\lambda)$ 不相关。可见, t_2 时刻的光谱 $\mathbf{x}_2(\lambda)$ 满足自适应滤波所需参考信号的要求。

3 实验部分

3.1 样品与仪器

实验采用 51 份吉林省东北部地区黑质土壤作为样品。土壤样品经风干后采用旋风磨粉碎,再经过 1 mm 的孔筛选,得到粉末样品。本实验对处理后的 51 份样品进行 NIR 光谱扫描并测定其中的有机质含量,而后利用 TQ Analyst 软件对 51 份样品集进行划分,其中 42 个作为校正集,9 个为预测集。

实验仪器采用 NEXUS 6700 傅里叶变换型 NIR 光谱分析仪。

3.2 NIR 光谱的采集

将样品放入样品池中,采用漫反射方式测量。仪器探测器选用 InGaAs 光电探测器,波数范围为 4000~10000 cm^{-1} ,分辨率为 8 cm^{-1} ,扫描次数 16 次,采集每份样品不同时刻的光谱 2 幅。

4 实验结果与讨论

4.1 基于自适应滤波的 NIR 光谱去噪处理

在 Matlab 软件平台上对 NIR 光谱进行预处理。图 2(a)和(b)分别为 t_1 和 t_2 时刻 51 份土壤样品的 NIR 光谱图,可以看出,光谱曲线不够平滑,随

机噪声较大。采用 NLMS 自适应滤波方法对光谱进行去噪处理,根据滤波器响应速度和精度的要求,选择滤波阶数为 30。利用最优步长选择算法计算出步长因子为 0.1。将 t_1 时刻的光谱作为待处理信号, t_2 时刻的光谱作为参考信号通入自适应滤波器,得到 51 份土壤样品处理后的光谱如图 3 所示。对比图 2(a)和(b),可见算法收敛后,光谱曲线变得平滑,随机噪声得到明显的抑制。

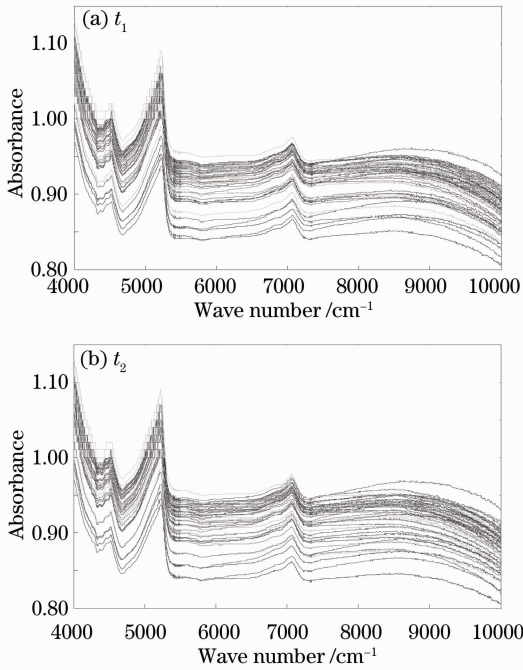


图 2 51 份土壤样品的 NIR 光谱
Fig. 2 NIR spectra of the fifty-one soil samples

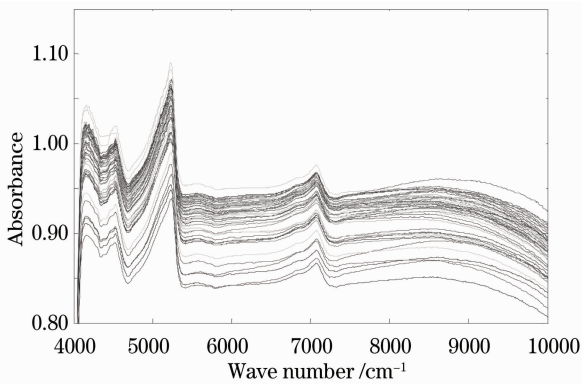


图 3 自适应滤波去噪后 51 份土壤样品 NIR 光谱
Fig. 3 Denoised NIR spectra using adaptive filter of fifty-one soil samples

图 4 为 1 号样品的 NIR 光谱图,图 5 中(a)为自适应滤波去噪后的 1 号样品图,可以更明显的看出算法收敛后的光谱噪声明显减小。作为比较,1 号土壤样品的光谱采用小波软阈值法进行去噪处

理,变换时的母小波选用扩展性较好的 db8 小波,阈值选择方式选用 sigsure 的软阈值方式,分解层数为 4,处理后的光谱图如图 5(b)所示。可见,两种预处理方法都有较强的去噪能力,与图 4 中的光谱相比,处理后谱图的噪声明显减小,曲线的平滑度增强,且整体光谱形状没有变化。

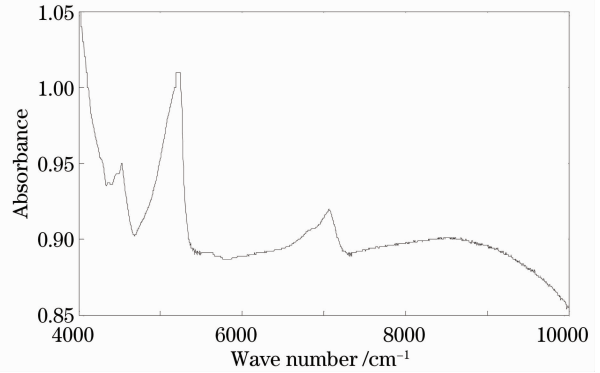


图 4 1 号土壤样品的 NIR 光谱
Fig. 4 NIR spectrum of No. 1 soil sample

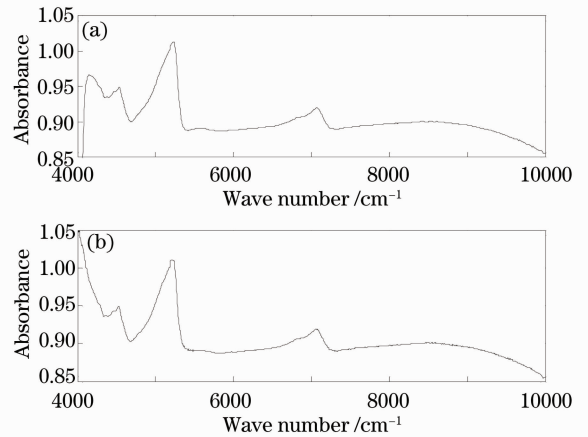


图 5 自适应滤波和小波变换去噪后的 1 号土壤样品光谱
Fig. 5 De-noised spectra of No. 1 soil sample by adaptive filter and wavelet transform

4.2 两种预处理方法结果对比

在 TQ Analyst 分析软件中,结合 51 份土壤样品的有机质含量,将样品集中的 42 份作为校正集,9 份作为预测集。采用偏最小二乘法(PLS)分别将处理前后的光谱数据与土壤中化学方法测定的有机质含量相关联,并建立校正模型。利用此校正模型对 9 份预测集样品光谱进行预测,得到预测集相关系数 r 和预测均方根误差(RMSEP)。表 1 中列出了利用自适应滤波和小波变换两种预处理方法去噪后的土壤 NIR 光谱分析有机质含量和化学方法测定其含量的偏差,并将其数据与处理前光谱分析所得

数据相比。结果表明,自适应滤波去噪处理后的分析结果有明显的改善, r 由原来的 0.8284 提高至 0.9654, RMSEP 由原来的 0.3385 降至 0.1606, NIR 光谱的分析精度和模型的稳健性均得到有效的提高。小波变换去噪处理后的 r 为 0.9575, RMSEP 为 0.1801,可见小波变换去噪后的光谱也

能达到很好的分析效果,但与自适应滤波去噪相比,自适应滤波方法的分析精度更高。由上述分析结果可知,自适应滤波应用于 NIR 光谱预处理中,能够取得较好的效果。与小波变换相比,自适应滤波的自适应性更好,且不需要选择母小波,计算量小,运算速度快,更增加了分析结果的有效性。

表 1 两种光谱预处理方法土壤 NIR 分析有机质含量与真实化学值

Table 1 Prediction results of the organic substance of soil by NIR spectra denoised with two denoising methods and their chemical value

Sample number	Reference value / %	Original spectrum		NLMS adaptive filter denoising		Wavelet denoising	
		Predicted value / %	Bias / %	Predicted value / %	Bias / %	Predicted value / %	Bias / %
1	1.94	2.15	0.21	1.95	0.01	2.23	0.27
2	2.98	2.84	-0.14	2.86	-0.12	2.76	-0.20
3	2.28	2.29	0.01	2.17	-0.11	2.11	-0.11
4	2.76	2.65	-0.11	2.71	-0.05	2.56	-0.17
5	2.28	2.23	-0.05	2.41	0.13	2.02	-0.22
6	3.68	2.72	-0.96	3.28	-0.40	3.43	-0.23
7	3.13	3.30	0.17	3.27	0.14	3.12	-0.01
8	3.46	3.42	-0.04	3.45	-0.01	3.43	-0.02
9	2.18	2.21	0.03	2.26	0.08	2.37	0.19
r		0.8284		0.9654		0.9575	
RMSEP		0.3385		0.1606		0.1801	

5 结 论

在 NIR 光谱去噪领域中引入 NLMS 自适应滤波方法,并利用此方法对 51 份土壤样品的 NIR 光谱进行处理。结果表明,处理后光谱的 r 由处理前的 0.8284 提升至 0.9654, RMSEP 由 0.3385 降至 0.1606,证实了该处理方法的有效性。由于自适应滤波具有运算量小、运算速度快和算法简单等优点,因此可以作为 NIR 光谱去噪处理的一种有效方法。

参 考 文 献

- 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 NIR 光谱分析与模型优化[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1030001
- Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Preprocessing methods of near-infrared spectra for simplifying prediction model of sugar content of apples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 136~140
- 赵杰文, 张海东, 刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 136~140
- Lu Wanzhen. *Modern Near Infrared Spectroscopy Analysis Technology*[M]. Second Edition. Beijing: Chinese Petrochemical Press, 2007. 35~40
- 陆婉珍. *现代近红外光谱分析技术*[M]. 第 2 版. 北京: 中国石化

出版社, 2007. 35~40

- Huang Furong, Pan Tao, Zhang Ganlin *et al.*. Rapid measurement of zinc contents in soils by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 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
- Sun Guangming, Liu Fei, Zhang Fan *et al.*. Fast determination of proline in herbicide-stressed oilseed rape leaves based on near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1192~1193
- 孙光明, 刘飞, 张帆等. 基于近红外光谱技术检测除草剂胁迫下油菜叶中脯氨酸含量的方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1192~1193
- Gao Jianshu, Han Renyi, Yu Zhijing *et al.*. Near-infrared multispectral solution to ice detection on CF composite material wings[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2011, **19**(6): 1250~1255
- 高建树, 韩仁义, 于之靖等. 复合材料结构机翼表面残冰的近红外多光谱检测[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1250~1255
- Cai Jianhua, Wang Xianchun. Preprocessing methods of near-infrared spectra based on EMD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 267~271
- 蔡剑华, 王先春. 基于经验模态分解的近红外光谱预处理方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 267~271
- Li Hui, Lin Qizhong, Wang Qinjun *et al.*. Preprocessing methods of spectra based on the combination of wavelet and mathematical [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(3): 644~648
- 李慧, 蔺启忠, 王钦军等. 基于小波包变换和数学形态学结合的光谱去噪方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(3): 644~648

- 9 Chen Xingdan, Wang Dongmin, Lu Qipeng *et al.*. Process of MIR non-invasive blood glucose determination 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
- 10 Liu Rong, Xu Kexin, Chen Wenliang *et al.*. Primal problem and headway of optics noninvasive glucose sensing[J]. *China Science: Physics Mechanics Astronomy*, 2007, **37**(Supp.): 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): 124~131
- 11 Yan Yanlu. The Basic and Application of Near-Infrared Spectra Analysis[M]. First Edition. China Light Industry Press, 2005. 103~107
严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 第 1 版, 中国轻工业出版社, 2005. 103~107
- 12 Tian Gaoyou, Yuan Hongfu, Chu Xiaoli *et al.*. Near infrared spectra analysis of octane number by wavelet denoising derivative method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(4): 516~520
田高友, 袁洪福, 褚小立等. 结合小波变换与微分方法改善近红外光谱分析精度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(4): 516~520
- 13 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Research and improvement of denoising method of fiber optic gyroscope based on wavelet packet analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2224~2228
李家垒, 许化龙, 何婧. 光纤陀螺信号的小波包去噪及改进[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2224~2228
- 14 Hao Yong, Chen Bin, Zhu Rui. Analysis of several methods for wavelet denoising used in near infrared spectrum pretreatment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(10): 1838~1842
郝勇, 陈斌, 朱锐. 近红外光谱预处理中几种小波消噪方法的分析[J]. *光学与光谱分析*, 2006, **26**(10): 1838~1842
- 15 Li Suwen, Xie Pinhua, Li Yujin *et al.*. Wavelet transform based differential optical absorption spectroscopy data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1601~1604
李素文, 谢品华, 李玉金等. 基于小波变化的差分吸收光谱数据处理方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1604~1604
- 16 Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, 1960, **82**: 35~45
- 17 Jiang Yinping, Li Yanwen. The pulse wave signal processing based on a lifting way[J]. *Computer Simulation*, 2006, **23**(7): 98~100
姜印平, 李艳文. 基于提升方法的脉搏波信号处理[J]. *计算机仿真*, 2006, **23**(7): 98~100
- 18 Liang Min, Liu Guixi. Multi-object tracking algorithm based on adaptive mixed filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2554~2561
梁敏, 刘贵喜. 基于自适应混合滤波的多目标跟踪算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2554~2561

栏目编辑: 李文喆