

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.021

猪肉肌内脂肪含量的可见/近红外光谱在线检测*

廖宜涛 樊玉霞 伍学千 成芳

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029)

【摘要】 研究基于可见/近红外光谱分析技术的新鲜猪肉肌内脂肪含量在线检测。实验样本为208份背最长肌,实验时样品以0.25 m/s的速度运动,采集可见/近红外漫反射光谱,进行小波消噪处理后,结合不同的光谱预处理方法建立肌内脂肪含量的偏最小二乘回归模型。研究发现采用db6小波在6层分解后以极大极小原理选择阈值进行消噪效果较好;消噪的光谱直接建立的PLSR模型预测性能较差,经过多元散射校正、变量标准化及微分等预处理均能提高模型的预测性能;变量标准化结合一阶微分预处理后建立的模型性能最佳,校正集相关系数为0.892、验证集相关系数为0.834、校正集均方根误差为0.090、预测集均方根误差为0.080。结果表明可见/近红外光谱可用于肌内脂肪含量的在线检测,但模型相对分析误差最高为1.738,模型的精度和稳定性仍需进一步提高。

关键词: 猪肉 肌内脂肪含量 在线检测 小波消噪 偏最小二乘法 可见/近红外光谱

中图分类号: O657.33; S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0104-04

On-line Prediction of Intramuscular Fat Content in Pork Muscle with Visible/Near-infrared Spectroscopy

Liao Yitao Fan Yuxia Wu Xueqian Cheng Fang

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract

Prediction ability of visible/near-infrared spectroscopy for intramuscular fat content assessment on-line was studied. Totally 208 longissimus dorsi muscle samples were collected from different carcasses. Sample spectra were scanned while the samples were moving at the speed of 0.25 m/s. Wavelet transform was employed to eliminate the spectra noise. Partial least squares regression (PLSR) based on the de-noised spectra, combined with different pretreatment methods, was explored to predict intramuscular fat. Daubechies of vanishing moment-6 at decomposition level 6 with the minimax threshold gave good de-noising results. PLSR model based on the de-noised spectra without any pretreatment had poor prediction performances. And through pretreatment, including multiplicative signal correction (MSC), standard normalized variate (SNV) and derivative, the performances are improved. The first derivative spectral in conjunction with SNV yielded the best PLSR model with correlation coefficient of 0.892 and 0.834 in calibration and validation sets, respectively, along with root mean square error of calibration of 0.090 and root mean square error of 0.080 for validation. Results indicate that it is possible to predict intramuscular fat content on-line. However, the best ratio of the standard deviation to the SEP of the validation set (RPD) value was 1.738, and the accuracy and the robustness of the model needed further improvement for practical on-line application.

Key words Pork, Intramuscular fat content, On-line prediction, Wavelet de-noising, Partial least squares regression, Visible/near-infrared spectroscopy

收稿日期: 2009-11-10 修回日期: 2010-03-04

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z215)和浙江省自然科学基金资助项目(Y307441)

作者简介: 廖宜涛, 博士生, 主要从事农畜产品品质无损检测研究, E-mail: liaoyitao@gmail.com

通讯作者: 成芳, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉技术、自动化控制和人工智能与专家系统研究, E-mail: fcheng@zju.edu.cn

引言

猪肉的肌内脂肪含量影响猪肉的风味、嫩度和食用营养与健康^[1],对消费者的选择意向和肉制品加工都有重要影响^[2-6]。检测肌内脂肪含量时,常以背最长肌为对象,利用化学分析方法进行萃取后称量测定,耗时长,检测成本高,属于破坏性检测,不适用于规模化生产的检测要求。

可见/近红外光谱无损检测是利用检测对象的光学特性建立预测模型对其品质进行定性或定量分析的一种技术,以其快速高效、无污染及无需样品预处理等优点,在肉及肉制品的品质检测上得到了广泛的研究^[7-13]。这些研究表明利用可见/近红外光谱可以较好地预测猪肉的肌内脂肪含量,但研究多以实验室内的静态检测为主,而实施在线检测可以实现猪肉品质的智能化分级处理、监测肉制品加工过程中原料肉品质,对提高肉及肉制品的经济价值有重要意义。本文利用可见/近红外漫反射光谱对猪肉肌内脂肪含量进行在线检测,模拟在线情况采集背最长肌的漫反射光谱,进行小波消噪后建立其肌内脂肪含量的偏最小二乘回归在线检测模型,并对比不同预处理方法对预测模型的影响,确定最佳的预处理方法。

1 材料与方 法

1.1 实验材料与数据采集

实验样品为农贸市场所售当日凌晨宰杀的不同胴体上新鲜背最长肌肉,共208份,分12d购买实验。每个样品分割为2部分:一部分(25±2)mm厚,用于光谱采集;另一部分(约20mm厚)用于理化分析。肌内脂肪含量通过全自动索氏抽提系统(2050 Soxtec auto extraction unit, Foss Tecator, Sweden)测定,作为建模参考值。实验在温度22℃、湿度60%左右的实验室环境中进行。

光谱采集装置如图1所示,主要由光谱仪、光源、Y型光纤、光电传感器、光谱采集室、传输带等组成。其中光谱采集室四周封闭,以排除外部杂光干扰。鲜肉是易变质的非透光性固态生物物质材料,若透射需要光源提供较高能量,照射过程中易使局部环境温度升高,甚至引起肉品变质,因此采用漫反射式光谱;光纤的应用降低了光谱采集对光路和采集环境的要求,虽然光谱采集区域不能完全覆盖整个样品表面,但可以使采集系统的设计更适用于实际生产。光源由Y型光纤一端传导至样品表面(照射光斑直径约15mm)并在内部漫射,漫射光由接收光纤进入光谱仪,得到样品的漫反射光谱。

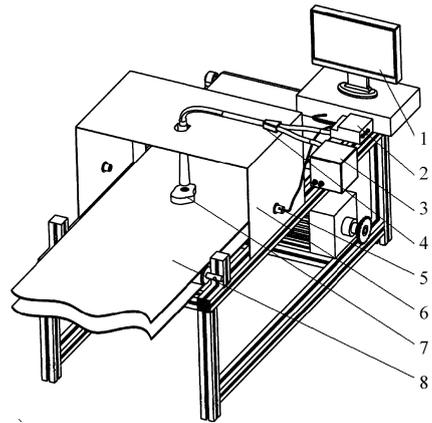


图1 样品漫反射光谱采集系统示意图

Fig.1 Scheme of on-line visible/near-infrared measurement system

1. 数据采集计算机 2. 光谱仪 3. 光源 4. 双叉光纤 5. 光电传感器 6. 光谱采集室 7. 样品 8. 传输带

采集光谱时,传输带以0.25 m/s的速度运动,样品水平放置在传输带上进入光谱采集室,光电传感器检测到进入光谱采集区域的样品,发送信号触发光谱仪,光谱仪采集样品的漫反射光谱信息。光谱仪为USB4000型光谱仪(Ocean Optics, USA),波长范围350~1000 nm;光源为HL-2000-LVF-HP型卤钨光源(Ocean Optics, USA),功率20 W。光谱采集积分时间设置为8 ms,离散扫描1次,光谱数据平滑宽度为5,数据获取方式为外部硬件触发,每个样品重复采集3次,计算平均光谱用于分析。

1.2 实验数据处理与分析

受检测器响应特性的影响,光谱两端信号失真,故取460~920 nm光谱用于分析。样品在运动过程中轻微振动,且运动的样品在光谱采集时无法通过多次离散扫描记录其平均光谱以降低随机噪音,因此采集的光谱需要进行降噪处理。

应用小波变换(wavelet transform,简称WT)去除光谱中的噪音。理想的光谱 $f(n)$ 被噪音污染后为 $s(n)$,可以表示为

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n)$$

式中 $e(n)$ ——噪音 σ ——噪音强度

WT用于去噪的步骤为:对原始光谱进行WT得到高频和低频小波系数,通过阈值法去除小波系数中被认为是表示噪音的元素,用经过处理的小波系数进行反变换即可得到去噪的光谱信号。近年来在光谱去噪处理中得到了广泛的应用^[14-16]。在降噪处理过程中,选用Daubechies(dbN)小波,采用极大极小原理选择阈值,对各层噪音分别估计后进行软门限阈值处理降噪。以所消除信号的能量比来衡量,去除噪音所占比例越大,消噪效果越好。

经过 WT 降噪处理的光谱由 PLSR 方法建立肌肉脂肪含量预测模型。模型性能以校正集、验证集的参考值与预测值相关系数 r , 校正集均方误差 R_{MSEC} , 验证集均方误差 R_{MSEP} 和验证集相对分析误差 R_{PD} 值来判断, 好的模型要求相关系数高, R_{MSEC} 和 R_{MSEP} 低且两者差异小, 相对分析误差 $R_{PD} \geq 3$ [13]。

光在运动的样品中散射时受表面形状和物理性质的影响, 利用数学方法进行预处理可减少样品物理特性对光谱的影响, 增加样品化学成分不同造成的差异, 提高模型的预测精度。本文采用多元散射校正 (multiplicative signal correction, 简称 MSC)、变量标准化 (standard normalized variate, 简称 SNV) 及微分等预处理方法。建模时, 数据均经过数据中心化处理。

2 结果与讨论

2.1 样品光谱

样品 (S1、S2) 重复 3 次采集 (T1、T2、T3) 的光谱与平均光谱 (S1M、S2M) 及光谱间的差异如图 2 所示。样品是非绝对均值材料, 3 次采集的光谱不完

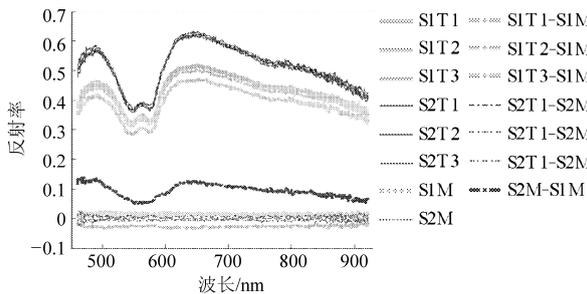


图 2 样品的光谱

Fig. 2 Spectra of pork sample

全一致; 并由于样品表面的不平整, 以及样品在运动过程中的上下振动, 采集的同一样品光谱会出现不依存于波长的基线变动, 样品 3 次采集的光谱与平均光谱间的差异近似于常数, 如图中 SIT3-S1M; 不同样品的光谱差异 (S2M-S1M) 较大, 包括因样品厚度不同引起的基线变动和样品理化特性不同引起的差异。

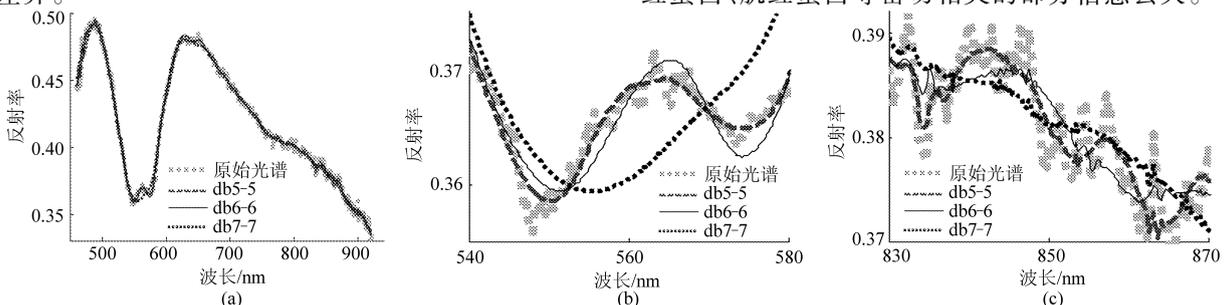


图 3 小波消噪的光谱

Fig. 3 Wavelet de-noised spectra

2.2 样品的肌肉脂肪含量

140 个样品用于校正集, 68 个样品用于验证集, 索式提取测定肌肉脂肪含量参考值统计信息如表 1 所示。所选样品肌肉脂肪含量范围为 2.438% ~ 3.573%, 在一般适口性要求的 2% ~ 4% 范围之间 [2], 但受采样地点单一的限制, 变化范围较小。样品校正集的范围覆盖了验证集的变化范围, 表明实验中校正集的样品选择具有代表性, 较合理; 验证集平均值与校正集接近, 但标准差偏低, 样品肌肉脂肪含量相对集中。

表 1 样品肌肉脂肪含量统计

Tab. 1 Statistic of intramuscular fat content of samples

| | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 校正集 | 3.573 | 2.438 | 2.869 | 0.200 |
| 验证集 | 3.117 | 2.576 | 2.869 | 0.139 |

2.3 光谱降噪处理效果

不同阶数 N 和不同分解层次 L 的 db 小波降噪处理 (db $N-L$) 效果不同, 研究发现对样品的平均光谱, 采用 5 阶以上小波, 分解 5 层以上, 能明显去除原信号中的噪声干扰。图 3a 为样品的原始平均光谱和经过 db5-5、db6-6 和 db7-7 小波消噪处理的光谱, 消噪后的光谱在整体上保持原光谱的形状。

采用 db $N-L$ 小波消噪处理, 分解层次越高, 消噪效果越明显, 其中 db5-5 小波消除的噪音信号能量占原信号能量的 2.1250×10^{-5} , db6-6 小波消噪的能量比略大 (2.7124×10^{-5}), 而 db7-7 小波消噪的能量比为 6.5742×10^{-5} , 消除的噪音信号较多。由图 3a 中也可以看出 db5-5 降噪处理的光谱与 db6-6 降噪处理的差异不大, 细节信息得到较好保存, 但仍存在部分噪音, 如图 3c 中 830 ~ 870 nm, 消噪的光谱不及 db6-6 平滑; db7-7 降噪后光谱更平滑, 但信息丢失严重, 如图 3b 中 550 ~ 580 nm 光谱与原光谱差异大, 与猪肉中血红素蛋白、氧合肌红蛋白、肌红蛋白等密切相关的部分信息丢失。

2.4 肌内脂肪含量预测模型

将经过 db6 - 6 消噪处理的光谱按校正集与验证集划分,建立肌内脂肪含量的 PLSR 模型。采用 MSC、SNV、一阶和二阶微分等光谱预处理方法,建立的模型性能参数见表 2。

表 2 肌内脂肪含量的预测模型性能

Tab.2 Performances of IMF content prediction models

| 预处理方法 | 校正集 | | 验证集 | | 因子数 | R_{PD} |
|------------|-------|------------|-------|------------|-----|----------|
| | r | R_{MSEC} | r | R_{MSEP} | | |
| 无预处理 | 0.618 | 0.157 | 0.372 | 0.151 | 13 | 0.914 |
| MSC | 0.636 | 0.154 | 0.446 | 0.150 | 12 | 0.927 |
| SNV | 0.643 | 0.153 | 0.451 | 0.148 | 13 | 0.939 |
| 一阶微分 | 0.875 | 0.097 | 0.760 | 0.095 | 6 | 1.463 |
| 一阶微分 | 0.704 | 0.141 | 0.468 | 0.132 | 2 | 1.053 |
| MSC + 一阶微分 | 0.889 | 0.091 | 0.833 | 0.081 | 6 | 1.716 |
| SNV + 二阶微分 | 0.892 | 0.090 | 0.834 | 0.080 | 6 | 1.738 |

利用原始光谱建立的模型性能较差,校正集 $r = 0.618$, 预测集 $r = 0.372$, $R_{PD} < 1$ 。采用 MSC 或 SNV 预处理后模型性能有所改善,预测相关性提高, R_{MSEC} 与 R_{MSEP} 也均降低,肌肉表面肌肉组织和肌内脂肪组织的不均匀性,以及切面的不平滑等物理特性不同引起的散射差异得到了消除。应用微分光谱建模,相关性得到较大提高, $R_{PD} > 1$,微分处理消除了样品因运动过程的上下振动,样品切面不平整,以及样品厚度不一致等因素引起的反射光谱中不依存于波长的基线变动,但二阶微分光谱建立的模型性能比一阶微分的差。MSC 或 SNV 结合一阶微分预处理效果较好,建立的模型校正集 $r > 0.88$ 、验证集 $r > 0.83$ 、 $R_{MSEC} \leq 0.091$ 、 $R_{MSEP} \leq 0.081$,表明样品厚度、表面形状、运动中的振动等物理特性不同所引起的光谱间的差异信息得到了较好的消除。受实验收集样品的理化值范围、样品表面的光谱采集区域(直

径约 15 mm 的)及光谱噪音信息等因素的影响,所建立模型 R_{PD} 最高为 1.738,与推荐的 R_{PD} 接近或超过 3 尚有一定差距,模型的精度和稳健性仍需要进一步的提高。

用 db5 - 5 消噪处理的光谱建立 PLSR 模型,校正集 $r = 0.633$, 验证集 $r = 0.351$, $R_{MSEC} = 0.154$, $R_{MSEP} = 0.138$;与 db6 - 6 消噪处理光谱相比,建立的模型校正集预测性能有所提高,但受残留噪音信号的影响,预测集相关系数下降。db7 - 7 消噪处理的光谱建立 PLSR 模型,校正集 $r = 0.599$, 验证集 $r = 0.362$, $R_{MSEC} = 0.160$, $R_{MSEP} = 0.135$,光谱中部分有效信息被忽略,模型预测性能下降。上述两类光谱采用 SNV 结合一阶微分处理后建立 PLSR 模型,校正集 $r > 0.9$,但预测集 $r < 0.34$, $R_{PD} < 0.8$,模型预测性能差。

3 结论

(1) 动态环境下采集猪背最长肌肉的漫反射光谱噪音较大,采用小波变换消噪可以有效降低噪音信号。以 db6 小波 6 层分解后,分别对各层噪声估计,通过极大极小原理选择阈值,然后进行软门限阈值处理降噪,消噪效果较好;与低阶低层次小波消噪相比,所得光谱更平滑;与高阶高层次小波消噪相比,细节信息丢失少。

(2) 经过 db6 - 6 小波消噪处理的光谱,采用 PLSR 建立肌内脂肪含量的预测模型,预测性能优于 db5 - 5 和 db7 - 7 小波消噪处理的光谱建立模型。原始光谱建立的模型预测性能较差,经过 SNV、MSC 或微分等预处理后建立的模型性能得到改善,SNV 结合一阶微分预处理的模型性能最佳,校正集 $r = 0.892$ 、验证集 $r = 0.834$ 、 $R_{MSEC} = 0.090$ 、 $R_{MSEP} = 0.080$,但 $R_{PD} = 1.738$,模型的精度和稳健性还需要进一步的提高。

参 考 文 献

- 1 Rincker P J, Killefer J, Ellis M, et al. Intramuscular fat content has little influence on the eating quality of fresh pork loin chops[J]. Journal of Animal Science, 2008, 86(3): 730 ~ 737.
- 2 Verbeke W, Van Oeckel M J, Warnants N, et al. Consumer perception, facts and possibilities to improve acceptability of health and sensory characteristics of pork[J]. Meat Science, 1999, 53(2): 77 ~ 99.
- 3 Brewer M S, Zhu L G, McKeith F K. Marbling effects on quality characteristics of pork loin chops: consumer purchase intent, visual and sensory characteristics[J]. Meat Science, 2001, 59(2): 153 ~ 163.
- 4 Aaslyng M D, Oksama M, Olsen E V, et al. The impact of sensory quality of pork on consumer preference[J]. Meat Science, 2007, 76(1): 61 ~ 73.
- 5 Hadorn R, Eberhard P, Guggisberg D, et al. Effect of fat score on the quality of various meat products[J]. Meat Science, 2008, 80(3): 765 ~ 770.
- 6 Vandendriessche F. Meat products in the past, today and in the future[J]. Meat Science, 2008, 78(1 ~ 2): 104 ~ 113.

- 5 丁青芝,马海乐,骆琳,等. 脉冲超声预处理对玉米黄粉酶解制备ACEI肽的影响[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009,30(6):554~558.
Ding Qingzhi, Ma Haile, Luo Lin, et al. Effect of ultrasonic pretreatment of corn gluten meal to enhance enzymatic hydrolysis in preparing ACEI peptid[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009,30(6):554~558. (in Chinese)
- 6 吴琼英,马海乐,崔恒林,等. 猪肺血管紧张素转化酶的提取纯化及其性质研究[J]. 食品科学, 2004,25(9):71~73.
Wu Qiongying, Ma Haile, Cui Henglin, et al. Study on extraction and characteristics of angiotensin converting enzyme-ACE of fresh hog lung[J]. Food Science, 2004,25(9):71~73. (in Chinese)
- 7 Adler-Nissen Jens. Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzen sulfonic acid[J]. J. Agric. Food Chem., 1979, 27(6): 1 256~1 262.
- 8 刘志国,吴琼,吕玲肖,等. 酶解米糠蛋白分离提取ACE抑制肽及其结构研究[J]. 食品科学, 2007, 28(3):223~227.
Liu Zhiguo, Wu Qiong, Lü Lingxiao, et al. Activity detection and structure analysis of ACE inhibitors derived from rice bran protein[J]. Food Science, 2007, 28(3):223~227. (in Chinese)
- 9 吕鹏,庄重,凌建亚,等. 超声对酶的影响[J]. 生物技术通讯, 2004,15(5):534~536.
Lü Peng, Zhuang Zhong, Ling Jianya, et al. Effect of ultrasound on enzyme[J]. Letters in Biotechnology, 2004,15(5): 534~536. (in Chinese)
- 10 贾俊强,马海乐,赵伟睿,等. 超声波处理对麦胚清蛋白结构和功能性质的影响[J]. 过程工程学报, 2009,9(1): 107~112.
Jia Junqiang, Ma Haile, Zhao Weirui, et al. Effect of ultrasound treatment on structure and functional properties of wheat germ albumin[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009,9(1):107~112. (in Chinese)
- 11 贾俊强,马海乐,王振斌,等. 降血压肽的构效关系研究[J]. 中国粮油学报, 2009,24(5):110~114.
Jia Junqiang, Ma Haile, Wang Zhenbin, et al. Structure-activity relationship of antihypertensive peptides[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009,24(5):110~114. (in Chinese)
- 12 刘静波,于志鹏,赵文竹,等. 蛋清肽酶解工艺及血管紧张素转化酶抑制活性研究[J]. 农业机械学报, 2010,41(7): 147~152,113.
Liu Jingbo, Yu Zhipeng, Zhao Wenzhu, et al. Enzymatic hydrolysis technology for ACE-inhibitory peptides from egg white [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):147~152,113. (in Chinese)

(上接第 107 页)

- 7 Prevolnik M, Candek-Potokar M, Skorjanc D. Ability of NIR spectroscopy to predict meat chemical composition and quality—a review[J]. Czech Journal of Animal Science, 2004, 49(11): 500~510.
- 8 Prieto N, Roehe R, Lavin P, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: a review[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 175~186.
- 9 Brondum J, Munck L, Henckel P, et al. Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy[J]. Meat Science, 2000, 55(2): 177~185.
- 10 Barlocco N, Vadell A, Ballesteros F, et al. Predicting intramuscular fat, moisture and Warner-Bratzler shear force in pork muscle using near infrared reflectance spectroscopy[J]. Animal Science, 2006, 82(1): 111~116.
- 11 Chan D E, Walker P N, Mills E W. Prediction of pork quality characteristics using visible and near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(5): 1 519~1 527.
- 12 Savenije B, Geesink G H, Vander Palen J G P, et al. Prediction of pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Meat Science, 2006, 73(1): 181~184.
- 13 Prevolnik M, Candek-Potokar M, Skorjanc D, et al. Predicting intramuscular fat content in pork and beef by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2005, 13(2): 77~85.
- 14 夏俊芳,李小昱. 脐橙VC含量近红外光谱消噪小波优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 143~146.
Xia Junfang, Li Xiaoyu. Wavelet optimization for near-infrared spectra denoising of vitamin C content of umbilical orange [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 143~146. (in Chinese)
- 15 Zhu D Z, Ji B P, Meng C Y, et al. Study of wavelet denoising in apple's charge-coupled device near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(14): 5 423~5 428.
- 16 Liang L W, Wang B, Guo Y, et al. A support vector machine-based analysis method with wavelet denoised near-infrared spectroscopy[J]. Vibrational Spectroscopy, 2009, 49(2): 274~277.