

文章编号 1004-924X(2013)10-2513-07

同步荧光光谱结合 CARS 变量优选 预测猪肉中四环素残留含量

肖海斌, 赵进辉, 袁海超, 洪 茜, 刘木华*

(江西农业大学 工学院/生物光电及应用重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:为快速检测猪肉中的四环素残留含量,采用同步荧光法结合竞争适应重加权采样(CARS)变量优选法建立了预测猪肉中四环素残留含量的支持向量回归(SVR)模型。从样本的三维同步荧光光谱中确定了最佳波长差为 65 nm,采用 CARS 方法从中挑选出与四环素相关的特征波长变量,并与连续投影算法(SPA)及遗传算法(GA)进行比较。最后,应用 SVR 算法对优选出的 16 个波长变量建立猪肉中四环素含量的预测模型。分析发现,多元散射校正(MSC)光谱预处理后的 CARS 方法优于 SPA 及 GA 变量选择方法,可以有效地筛选出全光谱中的特征波长变量。CARS-SVR 建立的四环素预测模型优于原始光谱的 SVR 模型,其预测集的决定系数(R^2)和预测均方根误差(RMSEP)分别为 0.961 2 和 10.94 mg/kg。研究结果表明,采用同步荧光法结合 CARS-SVR 模型可以预测猪肉中的四环素残留含量,且 CARS-SVR 能有效地简化模型并提高预测精度。

关键词:同步荧光光谱;竞争适应重加权采样(CARS);支持向量回归;四环素;猪肉

中图分类号:O657.31 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2513

Determination of tetracycline content in pork by synchronous fluorescence spectroscopy with CARS method

XIAO Hai-bin, ZHAO Jin-hui, YUAN Hai-chao, HONG Qian, LIU Mu-hua*

(*Optics-electrics Application of Biomaterial Laboratory, College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*)

* *Corresponding author, E-mail: suikelmh@sohu.com*

Abstract: The Support Vector Regression (SVR) prediction model was established for the rapid detection of tetracycline contents in pork by the synchronous fluorescence spectroscopy combined with Competitive Adaptive Reweighted Sampling (CARS) method. The CARS was used to select tetracycline correlative variables of pork samples from spectral data and the optimum wavelength difference was set to be 65 nm. Then, the performance of three variable selection methods including CARS, Successive Project Algorithm (SPA) and Genetic Algorithm (GA) were compared. Finally, the SVR was used to establish the prediction model for tetracycline contents of the pork by using 16 selected variables. The results show that CARS after Multi Scattering Correction(MSC) processing is superior

收稿日期:2013-03-13; **修订日期:**2013-04-25.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAK17B02);国家自然科学基金资助项目(No. 31101295);江西省科技厅对外科技合作计划资助项目(No. 20132BDH80005);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA10Z209);江西省科技厅科技支撑计划资助项目(No. 2012BBG70058);江西省教育厅科技计划资助项目(No. GJJ12244)

to SPA and GA and can select feature variables of full spectra efficiently. The prediction model of tetracycline by CARS-SVR is superior to the model established by original spectrum SVR, and the determination coefficient (R^2) and the Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) in the CARS-SVR model prediction sets are 0.961 2 and 10.94 mg/kg, respectively. The results demonstrate that synchronous fluorescence spectroscopy combined with CARS-SVR is feasible to predict tetracycline contents of the pork, and CARS-SVR method can simplify the model efficiently and improve the prediction precision.

Key words: synchronous fluorescence spectroscopy; Competitive Adaptive Reweighted Sampling (CARS); Support Vector Regression(SVR); tetracycline; pork

1 引言

猪肉中含有丰富的脂肪、蛋白质、碳水化合物及钙、铁、磷等成分。它营养丰富,性平味甘,具有丰肌泽肤、补虚强身、滋阴润燥的功效,因此成为人们生活中主要的副食品^[1-2]。四环素($C_{22}H_{24}N_2O_8$)属于广谱杀菌、抗菌类抗生素,被广泛用于动物疾病的控制和治疗,同时也可作为饲料添加剂,用于预防疾病和提高动物的生长速率^[3]。目前,四环素类饲用和药用抗生素被广泛地用于猪养殖业。随着这类抗生素的不断使用,大量四环素积累在猪体内且不易分解,从而间接地威胁到人们的身体健康。猪肉中抗生素残留问题越来越受到人们的关注,因此建立一种快速、准确的四环素类抗生素的检测方法,具有十分重要的意义。

目前,用于检测动物源性食品中四环素类抗生素的传统方法有:高效液相法^[4-5]、微生物法^[6-7]、化学发光法^[8]和荧光法^[9]等。刘妮^[10]等综述了基于动物源性食品中四环素类抗生素残留检测的各种前处理方法,以及高效液相、微生物法和毛细管电泳法等检测方法的应用。岳振峰^[11]等采用高效液相色谱串联质谱法检测牛奶中四环素类抗生素及代谢产物,此处理方法比较复杂,不适用于快速检测。刘艳华^[12]等利用液相色谱-串联质谱法建立了一种同时检测鸡肉组织中土霉素、金霉素和四环素残留的系统。李佳^[13]等利用四环素在碱性溶液中反应生成的强荧光降解物质异四环素来检测牛奶中的四环素残留。池利民^[14]等采用高效液相色谱法检测肉类中四环素族抗生素的残留含量。上述检测方法中,大多数前处理比较复杂、费时,无法满足快速检测动物源性食品中四环素的要求。因此,本文建立了同步荧光法直接测定猪肉中四环素残留含量的检测方法。

同步荧光法具有光谱简化、灵敏度高,可减小光谱重叠和散色光现象影响等特点,适合对复杂背景体系中物质的组分进行定性和定量分析^[15]。本工作采用同步荧光光谱技术直接对猪肉中四环素进行分析和检测,利用荧光分光光度计的固体采集装置采集 60 个含有四环素猪肉样本的同步荧光光谱,采用一种新的变量提取方法——竞争适应重加权采样(Competitive Adaptive Reweighted Sampling, CARS)选择与四环素相关的重要特征变量,应用支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)建立猪肉中四环素残留含量预测模型,从而达到快速、准确检测猪肉中四环素类抗生素的目的。

2 实验部分

2.1 实验试剂与仪器设备

实验试剂有:猪肉(购于江西农业大学菜市场)、四环素(纯度约为 98.0%,购于中国标准物质网)、氢氧化钠和超纯水。

主要的仪器设备为:Cary Eclipse 荧光分光光度计(Varian, USA)及固体采集装置;超纯水机(科尔顿水务有限公司);JK-50B 型超声波清洗器(合肥金尼克机械有限公司);FA1004B 型电子天平(精度为 0.1 mg,上海上平仪器有限公司);FD-1-50 型真空冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司);HH-6 型数显恒温水浴锅(上海浦东物理光学仪器厂);石英比色皿(光程为 1 cm)。

2.2 实验方法

将购买的猪肉放置冰箱冷冻,过段时间后,将冷冻的猪肉取出切成薄片,接着继续冷冻一段时间。将冷冻好的猪肉薄片利用真空冷冻干燥机干燥 30 h 后,再将薄片制作成 60 个直径为 1.3 cm,厚度为 2 mm 的圆形样本。称取 100 mg 四环素

标准品,用少量超纯水溶于 200 mL 棕色容量瓶中,超声溶解后再定容至刻度,得到 500 mg/L 的四环素储备液。称取 3 g 氢氧化钠,用超纯水溶于 50 mL 的容量瓶中配制成 1.5 mol/L 的 NaOH 溶液。向 60 个 10 mL 的棕色容量瓶中加入不同体积的四环素储备液,同时向容量瓶中加入等体积的 NaOH 溶液,然后在沸水浴中降解 30 min,最后用超纯水定容,得到 60 个不同浓度的四环素降解溶液。分别将制作好的猪肉样本在四环素降解溶液中浸泡半个小时,静置至晾干,得到 60 个含有不同浓度的四环素猪肉样本,另外用同样方法制作一个空白样本。再将猪肉样本放入固体采集装置中,采集参数设置如下:波长差 $\Delta\lambda$ 为 20~120 nm,间隔为 5 nm,PMT 探测器电压为 660 V,激发和发射狭缝分别为 10 nm 和 5 nm,Emission filter 参数设置为 295~1 100 nm,平滑方式为 moving average,中等扫描速度。采集装置在 240~420 nm 波长同步扫描,采集样本的同步荧光光谱。

在样品的制作过程中,称量猪肉的干重,经过浸泡晾干后再称量其湿重,经分析得到猪肉中四环素含量的统计结果,如表 1 所示。其中,校正集样本的四环素浓度的最小值和最大值分别为 3.58 mg/kg 和 188.85 mg/kg,而预测集样本的四环素浓度的最小值和最大值分别为 7.32 mg/kg 和 184.64 mg/kg。由此可知,预测集样本中四环素浓度的变化范围在校正集样本内,因此,校正集样本所建立的四环素预测模型适用于预测集样本。

表 1 猪肉样本中四环素含量的统计结果

Tab.1 Range, mean, and standard deviation of tetracycline of pork in data sets

Data set	Samples	Range/ (mg · kg ⁻¹)	Mean/ (mg · kg ⁻¹)	Standard deviation/ (mg · kg ⁻¹)
Calibration	40	3.58~188.85	106.05	55.24
Prediction	20	7.32~184.64	107.16	56.68

2.3 数据处理和分析

2.3.1 光谱预处理

采用多元散射校正 (Multiplicative Scatter Correction, MSC)、一阶微分、标准正态变量变换

(Standard Normal Variate, SNV) 及 3 点、5 点和 7 点平均值平滑方法对含有四环素猪肉样本的同步荧光光谱进行预处理,以考察预处理方法对猪肉中四环素浓度预测精度的影响。光谱预处理通过 MATLAB 2007b(the Math Works, USA) 软件完成。

2.3.2 CARS 法选择变量

CARS 变量选择法是新近提出的一种变量选择方法。此算法是根据进化论中“适者生存,不适者淘汰”的原则提出的,将每一个波长作为一个个体,选择出适应的个体,淘汰不适应的个体^[15]。在选择变量的过程中,通过自适应重加权采样技术挑选出 PLS 建模中回归系数绝对值大的个体,获得了多个波长变量子集,最后采用交叉验证方法从多个波长变量子集中筛选出与四环素相关的最佳变量组合。

全光谱中数据量大,并且包含大量的冗余信息和背景噪声信号,它们会降低模型的运行速度和预测精度^[16],因此采用 CARS 方法选择出与猪肉中四环素相关的波长变量。然后由蒙特卡罗交叉验证方法选择最优潜变量数,其中采样次数设置为 50 次,根据 PLS 交叉验证建模得到的 RM-SEC 值优选出最佳变量子集。CARS 方法通过 MATLAB 2007b(the Math Works, USA) 软件完成。

2.3.3 SVR 回归模型建立

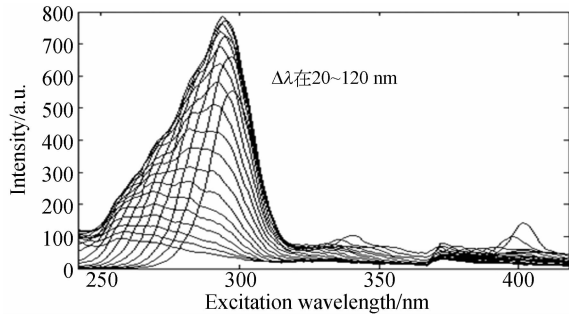
采用 CARS 变量选择方法筛选出的特征波长作为 SVR 回归模型的输入变量。利用校正集样本进行建模,预测样本猪肉中四环素的浓度。再根据 SVR 模型预测结果比较变量选择方法 CARS 与 GA 和 SPA 方法的优劣。对于 GA 算法,初始群体设置为 30,变异概率设置为 0.01,交叉概率设置为 0.5,算法循环 6 次。SPA 算法结合留一交叉验证法确定最佳变量数,其中最小和最大可选变量数分别为 1 和 30,具体算法原理见参考文献^[17]和^[18]。变量选择算法和回归模型的建立均通过 MATLAB 2007b (the Math Works, USA) 软件完成。

3 结果与讨论

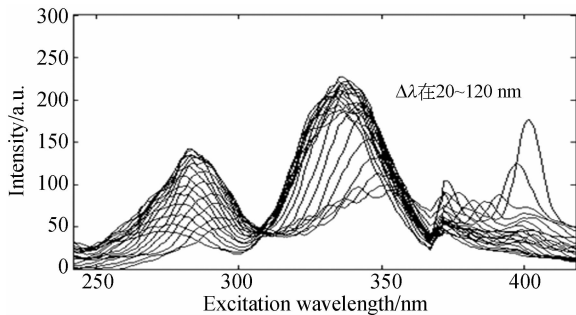
3.1 同步荧光光谱分析

按照采集参数设置,得到波长差 $\Delta\lambda$ 为 20~

120 nm, 间隔为 5 nm 的同步荧光光谱图, 如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出, 猪肉本身的荧光峰位于 290 nm 左右; 而从图 1(b)中发现, 猪肉本身的荧光峰位置没有改变, 只是荧光强度降低至 150(a. u.)左右, 但是在 334 nm 处出现一个强荧光峰, 说明此峰是由四环素物质产生的, 而且不同猪肉样本的背景信号强度不同, 这可能是由不同浓度的四环素引起的。同时从图 1(b)中还发现, 随着波长差的增加, 四环素的荧光强度值先增强再降低, 在 $\Delta\lambda$ 为 65 nm 时, 强度达到最大。这是因为波长差的选择关系到荧光峰的分离程度以及预测模型的精度, 故本实验对猪肉中四环素含量建模预测时, 均选择波长差为 65 nm 的同步荧光光谱。



(a) 空白样本
(a) Blank sample



(b) 含有四环素猪肉
(b) Pork containing tetracycline

图 1 实验样品的同步荧光图

Fig. 1 Synchronous fluorescence spectra of samples

3.2 光谱预处理分析

图 2 为含有四环素的猪肉样本在波长差为 65 nm 处的同步荧光光谱图。从图 1(b)中可以看出, 在 362 nm 处有一明显的突变信号, 与空白样本对比发现, 这不是由四环素产生的, 可能是仪器误差引起的噪声。因此, 选择 242~362 nm 波

段进行预处理。在 242~362 nm 经过 MSC 预处理后, 得到的同步荧光光谱图如图 2 所示。为了避免两种光谱重叠, 将校正后的同步荧光光谱图的强度值均加上 50 a. u.。该波段总共有 121 个波长变量。

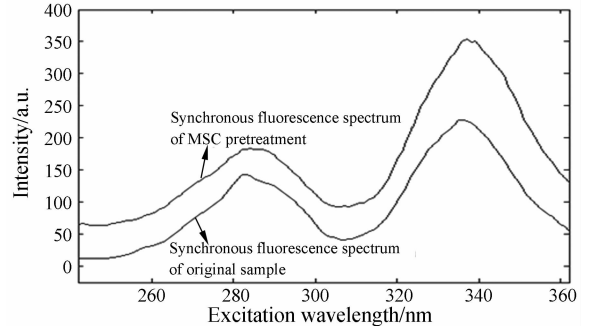


图 2 原始样本和 MSC 预处理后的同步荧光光谱图
Fig. 2 Synchronous fluorescence spectra of original sample and MSC pretreated sample

本文比较了不同预处理方法对猪肉中四环素含量 SVR 建模预测的结果, 如表 2 所示。MSC 同步光谱所建立的 SVR 模型结果最优, 其决定系数 (R^2) 和预测均方根误差 (RMSEP) 分别为 0.951 8 和 12.65。经 SNV 和一阶微分处理后, 预测结果有所降低; 而 3 点、5 点及 7 点平滑预处理的效果均不佳, 其中 5 点平滑的预测结果最差, RMSEP 值升到 22.73。

表 2 不同预处理方法的预测模型结果

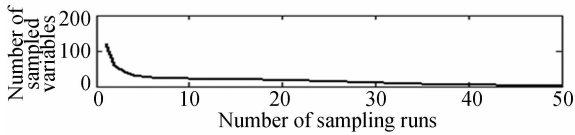
Tab. 2 Results of SVR of tetracycline in pork with different pretreatment methods

Pretreatment methods	R^2	RMSEP/(mg · kg ⁻¹)
原始	0.938 9	13.72
MSC	0.951 8	12.65
SNV	0.920 6	16.00
一阶微分	0.924 1	15.29
3 点平滑	0.872 2	22.02
5 点平滑	0.847 2	22.73
7 点平滑	0.874 1	22.21

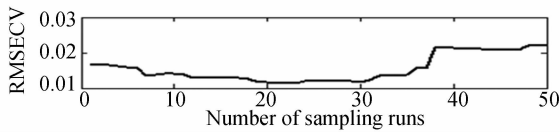
3.3 CARS 法选择变量

通过光谱预处理分析发现, 由 MSC 预处理光谱所建立的猪肉中四环素的 SVR 模型预测结果最优, 所以 CARS 优选变量要针对 MSC 预处理后的光谱。图 3 为 CARS 方法优选变量的具体过程。其中, 图 3(a)是优选变量过程中波长变

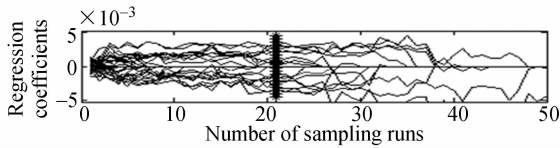
量数的变化趋势。随着采样数的增加,被优选出的波长变量数逐渐减少;图 3(b)为优选变量过程中交互验证均方根误差(RMSECV)的变化趋势。随着采样次数增加到 21 次,RMSECV 值逐渐降低,之后再逐渐升高,这说明开始剔除与猪肉中四环素相关的特征变量;图 3(c)为优选变量过程中各个波长变量的回归系数趋势图,“*”代表 RMSECV 值最小的位置。最终,CARS 方法优选出的变量数为 16 个。图 4 为 CARS 方法优选出的 16 个波长变量的分布情况。



(a) 波长变量数的变化
(a) Variation of wavelength number



(b) 均方根误差的变化
(b) Variation of RMSECV



(c) 变量回归系数趋势图
(c) Trend of variable regression coefficients

图 3 CARS 优选变量过程图

Fig. 3 Procedure plots of CARS variable selection

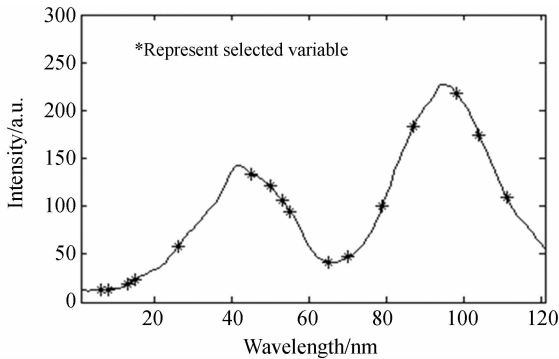


图 4 CARS 优选变量的分布图

Fig. 4 Distribution of selected CARS variables

3.4 SVR 模型比较与预测

通过 CARS 方法优选的波长变量作为模型的输入变量,采用 SVR 对猪肉中的四环素含量进行建模预测,并与 GA 及 SPA 的 SVR 模型预测结果进行比较。表 3 列出了 3 种变量选择方法及全光谱的 SVR 建模预测结果,CARS 变量选择方法的决定系数(R^2)最高达到 0.961 2,且变量数从 121 个减少到 16 个,变量压缩率为 86.8%。与其它 3 种方法相比,RMSEP 值最低,为 10.94 mg/kg。其次,GA 变量选择方法稍优于全光谱的 SVR 模型预测结果,SPA 变量选择方法的预测结果最差。结果表明,CARS 变量选择方法可以有效地筛选出光谱的特征波长变量,简化模型、提高运行速度和模型预测精度。

表 3 不同变量选择方法得到的四环素含量 SVR 建模预测结果

Tab. 3 Results of SVR of tetracycline of pork for different variable selection methods

Method	Number of variables	R^2	RMSEP/(mg · kg ⁻¹)
—	121	0.951 8	12.65
CARS	16	0.961 2	10.94
GA	33	0.952 4	12.59
SPA	6	0.940 1	14.57

采用 CARS-SVR 方法建立的四环素含量预测模型对没有参与建模的 20 个样本进行了预测,模型的预测值与实测值的回归线如图 5 所示。回归表达式为: $y = 0.942 7x + 0.005 7$,由此可知,同步荧光光谱法结合 CARS 变量优选可以有效地预测猪肉中四环素的含量。

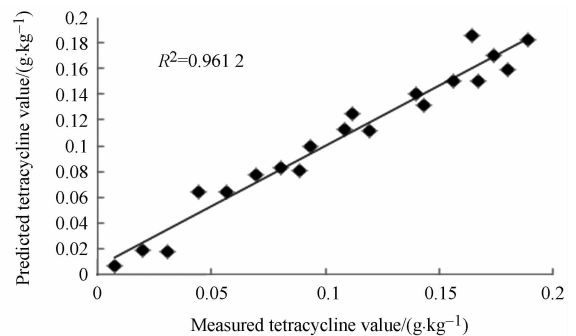


图 5 CARS-SVR 模型预测值与实测值的关系

Fig. 5 Relationship between actual value and predictive value in CARS-SVR model

4 结 论

本文利用同步荧光光谱法结合 CARS 法优选变量对猪肉中四环素含量进行了 SVR 建模预测。从样本的同步荧光光谱图中选择出最佳波长差为 65 nm 的同步荧光光谱,经过 MSC 光谱预处理后,可以有效地提高模型预测结果,并且用

CARS 方法从全光谱中筛选出与四环素相关的特征波长变量,优于 SPA 与 GA 变量选择方法。采用 CARS-SVR 建立的四环素含量预测模型优于全光谱的 SVR 模型,其预测集的决定系数和预测均方根误差分别为 0.961 2 和 10.94 mg/kg。因此,同步荧光光谱法结合 CARS-SVR 建模可以预测猪肉中四环素的含量,而且 CARS-SVR 能有效地简化模型,提高预测精度。

参考文献:

- [1] 程志斌,葛长荣,李德发. 浅谈猪肉的营养价值[J]. 肉类工业,2005,289(5):34-40.
CHENG ZH B, GE C R, LI D F. Introduction to pork nutritional value[J]. *Meat Industry*, 2005, 289(5):34-40. (in Chinese)
- [2] 朱洪强,王全凯,殷树鹏. 野猪肉与家猪肉营养成分的比较分析[J]. 西北农业学报, 2007,16(3):54-56.
ZHU H Q, WANG Q K, YIN SH P. The comparison analysis of the boar meat and pork in nourishment composition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2007, 16(3):54-56. (in Chinese)
- [3] 贺德春,许振成,吴根义,等. 四环素类抗生素的环境行为研究进展[J]. 动物医学进展,2011, 32(4):98-102.
HE D CH, XU ZH CH, WU G Y, *et al.*. Progress on residues and environmental behavior of tetracycline antibiotics [J]. *Progressin Veterinary Medicine*, 2011, 32(4):98-102. (in Chinese)
- [4] SHALABY A R, SALAMA NADIA A, ABOU-RAYA S H, *et al.*. Validation of HPLC method for determination of tetracycline residues in chicken meat and liver[J]. *Food Chemistry*, 2011,124(4):1660-1666.
- [5] EVAGGELIA N, EVAGGELOPOULOU, SAMANIDOU V F. Confirmatory development and validation of HPLC-DAD method for the determination of tetracyclines in gilthead seabream (*sparus aurata*) muscle tissue[J]. *Journal of Separation Science*, 2012,35(10-11):1372-1378.
- [6] IDOWU F, JUNAID K, PAUL A, *et al.*. Antimicrobial screening of commercial eggs and determination of tetracycline residue using two microbiological methods[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2010, 9(10):959-962.
- [7] SCZESNY S, NAU H, HAMSCHER G. Residue analysis of tetracyclines and their metabolites in eggs and in the environment by HPLC coupled with a microbiological assay and tandem mass spectrometry[J]. *Agric. Food Chem.*, 2003, 51(3):697-703.
- [8] 张琰图,章竹君,孙永华. 高效液相色谱化学发光法检测牛奶中残留四环素类化合物的研究[J]. 化学学报,2006, 64(24):2461-2466.
ZHANG Y T, ZHANG ZH J, SUN Y H. Determination of tetracyclines residues in milk using high performance liquid chromatography with chemiluminescence detection [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2006, 64(24):2461-2466. (in Chinese)
- [9] 高红,赵一兵,郭祥群. 一种测定四环素类抗生素的光谱新方法[J]. 光谱学与光谱分析,2006, 26(3):488-490.
GAO H, ZHAO Y B, GUO X Q. Determination of tetracyclines by a new spectrum technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(3):488-490. (in Chinese)
- [10] 刘妮,叶能胜,谷学新,等. 动物源性食品中四环素类残留分析研究进展[J]. 分析科学学报,2009, 25(3):351-356.
LIU N, YE N SH, GU X X, *et al.*. Progression the analysis of residual tetracyclines in animal origin foods [J]. *Journal of Analytical Science*, 2009, 25(3):351-356. (in Chinese)
- [11] 岳振峰,邱月明,林秀云,等. 高效液相色谱串联质谱法测定牛奶中四环素类抗生素及其代谢产物[J]. 分析化学,2006, 34(9):1255-1259.
YUE ZH F, QIU Y M, LIN X Y, *et al.*. Determination of multi-residues of tetracyclines and their metabolites in milk by high performance liquid chromatography-tandem positive-ion electrospray ionization mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2006,34(9):1255-1259. (in Chinese)
- [12] 刘艳华,张纯萍,门立强,等. 液相色谱-串联质谱

法测定鸡肌肉组织中的四环素类药物残留[J]. 色谱, 2006, 24(2):171-173.

LIU Y H, ZHANG CH P, MEN L Q, *et al.*. Determination of tetracycline antibiotics residues in chicken muscle by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2006, 24(2):171-173. (in Chinese)

[13] 李佳,陈冠华,杨磊,等. 碱解增敏荧光法测定牛奶中四环素残留[J]. 中国乳品工业, 2008, 36(1):60-62.

LI J, CHEN G H, YANG L, *et al.*. Fluorescent spectrophotometric determination of hydrolytic residue tetracycline sensitized by cetyltrimethyl ammonium bromide[J]. *Dairy Industry*, 2008, 36(1):60-62. (in Chinese)

[14] 池利民,全则灵,张雪梅. HPLC 测定猪肉食品中四环素族抗生素残留[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(7):3548-3549.

CHI L M, QUAN Z L, ZHANG X M. Determination of tetracycline antibiotics in neat by HPLC[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2010, 38(7):3548-3549. (in Chinese)

[15] 赵进辉,袁海超,刘木华,等. 鸭肉中金霉素残留量 LSSVR-同步荧光法测定[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):136-140.

ZHAO J H, YUAN H H, LIU M H, *et al.*. De-

termination of aureomycin content in duck meat using LSSVR and synchronous fluorescence spectroscopy[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2012, 43(12):136-140. (in Chinese)

[16] 孙通,许文丽,林金龙,等. 可见/近红外漫透射光谱结合 CARS 变量优选预测脐橙可溶性固形物[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12):3229-3233.

SUN T, XU W L, LIN J L, *et al.*. Determination of soluble solids content in navel oranges by Vis/NIR diffuse transmission spectra combined with CARS method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12):3229-3233. (in Chinese)

[17] 边霞,米良. 遗传算法理论及其应用研究进展[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(7):2425-2439.

BIAN X, MI L. Development on genetic algorithm theory and its applications[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(7):2425-2439. (in Chinese)

[18] 廖宜涛,樊玉霞,成芳,等. 连续投影算法在猪肉 pH 值无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):379-383.

LIAO Y T, FAN Y X, CHENG F, *et al.*. Application of successive projections algorithm to nondestructive determination of pork pH value[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):379-383. (in Chinese)

作者简介:



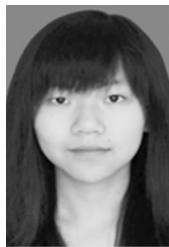
肖海斌(1988—),男,江西吉安人,主要从事农畜产品无损检测的研究。E-mail: hb Xiao168@163.com



赵进辉(1978—),男,湖南华容人,博士,副教授,2008年于华南农业大学获得博士学位,主要从事图像处理与农畜产品无损检测的研究。E-mail: zjhxiaocao@sina.com



袁海超(1984—),女,湖南益阳人,研究实习员,主要从事农畜产品无损检测的研究。E-mail:37081154@qq.com



洪茜(1990—),女,江西九江人,硕士研究生,主要从事农畜产品无损检测的研究。E-mail: 377762483@qq.com

导师简介:



刘木华(1969—),男,江西宁都人,博士,博士后,教授,2001年于中国农业大学获得博士学位,2004年于江苏大学博士后出站,主要从事农产品的光学无损检测。E-mail: suikelmh@sohu.com