

基于红外光声光谱的农作物秸秆导热系数定量分析

黄光群 段宏伟 何金鸿 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 选用我国华北地区具有代表性的小麦、玉米、水稻秸秆样品,对比研究了偏最小二乘(PLSR)和高斯核支持向量机(RBF-SVR)分别构建单一和混合种类秸秆全波段定量分析模型的效果,探讨了红外光声光谱耦合化学计量学方法构建我国主要粮食作物秸秆导热系数定量分析模型的可行性。研究发现,小麦秸秆和水稻秸秆导热系数RBF-SVR非线性模型,以及玉米秸秆、混合种类秸秆的PLSR线性模型效果较优。进一步应用蚁群算法与上述最优建模方法相结合,构建了更加优化的小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆和混合秸秆导热系数模型,验证决定系数(R_p^2)分别为0.77、0.83、0.96和0.79,验证均方差(RMSEP)分别为0.007 8、0.015、0.005 9、0.014 W/(m·K),验证相对分析误差(RPD)分别为2.81、2.41、7.39和2.15。研究结果表明,红外光声光谱技术结合先进适用的化学计量学方法可实现我国主要粮食作物秸秆导热系数的快速定量分析,但混合秸秆模型预测精度仍需进一步提升。

关键词: 农作物秸秆; 导热系数; 红外光声光谱; 偏最小二乘; 高斯核支持向量机; 蚁群算法

中图分类号: S210 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0342-06

Rapid Quantitative Analysis of Crop Straws' Thermal Conductivity Based on Infrared Photoacoustic Spectroscopy

HUANG Guangqun DUAN Hongwei HE Jinhong HAN Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Rapid determination of thermal conductivity is of great significance for realizing high-efficient and value-added utilization of crop straw. The feasibility of infrared photoacoustic spectroscopy coupled with chemometrics for developing the quantitative models of main crop straws' thermal conductivity in China was investigated. The representative samples of wheat, corn and rice straws were initially acquired from North China, and the full-band models of single and mixed kinds of straws were then developed by using the partial least squares regression (PLSR) and Gaussian kernel support vector regression (RBF-SVR). By comparing the model effects of PLSR and RBF-SVR, it was found that the full-band RBF-SVR models of wheat stalk and rice straw had better performances, while the full-band PLSR models were more appropriate for corn and mixed straws. Moreover, based on the combination of above-mentioned optimal modeling method and the ant colony algorithm, the new feature models of wheat, corn, rice and mixed straws showed better performances, which yielded determination coefficient of prediction set (R_p^2) of 0.77, 0.83, 0.96 and 0.79, root mean square error of prediction set (RMSEP) of 0.007 8, 0.015, 0.005 9 and 0.014 W/(m·K), relative percent deviation of prediction set (RPD) of 2.81, 2.41, 7.39 and 2.15, respectively. Results showed that FTIR-photoacoustic spectroscopy coupled with applicable chemometrics had good potential for rapid quantitative analysis of main crop straws' thermal conductivity in China.

Key words: crop straw; thermal conductivity; infrared photoacoustic spectroscopy; partial least squares; Gaussian kernel support vector; ant colony algorithm

0 引言

导热系数速测分析对于实现农作物秸秆高效、高值化资源利用具有重要意义。据统计,我国每年可收集利用的农作物秸秆约7亿吨,以其材料化利用为例,近年来,隔热性好、性价比高的新型保温材料

料成为社会关注的热点。农作物秸秆因其导热性差、强度高、耐腐蚀、吸声好和生产成本低廉等优势，可与石膏、水泥和木材等做成夹心或复合保温材料^[1-6]。然而，不同农作物秸秆的导热性不同，其所生成的复合材料隔热保温性能也差别较大。因此，导热性参数的快速准确获取对农作物秸秆制备复合保温材料至关重要。

红外光声光谱技术 (Infrared photoacoustic spectroscopy) 与传统的热流计法和近红外光谱分析技术相比，因其配备光声探测器，对样品因吸收红外光而产生的振动声波进行测量，基本不受样品颜色、形态等影响，且建模时所需样品少而被广泛应用于粉末状、膜状、纤维状和液态样品 (如水果、谷物、土壤和秸秆等) 关键指标的定量分析^[7-13]。

常用的红外光声光谱建模方法^[14]中，线性建模方法偏最小二乘法 (Partial least square regression, PLSR) 能同时对光谱和化学分析值进行主成分降维，所构建的定标模型稳健性相对较好；非线性建模方法支持向量回归 (Support vector regression, SVR) 通过引入核函数而具有较好的非线性拟合性能。考虑农作物秸秆组成较为复杂，不同种类间差异较大，有必要在构建农作物秸秆导热系数定量分析模型时进行线性和非线性模型的比较研究。当采用全波段红外光声光谱数据进行定标模型构建时，无信息变量和多重相关性变量可能会对定标模型精度产生影响。因此，需要进行特征变量提取。蚁群算法 (Ant colony algorithm, ACA) 作为一种新型的仿生类进化算法，具有较强的鲁棒性、分布式计算机制、信息正反馈、启发式搜索和易于实现的优点^[15]，因此，可将蚁群算法应用于农作物秸秆导热系数红外光声光谱特征波段提取，以提高定标模型精度。红外光声光谱耦合上述先进适用化学计量学方法构建我国主要粮食作物秸秆导热性定量分析模型的相关研究尚未见报道。

本文基于作者所在团队建立的我国农作物秸秆资源样本库，选用我国华北地区具有代表性的小麦、玉米、水稻秸秆样品，探索研究利用红外光声光谱耦合化学计量学方法构建我国主要粮食作物秸秆导热系数定量分析模型的可行性。通过比较分析偏最小二乘 (PLSR) 和高斯核支持向量机 (RBF - SVR) 分别构建单一和混合种类秸秆全波段定量分析模型的效果，并将蚁群算法与上述最优建模方法相结合，构建更加优化的我国华北地区小麦、玉米、水稻秸秆导热系数快速定量分析模型，为实现我国农作物秸秆高效、高值化资源利用提供指导。

1 材料与方法

1.1 样品收集与制备

从我国华北地区北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区采集具有代表性的秸秆样品 268 个，其中：小麦秸秆 120 个，玉米秸秆 119 个，水稻秸秆 29 个。上述样品经粉碎机 (WKF - 130 型，中国) 粉碎过 40 目筛后密封保存备用。

1.2 导热系数测定

采用热特系数测定分析仪 (KD2 Pro，美国) 测定分析秸秆样品导热性，每个样品测定 3 次取其平均值^[16]。

1.3 红外光声光谱采集

使用傅里叶型红外光谱仪 Nicolet - IS50 (ThermoScientific 公司，美国) 获取待测样品红外光声光谱，配置专用光声附件 PA300 (MTEC Photoacoustics，美国)、转子流量计和光声池等。

光谱采集前，以 10 mL/s 流量氦气吹扫光声池 10 s，避免二氧化碳和水汽对样品谱线干扰。为获取最佳的信背比，动镜速率和光谱分辨率分别设为 0.158 1 cm/s 和 0.482 cm⁻¹。同时将单个样品的光谱采集点数和采集次数分别设为 10 和 32，以减少样品基体效应的影响^[17]。每间隔 2 h 重新获取炭黑背景光谱。光谱采集时，扫描器按照设定路径逐点扫描，并依次获取每个点在 4 000 ~ 500 cm⁻¹ 波段的光谱信息，扫描完成后将最终获取的 10 个点的平均光谱作为该样品光谱。

1.4 数据处理与模型构建

红外光声光谱数据分析与处理采用光谱软件 OMNIC9.7 - IS50 (ThermoScientific 公司，美国)、Matlab 7.8 (MathWorks 公司，美国) 和 Origin 9.1 (OriginLab 公司，美国)。利用面积归一化法对获取的代表性秸秆样品红外光声光谱进行预处理，以校正由光程差引起的光谱差异。基于 PLSR 和 SVR 两种算法，分别构建单一和混合种类秸秆的全波段线性和非线性定标模型，并对比优选出较优建模方法。利用蚁群算法和优选建模方法相结合进行特征光谱提取，以构建最优的小麦、玉米、水稻和混合秸秆导热系数红外光声光谱定量分析模型。

1.5 模型效果评价

模型评价参数主要使用校正决定系数 (R_c^2)、校正均方差 (RMSEC)、验证决定系数 (R_p^2)、验证均方差 (RMSEP) 和验证相对分析误差 (RPD)。RMSEC 越小， R_c^2 越大，模型的建模效果越好；RMSEP 越小， R_p^2 越大，模型的预测效果越好。同时 RMSEC 与 RMSEP 越接近，模型的稳定性越好。如果 RPD 大

于等于 2.25,表明模型的预测效果很好,可以用于实际检测;如果 RPD 大于 1.75,小于 2.25,说明利用所建模型能够用于定量分析;如果 RPD 小于等于 1.75,则难以进行准确的定量分析^[18-19]。

表 1 代表性农作物秸秆建模分集样品导热系数统计分析

校正集						
秸秆种类	样本量	均值/ (W·(m·K) ⁻¹)	标准差/ (W·(m·K) ⁻¹)	变异系数	最小值/ (W·(m·K) ⁻¹)	最大值/ (W·(m·K) ⁻¹)
小麦	90	0.079 2	0.019 5	0.246	0.058 0	0.165
玉米	89	0.099 1	0.036 1	0.364	0.052 0	0.168
水稻	21	0.095 2	0.026 5	0.278	0.058 5	0.145
混合	201	0.089 6	0.030 2	0.337	0.049 0	0.168

验证集						
秸秆种类	样本量	均值/ (W·(m·K) ⁻¹)	标准差/ (W·(m·K) ⁻¹)	变异系数	最小值/ (W·(m·K) ⁻¹)	最大值/ (W·(m·K) ⁻¹)
小麦	30	0.080 7	0.021 9	0.271	0.063 5	0.168
玉米	30	0.097 4	0.036 2	0.372	0.049 0	0.149
水稻	8	0.096 8	0.043 6	0.450	0.053 5	0.161
混合	67	0.090 5	0.030 9	0.341	0.053 0	0.168

样品导热系数涵盖范围较广,表明样本具有良好的代表性。按照导热性的大小隔二选一进行分级,各分集和全集统计指标值接近,分集较为合理^[20-21]。

2.2 红外光声光谱分析

图 1 为小麦、玉米和水稻秸秆的平均红外光声光谱。由于农作物秸秆中纤维素、半纤维素和木质素相互铰链形成特殊的维管束结构,并且结晶纤维素能够在秸秆表面形成蜡质层外膜,使得导热系数相对较低。

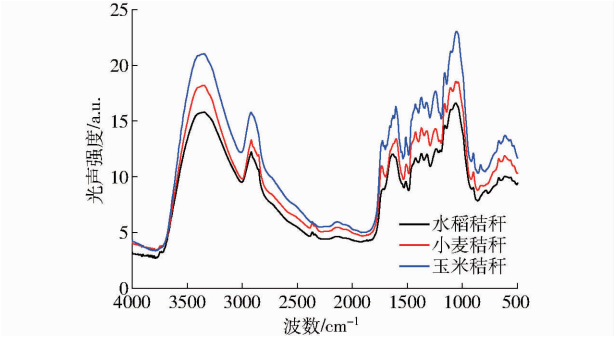


图 1 小麦、玉米和水稻秸秆平均光谱
Fig.1 Average spectra of wheat stalk, corn straw and rice straw

小麦、玉米和水稻秸秆的红外光声光谱在 3 500 ~ 3 000 cm⁻¹、3 000 ~ 2 700 cm⁻¹、1 750 ~ 899 cm⁻¹和 880 ~ 680 cm⁻¹均有相同的吸收峰位置,但吸收强度差别较大,由大到小为:玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆。如表 2 所示^[11-13],3 600 ~ 3 000 cm⁻¹特征区域是与水或木质素中的羟基伸缩振动相关的吸收峰,而 2 920、2 850 cm⁻¹处是与脂肪族亚甲基化合物相

2 结果与讨论

2.1 样品导热系数分析

如表 1 所示,3 种农作物秸秆和混合种类秸秆

关的吸收峰。1 735、1 650 cm⁻¹处吸收峰均为 C=O 伸缩振动,可能与秸秆中的半纤维素和羧酸盐相关。1 600 ~ 1 510 cm⁻¹处吸收峰主要由木质素中 C=C 骨架振动和芳环振动产生,而 1 160 ~ 1 045 cm⁻¹处主要是结晶纤维素和半纤维素的 C—O—C 不对称和面内环拉伸振动。899 cm⁻¹和 825 ~ 750 cm⁻¹处的吸收峰分别与非结晶纤维素和结晶纤维素相关。

表 2 农作物秸秆光声光谱特征峰解析
Tab.2 Photoacoustic spectra' characteristic peaks of main crop straw samples

波数/cm ⁻¹	振动官能团	对应化合物
3 600 ~ 3 000	O—H 伸缩振动	水,木质素
3 000 ~ 2 700	C—H 伸缩振动	含亚甲基的脂肪族化合物
1 735	C=O 伸缩振动	半纤维素
1 650	C=O 伸缩振动	羧酸盐
1 600 ~ 1 510	C=C 骨架振动和芳环振动	木质素
1 160 ~ 1 045	C—O—C 不对称和面内环拉伸振动	结晶纤维素和半纤维素
899	C—O—C 伸缩振动	非结晶纤维素
825 ~ 750	CH ₂ 摇摆振动	结晶纤维素

2.3 基于 PLSR 和 RBF-SVR 的全波段模型

基于所获取的代表性农作物秸秆样品红外光声光谱,应用 PLSR 和 RBF-SVR 算法,分别构建小麦、玉米、水稻和混合秸秆导热系数的线性和非线性定量模型,结果如表 3 所示。其中 LVs 为潜变量因子数,c 和 g 分别为损失函数和核函数参数。

表 3 PLSR 和 RBF-SVR 建模结果比较

Tab.3 Comparison of results of PLSR and RBF-SVR models

种类	PLSR					
	LVs	R_c^2	RMSEC/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	R_p^2	RMSEP/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	RPD
小麦	8	0.92	0.005 3	0.73	0.011	1.99
玉米	5	0.85	0.014 0	0.80	0.017	2.12
水稻	8	0.99	0.000 5	0.92	0.012	3.79
混合	4	0.85	0.012 0	0.78	0.015	2.06

种类	RBF-SVR					
	$[c, g]$	R_c^2	RMSEC/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	R_p^2	RMSEP/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	RPD
小麦	[1.41, 0.004]	0.86	0.005 1	0.75	0.009 4	2.33
玉米	[0.5, 0.003 9]	0.91	0.009 7	0.80	0.018 0	2.01
水稻	[0.5, 0.003 9]	0.96	0.005 9	0.97	0.007 9	5.50
混合	[1, 0.003 9]	0.95	0.006 7	0.81	0.017 0	1.82

对于小麦秸秆,当选用的潜变量因子数(LVs)为 8 时,其 PLSR 模型效果达到最优,验证集的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.011 W/(m·K)和 1.99;此时,RBF-SVR 最优模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.009 4 W/(m·K)和 2.33,对应的建模参数 c 、 g 为 1.41/0.004。

对于玉米秸秆,当采用与水稻秸秆相同的建模参数时,其 RBF-SVR 最优模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.018 W/(m·K)和 2.01,对应的 PLSR 模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.017 W/(m·K)和 2.12,此时所选用潜变量因子数为 5。

对于水稻秸秆,当参数 c 、 g 为 0.5/0.003 9 时,RBF-SVR 最优模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.007 9 W/(m·K)和 5.5,对应的 PLSR 最优模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.012 W/(m·K)和 3.79。

对于混合种类秸秆,当潜变量因子数为 4,建模参数 c 、 g 为 1/0.003 9 时,其 PLSR 和 RBF-SVR 模型效果均达到最优,对应的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.015 W/(m·K)、2.06 和 0.017 W/(m·K)、1.82。基于 PLSR 所构建模型效果优劣顺序为:小麦秸秆、水稻秸秆、混合秸秆、玉米秸秆;基于 RBF-SVR 所构建模型效果优劣顺序为:水稻秸秆、小麦秸秆、混

合秸秆、玉米秸秆。由此可见,尽管所有秸秆混合后建模样本量增大,但是混合模型效果并未得到提升,原因可能是不同种类秸秆导热系数的特征光谱差异较大,当进行混合建模时,不同种类秸秆的特征信息可能存在相互干扰,从而降低了模型效果。然而,与 PLSR 模型结果相比,小麦和水稻秸秆的 RBF-SVR 模型的 RMSEP 值均较小,玉米和混合秸秆的 RBF-SVR 模型的 RMSEP 值均较大。结果表明,小麦和水稻秸秆 RBF-SVR 非线性模型效果更优,玉米和混合种类秸秆的 PLSR 线性模型效果较优。但是,仅小麦和水稻秸秆导热系数定标模型可用于实际定量分析,原因可能是全波段光声光谱中存在大量无信息变量和多重相关性变量,对建模效果和预测精度产生干扰。

2.4 基于蚁群算法的模型优化

将蚁群算法和上述最优建模方法相结合用于小麦、玉米、水稻和混合秸秆的红外光声光谱特征信息提取,建模结果如表 4 所示。

对于小麦秸秆,当建模参数 c 和 g 分别为 5.66 和 0.003 1 时,蚁群算法提取 200 个特征变量所构建的 ACA-RBF-SVR 模型效果达到最优,其 RMSEP 和 RPD 分别为 0.007 8 W/(m·K)和 2.81。对于玉

表 4 基于蚁群算法的 PLSR 和 RBF-SVR 建模结果

Tab.4 Comparison of results of PLSR and RBF-SVR models based on ACA

种类	模型	波长点数	$[c, g]$	LVs	R_c^2	RMSEC/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	R_p^2	RMSEP/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	RPD
小麦	RBF-SVR	3 734	[1.41, 0.004]		0.86	0.005 1	0.75	0.009 4	2.33
	ACA-RBF-SVR	200	[5.66, 0.003 1]		0.85	0.005 0	0.77	0.007 8	2.81
玉米	PLSR	3 734		5	0.85	0.014	0.80	0.017	2.12
	ACA-PLSR	150		8	0.91	0.011	0.83	0.015	2.41
水稻	RBF-SVR	3 734	[0.5, 0.003 9]		0.96	0.005 9	0.97	0.007 9	5.50
	ACA-RBF-SVR	200	[8, 0.003 9]		0.95	0.005 7	0.96	0.005 9	7.39
混合	PLSR	3 734		4	0.85	0.012	0.78	0.015	2.06
	ACA-PLSR	350		4	0.81	0.013	0.79	0.014	2.15

米秸秆,当采用 150 个特征变量进行 ACA-PLSR 模型构建时,其 RMSEP 和 RPD 分别为 0.015 W/(m·K) 和 2.41。对于水稻秸秆,蚁群算法提取的最佳特征变量数为 200,其所构建的 ACA-RBF-SVR 模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.005 9 W/(m·K) 和 7.39。对于混合秸秆,当特征变量数和潜变量因子

数分别为 350 和 4 时,最优的 ACA-PLSR 模型的 RMSEP 和 RPD 分别为 0.014 W/(m·K) 和 2.15。分析可知,与全波段模型效果相比,特征波段模型效果均较优(如图 2 所示),表明蚁群算法能够有效提取不同种类秸秆红外光声光谱中的有效建模信息。

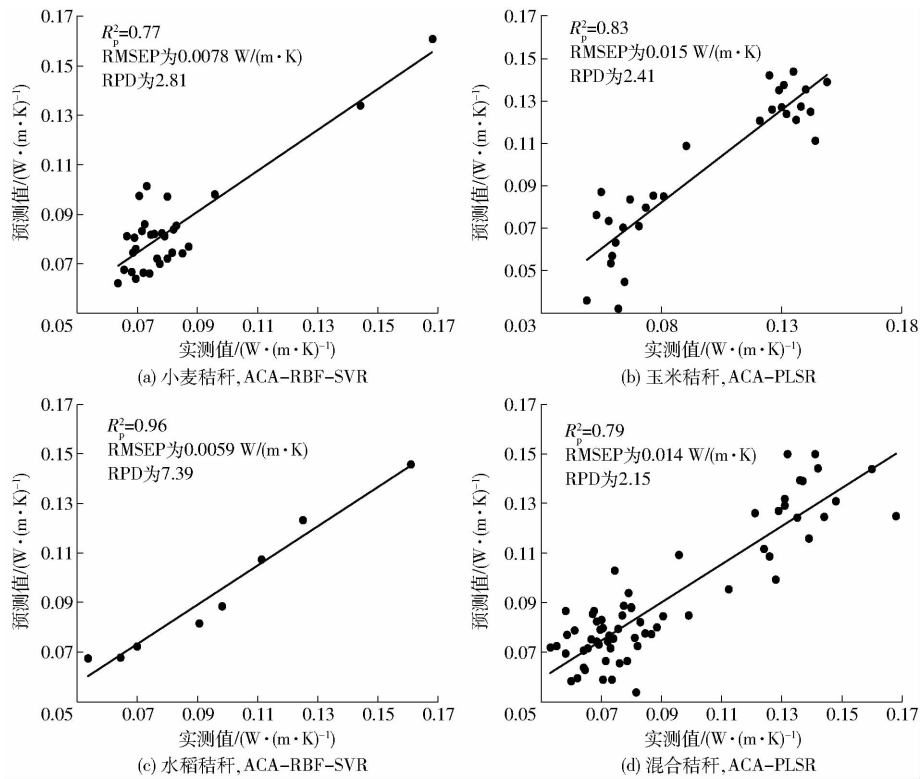


图2 基于蚁群算法的PLSR和SVR建模散点图
Fig. 2 Plots of PLSR and SVR models based on ACA

在所构建的4种最优定量分析模型中,小麦、玉米和水稻单一种类秸秆模型的 RPD 值均大于 2.25,而混合秸秆模型的 RPD 值低于 2.25。结果得出:与混合秸秆相比,单一种类农作物秸秆分别与先进适用化学计量学方法相结合所构建的红外光声光谱定量模型,在快速分析导热系数方面具有可行性和推广应用前景。但对混合秸秆不适用,其模型精度有待进一步提高。

3 结束语

选用我国华北地区具有代表性的小麦、玉米、

水稻秸秆样品,对比研究了偏最小二乘和高斯核支持向量机分别构建单一和混合种类秸秆全波段定量分析模型的效果,研究发现,小麦秸秆和水稻秸秆导热系数 RBF-SVR 非线性模型,以及玉米秸秆、混合种类秸秆的 PLSR 线性模型效果较优。进一步应用蚁群算法与上述最优建模方法相结合,构建了更加优化的小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆和混合种类秸秆导热系数模型。研究结果表明,红外光声光谱技术结合先进适用的化学计量学方法分析我国主要粮食作物秸秆导热系数具有良好的可行性和推广应用前景。

参 考 文 献

1 徐晓娟,卢立新,王立军,等. 农作物秸秆废弃物材料化利用现状及发展[J]. 包装工程,2017,38(1):156-162.
XU Xiaojuan, LU Lixin, WANG Lijun, et al. Current situation and development of material utilization of agricultural straw wastes [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 156-162. (in Chinese)

2 YANG H S, KIM D J, KIM H J. Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials[J]. Bioresource Technology, 2003, 86(2): 117-121.

3 ASHOUR T, GEORG H, WU W. Performance of straw bale wall: a case of study[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 1960-1967.

- 4 胡玉秋,范军,张玉稳,等. 秸秆混凝土砌块保温性能的实验研究[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2010,41(3):428-430.
HU Yuqiu, FAN Jun, ZHANG Yuwen, et al. Experimental study on thermal performance of stalk concrete blocks[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2010, 41(3):428-430. (in Chinese)
- 5 姚久星. 秸秆菱镁混凝土保温性能试验与应用研究[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
YAO Jiuxing. Experimental and application research on thermal insulation performance of straw MOC concrete [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 6 韩旭. 农作物秸秆再生保温砖的应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
HAN Xu. Application of renewable straw insulation brick [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
- 7 BERGEVIN M, N'SOUKPOE-KOSSI C N, CHARLEBOIS D, et al. Assessment of strawberry maturity by photoacoustic spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 1995, 49(3): 397-399.
- 8 LI C, DU C, ZENG Y, et al. Two-dimensional visualization of nitrogen distribution in leaves of Chinese cabbage (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) by the Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy technique[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(41): 7696-7701.
- 9 HERNANDEZ-AGUILAR C, CRUZ-OREA A, IVANOV R, et al. The optical absorption coefficient of maize seeds investigated by photoacoustic spectroscopy[J]. Food Biophysics, 2011, 6(4): 481-486.
- 10 ZHOU X, DU C, TIAN K, et al. Application of FTIR-PAS and Raman spectroscopies for the determination of organic matter in farmland soils[J]. Talanta, 2016, 158: 262-269.
- 11 BEKIARIS G, LINDEDAM J, PELTRE C, et al. Rapid estimation of sugar release from winter wheat straw during bioethanol production using FTIR-photoacoustic spectroscopy[J]. Biotechnology for Biofuels, 2015, 8(1): 85-96.
- 12 BEKIARIS G, TRIOLO J M, PELTRE C, et al. Rapid estimation of the biochemical methane potential of plant biomasses using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2015, 197(4): 475-481.
- 13 DU C W, ZHOU G Q, ZHOU J M, et al. Characterization of animal manures using mid-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6273-6277.
- 14 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- 15 李小昱,徐森森,冯耀泽,等. 基于高光谱图像与果蝇优化算法的马铃薯轻微碰伤检测[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(1):221-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160129&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.029.
LI Xiaoyu, XU Senmiao, FENG Yaoze, et al. Detection of potato slight bruise based on hyperspectral image and fruit fly optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):221-226. (in Chinese)
- 16 王超. 膨化饲料特性及带式穿流干燥机气流场数值模拟研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
WANG Chao. Research on characteristics of expanded feed and airflow field simulation in the belt cross-flow dryer[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 17 李欢欢,卢伟,杜昌文,等. 基于光声光谱结合 LS-SVR 的稻种活力快速无损检测方法研究[J]. 中国激光,2015,42(11): 270-279.
LI Huanhuan, LU Wei, DU Changwen, et al. Study on rapid and non-destructive detection of rice seed vigor based on photoacoustic spectroscopy combined with LS-SVR [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11):270-279. (in Chinese)
- 18 DUAN H, ZHU R, YAO X, et al. Sensitive variables extraction, non-destructive detection and visualization of total viable count (TVC) and pH in vacuum packaged lamb using hyperspectral imaging[J]. Analytical Methods, 2017, 9(21): 3172-3183.
- 19 MALLEY D F, MCCLURE C, MARTIN P D, et al. Compositional analysis of cattle manure during composting using a field-portable near-infrared spectrometer[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(4-6): 455-475.
- 20 朱荣光,段宏伟,王龙,等. 不同分集方法对牛肉嫩度高光谱检测模型的比较[J]. 食品与发酵工业. 2016,42(4):189-192.
ZHU Rongguang, DUAN Hongwei, WANG Long, et al. Comparative research on hyperspectral detection model of beef tenderness with different sample set partitioning methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(4):189-192. (in Chinese)
- 21 刘伟,赵众,袁洪福,等. 光谱多元分析校正集和验证集样本分布优选方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(4): 947-951.
LIU Wei, ZHAO Zhong, YUAN Hongfu, et al. An optimal selection method of samples of calibration set and validation set for spectral multivariate analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4):947-951. (in Chinese)