

王新宇, 牛鹏帅, 卢伟, 等. 基于光声光谱深度扫描的单粒玉米种子发芽率无损检测方法 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 119-125.
WANG Xinyu, NIU Pengshuai, LU Wei, et al. A nondestructive detection method for single maize seed germination rate based on photoacoustic spectrum deep scanning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 119-125.

基于光声光谱深度扫描的单粒玉米种子发芽率无损检测方法

王新宇¹, 牛鹏帅¹, 卢伟¹, DENG Yiming²

(1 南京农业大学 人工智能学院/江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 江苏 南京 210031;

2 密歇根州立大学 工学院, 密歇根州 东兰辛 48824)

摘要:【目的】针对目前玉米种子发芽率快速无损检测方法易受种子表皮颜色影响的问题,拟采用光声光谱深度扫描技术提高玉米种子发芽率的检测精度。【方法】选取3种不同颜色、6个品种的玉米样本,利用人工老化方法得到8种不同老化时间的玉米种子;通过调制光谱频率获得7种不同深度的光声光谱信息,并利用主成分分析分别得到最佳扫描频率和特征光谱,比较偏最小二乘法回归、BP神经网络、广义回归神经网络和支持向量回归等发芽率预测模型精度。【结果】光声光谱最佳扫描频率为500 Hz,支持向量回归的预测模型精度最高,相关系数均超过0.980 0。6个品种玉米种子的发芽率预测相关系数分别为0.983 8, 0.984 7, 0.983 6, 0.987 8, 0.983 3和0.994 7, 6个品种混合的玉米种子发芽率预测相关系数为0.942 1。【结论】通过拓展光谱、声音和深度信息,光声光谱深度扫描技术适用于不同颜色的玉米发芽率高精度检测,具有较好的泛化能力。

关键词: 光谱学; 光声光谱; 玉米种子; 发芽率; 支持向量回归
中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)06-0119-07

A nondestructive detection method for single maize seed germination rate based on photoacoustic spectrum deep scanning

WANG Xinyu¹, NIU Pengshuai¹, LU Wei¹, DENG Yiming²

(1 College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Provincial Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment Engineering, Nanjing 210031, China;
2 College of Engineering, Michigan State University, East Lansing 48824, USA)

Abstract: 【Objective】In view of the problem that the existed rapid and non-destructive maize seed germination rate testing methods are easily affected by the color of seed skin, the photoacoustic spectroscopy deep scanning technology was proposed to improve the detection accuracy of maize seed germination rate. 【Method】Six maize cultivar seeds with three different colors were selected and treated using artificial aging method to obtain eight kinds of maize seeds with different aging time. The photoacoustic spectrum information with seven different depths was obtained by modulating the spectral frequency. The best scanning frequency and characteristic spectrum were determined by principal component analysis method. Different modeling

approaches including partial least squares regression, back propagation neural network, generalized regression neural network and support vector regression were applied for comparing the prediction accuracy to optimize maize seed germination rate model. 【Result】 The best scanning frequency of photoacoustic spectrum was 500 Hz. The prediction model accuracy of support vector regression was the highest, and the correlation coefficients were all over 0.980 0. The prediction correlation coefficients of germination rates of six maize cultivar seeds were 0.983 8, 0.984 7, 0.983 6, 0.987 8, 0.983 3 and 0.994 7 respectively, while that of the mixed six cultivar maize seeds reached 0.942 1. 【Conclusion】 Through expanding the spectrum, sound and depth information, the photoacoustic spectrum depth scanning technology has a good generalization ability, and is suitable for high-precision germination rate detection of maize with different colors.

Key words: spectroscopy; photoacoustic spectroscopy; maize seed; germination rate; support vector regression

美国农业部 2020 年 6 月发布 2020—2021 年度全球玉米产量预估报告,我国以 2.6 亿 t 的预估产量位居全球第 2。玉米作为我国主要农作物之一,是我国重要的经济产业,其种子质量直接影响玉米产量,其中种子发芽率是评价种子质量的重要指标之一^[1]。为避免因种子发芽率过低导致产量受损,需在播种前对随机抽取的玉米种子进行发芽试验以确定发芽率,但该方法耗时较长且受休眠期影响。为缩短检测时间,染色法代替了发芽试验法,有活力种子胚细胞中的脱氢酶被染色剂 (TTC) 还原,胚部位呈红色,以此区分有无活力的种子。染色法简单快速、准确可靠,同时适用于休眠期长和难以进行发芽试验的种子,但仍为有损检测且对操作者专业性要求较高^[2]。因此,1995 年国际种子检验协会的《种子生活力测定手册》提出电导率检测方法^[3],在保证检测速度的同时,降低了对操作人员的要求,但其主要基于种子吸胀初期细胞膜损伤重建过程中电解质和可溶性物质的外渗程度,对种子发芽率进行评价,耗时较长且损伤种子,同时准确性也易受室温、水温、水质等因素影响。

为实现玉米种子发芽率的快速无损检测,近年来,机器视觉、近红外光谱、高光谱成像等多种无损检测技术被应用于种子质量评价。为准确检测玉米种子是否有机机械损伤裂纹,闫彬等^[4]基于机器视觉技术对自动提取的 320 幅玉米胚面和胚乳面图像裂纹进行识别,准确率分别为 94.4% 和 86.9%。Kusumaningrum 等^[5]采用近红外光谱技术并结合偏最小二乘法判别区分有无活力的大豆种子,精确度接近 100%。Kimuli 等^[6]采用可见/近红外高光谱成像系统对不同地区的 4 个品种的玉米种子表面是否含黄曲霉毒素 B1 进行评估,结合主成分分析和因子判别分析建模,评估准确率达到 96%。Feng 等^[7]利用高光谱成像技术,通过图谱融

合鉴定不同加速老化时期的玉米种子活力,通过发芽试验验证分类模型,其结果表明,高光谱技术结合 SVM 模型可以进一步提高玉米种子活力的检测精度。可见,检测信息维度的增加有利于提高检测精度。本文拟通过深度扫描光声光谱技术将光谱技术拓展到光谱、声音、深度维度,基于此,构建玉米种子发芽率预测模型,实现对不同颜色玉米种子发芽率的快速、无损、高精度检测,为种子质量评估提供新的方法和技术。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取 3 种颜色、6 个品种的玉米种子为研究对象,其中每种颜色的玉米种子均有 2 个不同的品种,分别为白玉米 (‘银香’和‘京糯 808’),黄玉米 (‘京黏 1 号’和‘苏玉’),黑玉米 (‘黑糯 4 号’和‘黑糯 6 号’),于 2019 年收获于山东潍坊,由寿光顺昌种业提供,经筛选剔除缺陷种子,每个品种挑选颗粒饱满、外表无明显差异的种子 1 600 粒,用于人工老化。

1.2 人工老化

为得到不同发芽率的玉米种子,参照已有研究^[8]采用人工老化法对玉米种子样品进行高温高湿人工老化处理。将挑选的种子均分为 8 份,按照 0~7 次序编号,将 0~7 号样品置于托盘中放入培养箱 (宁波江南仪器厂制造,型号:RXZ-128A) 在温度 45 ℃ 和相对湿度 95% 环境下分别老化 0、1、2、3、4、5、6 和 7 d。结束后从培养箱中取出,自然条件下风干 1 d 后装入密封袋中,放入 4 ℃ 冰箱冷藏保存。

1.3 检测原理

光声光谱技术 (Photoacoustic spectrometry technology, PAS) 是一种基于光热测量原理的新型

技术, 与传统吸收光谱的测量原理差异在于, PAS并非基于光子特性直接进行光谱检测, 而是在样品受光照之后, 对其在无辐射激发现象中的周期性热流进行检测。在不同光谱波长和调制频率下, 不同材料中的热扩散长度具有差异, 因此, 可通过物质表面附近热扩散层内的光吸收进行物质成分分析。随着调制频率的降低, 热扩散距离增加, 检测深度更深, 基于此原理可以检测样品不同深度的物质成分^[9]。由于玉米种子的种皮具有良好的透光性, 而胚乳、子叶、胚芽、胚轴和胚根的老化程度和种子生命活力具有密切的联系, 因此通过深度扫描光声光谱可挖掘出玉米种子的生命信息^[10], 原理如图1所示。

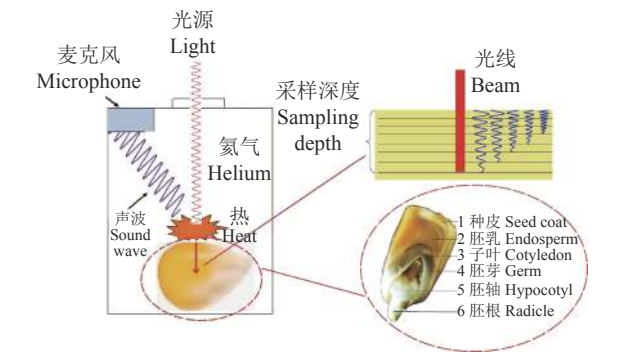


图1 玉米种子光声光谱深度扫描原理

Fig. 1 Photoacoustic spectroscopy deep scan schematic diagram of maize seed

1.4 光声光谱采集

试验使用美国 Thermal Fish 公司生产的 Nicolet Is50R 红外光谱仪和美国 MTEC Photoacoustics 公司生产的 PA300 光声检测器搭建玉米种子光声光谱检测系统。在试验数据采集之前, 将光谱仪开机预热 0.5 h, 并用氮气对整个红外光谱仪仓体内部进行吹扫, 以减小水分对光谱测定的干扰, 然后对光谱仪进行设定。试验过程中扫描的光声光谱波数范围为中红外 400~4 000 cm^{-1} , 光谱扫描的分辨率为 8 cm^{-1} , 动镜速率为 0.32 cm/s , 光谱的连续扫描次数为 32 次。把不同老化程度的玉米样品以单颗形式均匀放置在铜质圆柱形样品池 (直径 10 mm, 高 5 mm) 中, 调整样品的高度, 使其低于样品仓边缘 1~2 mm, 用氦气 (5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 连续吹扫 10 s 后采集样品的光声光谱, 每改变一次采集深度前需重新用玻璃碳进行一次相位校准, 以碳黑背景光谱作为对照, 用于光谱信号的标准化处理。检测装置如图2所示。

1.5 发芽试验

经过人工加速老化处理和光谱采集后, 取不同

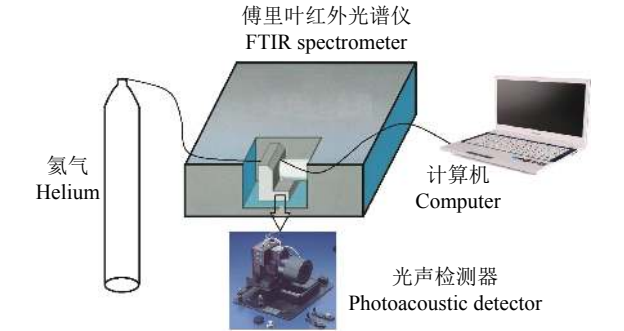


图2 光声光谱采集试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photoacoustic spectrum acquisition experimental device

老化处理时间的玉米种子各 200 粒, 均分为 4 组, 进行发芽试验。试验过程中首先将不同老化时间的玉米种子按编号放入装有清水的 500 mL 烧杯中, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下浸种 48 h。然后, 将不同老化时间的玉米种子按编号顺序依次放置在内铺 2 层滤纸的玻璃培养皿的相应位置, 加水湿润, 每粒玉米种子之间留有种子直径 5 倍以上的间距, 盖好盖子后放入 20 $^{\circ}\text{C}$ 的智能人工气候箱 (型号: RXZ 型-多段编程, 宁波江南仪器厂) 中, 按照 GB/T 3543.4—1995 农作物种子检验规程 发芽试验^[11] 要求培养玉米种子 7 d。每天记录玉米种子的发芽情况, 第 7 天计算发芽率, 结果取 4 组试验的平均值。发芽率试验结果见表1。

表1 不同老化时间玉米种子的发芽率					
Table 1 Germination rates of maize seeds with different aging times					
老化时间/d	第1组	第2组	第3组	第4组	平均值
Aging time	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Average
0	90.00	88.00	86.00	90.00	88.50
1	84.00	86.00	86.00	88.00	86.00
2	82.00	80.00	84.00	84.00	82.50
3	80.00	78.00	80.00	78.00	79.00
4	76.00	76.00	74.00	74.00	75.00
5	70.00	72.00	68.00	68.00	69.75
6	68.00	66.00	64.00	66.00	66.00
7	60.00	64.00	62.00	64.00	62.50

2 结果与分析

2.1 EEMD 去噪

通过集合经验模态分解 (Ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 对采集到的原始光谱信息进行去噪, 得到平滑的原始光谱曲线^[12]。步骤如下:

- 1) 在原始光谱曲线 $x(t)$ 中引入正态分布的白噪声 $w(t)$;

2) 加入白噪声的光谱作为一个新的光谱曲线 $X(t) = x(t) + w(t)$, 对构造的新光谱曲线 $X(t)$ 进行经验模态分解, 得到各个本征模函数 (Intrinsic mode function, IMF) 分量:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n, \tag{1}$$

式中, c_j 是经验模态分解得到的第 j 个 IMF, r_n 是分解删除 n 个 IMF 后的残余分量, 常表示信号趋势;

3) 给原始光谱曲线 $x(t)$ 加入不同的白噪声 $w_i(t)$, 重复以上步骤得到各自分解后的 IMF 分量组:

$$X(i) = \sum_{j=1}^n c_{ij} + r_{in}, \tag{2}$$

式中, $X(i)$ 是加入白噪声 $w_i(t)$ 后的光谱, c_{ij} 是经验模态分解得到的第 j 个 IMF, r_{in} 是分解删除 n 个 IMF 后的残余分量;

4) 每次获得的 IMF 集合平均后作为最终的 IMF:

$$c_j = \sum_{i=1}^N c_{ij} / N, \tag{3}$$

式中, N 为添加噪声的次数。

以 ‘京黏 1 号’ 玉米为例, 由于 Nicolet Is50R 红外光谱仪的测量波数范围 ($4\,000 \sim 3\,700\text{ cm}^{-1}$ 和 $940 \sim 400\text{ cm}^{-1}$) 内的信噪比过低, 因此去除该段波数。图 3 为该玉米种子在调制频率为 500 Hz 下的光声光谱原始图像和 EEMD 去噪图像。

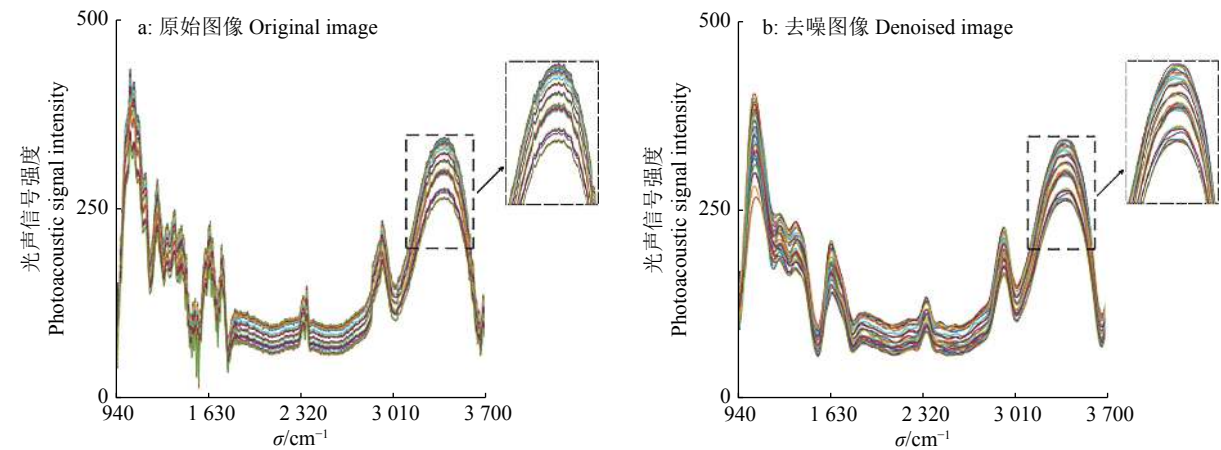


图 3 ‘京黏 1 号’ 玉米的 500 Hz (8 μm) 原始图像和去噪图像
Fig. 3 ‘Jingnian No.1’ maize original image and denoised image at 500 Hz (8 μm)

由图 4 可见, 不同老化程度的玉米种子在波数 $3\,700 \sim 940\text{ cm}^{-1}$ 之间具有相似的吸收特性, 出现相似度较强的吸收峰。在波数 $3\,500 \sim 3\,100\text{ cm}^{-1}$ 处有较宽吸收峰; 在波数 $3\,000 \sim 2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处均出现一尖峰; 在 $2\,700 \sim 1\,850\text{ cm}^{-1}$ 范围内, 光声光谱信号较平缓, 仅在 $2\,320\text{ cm}^{-1}$ 处出现一小峰; 在波数 $1\,630\text{ cm}^{-1}$ 处有较明显尖峰; 在波数 $1\,500 \sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 处有一段平缓且不明显小峰; 在波数 $1\,440 \sim 1\,317\text{ cm}^{-1}$ 处

亦然, 在 $1\,412\text{ cm}^{-1}$ 附近有一吸收峰; 指纹区 $1\,060\text{ cm}^{-1}$ 附近有一强而宽的吸收峰; 以上吸收峰均反映了玉米种子内部成分的光声光谱特性。

2.2 PCA 特征波长提取

主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 旨在实现数据降维, 消除众多信息相互重叠的部分^[13]。本文对已经预处理过的每个深度的样本进行主成分分析, 经过预处理之后, 每条玉米种子光声光谱有 727 个数据点, 各检测深度的玉米种子光谱信息组成数据矩阵。虽均可作为模型的输入, 但大量的数据会显著增加计算量, 同时信息冗余也会导致过拟合而降低模型的预测精度, 因此利用主成分分析分别获取各检测深度数据矩阵的主成分及相应贡献率, 以 95% 为目标累积贡献率选取主成分, 完成光声光谱的特征提取, 特征光谱如图 5。

2.3 玉米发芽率检测模型的建立与验证

为优化玉米光声光谱发芽率预测模型, 分别采用偏最小二乘法回归 (Partial least squares regression, PLSR)、BP 神经网络 (Back propagation

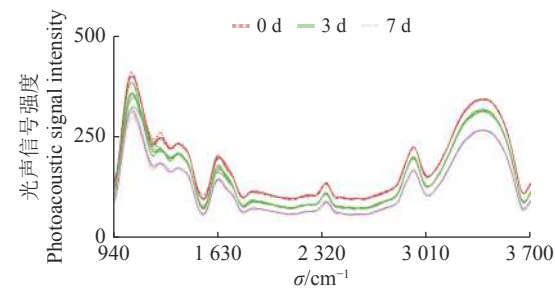


图 4 不同老化时间玉米种子的光声光谱
Fig. 4 Photoacoustic spectroscopy of maize seeds with different aging time

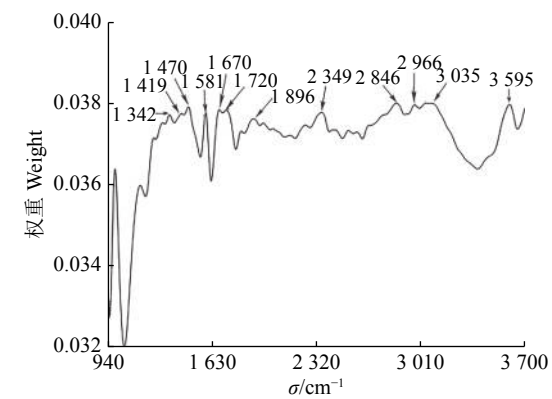


图 5 ‘京黏 1 号’ 500 Hz (8 μm) 特征光谱

Fig. 5 Characteristic spectrum of ‘Jingnian No.1’ at 500 Hz (8 μm)

neural network, BPNN)、支持向量回归 (Support vector regression, SVR) 和广义回归神经网络 (Generalized regression neural network, GRNN) 4 种建模方法, 在 7 个检测斩波频率下建立 28 种玉米种子发芽率预测模型。各检测斩波频率以 3:1 为比例随机选出训练集和预测集, 将特征光谱作为模型输入, 玉米种子发芽率作为模型输出, 建模结果对比见表 2 和表 3。

由表 2 可见, ‘京黏 1 号’ 玉米在不同深度下的 SVR 建模结果均较优, BP、PLSR 和 GRNN 模型在不同深度下的结果优劣各异, 且稳定性较差。综合建模精度和采样时间两方面因素, 选定 500 Hz 为最优检测频率, 该频率下训练集和预测集的相关系

表 2 不同深度 ‘京黏 1 号’ 光声光谱建模结果

Table 2 Photoacoustic spectroscopy modeling results of ‘Jingnian No.1’ with different depths

调制频率/Hz(深度/μm) Modulation frequency (Depth)	建模方法 Modeling method	训练集 Training set		预测集 Prediction set		扫描时间/min Scan time
		相关系数	均方根误差	相关系数	均方根误差	
		Correlation coefficient	Root mean square error	Correlation coefficient	Root mean square error	
1 000(5.7)	PLSR	0.976 2	1.923 7	0.841 7	5.270 0	5
	BP	0.970 4	2.216 6	0.917 7	4.353 7	5
	GRNN	0.972 6	2.792 9	0.932 5	3.853 8	5
	SVR	0.994 7	1.031 4	0.976 9	1.720 7	5
800(6.4)	PLSR	0.974 6	1.569 1	0.955 8	3.495 7	6
	BP	0.984 9	1.544 7	0.961 3	3.789 1	6
	GRNN	0.990 2	1.333 5	0.962 5	1.790 3	6
	SVR	0.997 6	0.633 0	0.993 0	0.875 3	6
500(8.0)	PLSR	0.992 6	1.100 5	0.967 5	1.100 3	8
	BP	0.983 9	1.231 0	0.964 8	2.742 8	8
	GRNN	0.989 4	1.336 2	0.961 7	2.373 5	8
	SVR	0.993 6	0.971 9	0.983 6	1.010 3	8
400(9.0)	PLSR	0.842 2	4.550 9	0.617 2	11.604 9	11
	BP	0.990 0	1.505 2	0.806 7	3.811 1	11
	GRNN	0.918 8	3.581 2	0.611 0	8.337 2	11
	SVR	0.973 4	0.510 8	0.839 4	4.604 8	11
300(10.4)	PLSR	0.989 1	1.271 0	0.976 5	2.115 6	15
	BP	0.987 2	1.636 6	0.964 5	2.739 1	15
	GRNN	0.971 6	2.336 9	0.940 8	2.657 1	15
	SVR	0.994 1	0.975 1	0.980 7	1.761 4	15
200(12.0)	PLSR	0.972 2	2.002 6	0.903 7	4.818 8	18
	BP	0.990 9	1.353 7	0.908 6	0.812 0	18
	GRNN	0.936 6	0.646 6	0.926 3	0.780 4	18
	SVR	0.992 0	1.165 0	0.941 1	2.074 4	18
100(18.0)	PLSR	0.908 2	3.793 4	0.848 3	4.697 7	20
	BP	0.988 4	1.600 1	0.933 2	3.751 9	20
	GRNN	0.927 0	3.581 1	0.913 1	3.797 6	20
	SVR	0.998 7	0.952 1	0.952 1	2.885 5	20

表 3 单一品种玉米和混合玉米最优建模 (SVR 模型) 结果

Table 3 Optimal modeling (SVR model) results of single cultivar maize and mixed-cultivar maize

玉米品种 Maize cultivar	训练集 Training set		预测集 Prediction set	
	相关系数	均方根误差	相关系数	均方根误差
	Correlation coefficient	Root mean square error	Correlation coefficient	Root mean square error
‘京糯808’ ‘Jingnuo 808’	0.997 8	0.576 0	0.983 8	1.931 3
‘银香’ ‘Yinxiang’	0.994 2	0.947 5	0.984 7	1.833 8
‘京黏1号’ ‘Jingnian No.1’	0.993 6	0.971 9	0.983 6	1.010 3
‘苏玉’ ‘Suyu’	0.992 7	1.036 0	0.987 8	1.659 7
‘黑糯4号’ ‘Heinuo No.4’	0.994 2	0.992 4	0.983 3	1.347 2
‘黑糯6号’ ‘Heinuo No.6’	0.997 9	0.567 5	0.994 7	1.053 6
混合玉米 Mixed maize	0.994 5	0.974 8	0.942 1	1.387 8

数较高,且相对偏差较小。其余 5 个品种玉米的发芽率预测模型建立结果与‘京黏 1 号’趋势相同,均在 500 Hz 调制频率下 SVR 预测结果最优。

表 3 为 6 个品种玉米种子以最优模型 (SVR 模型) 独立、混合建模的结果。由表 3 可见,训练集和预测集的相关系数较高,且相对偏差较小,表明 SVR 建模方法对单一品种玉米种子和多品种混合

玉米种子的发芽率预测均适用,且不受玉米表面颜色影响。同时,混合建模时,训练集相关系数为 0.994 5,均方根误差为 0.974 8,预测集相关系数为 0.942 1,均方根误差为 1.387 8,虽然建模效果评定为优良,但精度较单一品种玉米种子建模精度相比略低。单一品种玉米和混合玉米发芽率的 SVR 预测模型见图 6。

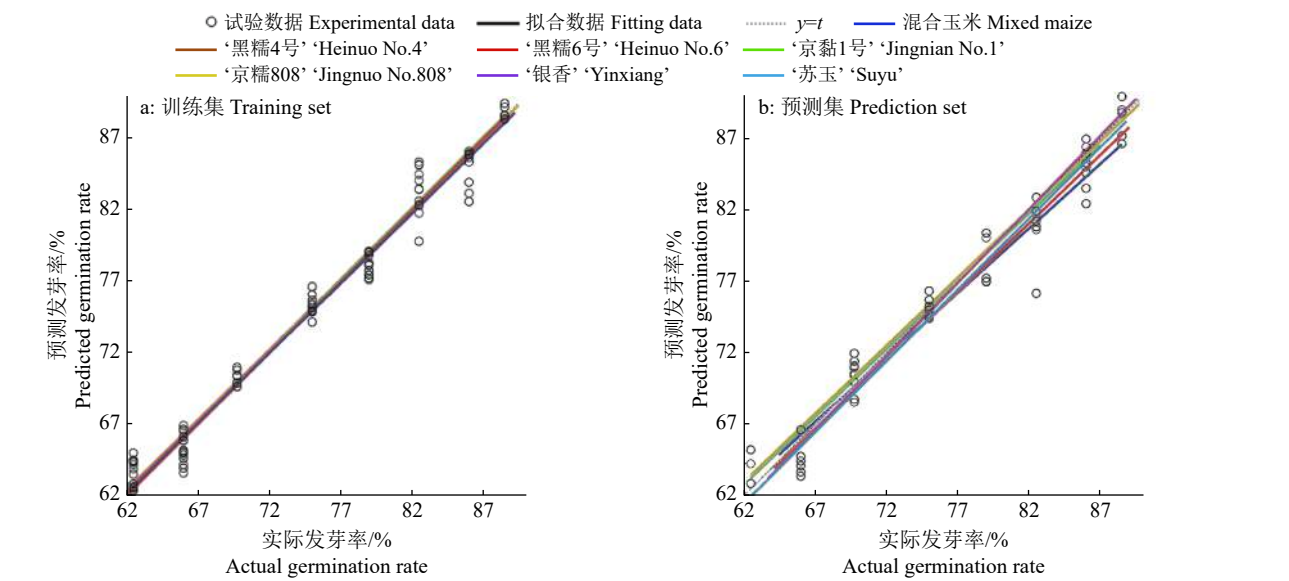


图 6 单一品种玉米和多种混合玉米的 SVR 建模结果

Fig. 6 SVR modeling results of single cultivar maize and mixed-cultivar maize

3 讨论与结论

基于不同老化时间玉米膜结构完整性差异、玉米种子内部物质发生变化的生物学原理及光声光谱检测的物理学原理对玉米发芽率进行预测。已有生物学分析^[14-15]表明:随着玉米种子老化劣变,玉米种子发芽率降低,其内部酶基团(主要元素:C、H、O、N)的活性也逐渐降低,如玉米内部的过氧化物酶、脱氢酶、过氧化氢酶等;同时,可溶性糖(主要元

素:C、H、O)和丙二醛(主要元素:C、H、O)含量逐渐增加,可溶性蛋白(主要元素:C、H、O、N、S等)含量不断减少。光声光谱检测技术能够通过光转换成声的能力大小的探测来确定物质的热学性质和光谱学性质,改变调制频率便可获取玉米种子不同深度下物质变化的信息。

在 500 Hz 时,玉米种子的生物学变化最为敏感,其中:可溶性糖和蛋白质等 C—O 键、C—N 键的伸缩振动导致波数 1 160~1 000 cm⁻¹ 的波段内出

现吸收峰;油脂和纤维素等 C—O 键和 C—C 键的伸缩振动导致波数 1 060 cm⁻¹ 附近强而宽的吸收峰;波数 1 412 cm⁻¹ 附近的吸收峰为淀粉中 C—O—O、CH₂ 伸缩振动吸收区;波数 1 440~1 317 cm⁻¹ 附近的吸收峰为亚甲基和甲基对称弯曲振动及 CH₃ 剪式振动吸收;波数 1 500~1 200 cm⁻¹ 范围内的吸收峰是多糖和蛋白质混合振动的吸收区;波数 1 630 cm⁻¹ 处小的吸收峰主要由蛋白质 C—O 键的伸缩振动(酰胺 I) 和水的 O—H 键的弯曲振动以及不饱和油脂中 C—C 键的伸缩振动叠加而导致;波数 2 320 cm⁻¹ 处的小吸收峰由光声池中残余 CO₂ 气体导致;波数 3 000~2 850 cm⁻¹ 处的尖状吸收峰主要为丙二醛和纤维素等物质的 C—H 键伸缩振动所导致;波数 3 500~3 100 cm⁻¹ 处宽的吸收峰主要由水中 O—H 键和蛋白质中 N—H 键振动伸缩的叠加作用导致^[16-18]。

本文采用基于深度扫描的单粒玉米发芽率光声光谱检测方法,采集 3 种颜色、6 个品种的不同老化程度的玉米种子在不同调制频率下的光声光谱信息,通过 EEMD 和 PCA 对原始光声光谱进行去噪和降维处理,分别结合 PLSR、BPNN、GRNN 和 SVR 进行建模。结果表明,500 Hz 为最佳扫描频率,SVR 建模为最优发芽率预测模型;单一品种玉米种子发芽率预测相关系数均超过 0.980 0,混合品种玉米种子发芽率预测相关系数达 0.942 1。结果表明,光声光谱深度扫描技术通过拓展光谱、声音和深度信息预测玉米种子发芽率是可行的,可为多维、高精度检测种子发芽率提供新方法。

参考文献:

[1] RAJJOU L, DUVAL M, GALLARDO K, et al. Seed germination and vigor[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2012, 63: 507-533.

[2] 沈宇峰,王志安,俞旭平,等.白术种子生活力测定方法及其与发芽率的相关性研究[J].*中国中药杂志*, 2008(3): 248-250.

[3] HIBBARD R P, MILLER E V. Biochemical studies on seed viability: I: Measurements of conductance and reduction[J]. *Plant Physiol*, 1928, 3(3): 335-352.

[4] 闫彬,杨福增,郭文川.基于机器视觉技术检测裂纹玉米种子[J].*农机化研究*, 2020, 42(5): 181-185.

[5] KUSUMANINGRUM D, LEE H, LOHUMI S, et al. Non-destructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy[J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(5): 1734-1742.

[6] KIMULI D, WANG W, LAWRENCE K C, et al. Utilisation of visible/near-infrared hyperspectral images to classify aflatoxin B1 contaminated maize kernels[J]. *Biosyst Eng*, 2018, 166: 150-160.

[7] FENG L, ZHU S S, ZHANG C, et al. Identification of maize kernel vigor under different accelerated aging times using hyperspectral imaging[J/OL]. *Molecules* (Basel, Switzerland), 2018, 23(12): 3078. [2020-07-25]. <https://doi.org/10.3390/molecules23123078>.

[8] 赵欣欣,刘继权,王奇.玉米种子对高温高湿老化的响应研究[J].*吉林农业科学*, 2015, 40(2): 11-15.

[9] HERNÁNDEZ-AGUILAR C, DOMÍNGUEZ-PACHECO A, CRUZ-OREA A, et al. Depth profiles in maize (*Zea mays* L.) seeds studied by photoacoustic spectroscopy[J]. *Int J Thermophys*, 2015, 36(5/6): 891-899.

[10] 魏旭彤.玉米种子活力影响因素研究[D].哈尔滨:东北农业大学, 2018.

[11] 中华人民共和国农业部,全国农作物种子标准化技术委员会.农作物种子检验规程发芽试验:GB/T 3543.4—1995[S].北京:国家技术监督局, 1995.

[12] TIAN Z D, LI S J, WANG Y H, et al. A prediction approach using ensemble empirical mode decomposition-permutation entropy and regularized extreme learning machine for short-term wind speed[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(2): 177-206.

[13] 郭明军,李伟光,杨期江,等.基于SVD原理的PCA特征频率提取算法及其应用[J].*华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 1-9.

[14] SILVA G P, SALES J F, NASCIMENTO K J T, et al. Biochemical and physiological changes in *Dipteryx alata* Vog. seeds during germination and accelerated aging[J]. *South African J Bot*, 2020, 131: 84-92.

[15] 鲜萱,齐传东,陈琦,等.人工老化处理对菠菜种子生理生化指标及萌发相关基因表达量的影响[J].*中国农业大学学报*, 2019, 24(3): 45-53.

[16] 陆宇振,杜昌文,余常兵,等.红外光声光谱法测定油菜籽品质参数[J].*分析化学*, 2014, 42(2): 293-297.

[17] BRYŚ A, BRYŚ J, MELLADO Á F, et al. Characterization of oil from roasted hemp seeds using the PDSC and FTIR techniques[J/OL]. *J Therm Anal Calorim*, 2019, 138(4): 2781-2786. [2020-07-25]. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08640-8>.

[18] LÜ G Q, DU C W, MA F, et al. In situ detection of rice leaf cuticle responses to nitrogen supplies by depth-profiling Fourier transform photoacoustic spectroscopy[J]. *Spectrochim Acta Part A: Mol Biomol Spectrosc*, 2020, 228: 117759. [2020-07-25]. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117759>.

【责任编辑 李晓卉】