

人工老化小麦种子的红外光谱鉴别

刘杰¹, 刘刚^{1*}, 李姝洁¹, 邓子昂¹, 欧全宏¹, 时有明²

¹ 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500;

² 曲靖师范学院物理与电子工程学院, 云南 曲靖 655011

摘要 老化粮食种子鉴别对农业生产和食品安全具有重要意义, 因此, 结合红外光谱和多元统计分析对人工老化小麦种子进行研究。实验结果表明, 不同老化程度小麦种子的原始光谱总体比较相似。在二阶导数红外光谱中, 人工老化小麦种子在 $1800\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收峰强度和形状显示出差异。在 $1800\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 范围内, 小麦种子二维相关红外光谱的自动峰数目、强度随老化时间的增加会发生明显变化。研究结果表明, 红外光谱法结合主成分分析和系统聚类分析法可以快速、方便地区分人工老化小麦种子, 有望发展为鉴别老化种子的新方法。

关键词 红外光谱; 小麦种子; 人工老化; 多元统计分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0830002

Infrared Spectroscopy Identification of Artificially Aging Wheat Seeds

Liu Jie¹, Liu Gang^{1*}, Li Shujie¹, Deng Ziang¹, Ou Quanhong¹, Shi Youming²

¹ School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

² School of Physics and Electronic Engineering, Qujing Normal University, Qujing, Yunnan 655011, China

Abstract Identification of aging grain seeds has attracted significant attention in agricultural production and food safety. Therefore, this study combines infrared spectroscopy and multivariate statistical analysis to investigate artificially aging wheat seeds. The experimental results show that the original spectra of wheat seeds with different aging degrees are similar. In the second derivative infrared spectrum, the peak intensity and shape of the wheat seeds showed differences in the range of $1800\sim 800\text{ cm}^{-1}$. In the range of $1800\sim 800\text{ cm}^{-1}$, the number and intensity of automatic peaks of the two-dimensional correlation infrared spectrum of wheat seeds will change significantly with the increase of aging time. The study results show that infrared spectroscopy with principal component analysis and hierarchical cluster analysis can quickly and conveniently distinguish artificially aging wheat seeds. It is expected to develop into a new method for identifying aging seeds.

Key words infrared spectroscopy; wheat seeds; artificial aging; multivariate statistical analysis

OCIS codes 070.4790; 120.7280; 300.6300

1 引言

小麦是全世界最重要的农作物之一, 在人类饮食中占有重要地位。小麦在储藏过程中会发生一些理化性质的老化^[1], 如种子组织结构松弛、营养物质减少、酶活性降低^[2], 使种子活力、生活力、田间健植率和植株生产等性能受到影响^[3], 导致种子的种用

品质和食用品质发生劣变, 对农业生产和食品安全造成严重危害^[4]。因此, 鉴别老化种子对农业生产和食品安全具有重要意义。

目前鉴别老化种子的常规方法包括标准发芽试验、电导率试验、幼苗生长试验、加速老化试验、低温发芽试验和四唑染色测定等^[5]。这些常规方法通常比较耗时, 且具有破坏性或需要专门的训练经验。

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-07; 录用日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(31760341)、云南省高校科技创新团队支持计划

* E-mail: gliu66@163.com

新兴的无损技术也被用于老化种子的检测,如 Kusumaningrum 等^[6]结合傅里叶变换近红外光谱 (FT-NIR) 和偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA) 对不同活力的大豆种子进行区分研究。贾良权等^[7]基于可调谐半导体激光吸收高光谱技术对玉米种子进行无损分级检测。吾木提·艾山江等^[8]基于实测的春小麦高光谱数据和叶片含水量数据,利用分数阶微分和连续投影算法-反向传播神经网络对小麦叶片含水量进行估算。Zhang 等^[9]采用可见光和近红外高光谱成像技术,结合偏最小二乘法支持向量机和连续投影算法建立分类模型,并对小麦种子的活力进行鉴定。Ambrose 等^[10]利用傅立叶变换近红外和拉曼光谱方法结合主成分分析 (PCA) 和 PLS-DA 预测评估玉米种子的生存能力。Men 等^[11]采用红外热成像技术 (IRT) 和支持向量机算法预测人工老化豌豆种子的活力。Ahmed 等^[12]利用计算机 X 线断层扫描 (CT) 图像结合模式识别技术评估自然老化香瓜种子的活力。这些无损技术在应用过程中都存在一定的缺点,如近红外光谱 (NIR) 和高光谱成像技术对每种样品都需要一个新的校准模型,需要收集大量数据,且预测精度取决于多种外界因素,拉曼光谱易受荧光干扰,X 射线成像和 IRT 在种子质量评估中的应用成本高、检测效率较低^[5]。

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 技术是一种快速无损检测技术^[13],二阶导数红外光谱 (SD-IR) 可提高光谱的分辨率,二维相关红外光谱 (2D-IR) 利用温度扰动对基团分子的振动行为进行分析^[14-15]。红外光谱技术可以定性和定量分析样品,具有成本低、高效、无损、适用范围广的特点,已应用于农业生产和食品安全等领域^[16]。Czekus 等^[17]利用拉曼光谱和 FT-NIR 技术有效区分了两种藜麦种子。de Girolamo 等^[18]结合 FT-NIR、傅里叶变换中红外光谱 (FT-MIR) 技术、PLS-DA 和主成分线性判别分析 (PC-LDA) 等多元分类模型,对被曲霉毒素 A 污染的硬质小麦样品进行筛选。Guo 等^[14]通过多步红外宏观指纹法快速有效地鉴别出含有过氧化苯甲酰 (BPO) 的小麦粉。杨卫梅等^[16]以自然老化的谷类种子为原材料,利用三步红外光谱法鉴别谷类种子的老化程度。时有明等^[19]利用红外光谱技术分析了感染小斑病玉米叶片的生化变化。本文结合红外光谱技术和多元统计分析方法研究了人工老化的小麦种子,并探讨了小麦种子老化过程中的光谱变化规律,研究结果可为研究小麦种子的老化、食品安全检测提供参考。

2 实验部分

2.1 仪器和参数

实验装置:FTIR 仪为美国 Perkins Elmer 公司生产配备的氘代硫酸三甘肽晶体 (DTGS) 探测器,波数测量范围为 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 16,分辨率为 4 cm^{-1} ;温度控制仪为 Eurotherm 公司生产的 SYD-TC-01,在 $50 \sim 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内每隔 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 采集一次光谱信息。

2.2 样品制备

小麦品种为烟农 19 号,产自安徽省蒙城县。小麦种子加速老化试验参考孙常玉等^[20]的方法,在杭州绿博仪器有限公司生产的 LH-150S 种子老化箱 (温度为 $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 95%) 中进行人工加速老化处理。将小麦种子在人工老化试验箱中分别处理 2, 4, 6, 8 d 后定期取出,用未经老化处理的小麦种子作为对照组样品。将人工老化小麦种子样品研磨为细粉,在玛瑙研钵中将溴化钾研磨成细粉,将小麦粉末和溴化钾粉末以 1 : 100 (质量比) 的比例进行混合,研磨均匀后进行压片测量,以去除溴化钾背景。

2.3 数据处理

用 Spectrum10 软件采集原始光谱,对原始光谱进行 13 点平滑处理获得 SD-IR。用清华大学编程的 2D-IR 相关分析软件,对温度为 $50 \sim 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (每隔 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 采集一次) 时采集的动态光谱进行处理,得到 2D-IR。用 The Unscrambler X 10.4 软件进行 PCA,用 SPSS 24 软件进行系统聚类分析 (HCA)。

3 试验结果与讨论

3.1 红外光谱特征分析

图 1 为不同程度人工老化小麦种子的 FTIR,可以发现,不同老化程度小麦种子的傅里叶

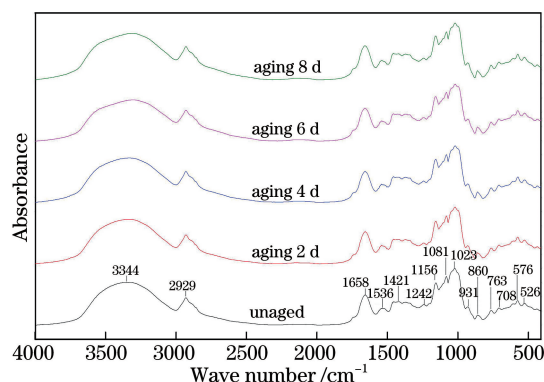


图 1 小麦种子的 FTIR

Fig. 1 FTIR of the wheat seeds

红外光谱整体具有相似性。表 1 为人工老化小麦种子在 FTIR 中出现的特征峰, ν 表示伸缩振动, ν_{as} 表示反对称伸缩振动, δ 表示弯曲振动。可以

发现, 小麦种子在人工老化过程中的吸收峰没有明显差异。因此, 还需进一步分析人工老化小麦种子。

表 1 小麦种子的 FTIR 吸收峰

Table 1 FTIR absorption peaks of the wheat seeds

unit: cm^{-1}

Untreated wheat seeds	2 d	4 d	6 d	8 d	Functional group and vibration mode	Main compound
3312	3308	3306	3336	3336	$\nu(\text{O}-\text{H})$	-
2930	2929	2929	2929	2929	$\nu_{as}(-\text{CH}_2)$	-
1750	1743	1750	1747	1750	$\nu(\text{C}=\text{O})$	ester ^[21]
1670	1659	1659	1658	1658	-	amide I band of protein ^[17]
1542	1542	1542	1542	1542	-	amide II band of protein ^[17]
1500-1200					-	protein and polysaccharide ^[16]
1456	1456	1456	1456	1456	$\nu(-\text{CH}_2)$	-
1369	1370	1370	1370	1370	$\nu(-\text{CH})$	-
1242	1243	1243	1243	1243	-	amide III band of protein ^[22]
1200-950					-	polysaccharide
1158	1157	1158	1157	1157	$\nu(\text{C}-\text{O}, \text{C}-\text{C})$	-
1081	1081	1081	1081	1081	$\nu(\text{C}-\text{H})$	-
1018	1020	1019	1020	1020	$\nu(\text{C}-\text{O}), \delta(\text{C}-\text{OH})$	-
950-750					-	carbohydrate isomers
928	930	930	930	931	$\nu_{as}(\text{C}-\text{O}-\text{C})$	starch ^[23]
765	764	764	763	763	$\nu(\text{C}-\text{C})$	-
574	575	574	575	576	-	starch frame vibration ^[23]

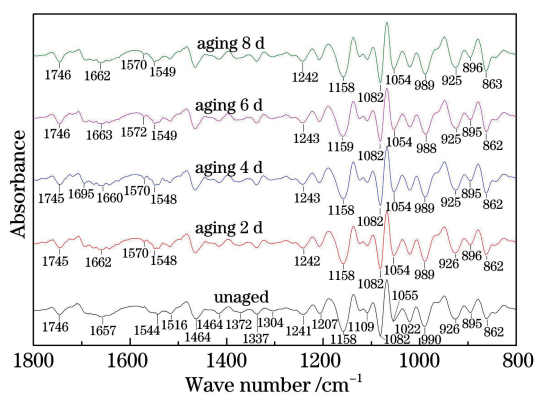
3.2 二阶导数红外光谱分析

人工老化小麦种子的原始红外光谱整体相似, SD-IR 具有更高的分辨率, 能显示更多的分子信息。因此, 对人工老化小麦种子进行 SD-IR 分析。图 2 为不同老化程度小麦种子在 $1800 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的 SD-IR, 可以发现, 老化 2, 4, 8 d 的小麦种子在 1570 cm^{-1} 处有一个弱吸收峰, 老化 6 d 的小麦种子在 1572 cm^{-1} 附近有一个弱吸收峰, 未老化的小麦种子没有出现弱吸收峰。老化 4 d 小麦种子吸收

峰强度最强时出现 1570 cm^{-1} 附近。人工老化小麦种子在 1746 cm^{-1} 附近的吸收峰强度随老化时间的增加而增强^[24], 这与傅家瑞等^[25]关于种子内的脂肪酸随老化程度增加而增加结论相关; 在 1660, 1548, 1242 cm^{-1} 附近的吸收峰强度整体呈增加趋势, 且随老化程度的增加都会出现一段减弱的趋势, 这表明在老化时间内蛋白质的含量有所增加。归属于糖类物质的 1158 cm^{-1} 附近吸收峰强度随老化程度的增加而减小, 但在老化 8 d 时的吸收峰强度有所增强。这与张自阳等^[26]测量出小麦种子在人工老化过程中可溶性糖整体呈下降趋势, 经贮藏蛋白的分解会出现一定上升的结果一致。在 1464, 1207, 1082, 1053, 862 cm^{-1} 附近的吸收峰强度呈增加趋势; 在 $1150 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收峰强度呈增加趋势; 在 926 cm^{-1} 附近的吸收峰归属为淀粉非对称环模式(α -1, 4 糖苷键(C-O-C))的骨架振动^[23], 其吸收峰强度的变化可能与小麦种子中的直链淀粉水解有关。

3.3 二维相关红外谱分析

2D-IR 受温度扰动后光谱强度会发生变化, 从而获得更多的动态结构信息^[14]。对人工老化小麦种子

图 2 小麦种子在 $1800 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 时 SD-IRFig. 2 SD-IR of wheat seeds at $1800 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$

进行 2D-IR 处理, 可为鉴别不同老化程度的小麦种子提供更多依据。图 3 为人工老化小麦种子在 $800 \sim 1050 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的 2D-IR。可以发现, 未老化的小麦种子出现了 3 个自动峰, 最强峰出现在 886 cm^{-1} 附近。老化后小麦种子均出现 4 个自动峰, 老化 2 d 时最强峰出现在 910 cm^{-1} 附近, 老化 4 d 时最强峰

出现在 888 cm^{-1} 附近, 老化 6 d 时最强峰出现在 908 cm^{-1} 附近, 老化 8 d 时最强峰出现在 888 cm^{-1} 附近。在 908 cm^{-1} 附近出现的自动峰, 是对未老化和人工老化小麦种子进行区分的依据。人工老化小麦种子在 $800 \sim 1050 \text{ cm}^{-1}$ 范围内出现最强自动峰, 老化 2 d < 老化 4 d < 老化 6 d < 老化 8 d。

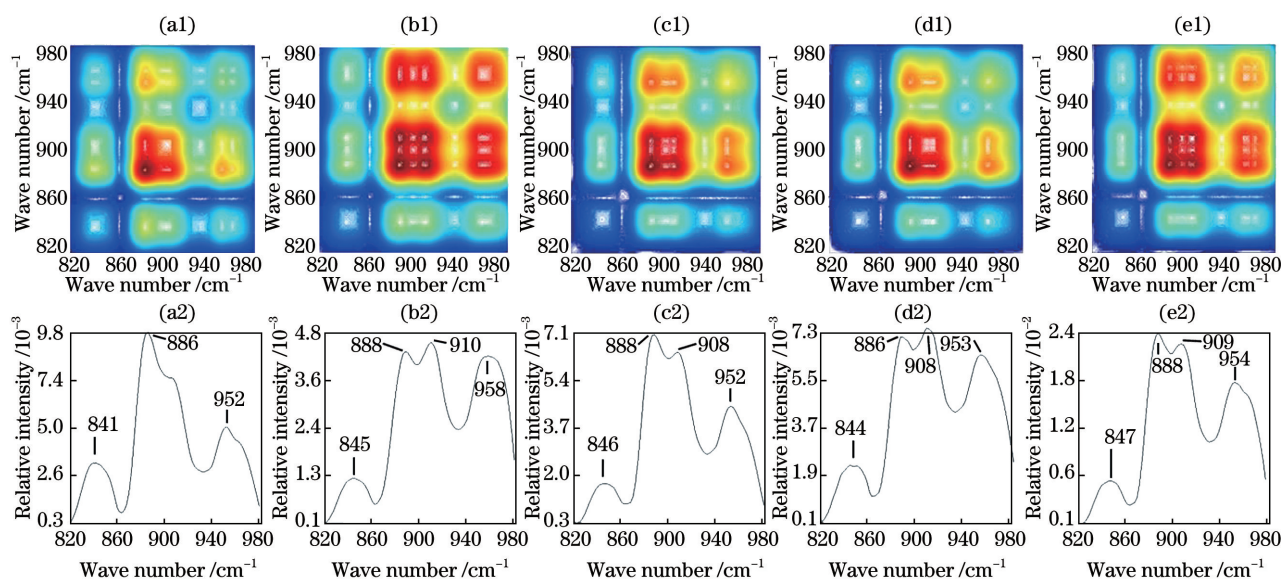


图 3 人工老化小麦种子的 2D-IR。(a) 未老化; (b) 老化 2 d; (c) 老化 4 d; (d) 老化 6 d; (e) 老化 8 d

Fig. 3 2D-IR of the artificially aging wheat seeds. (a) Unaged; (b) aging 2 d; (c) aging 4 d; (d) aging 6 d; (e) aging 8 d

图 4 为人工老化小麦种子在 $1060 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的 2D-IR。可以发现, 未老化和老化小麦种子均出现了 4 个自动峰, 分别在 $1068, 1097, 1117, 1138 \text{ cm}^{-1}$ 附近, 最强峰均在 1068 cm^{-1} 附近, 次强峰均在 1138 cm^{-1} 附近。老化后小麦种子在 1068 cm^{-1} 附近的自动峰强度大小: 老化 2 d < 老

化 4 d < 老化 6 d < 老化 8 d。老化 2 d 和老化 4 d 小麦种子在 1098 cm^{-1} 附近的自动峰强度高于 1118 cm^{-1} 处, 而老化 6 d、8 d 小麦种子在 1098 cm^{-1} 附近的自动峰强度低于 1118 cm^{-1} 处。老化 8 d 小麦种子在 1114 cm^{-1} 附近出现了一个弱自动峰。

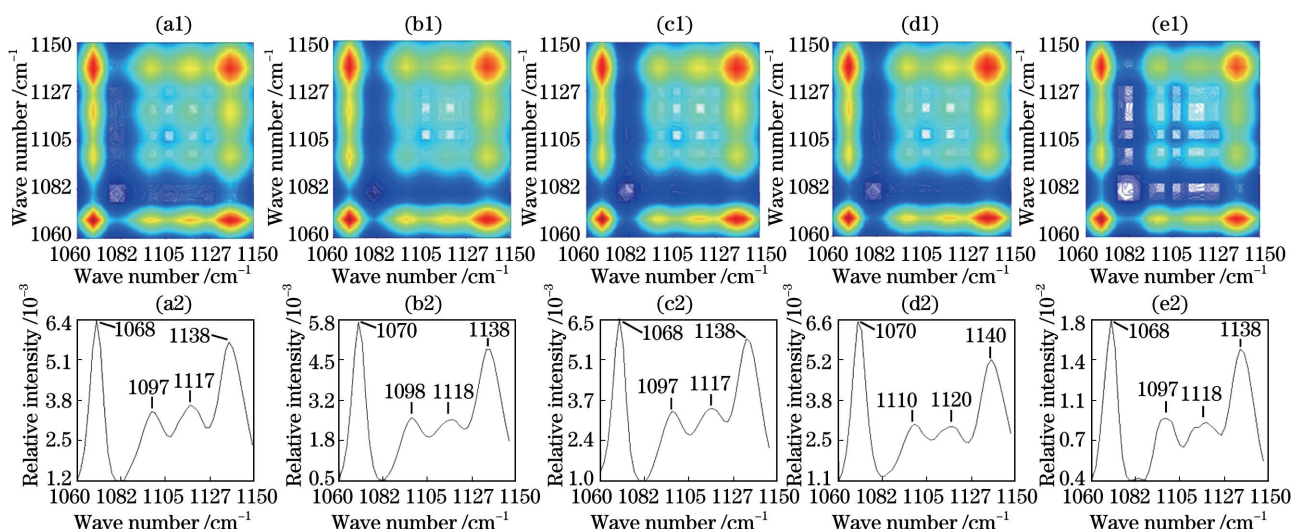


图 4 人工老化小麦种子在 $1060 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的 2D-IR。(a) 未老化; (b) 老化 2 d; (c) 老化 4 d; (d) 老化 6 d; (e) 老化 8 d

Fig. 4 2D-IR of the artificially aging wheat seeds in the range of $1060 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$. (a) Unaged; (b) aging 2 d;

(c) aging 4 d; (d) aging 6 d; (e) aging 8 d

图 5 为人工老化小麦种子在 1150~1800 cm⁻¹ 范围内的 2D-IR。可以发现,未老化和老化 2,4,8 d 小麦种子都出现了 6 个自动峰,分别在 1198, 1222, 1270, 1391, 1495, 1648 cm⁻¹ 附近。老化

6 d 的小麦种子出现了 7 个自动峰,分别在 1191, 1223, 1271, 1399, 1503, 1559, 1639 cm⁻¹ 附近,在 1560 cm⁻¹ 附近出现了一个弱峰。

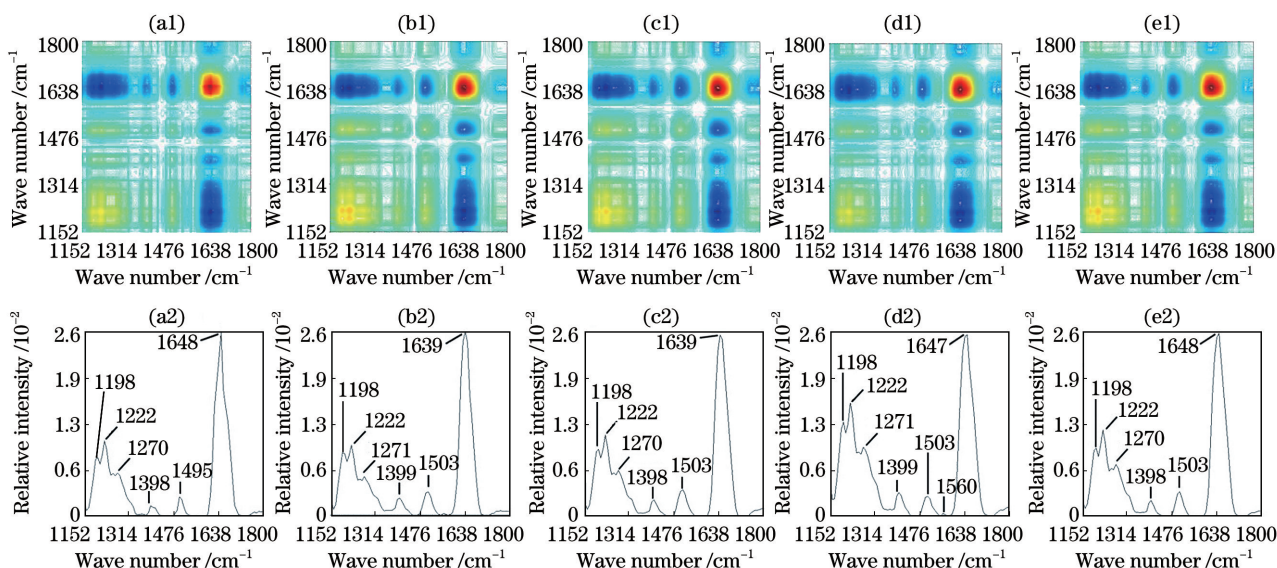


图 5 人工老化小麦种子在 1150~1800 cm⁻¹ 范围内的 2D-IR。(a)未老化;(b)老化 2 d;(c)老化 4 d;(d)老化 6 d;(e)老化 8 d

Fig. 5 2D-IR of artificially aging wheat seeds in the range of 1150–1800 cm⁻¹. (a) Unaged; (b) aging 2 d; (c) aging 4 d; (d) aging 6 d; (e) aging 8 d

3.4 多元统计分析

PCA 是一种无监督模式识别分类方法^[24],通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量,达到数据结构简化和降维的目的^[24]。图 6 为小麦种子(未老化,老化 2,4,6,8 d 各 10 个,共 50 个样品)在 1800~800 cm⁻¹ 范围内的红外光谱 PCA 结果。其中,主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)的方差累计贡献率为 95%,即这两个主成分可以表达全部信息的 95%。5 种小麦种子的 PCA 得分图显示小麦种子明显分成 5 类,这表明 PCA 对人工老化小麦种子有较好的聚类效果。

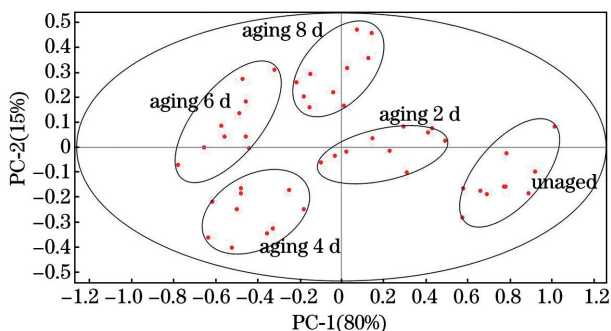


图 6 人工老化小麦种子的 PCA 得分

Fig. 6 PCA score of the artificially aging wheat seeds

HCA 是一种无监督模式识别分类法,根据研究对象的特征在数值上存在的相似性程度进行分类,距离越近越容易聚在一起形成一类物质^[13]。用 SPSS24 对 5 种人工老化小麦种子样品在 1800~800 cm⁻¹ 范围内进行系统聚类分析,聚类方法为 Ward 法,选择欧氏距离计算区间,结果如图 7 所示。可以发现,聚类结果分为 5 类,未老化小麦种子聚为一类,老化 2,4,6,8 d 小麦种子各自聚为一类,且 HCA 与 PCA 结果一致。相比杨卫梅等^[15]利用偏最小二乘法对自然老化大豆种子的分类结果,本方法的分类效果更好,且不同类之间能保持一定的

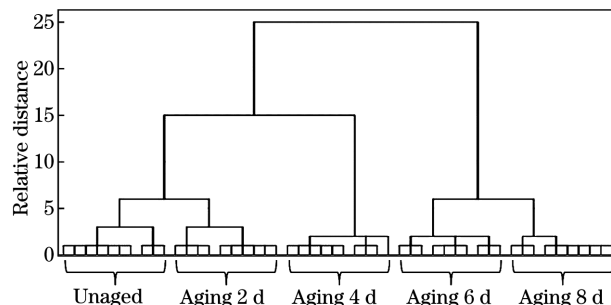


图 7 人工老化小麦种子在 1800~800 cm⁻¹ 范围的聚类结果
Fig. 7 Clustering results of artificially aging wheat seeds in the range of 1800–800 cm⁻¹

空间距离,聚类结果更直观。与 Zhang 等^[9]、Men 等^[11]通过支持向量机模型对老化种子的分类相比,预处理比较简单。因此,多元统计方法可有效区分人工老化小麦种子。

4 结 论

采用人工高温高湿法对小麦种子进行加速老化处理,利用 FT-IR、SD-IR 和 2D-IR 结合多元统计分析方法对不同老化程度的小麦种子进行区分。结果表明,不同老化程度小麦种子的原始光谱总体相似。在 SD-IR 中,通过光谱中吸收峰的强度变化,可对种子中脂类物质、蛋白质和糖类物质的变化进行分析。2D-IR 显示,通过对老化小麦种子自动峰强度规律的探索,可进一步鉴别小麦种子的老化程度。采用 PCA 和 HCA 对人工老化小麦种子进行分类,均能有效区分不同老化程度的小麦种子。综上所述,红外光谱结合多元统计分析方法,可以快速有效地鉴别老化小麦种子,有望发展为鉴别老化种子的新方法。

参 考 文 献

- [1] Zhang S B, Lü Y Y, Wang Y L, et al. Physicochemical changes in wheat of different hardnesses during storage [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 72: 161-165.
- [2] Tian P P, Lü Y Y, Yuan W J, et al. Effect of artificial aging on wheat quality deterioration during storage [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 80: 50-56.
- [3] Wang Y J, Wu W, Guo Z J, et al. Effects of aging treatment on germination index and root system of wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(12): 2423-2430.
王玉娇, 吴薇, 郭忠军, 等. 小麦种子老化处理对发芽指标及根系的影响 [J]. *核农学报*, 2018, 32(12): 2423-2430.
- [4] Wu J Z, Li H, Zhang H D, et al. Nondestructive determination of natural aging stage of wheat seeds using near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 751-755.
吴静珠, 李慧, 张鹤冬, 等. 小麦种子自然老化程度的近红外光谱无损识别 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 751-755.
- [5] Xia Y, Xu Y F, Li J B, et al. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: a review [J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2019, 1: 35-47.
- [6] 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]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(5): 1734-1742.
- [7] Jia L Q, Qi H N, Hu W J, et al. Rapid nondestructive grading detection of maize seed vigor using TDLAS technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0911002.
贾良权, 祁亨年, 胡文军, 等. 采用 TDLAS 技术的玉米种子活力快速无损分级检测 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0911002.
- [8] Umut H, Mamat S, Ma C Y, et al. Hyperspectral estimation of wheat leaf water content using fractional differentials and successive projection algorithm-back propagation neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 153002.
吾木提·艾山江, 买买提·沙吾提, 马春玥. 基于分数阶微分和连续投影算法-反向传播神经网络的小麦叶片含水量高光谱估算 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 153002.
- [9] Zhang T T, Wei W S, Zhao B, et al. A reliable methodology for determining seed viability by using hyperspectral data from two sides of wheat seeds [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(3): E813.
- [10] Ambrose A, Lohumi S, Lee W H, et al. Comparative nondestructive measurement of corn seed viability using Fourier transform near-infrared (FT-NIR) and Raman spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 224: 500-506.
- [11] Men S, Yan L, Liu J, et al. A classification method for seed viability assessment with infrared thermography [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(4): 845.
- [12] Ahmed M R, Yasmin J, Collins W, et al. X-ray CT image analysis for morphology of muskmelon seed in relation to germination [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 175: 183-193.
- [13] Xu L R, Zhu X F, Chen X M, et al. Direct FTIR analysis of isolated trans fatty acids in edible oils using disposable polyethylene film [J]. *Food Chemistry*, 2015, 185: 503-508.
- [14] Guo X X, Hu W, Liu Y, et al. Rapid determination and chemical change tracking of benzoyl peroxide in wheat flour by multi-step IR macro-fingerprinting [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2016, 154: 123-129.
- [15] Yang W M, Liu G, Ou Q H, et al. Infrared spectroscopy of naturally aged legume seeds [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 123001.
杨卫梅, 刘刚, 欧全宏, 等. 豆类种子自然老化过程

- 的红外光谱研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 123001.
- [16] Yang W M, Liu G, Lin H J, et al. Discrimination of grain seeds of natural aging by two-dimensional infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(10): 3041-3047.
杨卫梅, 刘刚, 林浩坚, 等. 自然老化谷类种子的二维红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 3041-3047.
- [17] Czekus B, Pećinar I, Petrović I, et al. Raman and Fourier transform infrared spectroscopy application to the Puno and Titicaca cvs. of quinoa seed microstructure and perisperm characterization [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 25-30.
- [18] de Girolamo A, von Holst C, Cortese M, et al. Rapid screening of ochratoxin A in wheat by infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2019, 282: 95-100.
- [19] Shi Y M, Li D Y, Yi S L, et al. Infrared spectroscopy analysis of biochemical changes of corn leaves infected by southern corn leaf blight disease [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 083002.
时有明, 李栋玉, 易时来, 等. 玉米小斑病叶片生化变化的红外光谱分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 083002.
- [20] Sun C Y, Chen X, Zhang Z P, et al. Effects of seed aging on the quality of wheat seeds [J]. Seed, 2015, 34(8): 88-90.
孙常玉, 陈晓, 张志鹏, 等. 种子老化对小麦种子品质的影响[J]. 种子, 2015, 34(8): 88-90.
- [21] Chen Y, Huang J F, Yeap Z Q, et al. Rapid authentication and identification of different types of a. roxburghii by tri-step FT-IR spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 199: 271-282.
- [22] Wei W, Yan Y, Zhang X P, et al. Enhanced chemical and spatial recognition of fish bones in surimi by tri-step infrared spectroscopy and infrared microspectroscopic imaging [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 205: 186-192.
- [23] Ren J, Liu G, Ou Q H, et al. Starch discrimination with Fourier transform infrared spectroscopy(FTIR) and two-dimensional correlation infrared spectroscopy (2D-IR) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(17): 58-64.
任静, 刘刚, 欧全宏, 等. 淀粉的红外光谱及其二维相关红外光谱的分析鉴定[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 58-64.
- [24] Genkawa T, Ahamed T, Noguchi R, et al. Simple and rapid determination of free fatty acids in brown rice by FTIR spectroscopy in conjunction with a second-derivative treatment [J]. Food Chemistry, 2016, 191: 7-11.
- [25] Fu J R. Seed physiology[M]. Beijing: Science Press, 1985: 335-375.
傅家瑞. 种子生理[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 335-375.
- [26] Zhang Z Y, Jiang X L, Ru Z G, et al. Effects of artificial aging on physiological characteristics and vigor of hybrid wheat seeds [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(2): 81-83.
张自阳, 姜小苓, 茹振钢, 等. 人工老化对杂交小麦种子生理特性和种子活力变化的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(2): 81-83.