

苹果贮藏室气体 3D 荧光特征信息小波包表征与腐败预警

于慧春 李 迎 殷 勇 袁云霞 李建盟

(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023)

摘要: 为了实现对苹果贮藏室中气体 3D 荧光光谱特征信息的有效表征,提出一种基于小波包分解系数的荧光特征信息表征方法,在此基础上开展了腐败预警方法研究。首先利用三角形插值法和 Savitzky – Golar 卷积平滑对光谱数据进行预处理,以消除瑞利散射和环境噪声的影响。然后,将预处理后的 3D 荧光数据按激发波长从短到长顺序将其对应的发射光谱首尾相连转换成一维数据向量,并利用 3 层 sym4 小波包对该向量数据进行分解,提取低频系数集作为荧光特征信息;运用偏最小二乘对特征信息与 6 个理化指标进行进行分析,并对其分析结果进行聚类分析以确定出腐败基准。最后,运用马氏距离构建腐败预警模型。结果表明,用小波包分解系数表征荧光特征信息是有效的;同时,随着贮藏时间增加,预测的马氏距离逐渐变小,较好刻画了贮藏过程中苹果品质的变化趋势,进而可实现苹果贮藏过程中的腐败预警。

关键词: 苹果; 腐败预警; 3D 荧光特征信息; 小波包分解

中图分类号: TS205.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0392-08

OSID:



Wavelet Packet Characterization of 3D Fluorescence Characteristic Information of Gas in Storage Room and Early Warning Method of Apple Spoilage

YU Huichun LI Ying YIN Yong YUAN Yunxia LI Jianmeng

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to effectively characterize the three-dimensional (3D) fluorescence spectrum of gas in apple storage room, a feature information representation method based on wavelet packet decomposition coefficient was proposed. On this basis, the research on apple spoilage early warning methods was carried out. Firstly, the triangular interpolation method and Savitzky – Golar (SG) convolution smoothing were used to preprocess the spectrum data to eliminate the influence of Rayleigh scattering and ambient noise on the original fluorescence spectrum. After preprocessing, the 3D fluorescence data was converted into one-dimensional (1D) data vector, and the converted method was the corresponding emission spectrum, which was smoothly connected end to end according to the order of excitation wavelength, the 1D vector was decomposed by 3-layer sym4 wavelet packet, and the low-frequency coefficient set after the wavelet packet decomposing was extracted as fluorescence characteristic information. Secondly, partial least squares (PLS) was used to analyze the characteristic information and six physico-chemical indexes, and spectral clustering analysis (SCA) was adopted to determine the spoilage benchmark based on the results of PLS. Finally, a spoilage early warning model was constructed by using Mahalanobis distance (MD). The results showed that the fluorescence characteristic information represented method of wavelet packet decomposition coefficient was effective. With the increase of storage days, the Mahalanobis distance of the sample to the spoilage benchmark was gradually decreased, which better described the change trend of apple quality during storage, and it could realize the early warning of apple spoilage during storage.

Key words: apple; spoilage warning; 3D fluorescence characteristic information; wavelet packet decomposition

0 引言

在苹果贮藏期间,实现对其腐败预警十分必要。目前,对果蔬贮藏中腐败变质过程的研究多采用感官评定^[1]和理化指标检测^[2],这些方法主观性强或者处理过程繁琐。近年来,光谱检测技术被越来越多地用于果蔬品质检测,但是光谱检测需要随机检测大量的样本,且样本间具有个体差异性,检测结果无法真正体现贮藏室内苹果整体质量的变化。在果蔬贮藏过程中,贮藏室空气中浮游微生物及气体组成与果蔬品质变化密切相关。因此,通过对果蔬贮藏室气体的检测和分析,可以反映贮藏过程中果蔬的品质变化^[3-5]。

3D 荧光光谱技术因其高灵敏度、多组分选择性、荧光信息丰富等优点^[6],在环境、医药、食品等^[7]领域得到广泛应用。因此,3D 荧光光谱技术可用于分析苹果贮藏过程中的气体环境,并实现苹果贮藏过程中的腐败预警。要实现苹果的腐败预警,贮藏室空气荧光特征信息的有效表征是关键,但是常用的 3D 荧光光谱信息分析方法,如主成分分析^[8-9]、平行因子分析^[10-11]、交替三线性分解^[12-13]等在荧光特征信息的提取过程中,需要结合被测对象具体品质指标,分别提取激发特征波长和发射特征波长,这不但计算过程较为复杂,而且存在一定局限:所提取的激发和发射特征波长会因被测对象品种变化而不同,缺乏适用性;品质指标仅是被测对象某一方面属性的表征,因此以品质指标作为指导提取荧光特征信息不能有效表征被测对象整体品质变化。

小波包(Wavelet packet)分解能同时获取信号的低频和高分量^[14],在获取低频和低频信息的同时剔除冗余信息,既可以实现对荧光数据的压缩,提高数据分析的精度,降低计算的难度,又可全面提取被测对象的表征信息^[15-16]。因此,本文提出一种基于小波包分解的3D 荧光特征信息提取方法。该方法首先按激发波长顺序将其对应的发射光谱首尾相连展开成一维数据向量的形式,然后采用小波包对其进行分解,提取分解后的低频系数集作为荧光光谱特征向量。选用两批不同品种苹果贮藏室的气体作为研究对象进行研究,以检验研究方法的有效性。

1 数据获取

1.1 实验材料

第1批苹果,品种为山东烟台红富士,总质量350 kg,于2020年10月14日购于超市。常温贮藏,贮藏室温度波动范围为18~20℃,相对湿度波动范

围为53%~65%。

第2批苹果,品种为山西红富士,总质量为350 kg,于2020年12月14日购于超市。常温贮藏,贮藏室温度波动范围为12~16℃,相对湿度波动范围为58%~65%。

两批苹果购买后即放入贮藏室,并开始每天对苹果贮藏室气体进行采集和3D 荧光光谱检测。同时每天都对贮藏苹果的pH值、质量损失值、相对电导率、可溶性固形物(TSS)含量、可滴定酸(SA)含量和糖酸比6种生理生化指标^[17]进行测试。由于在贮藏第20天左右,苹果表皮出现明显的深色褐斑,腐败现象明显,失去食用价值,因此测试过程在第20天结束。

1.2 检测方法

1.2.1 贮藏室气体的采集与处理

将装有4 mL 灭菌生理盐水(0.9 g/mL)的玻璃培养皿,放入HKM-II型空气浮游微生物采样器(广东环凯微生物科技有限责任公司)中,设置空气采样器的采样量为1 000 L,采集10 min。为了保证采样的均匀性,将采样器放置在贮藏室中央位置。采样结束后,将样品收集定容于4 mL 离心管中,TG16A型离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司)转速10 000 r/min 离心1 min 后舍弃上清液,取剩余2 mL 样液用振荡器混匀30 s后,进行3D 荧光检测^[3-5]。

1.2.2 3D 荧光光谱检测

3D 荧光光谱采集仪器为实验室自行设计的紫外增强型光谱仪,如图1所示。激发光源为150 W 紫外增强型连续氙灯,激发、发射带宽度均为5 nm,波长精度为±1 nm,信噪比大于800,积分时间为0.1~24 s,主要部件及参数如表1所示。实验采用3D 荧光扫描模式采集数据,激发波长范围设置为300~400 nm,步长为5 nm,共21条激发波长,积分

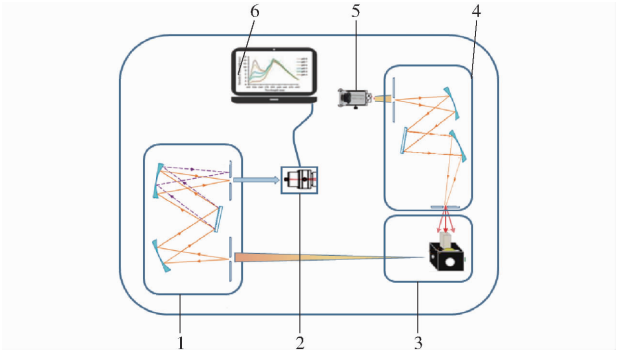


图1 紫外增强型三维荧光仪结构示意图
Fig.1 Schematic of enhanced three dimensional
fluorescence spectroscopy

1.发射单色仪 2.CCD检测仪 3.样品池 4.激发单色仪 5.紫外增强氙灯 6.便携式计算机

时间为 1 s;发射波长范围设置为 260 ~ 560 nm,步长为 4 nm,共 76 条发射波长,积分时间为 1 s。检测样本容器为 2 mm × 2 mm(底面长 × 底面宽)、容量 0.7 mL 的石英狭缝微量荧光比色皿。

表 1 三维荧光光谱仪主要部件及参数

Tab.1 Main parts and parameters of three dimensional fluorescence spectrometer		
部件	型号	规格
紫外增强型氙灯	LSB-X150AUV	150 W,7.5 A,20 V,波长准确度:±0.5 nm
激发单谱仪	SmartFluo-Pro-DZ-J	激发范围:200 ~ 800 nm,带宽:5 nm,波长重复性指数:±1 nm 1 800 g/mm,400 nm,体相全息 发射范围:200 ~ 800 nm,带宽:5 nm
光栅	SmartFluo-Pro-DZ-L	
CCD 探测器	SmartFluo-Pro-DZ-P	

1.2.3 苹果理化指标检测

(1)pH 值

实验当天从贮藏室不同位置上随机选取 3 个苹果,将苹果去皮,取果实赤道部位果肉 10 g,放入匀浆机,加入蒸馏水 90 mL,每次匀浆时间 60 s,然后用 3 层纱布过滤以去除浮沫及滤渣,用 pH 计(上海雷磁有限责任公司)进行测试。

每个苹果重复 3 次,共进行 9 个重复实验,取平均值。

(2)相对电导率

相对电导率可以体现果蔬组织细胞膜通透性的变化,可用以表征贮藏过程中果肉细胞的衰老程度。

实验当天从贮藏室不同位置上随机选取 3 个苹果,去皮,在果实赤道部位间隔均匀切取厚度为 2 mm 的 1 cm × 1 cm 的果肉 10 块,放于锥形瓶中,加 30 mL 蒸馏水,用保鲜膜封口,25℃ 摇床中振荡 30 min 后取出,用滤纸吸干切片上水分,在锥形瓶中重新加入 20 mL 蒸馏水,静止 30 min 后,用 DDS-307 型电导率仪(上海雷磁有限责任公司)测量此时电导率 W_1 ,将测量好的样本重新盖上薄膜密封,用电炉煮沸 10 min,冷却至室温(20℃),测量此时电导率 W_2 。相对电导率 W 计算公式为

$$W = \frac{W_1}{W_2} \times 100\%$$

(1)

每个苹果重复 3 次,共进行 9 个重复实验,取平均值。

(3)可溶性固形物含量、可滴定酸含量以及糖酸比

糖酸比是评价果蔬风味的重要指标,也与其品质密切相关。实验当天从贮藏室不同位置上随机选取 3 个苹果,糖酸比计算公式为

$$R_{As} = \frac{S_{ST}}{T_A}$$

(2)

式中 S_{ST} ——可溶性固形物质量分数

T_A ——可滴定酸质量分数

可溶性固形物含量用 ATAGO N-8α 型手持折光仪(上海人和仪器有限责任公司)测量,称取 10 g

果肉,研钵研磨后用 2 层纱布挤出滤液,取滤液,滴在手持折光仪上,读取数值,重复 3 次,取平均值。

可滴定酸含量利用酸碱中和滴定法测量。取 10 g 不同部位果肉,研钵中研至匀浆,后移至 100 mL 容量瓶中定容,摇匀。75 ~ 80℃ 水浴加热 30 min 后冷却至室温,2 层纱布过滤取滤液。于锥形瓶中加入 20 mL 滤液、3 ~ 5 滴 0.5 mol/L 的酚酞溶液,用 0.1 mol/L 的 NaOH 标准溶液进行滴定,当溶液初现粉色且 30 s 内不褪色即为滴定终点,记录所消耗的 NaOH 体积。重复 3 次,取平均值。可滴定酸质量分数计算公式为

$$T_A = \frac{0.067CV_1}{V_0m} \times 100\%$$

(3)

式中 C ——氢氧化钠标准溶液浓度,取 0.1 mol/L
 V_1 ——滴定时所消耗的氢氧化钠标准溶液体积,mL
 V_0 ——吸取滴定用的样液体积,mL
 m ——试样质量,g

(4)质量损失值

每天对贮藏室中不同位置上固定选出的 6 个苹果检测其质量,并求其平均值 A_i ,质量损失值 A 为 $A_i(i=1,2,\cdots,20)$ 与贮藏第 1 日质量 A_1 的差值。

2 数据处理

2.1 数据预处理

检测到的 3D 荧光数据中除了包含有表征样品信息的荧光信号,还包含有瑞利散射、拉曼散射等干扰信息,会影响样品荧光信号,因此,首先用插值法消除瑞利散射,同时为进一步减少环境及噪声的影响,再对荧光光谱进行 SG(Savitzky-Golay)卷积平滑处理^[18-19]。

2.2 小波包变换

小波包变换(Wavelet packet transform)^[20]既可以对低频部分信号进行分解,也可以对高频部分信号进行分解,将时频平面划分得更加细致,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相似度高的频带,进一步提高时频与信号频的匹配度,从而提高信

号的分析能力。这种分解既可以实现对荧光数据的压缩,提高数据分析的精度,降低计算的难度,又可全面提取被测对象的表征信息^[21]。在小波包的变换函数中,sym 小波函数具有较好的对称性和正交性,可减少分解时和重构时的相位失真。由于原始信号与小波基函数的相似性,小波系数即为小波基函数与原始信号相似的系数。因此,选用 3 层 sym4 小波包变换对荧光数据进行分解,用第 3 层的低频尺度分量系数集作为特征向量。

2.3 偏最小二乘

偏最小二乘(Partial least squares, PLS)^[22]是一种结合了主成分分析、典型相关分析和线性回归分析的分析方法,可以同时实现回归建模、数据结构简化以及变量间的相关性分析,提取出反映整体信息的最有效的数据。

2.4 聚类分析

聚类分析(Spectral clustering)^[22]又称层次聚类,是最常使用的聚类算法之一。以标准欧氏距离为分类依据,距离越小相关性越大,因此,根据苹果贮藏室空气荧光特征信息的聚类分析结果,来确定苹果的腐败基准,为贮藏过程中苹果的腐败预警模型构建奠定基础。

2.5 马氏距离

马氏距离(Mahalanobis distance, MD)^[22]是一种常用的计算两个未知样本集相似度的方法^[23-24]。样品间的马氏距离是由标准化数据和中心化数据计算出,不受量纲的影响,并且可以排除变量之间相关性的干扰。因此,可以通过计算不同贮藏日期空气荧光特征信息与腐败基准日空气荧光信息间的马氏距离,来判断贮藏期间苹果与腐败日苹果的近似度。马氏距离越小,说明贮藏苹果越接近腐败日苹果,由此实现苹果腐败的预警。马氏距离计算公式为

$$d^2 = (\mathbf{x}_i - \mathbf{y})\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{x}_i - \mathbf{y})^T \tag{4}$$

式中 $\mathbf{x}_i$ ——第*i*个贮藏日的特征向量
 $\mathbf{y}$ ——腐败基准日的特征向量
 $\mathbf{S}$ ——腐败基准日的协方差矩阵

3 结果与分析

3.1 理化指标结果

两批苹果所测量的 6 个理化指标如表 2、3 所示。

从表 2 可以看出,第 1 批苹果随着贮藏时间的延长,苹果的 pH 值、可溶性固形物含量、相对电导率、糖酸比都呈现上升趋势,可滴定酸质量分数呈现下降趋势。从表 3 可以看出,第 2 批苹果在贮藏过

表 2 第 1 批苹果理化指标测试结果

Tab.2 Physical and chemical data of the first batch of apples

贮藏时间/ d	pH 值	可溶性固 形物质量 分数/%	相对 电导 率/%	可滴定 酸质量 分数/%	糖酸比	质量 损失 值/g
1	3.49	12.40	15.02	21.59	57.43	0
2	3.79	14.30	17.06	21.59	66.23	0.04
3	3.92	13.30	23.49	21.22	62.68	0.08
4	3.92	13.00	19.33	20.10	64.68	0.13
5	4.12	12.40	19.93	20.10	61.69	0.17
6	4.12	13.90	21.93	18.61	74.69	0.22
7	4.02	12.80	26.78	21.22	60.32	0.26
8	3.85	13.56	23.73	21.96	61.73	0.31
9	4.02	13.44	23.57	21.22	63.37	0.38
10	4.00	12.89	21.23	20.47	62.96	0.45
11	3.83	12.89	24.88	20.47	62.96	0.53
12	3.90	12.28	20.02	21.22	57.87	0.59
13	3.88	11.78	25.69	26.43	44.57	0.64
14	4.08	12.89	30.71	18.24	70.67	0.70
15	3.93	12.44	23.71	20.10	61.91	0.76
16	3.94	12.78	26.39	21.22	60.23	0.82
17	3.96	13.11	24.13	21.96	59.70	0.88
18	4.01	13.72	24.71	17.49	78.44	0.94
19	3.93	12.89	28.82	16.75	76.95	1.01
20	4.01	12.67	22.82	14.52	87.26	1.11

表 3 第 2 批苹果理化指标测试结果

Tab.3 Physical and chemical data of the second batch of apples

贮藏时间/ d	pH 值	可溶性固 形物质量 分数/%	相对 电导 率/%	可滴定 酸质量 分数/%	糖酸比	质量 损失 值/g
1	4.16	13.80	29.48	16.75	82.39	0
2	4.07	17.00	27.92	20.10	84.58	0.06
3	3.99	13.80	22.24	13.59	101.55	0.12
4	4.29	14.70	19.37	13.77	106.75	0.18
5	4.20	13.20	30.35	16.01	82.45	0.26
6	4.25	14.90	21.96	16.38	90.96	0.33
7	4.39	14.10	29.90	12.28	114.82	0.37
8	4.23	13.33	28.93	13.40	99.49	0.41
9	4.38	14.00	29.74	12.28	113.98	0.49
10	4.18	14.94	40.81	14.52	102.94	0.56
11	4.33	12.94	29.05	16.15	80.13	0.65
12	4.08	14.00	32.13	16.57	84.50	0.72
13	4.31	12.22	28.52	16.75	72.97	0.79
14	4.25	14.17	29.08	17.09	82.91	0.83
15	4.38	14.17	32.25	13.59	104.25	0.88
16	4.33	13.06	32.40	13.40	97.43	0.96
17	4.27	12.72	38.61	18.80	67.68	1.07
18	4.32	13.72	25.15	18.24	75.23	1.18
19	4.37	13.28	30.54	17.31	76.71	1.28
20	4.31	13.94	26.88	17.87	78.04	1.34

程中,理化指标呈现一定的波动,但是 pH 值、相对电导率呈现上升趋势,与第 1 批苹果的相应指标一致;可溶性固形物含量呈现先升后降的趋势、可滴定酸质量分数呈现先降后升的趋势,糖酸比呈现先升后降的趋势。

3.2 预处理结果

在贮藏过程中,每天对苹果贮藏室空气进行采样和 3D 荧光检测,原始荧光光谱图如图 2a 所示,可以看出原始贮藏室空气的原始荧光信号存在较强的瑞利散射,掩盖了原始光谱中的有用信息。为获得较好的贮藏室空气 3D 荧光信号,采用插值法和 SG 卷积平滑对原始荧光光谱进行预处理,去除瑞利散射和噪声等环境因素的影响,预处理后的荧光光谱图如图 2b 所示,可以看出经过预处理后的荧光光谱图,样品峰更加突出,等高线图边际线更平滑,有利于进一步的数据分析。

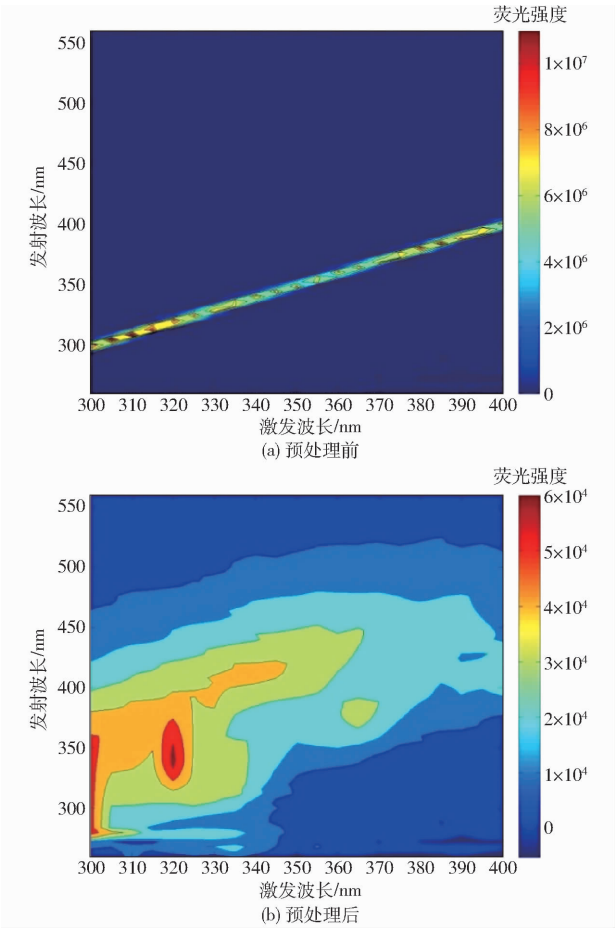


图 2 处理前后荧光光谱图
Fig.2 Fluorescence spectra before and after treatment

3.3 特征向量提取结果

3D 荧光光谱数据是由激发波长、发射波长、荧光强度构成的 3D 数据块,本研究中激发波长有 $(400 - 300) / 5 = 21$ 个,发射波长有 $(560 - 260) / 4 = 76$ 个,因此,共得到对应激发波长-发射波长位置上

的荧光强度值有 $21 \times 76 = 1\,596$ 个。
将每条激发波长下的发射波长展开,并按照激发波长顺序数将所有发射波长以接龙的形式连接,从而将原 3D 荧光光谱数据转化成 $1 \times 1\,596$ 的一维荧光光谱数据向量^[25]。

然后用 Matlab 2004a 中 wpdec (wave, 3, 'sym4') 程序对荧光信号进行小波包分解,用 wpcoc (t,) 函数提取不同节点的小波包系数。由于贮藏果蔬品质的变化是一个较为缓慢的过程,小波包分解得到的低频系数集反映了样本的整体荧光信息,因此,提取分解后的低频系数集作为特征信息。经过小波包变换,从原始 1 596 个频点中提取了 203 个低频系数集来作为荧光特征信息。

3.4 腐败基准确定

将提取到的苹果贮藏室空气 3D 荧光特征信息进行 PLS 分析,结果如表 4 所示。对于第 1 批苹果的贮藏室气体荧光信息,当取其前 3 个因子作为聚类分析的输入时,获得最佳的聚类结果,如图 3a 所示;对于第 2 批苹果的贮藏室空气荧光信息,当提取其第 2 个和第 3 个因子作为聚类分析的输入时,获得最佳的聚类结果,如图 3b 所示。

表 4 苹果因子累计贡献率						
Tab.4 Cumulative contribution rate of variance explained of apples %						
苹果批次	因子累计贡献率					
	1	2	3	4	5	6
第 1 批	16.51	80.55	85.41	91.15	93.51	95.76
第 2 批	85.97	89.95	92.60	94.30	95.86	97.98

如图 3a 所示,当类间距为 1.8 ~ 2.0 时(图中粗红线所在位置),贮藏第 1 ~ 16 天相似度较高,归为一大类,贮藏第 17 ~ 20 天归为一大类(图中用每一个红框代表一类)。苹果在第 17 天品质发生了变化,因此,对于第 1 批苹果,确定贮藏的第 17 天为其腐败基准日,即以贮藏第 17 天时的贮藏室气体荧光信息来作为苹果的腐败基准信息。由图 3b 可知,当类间距为 1.3 ~ 1.5 时(图中粗红线所在位置),同理,将贮藏第 1 ~ 16 天与贮藏第 17 ~ 20 天分成两类,贮藏第 1 ~ 16 天相似度较高,贮藏第 17 天没有与前 16 d 归为一类,苹果在第 17 天品质发生了变化(图中用每一个红框代表一类)。因此,对于第 2 批苹果,同样以贮藏第 17 天时的贮藏室气体荧光信息来作为其腐败基准信息。两批苹果虽然腐败基准相同,但是由于两批苹果的品种不同,两批苹果的类间距是不同的。

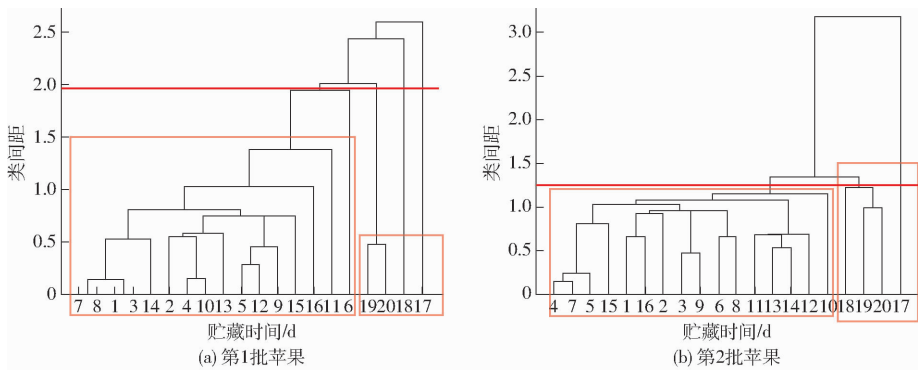


图 3 苹果贮藏室空气样本聚类树形图
Fig.3 Cluster tree diagram of air samples in apple storage room

3.5 预警模型构建

基于确定的腐败基准信息和荧光特征信息构建马氏距离预警模型。计算不同贮藏时间时,空气荧光小波包低频系数特征信息到腐败基准的马氏距离,结果如图 4 所示。

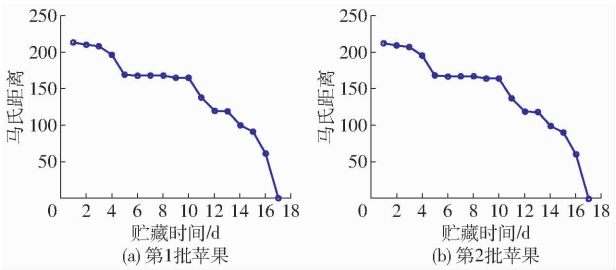


图 4 马氏距离预警模型结果

Fig.4 Mahalanobis distance warning model results

从图 4 中可以看出,对于两批不同品质的苹果,随着贮藏时间的延长,不同贮藏时间贮藏室空气的荧光特征信息与腐败基准日空气荧光信息间的马氏距离越来越小,即相似程度越来越高,苹果越接近腐败日苹果,马氏距离曲线整体呈下降趋势。对于两种苹果,基于空气荧光小波包低频系数特征信息构建马氏距离预警模型,检测结果显示两种苹果变化一致,说明该 3D 荧光特征信息提取方法的有效性。

第 2 批苹果在贮藏第 12~14 天温度降低,因此在图 4b 中显示出这几天马氏距离变化不明显。

4 结论

(1)提出一种基于小波包变换的 3D 荧光特征信息提取方法,基于所提取的荧光特征信息,构建马氏距离预警模型,并采用两种不同品种苹果进行了验证。针对两批不同品种苹果贮藏室内空气的 3D 荧光光谱,在去除瑞利和拉曼散射的基础上,将原始 3D 荧光光谱转化为一维荧光光谱后,进行小波包分解提取低频系数作为荧光特性信息。

(2)运用 PLS 对特征信息与 6 个理化指标进行分析,并对其分析结果进行聚类分析确定出腐败基准。最后构建马氏距离腐败预警模型。结果表明,基于小波包分解提取的荧光特征信息构建马氏距离腐败预警模型,实现了对贮藏期间苹果品质变化的腐败预警。

(3)该荧光特征提取方法对两种苹果都提取到了能有效表征其品质整体变化的特征信息,提取的特征信息具有较强的适用性,又避免了 3D 荧光光谱分析过程中对激发特征波长、发射特征波长的分别提取过程,使得过程更简单。因此,研究提出的小波包分解的低频系数作为荧光特征信息方法是有效的,所给出的预警方法也是可行的。另外,以贮藏室中气体为检测对象取代以苹果个体随机样本为检测对象,克服了苹果样本个体差异性的影响,使研究结果更加可靠、准确。

参 考 文 献

[1] 王春芳,毛明,胡菲菲,等. 超高压和热处理后黄瓜汁感官品质的主观评价和仪器检测对比[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 278-286.
WANG Chunfang, MAO Ming, HU Feifei, et al. Comparison of sensory quality between subjective evaluation and instrument detection for cucumber juice with high pressure processing and heat treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 278-286. (in Chinese)

[2] 陈红霞. 食品理化检测技术[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2013.

[3] 李孟丽,殷勇,袁云霞,等. 香蕉贮藏气体 3D 荧光表征特征选择及早期腐败预警初探[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(2): 558-564.
LI Mengli, YIN Yong, YUAN Yunxia, et al. Feature selection of 3D fluorescence data based on storage room gas and preliminary early warning of banana spoilage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(2): 558-564. (in Chinese)

[4] LI Mengli, YIN Yong, YU Huichun, et al. Early warning potential of banana spoilage based on 3D fluorescence data of storage

- room gas[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10):1946 – 1961.
- [5] 刘雪茹, 李欣, 殷勇, 等. 黄瓜贮藏中微生物信息 3D 荧光判别及其数量监控模型构建[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 32 – 38. LIU Xueru, LI Xin, YIN Yong, et al. 3D fluorescence discrimination of microbial information in cucumber storage and its quantitative monitoring model construction[J]. Food Science, 2021, 42(5): 32 – 38. (in Chinese)
- [6] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 溶解有机质的 3D 荧光光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(12): 2024 – 2028. FU Pingqing, LIU Congqiang, WU Fengchang. 3D fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(12): 2024 – 2028 (in Chinese)
- [7] 刘小静, 吴晓燕, 齐彩亚, 等. 3D 荧光光谱分析技术的应用研究进展[J]. 河北工业科技, 2012, 29(6): 422 – 425. LIU Xiaojing, WU Xiaoyan, QI Caiya, et al. Research progress on the application of 3D fluorescence spectroscopy[J]. Hebei Industrial Science and Technology, 2012, 29(6): 422 – 425. (in Chinese)
- [8] 谈爱玲, 王思远, 赵勇, 等. 基于 3D 荧光光谱和四元数主成分分析的食醋品牌溯源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 177 – 183. TAN Ailing, WANG Siyuan, ZHAO Yong, et al. Research on vinegar brand traceability based on 3D fluorescence spectrum and quaternion principal component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 177 – 183. (in Chinese)
- [9] TIAN Guangjun, YANG Zichen, DONG Lei. Application of wavelet transform and principal component analysis in mineral oil's 3D fluorescence spectra compression [C] // IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems & Applications. IEEE, 2012.
- [10] 孔德明, 宋乐乐, 崔耀耀, 等. 结合平行因子分析算法和模式识别方法的 3D 荧光光谱技术用于石油类污染物检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2798 – 2803. KONG Deming, SONG Lele, CUI Yaoyao, et al. Three-dimensional fluorescence spectroscopy coupled with parallel factor and pattern recognition algorithm for characterization and classification of petroleum pollutants[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(9): 2798 – 2803. (in Chinese)
- [11] SHI Jun, WANG Zhigang, XIAO Yonghui, et al. Three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectral characteristics analysis of influent and effluent from urban domestic sewage treatment plant[J]. Journal of Atmospheric & Environmental Optics, 2012, 7(1): 31 – 37.
- [12] 王雪梅, 吴海龙, 聂瑾芳, 等. 三维荧光二阶校正方法快速检测香蕉中双苯三唑醇含量[J]. 分析化学, 2009, 37(6): 811 – 816. WANG Xuemei, WU Hailong, NIE Jinfang, et al. Rapid determination of bitertanol content in banana using three dimensional fluorescence coupled with second-order calibration[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2009, 37(6): 811 – 816. (in Chinese)
- [13] 王玉田, 张艳, 商凤凯, 等. BP 神经网络结合 ATLD 与三维荧光光谱法测量水中多环芳烃[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3420 – 3425. WANG Yutian, ZHANG Yan, SHANG Fengkai, et al. Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons in water by BP neural network combined with ATLD and three-dimensional fluorescence spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3420 – 3425. (in Chinese)
- [14] 田高友, 袁洪福, 刘慧颖, 等. 小波变换用于近红外光谱数据压缩[J]. 分析测试学报, 2005, 24(1): 17 – 20. TIAN Gaoyou, YUAN Hongfu, LIU Huiying, et al. Application of wavelet transform to compressing near infrared spectra data [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2005, 24(1): 17 – 20. (in Chinese)
- [15] 陆静霞, 丁为民, 於海明, 等. 基于模糊最优小波包的植物胁迫因子识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 217 – 221, 228. LU Jingxia, DING Weimin, YU Haiming, et al. Plant stress recognition based on fuzzy-rule using optimal wavelet packet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 217 – 221, 228. (in Chinese)
- [16] 岳著风, 王颖. 基于小波包变换的 3D 荧光光谱数据压缩方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 100 – 105. YUE Zhufeng, WANG Ying. Study of excitation-emission-matrix(EEMs) compression based on wavelet packet transform[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2013, 40(6): 100 – 105. (in Chinese)
- [17] 朱丹实, 任晓俊, 魏立威, 等. 华富苹果常温贮藏过程中感官品质及挥发性风味物质变化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 278 – 284. ZHU Danshi, REN Xiaojun, WEI Liwei, et al. Changes of sensory quality and volatile compounds of huaifu apple preserved at room temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 278 – 284. (in Chinese)
- [18] 陈至坤, 黄微, 沈小伟, 等. 油类污染物 3D 荧光光谱的瑞利散射消除方法[J]. 中国测试, 2018, 44(11): 121 – 126. CHEN Zhikun, HUANG Wei, SHEN Xiaowei, et al. Rayleigh scattering elimination method for 3D fluorescence spectroscopy of oil pollutants[J]. China Test, 2018, 44(11): 121 – 126. (in Chinese)
- [19] 杜树新, 杜阳锋, 武晓莉. 基于 Savitzky – Golary 多项式的 3D 荧光光谱的曲面平滑方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 440 – 443. DU Shuxin, DU Yangfeng, WU Xiaoli. Surface smoothing method for 3D fluorescence spectrum based on Savitzky – Golary polynomial[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 440 – 443. (in Chinese)
- [20] 吴延军, 赵艳, 吕维雪. 小波包分解及其参数模型[J]. 应用声学, 1998(3): 25 – 29. WU Yanjun, ZHAO Yan, LÜ Weixue. Wavelet packet decomposition and its parametric model[J]. Applied Acoustics, 1998(3): 25 – 29. (in Chinese)
- [21] 范春咏, 吴守鹏, 刘晓文, 等. 基于小波包变换与随机森林的滚动轴承故障特征分析方法[J]. 机械设计与制造,

2020, 10(14): 59 – 63, 70.

FAN Chunyang, WU Shoupeng, LIU Xiaowen, et al. Fault feature analysis method for rolling bearings based on wavelet packet transform and random forest[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2020, 10(14): 59 – 63, 70. (in Chinese)

[22] 高惠旋. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

[23] 张棣, 殷勇, 于慧春, 等. 高光谱融合马氏距离的贮藏黄瓜腐败预警方法[J]. 核农学报. 2020, 34(12): 2749 – 2755.

ZHANG Di, YIN Yong, YU Huichun, et al. Early warning method of cucumber spoilage during storage based on hyperspectral technology and mahalanobis distance[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences. 2020, 34(12): 2749 – 2755. (in Chinese)

[24] 肖先勇, 崔灿, 汪洋, 等. 电压暂降分类特征可比性、相关性及马氏距离分类法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1299 – 1305.

XIAO Xianyong, CUI Can, WANG Yang, et al. Comparability and relevance of voltage sag classifying features and classification methods based on mahalanobis distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1299 – 1305. (in Chinese)

[25] 卢先勇, 何文绚, 陈昊聪, 等. 基于植物油三维荧光光谱的茶油鉴定模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 208 – 213.

LU Xianyong, HE Wenxuan, CHEN Haocong, et al. Identification model of camellia oil based on 3D fluorescence spectra of vegetable oils[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 208 – 213. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 384 页)

[31] 王陈龙, 胡龙飞, 龙军, 等. 脉冲紫外强光杀菌技术的作用机理及应用前景[J]. 中国消毒学杂志, 2016, 33(11): 1104 – 1107.

WANG Chenlong, HU Longfei, LONG Jun, et al. Action mechanism and application prospect of pulsed ultraviolet strong light sterilization technology[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2016, 33(11): 1104 – 1107. (in Chinese)

[32] 赵中开, 王欢. 两种微生物洁净室消毒方法对比初探[J]. 轻工科技, 2020, 36(9): 142 – 143.

ZHAO Zhongkai, WANG Huan. A preliminary study on the comparison of two disinfection methods of microbial clean room[J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(9): 142 – 143. (in Chinese)

[33] 张敏. 紫外灯照射空气消毒对静脉用药集中调配中心臭氧浓度及洁净度的影响[J]. 中国民康医学, 2021, 33(12): 103 – 104.

ZHANG Min. Influence of air disinfection by UV lamp irradiation on ozone concentration and cleanliness of pharmacy intravenous admixture services[J]. Medical Journal of Chinese People's Health, 2021, 33(12): 103 – 104. (in Chinese)

[34] DO-KYUN K, DONG-HYUN K. UVC – LED irradiation effectively inactivates aerosolized viruses, bacteria, and fungi in a chamber-type air disinfection system[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(17): e00944 – 18.

[35] 李建兴, 涂光备, 涂岱昕. 室内微生物污染的三种工程控制方法[J]. 暖通空调, 2004(12): 29 – 33.

LI Jianxing, TU Guangbei, TU Daixin. Three engineering control methods of indoor airborne microbes[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004(12): 29 – 33. (in Chinese)

[36] 代彩红, 王彦飞, 吴志峰, 等. 紫外辐射消毒中 UVC 辐射照度的测量与溯源[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 1 – 5.

DAI Caihong, WANG Yanfei, WU Zhifeng, et al. Measurement and traceability of UVC irradiance in ultraviolet disinfection[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 1 – 5. (in Chinese)

[37] 孙婷, 刘凤娟. 室内空气中微生物污染控制方法研究进展[J]. 环境生态学, 2021, 3(9): 79 – 82.

SUN Ting, LIU Fengjuan. Research progress of microbial pollution control methods in indoor-air[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 79 – 82. (in Chinese)

[38] GAO M, YAN X, QIU T L, et al. Variation of correlations between factors and culturable airborne bacteria and fungi[J]. Atmospheric Environment, 2016, 128(3): 10 – 19.

[39] 马丽新, 齐虹, 孙霞忠. 大气气溶胶粒径分布特征与呼吸系统暴露评估研究进展[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3549 – 3558.

MA Lixin, QI Hong, SUN Xiazhong. Research progress on aerosol particle size distribution characteristics and respiratory system exposure assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3549 – 3558. (in Chinese)

[40] 高玉红, 郭建军, 李宏双, 等. 寒区奶牛舍环境温湿度、粉尘和车载细菌的季节性变化及其相关性研究[J]. 畜牧兽医学报, 2016, 47(3): 620 – 629.

GAO Yuhong, GUO Jianjun, LI Hongshuang, et al. Seasonal variation of ambient temperature, relative humidity, dust and airborne bacteria in dairy cowshed and their correlation in chill region[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2016, 47(3): 620 – 629. (in Chinese)