

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407484

便携式荧光成像检测系统开发及应用研究*

张 玮 傅霞萍

(浙江理工大学信息科学与工程学院 杭州 310018)

摘要:针对食品加工过程中设备表面食物残留快速检测的需求,以菠菜汁液为例开发了一套便携式荧光成像检测系统,并在此基础上增加系统对菠菜汁液中含量较高的物质叶绿素A的定量功能。该系统主要由光源、CCD相机、显示屏及控制处理单元组成,用于激发物质产生荧光的光源、滤波片可根据实际需求调整更换,同时开发了检测系统的控制软件,利用显示屏进行人机交互操作,主要实现图像数据采集和处理等功能。对3种广泛使用的食品加工材料表面的菠菜汁液残留开展定性实验,检测结果显示:当食品加工表面本身不具有荧光效应时,便携式荧光成像检测系统能够较好地识别出其上的叶绿素残留。对叶绿素A的定量检测结果表明,当叶绿素A溶液浓度在0~8.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围内时,浓度预测模型的决定系数 R^2 都能达到0.99,预测结果的均方根误差RMSE不高于0.24 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。研究结果表明,开发的检测系统对具有特定荧光效应的物质检测可行且有效,系统具有的检测视场大、体积小便于携带等优点可将系统用于现场实时检测,也可拓展至植物病变等其他领域的应用,具有较广阔的应用前景。

关键词: 荧光成像;便携式;实时检测;浓度预测;食物残留

中图分类号: TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Development and application of a portable fluorescence imaging detection system

Zhang Wei Fu Xiaping

(School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the demand for rapid detection of food residues on the surface of equipment during food processing, a portable fluorescence imaging detection system was developed using spinach juice as an example, and on this basis, the quantitative function of the system for chlorophyll A, which is a substance with high content in spinach juice, was added. The system is mainly composed of a light source, a CCD camera, a display and a control and processing unit, and the light source and filter used to stimulate the substance to produce fluorescence can be adjusted and replaced according to the actual demand, while the control software of the detection system is developed, and the display is used for human-machine interactive operation, mainly realizing the functions of image data acquisition and processing. Qualitative experiments were carried out on spinach juice residues on the surface of three widely used food processing materials, and the detection results showed that the portable fluorescence imaging detection system was able to better identify chlorophyll residues on the food processing surface when the surface itself did not have a fluorescence effect. The quantitative detection results of chlorophyll A showed that when the concentration of chlorophyll A solution was in the range of 0~8.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$, the determination coefficient R^2 of the concentration prediction model can reach 0.99, and the root mean square error (RMSE) of the prediction results was not higher than 0.24 $\mu\text{g}/\text{mL}$. The results of this study show that the developed portable fluorescence imaging detection system is feasible and effective for the detection of substances with specific fluorescence effects, and the system has the advantages of a large field of view, small size and easy to carry, etc. The system can be used for real-time on-site detection, and in addition to the detection of food residues on the surface of food processing, it can also be extended to the detection of plant pathology and other fields, which has a broader application prospect.

收稿日期:2024-05-02 Received Date: 2024-05-02

* 基金项目:国家自然科学基金(32071904)项目资助

Keywords: fluorescence imaging; portable; real-time detection; concentration prediction; food residue

0 引言

随着社会的发展,与食品相关的上下游产业逐步形成,然而食品安全事件多发、频发,不仅对产业发展造成影响,同时造成了多次食源性疾病爆发,给人民身体健康和安全带来威胁^[1]。经调查研究发现,加工设备表面的食品污染是食品工业中导致食品安全问题的一个主要原因^[2]。食物残渣的积累为微生物生长和生物膜的形成提供了环境^[3],微生物可以在食品加工设备上的食物残渣中迅速生长。新鲜农产品造成食源性疾病爆发的风险很高,因为在食用前没有细菌致死阶段(例如加热杀死病原体)^[4],绿叶蔬菜会被进入田间的牲畜或野生动物的粪便污染^[5]。对于新鲜农产品来说,加工过程如修剪、切割、清洗、漂洗、脱水和包装都是生产过程中潜在的交叉污染点。受污染的食品每年在全世界造成 6 亿例食源性疾病和 42 万人死亡^[6]。因此,为了防止清洁后的食物残留导致病菌滋生,对食品加工表面的检测是十分有必要的。肉眼视觉检查是大面积实时测量的一种廉价方法,但它受到注意力持续时间和视力等人因因素的限制。与之相比,非破坏性和非接触性的光学检测技术在食品安全检测行业中引起了相当大的关注,其中,荧光检测技术被广泛应用于食品加工表面食物残留检测。

荧光检测技术具有简单高效的特点,与各种化学计量方法结合能为仪器分析提供许多新思路^[7],同时各类荧光探针的出现使其应用范围大大增加^[8],目前已经广泛应用于农药残留检测^[9]、医药分析^[10-11]、细胞检测^[12-13]、植物病变检测^[14]。早期荧光检测系统大多在微流体中应用,如毛细管流动柱中的荧光分析,这类荧光检测系统结构相似,以激光器作为激发光源,用尺寸小、低成本的微流控装置盛放样本,以光谱仪或光电二极管采集信号。这类设备检测精度较高,但是检测范围较小,且造价较高、不便移动,也无法成像。随着技术发展,许多荧光检测系统选择用 LED 光源代替激光光源^[15-16],与传统的固体激光光源相比,LED 光源体积小、造价低、性能稳定,而且驱动更方便。如今的荧光检测系统追求更高的精度,通常使用个人计算机控制相机并进行复杂的数据处理工作。这类设备可以实现荧光成像并进行大面积检测,但是无法随意移动。于是,便携式荧光检测系统应运而生。便携式荧光检测系统中可以用单片机或带有操作系统的嵌入式开发板、智能手机等 PC 端进行各种数据处理工作,通过各种器件搭配实现检测功能的同时缩小系统体积^[17]。

虽然现有的相关研究表明便携式荧光检测系统可用

于现场无损检测,但目前仍然存在一些问题和难点尚待解决,如:应用于食品加工表面的实时便携式荧光检测设备比较缺乏,且检测设备与数据分析处理单元分离,无法对所采集的荧光图像进行现场即时处理使检测结果更加明确,而某些设备虽然体积小且检测设备与数据处理单元结合,但是又无法成像。因此,研究的目的是:1)设计一款应用于食品加工表面食物残留检测的便携式荧光成像检测系统,实现图像采集、数据分析处理、图像显示于一体。2)验证所开发系统在菠菜汁液荧光定性和叶绿素 A 定量检测方面的应用效果。

1 便携式荧光成像检测系统开发

1.1 系统硬件构建

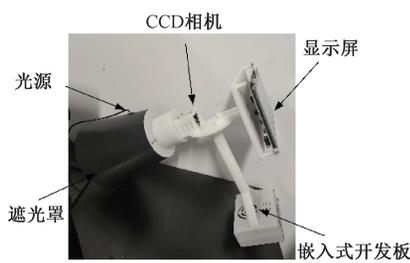
开发的便携式荧光成像检测系统如图 1 所示。叶绿素的激发光源通常为蓝色光,因此选择使用波长 465~470 nm 的 LED 环形光源(MV-RL90×50B-A45-F,维视智造,西安,中国)作为检测系统的光源(内径 50 mm,外径 90 mm,厚度 22.5 mm),同时搭配一个光源控制器(MV-ALP2415-02T-F,维视智造,Xi'an,China),系统的光源可以根据实际需要调整或更换。为了实现荧光成像功能,系统的信号采集单元使用的是一个 CCD 相机(MV-EM120C,维视智造,西安,中国),该相机分辨率为 1 280×960,在 450~700 nm 波段的感光效率都达到了 80%,能够较好地采集到叶绿素荧光。同时 CCD 相机镜头配置了一块长通滤波片($\lambda = 620$ nm,OD 4-5,上海朴显光学科技有限公司,上海,中国)用于消除激发光带来的干扰。系统使用嵌入式开发板(Jetson TX2-NX,Nvidia Corporation,Santa Clara,CA,USA)作为数据处理与控制单元,采用此类微型元器件可以让整个系统结构更加紧凑,同时外接一块 7 寸的显示屏,在显示屏上进行人机交互操作。

设计外壳将检测系统各部分组装,外壳下方是一个 122 mm×86 mm×46 mm 的空心长方体,用于安装嵌入式开发板,长方体底座上方延伸出一个圆柱形握把,在上方用一个圆台承载相机以及显示屏支架,相机前方设计一个圆环用来组装光源,并在光源前方增加一个黑色遮光罩,使用耐热材料进行 3D 打印。

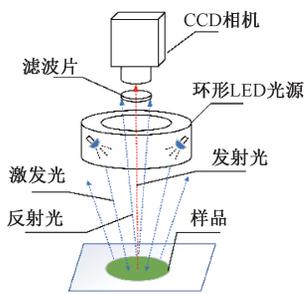
1.2 系统软件开发

便携式荧光成像检测系统的控制软件基于 Python2.7 环境开发。控制软件中的人机交互模块界面采用 Tkinter GUI 框架,主要包括图像采集界面(如图 2 所示)、数据处理界面(如图 3 所示)。

相机控制界面主要实现控制相机采集荧光图像功



(a) 实物图
(a) Physical diagram



(b) 检测示意图
(b) Schematic diagram of testing

图1 便携式荧光成像检测系统

Fig. 1 Portable fluorescence imaging detection system

能,在此界面可以控制相机启停,设置数据包大小、曝光时间以及图像文件的存储。数据处理界面实现对荧光图像的数据处理,可以进行荧光图像预处理(如选取感兴趣区域、阈值分割、提取分量图及特征值等),还可以绘制荧光强度的伪彩色图及三维立体图形,在写入预测模型后,也可直接在此界面进行叶绿素浓度预测。

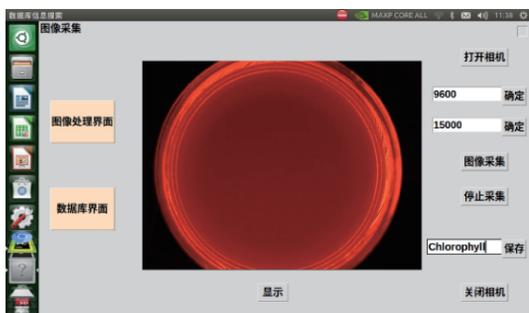


图2 图像采集界面

Fig. 2 Image acquisition interface

2 便携式荧光成像系统应用验证

2.1 菠菜汁液残留定性检测实验

为了测试所开发的便携式荧光成像检测系统在不同食品加工表面对菠菜汁液残留的检测效果,开展定性检测实验。



图3 数据处理界面

Fig. 3 Data processing interface

1) 样品制备

研究使用了3种广泛使用的食品加工表面材料,分别为食品级304不锈钢、食品级白色防水聚丙烯(polypropylene, pp)硬塑料板以及实木板。以新鲜菠菜叶作为富含叶绿素的食物代表,将菠菜叶碾碎不均匀涂抹在3种材质上,并剔除人眼能明显识别的出来的残渣。

2) 实验方法及图像处理过程

样品在室温下干燥5h后,首先使用不加滤波片的便携式荧光成像检测系统在实验室环境光条件下拍摄样品,将样品放置在相机正下方13cm处,尽量保证每次放置在相同的位置。然后,在便携式荧光检测系统中加上620nm的长通滤波片,并打开LED环形光源(光源控制器功率等级设置为250),安装好遮光罩后采集样品的荧光图像。进入荧光成像检测系统的人机交互界面,选取大小为400 pixel×400 pixel的感兴趣区域进行图像处理,不锈钢板反光相对较为严重,采用阈值分割除去不锈钢反光所带来的影响,提取荧光图像的R、G、B、H、S、V分量图,经预研分析后选择以R分量图像像素点数据绘制出可较好显示强度变化的三维立体图像。

2.2 叶绿素定量检测实验

为了拓展便携式荧光成像检测系统功能,在实现定性检测食品加工表面菠菜汁液残留的基础上,对菠菜汁液中含有较高的物质叶绿素A开展定量实验,验证系统是否能够通过荧光强度预测物质浓度。

1) 标准样品制备

从阿拉丁生化科技有限公司(中国上海)购买叶绿素A(C109269-5 mg),经过高效液相色谱检测其含量≥85.0%,以无水乙醇为溶剂配置溶液。将5mg叶绿素A完全溶解在500mL无水乙醇当中,此时叶绿素浓度为8.5 μg/mL,使用移液枪以5%的浓度梯度(0.425 μg/mL)将叶绿素溶液稀释成21份不同浓度溶液分别盛放容量瓶中,为减少误差,每个浓度配置6份样本。

2) 实验方法及图像处理过程

实验中选择直径为35mm的圆形塑料培养皿作为叶

绿素溶液的载体,使用移液枪取液,每次吸取 1 mL 叶绿素溶液即可完全覆盖培养皿底部。将 126 组样本分别取 1 mL 溶液滴入培养皿中,培养皿放在荧光检测相机正下方 13 cm 处,尽量保证每次都放在同一个位置,随后拍摄其荧光图像。选取感兴趣区域 250 pixel×200 pixel 进行图像处理,提取荧光图像的 R、G、B、H、S、V 分量图及灰度图,计算分量图及灰度图的平均像素值作为特征值。将 R、B 特征值和浓度进行线性拟合,发现线性度较好,因此建立适用于线性关系数据集的回归模型:弹性回归 (elastic net regression, ENR)、多元线性回归 (multiple linear regression, MLR)、随机梯度下降回归 (stochastic gradient descent regression, SGDR)、支持向量回归 (support vector regression, SVR) 模型。其中 ENR 模型惩罚系数为 1,混合参数为 0.5,最大迭代次数为 1 000, tol 为 0.000 1;MLR 模型拟合截距,拟合系数可以为负;SGDR 模型损失函数为最小二乘拟合,正则化项选择 L2,最大迭代次数为 1 000, tol 为 0.000 1;SVR 模型内核为线性核函数, tol 为 0.001。将 126 份样本按 2:1 的比例划分为训练集和测试集,同时计算出每种浓度溶液特征值的平均值为新的特征值,得到新的样本数据,将新的样本数据按 4:1 的比例划分为训练集和测试集,比较两种数据集的预测效果。经过比较 7 种分量图特征值与对应浓度的标准化回归系数,选择以 R、B 分量图的平均像素值作为输入建立回归模型。

2.3 检测系统及模型的实际应用验证

为了验证模型在实际应用中的准确度,从新鲜菠菜叶中提取叶绿素溶液后对其浓度进行测试,将结果与分光光度计(L3,上海仪电分析仪器有限公司,上海,中国)测试结果对比。

1) 样品制备

从当地农贸市场买来新鲜的菠菜,用清水洗干净后使用吸水纸将菠菜叶片表面残留水珠擦干。去掉菠菜叶片的主脉络,用剪刀将叶片剪碎以方便叶绿素的提取。用电子天平称取 15 g 菠菜碎叶,在烧杯中加入 300 mL 无水乙醇,将菠菜碎叶也加入烧杯中,用锡纸密封。将水浴锅温度调到 40 ℃后保持稳定,将装有菠菜碎叶及无水乙醇的烧杯放入其中,加热 2 h 后,使用慢性定性滤纸将烧杯中菠菜碎叶与叶绿素溶液的混合物过滤分离得到初始的叶绿素溶液^[18],使用分光光度计测量此时溶液中叶绿素 A 浓度,随后稀释到浓度低于 8.5 μg/mL 得到本次实验的原液,将原液按 10% 浓度梯度 (0.85 μg/mL) 进行稀释得到 10 组不同浓度溶液,每个梯度配置 3 份样本。

2) 实验方法

使用所研发的便携式荧光检测设备拍摄 30 份样本的荧光图像,提取重复浓度样本的特征值的平均值后用所建立的模型预测其浓度。使用分光光度计测试这 10

组样本的浓度与模型预测得出的浓度进行对比。用定量实验中所制得的浓度为 8.5 μg/mL 的叶绿素 A 溶液进行光谱扫描,选择叶绿素 A 的吸收波峰 684 nm 作为分光光度计浓度预测的波长,浓度预测方法选择 K 系数法,用定量实验中 7 组不同浓度的标准溶液进行多点标定,无水乙醇溶液作为参比溶液,以分光光度计测量结果为实际值。

3 结果与讨论

3.1 定性实验结果

在定性实验中图像采集与处理结果如图 4 所示。

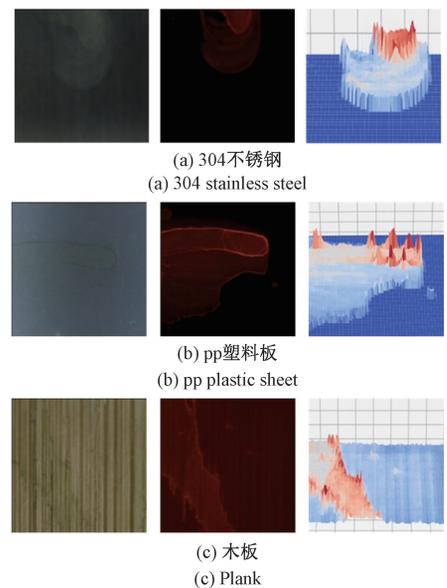


图 4 不同食品加工表面的叶绿素残留荧光图像采集与处理
Fig. 4 Acquisition and processing of chlorophyll residue fluorescence images on different food processing surfaces

当 304 不锈钢板、PP 塑料板、实木板上面的菠菜汁液量不多且浓度较低时,人眼几乎无法清晰识别,只有在很近的距离仔细观察或者以特定的角度,同时辅以较强的光照才能在表面看见菠菜汁液残留痕迹。便携式荧光成像检测系统加上蓝色光源及滤波片后采集到的荧光图像,可以清晰地看见菠菜汁液所在位置发出红色荧光,通过 R 分量三维图像可看出菠菜汁液残留的相对浓度。从实木板上采集的荧光图像显示其本身就有荧光效应,虽然能够大概识别菠菜汁液残留痕迹,但是不如在另外两种材质表面的识别效果。该实验结果表明:便携式荧光成像检测系统可以很好地识别本身无荧光效应的食品加工设备表面的叶绿素残留。

3.2 定量实验结果

定量实验结果如图 5 所示,可以看出随着叶绿素 A

溶液浓度增加, R 分量图的特征值较 B 分量图的特征值变化更明显, 由于人为配置溶液及一些其他干扰的影响, 在某几个浓度上特征值大小出现明显波动, 但是整体上特征值大小与叶绿素 A 溶液的浓度呈较为良好的线性关系。模型预测效果如表 1 所示, MLR 模型预测效果较好, SGDR、SVR 这两种回归模型效果比较相似, 同时在使用全部数据集建模和特征值平均值数据集建模预测效果存在明显差异, 使用全部数据集建模时模型的决定系数 R^2 都能达到 0.99 以上, 均方根误差 $RMSE$ 都不超过 $0.23 \mu\text{g/mL}$ 。

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_a - y_{pm})^2} \quad (1)$$

式中: y_a 为实际值, y_p 为预测值, y_{pm} 为预测值的平均值。

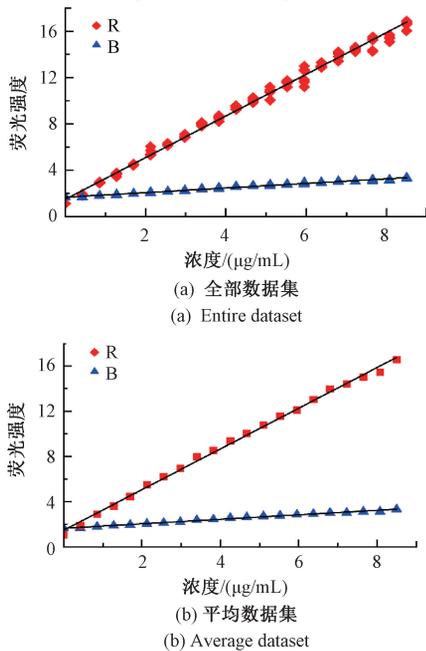


图 5 R、B 分量图特征值与浓度线性拟合图
Fig. 5 R、B component plots of eigenvalues vs. concentration linear fits

在使用特征值平均值数据集建模时, 由于数据集样本较少, 导致模型预测效果较差, 因此在实际应用时, 采用全部数据集所建立的回归模型。

3.3 实际应用验证结果

在实际应用中, 用所建立的 4 种回归模型的预测结果与使用标样标定后的分光光度计预测结果进行比较, 如图 6 所示(参照线为预测结果完全等于实际值的直线)。

随着浓度增加, 模型预测结果与分光光度计预测结果的绝对误差越来越大, 且浓度与绝对误差之间也呈现线性关系, 这是因为分光光度计标定时用的是叶绿素 A

纯品, 而从菠菜叶中提取的叶绿素溶液不仅包括叶绿素 A, 其中还有叶绿素 B 也会发出红色荧光影响便携式荧光成像检测系统的检测结果, 同时也可能会有硬件设备带来的难以消除的系统误差, 这些因素导致便携式荧光成像检测系统的检测结果偏高且呈现一定规律。建立输入特征值与误差的线性模型, 用已建立的模型和此线性模型做减法, 由此得到校准后的新模型, 重新进行实验验证校准后模型的预测效果, 结果如图 7 所示, 经过校准 4 种模型与分光光度计的预测结果已经十分接近。

表 1 4 种模型预测效果比较

Table 1 Comparison of prediction performance among four models

模型	$RMSE / (\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	R^2
全部数据集		
ENR	0.230	0.992
MLR	0.174	0.995
SGDR	0.176	0.995
SVR	0.176	0.995
平均数据集		
ENR	0.727	-0.463
MLR	0.353	0.655
SGDR	0.445	0.452
SVR	0.292	0.764

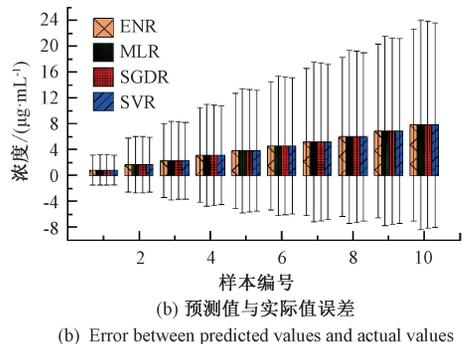
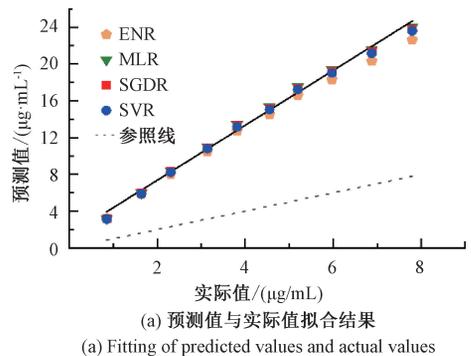


图 6 模型预测结果

Fig. 6 Model prediction results

如表 2 所示, 校准后 4 种模型的均方根误差最大值为 $0.238 \mu\text{g/mL}$, 决定系数均达到 0.99。经过比较, 4 种模型中 SGDR 模型的预测结果比其他模型预测结果更好一些, 均方根误差为 $0.165 \mu\text{g/mL}$, 决定系数高达 0.995。2014 年 Kostov 等^[19]研发的便携式荧光检测系统通过荧

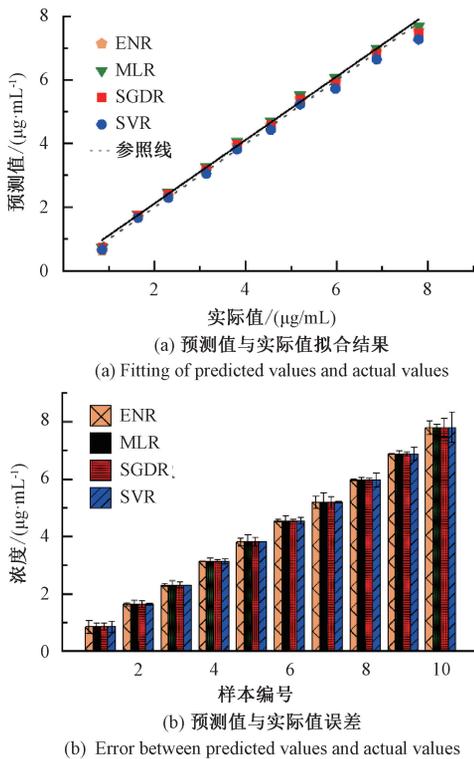


图 7 校准后模型预测结果

Fig. 7 Model prediction results after calibration

光检测葡萄糖浓度时的决定系数达到 0.988 5。2023 年杨佳羽等^[20]研发的多重实时荧光检测系统检测荧光素的决定系数高达 0.996 5,与本系统相差不大。

表 2 校准后模型预测效果

Table 2 Prediction performance of the model after calibration

模型	RMSE/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	R^2
ENR	0.238	0.990
MLR	0.205	0.993
SGDR	0.165	0.995
SVR	0.212	0.989

4 结 论

研究基于荧光成像原理,使用小型化组件研发了一套用于实时检测食品加工表面物质残留的便携式荧光成像检测系统,并实现对其中所含部分物质的浓度预测功能。该系统集图像采集、数据处理一体,提高了检测效率。实验研究结果表明,研究所开发的便携式荧光成像检测系统不仅可以有效识别食品加工表面的菠菜汁液残留,也可预测叶绿素 A 浓度,校准后 4 种浓度模型的均方根误差最大值为 0.238 $\mu\text{g}/\text{mL}$,决定系数均达到 0.99,其

中 SGDR 模型的预测结果比其他模型预测结果更好一些,均方根误差为 0.165 $\mu\text{g}/\text{mL}$,决定系数高达 0.995。通过此系统可以实时检测食品残留物是否清洁干净,进而降低食品与致病菌的交叉污染概率,预防食源性疾病。并且系统的光源、滤波片均设计成可方便更换的模块,根据实际需求调整或选择适宜的激发光源和滤波片,该系统还可拓展用于其他具有荧光效应的残留物或致病菌的检测,具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] LEVY N, HASHIGUCHI T C O, CECCHINI M. Food safety policies and their effectiveness to prevent foodborne diseases in catering establishments: A systematic review and meta-analysis [J]. Food Research International, 2022, 156, DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111076.
- [2] BARISH J A, GODDARD J M. Stability of nonfouling stainless steel heat exchanger plates against commercial cleaning agents[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 143-151.
- [3] ROSSI C, CHAVES-LÓPEZ C, SERIO A, et al. Effectiveness and mechanisms of essential oils for biofilm control on food-contact surfaces: An updated review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(8): 2172-2191.
- [4] WIEDERODER M S, LIU N T, LEFCOURT A M, et al. Use of a portable hyperspectral imaging system for monitoring the efficacy of sanitation procedures in produce processing plants [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(2): 217-226.
- [5] SRISAMRAN J, ATWILL E R, CHUANCHUEN R, et al. Detection and analysis of indicator and pathogenic bacteria in conventional and organic fruits and vegetables sold in retail markets [J]. Food Quality and Safety, 2022, 6: fyac013, DOI: 10.1093/fysafe/fyac013.
- [6] LEE H, YOON Y. Etiological agents implicated in foodborne illness worldwide[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(1): 1-7.
- [7] 程朋飞,朱燕萍,潘金燕,等. 三维荧光光谱技术结合交替残差三线性化算法检测成品油污染物[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(1):62-69.
- [8] CHENG P F, ZHU Y P, PAN J Y, et al. Detection of refined oil pollutants by three-dimensional fluorescence spectrum combined with alternate residual trilinearization algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(1):62-69.
- [8] 蔡忆,姜天雨,张静,等. 基于碳点的小型自校正比率荧光光纤铬(VI)传感器[J]. 仪器仪表学报,2023,44(11):261-270.

- CAI Y, JIANG T Y, ZHANG J, et al. The miniature self-correcting ratiometric fluorescence optical fiber sensor based on carbon dots for chromium(VI) detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 261-270.
- [9] TAFRESHI F, FATAHI Z, GHASEMI S F, et al. Ultrasensitive fluorescent detection of pesticides in real sample by using green carbon dots[J]. Plos One, 2020, 15(3), DOI: 10.1371/journal.pone.0230646.
- [10] DING Q, ZHAN Q, ZHOU X, et al. Theranostic upconversion nanobeacons for tumor mRNA ratiometric fluorescence detection and imaging-monitored drug delivery[J]. Small, 2016, 12(43): 5944-5953.
- [11] NIAN Y, WANG H, YING G, et al. Transfer rates of aflatoxins from herbal medicines to decoctions determined by an optimized high-performance liquid chromatography with fluorescence detection method [J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2018, 70(2): 278-288.
- [12] 明焱,冯汝鹏,朴永杰. 基于新冠病毒荧光检测的 RT-qPCR 温控系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 18-23.
- MING Y, FENG R P, PIAO Y J, et al. The RT-qPCR temperature control system based on COVID-19 fluorescence detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(6): 18-23.
- [13] CHEN P, WANG Y, HE Y, et al. Homogeneous visual and fluorescence detection of circulating tumor cells in clinical samples via selective recognition reaction and enzyme-free amplification [J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 11634-11643.
- [14] 张昭,姚志凤,王鹏,等. 叶绿素荧光成像技术的葡萄霜霉病早期检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1028-1035.
- ZAHNG ZH, YAO ZH F, WANG P, et al. Early detection of plasmopara viticola infection in grapevine leaves using chlorophyll fluorescence imaging [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 1028-1035.
- [15] RAJENDRAN V K, BAKTHAVATHSALAM P, BERGQUIST P L, et al. A portable nucleic acid detection system using natural convection combined with a smartphone[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 134: 68-75.
- [16] LI Z, ZHANG J, HU H, et al. Highly sensitive and portable fluorescence detection system for Cr³⁺ [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 2087-2089.
- [17] PONLAKHET K, PHOOLUB K, PHONGSANAM N, et al. Smartphone-based portable fluorescence sensor with gold nanoparticle mediation for selective detection of nitrite ions [J]. Food Chemistry, 2022, 384, DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132478.
- [18] AMIN M, CHETPATTANANONDH P, KHAN M N, et al. Extraction and quantification of chlorophyll from microalgae Chlorella sp [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 414(1), DOI: 10.1088/1757-899X/414/1/012025.
- [19] KOSTOV Y, GE X, RAO G, et al. Portable system for the detection of micromolar concentrations of glucose[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(2), DOI: 10.1088/0957-0233/25/2/025701.
- [20] 杨佳羽,曾俊添,奚邦朝,等. 面向核酸现场快速检测的多重实时荧光检测系统[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 859-867.
- YANG J Y, ZENG J T, XI B C, et al. Multiple real-time fluorescence detection system for rapid on-site nucleic acid detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 44(4): 859-867.

作者简介



张玮, 2020 年于南通理工学院获得学士学位, 现为浙江理工大学硕士研究生, 主要研究方向为荧光成像检测。

E-mail: 202130605358@mails.zstu.edu.cn

Zhang Wei received his B. Sc. degree from Nantong Institute of Technology in 2020.

Now he is a M. Sc. Candidate in Zhejiang Sci Tech University. His main research interest includes fluorescence imaging detection.



傅霞萍(通信作者), 2003 年于浙江大学获得学士学位, 2008 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江理工大学教授, 主要研究方向为光谱及光谱成像检测。

E-mail: fuxp@zstu.edu.cn

Fu Xiaping (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Zhejiang University in 2003, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2008, respectively. Now she is a professor in Zhejiang Sci Tech University. Her main research interests include spectroscopy and spectral imaging detection technology and application.