

基于高光谱技术的花椰菜农药残留检测

沈兵兵¹, 姚星伟², 王怀文¹

(1.天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134; 2.天津市农业科学院蔬菜研究所, 天津 300384)

摘要: **目的** 为了快速、无损地检测花椰菜上的农药残留, 采用高光谱成像技术分别对花椰菜上是否含有苏云金杆菌、高效氯氟菊酯和虫螨腈虫威等 3 种农药进行无损检测研究, 并且跟踪研究检测效果最好的农药安全间隔期。**方法** 对含有农药和不含农药的花椰菜样本进行高光谱成像处理, 提取感兴趣区域的光谱数据。剔除前后 20 个波段的原始光谱数据, 以降低噪声的影响, 针对剩余 216 个波段 (950~1 666 nm) 的数据分别采用卷积平滑 (S-G)、多元散射校正 (MSC) 和变量标准化 (SNV) 等 3 种算法对光谱数据进行优化。为了提高判别运行速率, 采用竞争性自适应重加权算法 (CARS) 提取 3 种农药光谱数据的特征波长, 并建立偏最小二乘法 (PLS) 判别模型。**结果** 基于 SNV 优化后的 PLS 模型对花椰菜上 3 种农药的识别准确率相对最高, 其中虫螨腈虫威农药样本的测试效果相对最好, 识别率为 100%, 随后对该农药进行了连续 7 d 的检测, 其结果符合农药的消散规律。**结论** 将高光谱图像技术应用于花椰菜的农药残留检测具有很好的应用前景。

关键词: 花椰菜; 高光谱技术; 农药残留; 数据模型

中图分类号: S481+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)19-0173-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.19.020

Detection of Pesticide Residues in Cauliflower Based on Hyperspectral Technology

SHEN Bing-bing¹, YAO Xing-wei², WANG Huai-wen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. Vegetable Research Institute, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct non-destructive testing to the bacillus thuringiensis, beta-cypermethrin and indoxacarb on cauliflower with hyperspectral imaging technology, in order to detect pesticide residues on cauliflower quickly and non-destructively and track and study the safe interval for the best detection effects. After hyperspectral imaging was performed on cauliflower samples with and without pesticides, the spectral data of the region of interest were extracted. The original spectral data of the front and back 20 bands were eliminated to reduce the effect of noise, convolution smoothing method (S-G), multivariate scattering correction (MSC) and standard normal variate (SNV) algorithms were used to optimize the data of the remaining 216 bands (950-1 666 nm), respectively. The characteristic wavelength of spectral data of the three pesticides was extracted by the competitive adaptive reweighted algorithm (CARS) to improve the discriminant operation speed, and finally the partial least squares (PLS) discriminant model was established. The PLS model optimized based on SNV had the highest recognition accuracy of the three pesticides on cauliflower. The test results of the pesticide samples with indoxacarb were the best, with a recognition rate of 100%, and then the 7-day detection

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 天津市科技计划 (19ZXZYSN0050); 天津市蔬菜现代农业产业技术体系项目 (ITTVRS2017004); 天津市“131”创新型人才团队建设项目 (201923)

作者简介: 沈兵兵 (1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为高光谱的农药残留检测技术。

通信作者: 王怀文 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高光谱测试技术及其在农业领域的应用。

was carried out to this pesticide, of which the results were consistent with dissipation law of pesticides. The hyperspectral imaging technology has a good application prospect in the detection of pesticide residues on cauliflowers.

KEY WORDS: cauliflower; hyperspectral technology; pesticide residues; data model

花椰菜又称花菜、菜花或椰菜花,具有风味鲜美、口感好、营养成分含量高、种类全等优点,富含蛋白质、碳水化合物、矿物质、维生素 C 和胡萝卜素等营养物质,深受消费者的青睐,是“菜篮子工程”中的主要蔬菜之一^[1]。在花椰菜种植生产中需要施用农药,以提高其产量,减少病害、虫害的发生。如果农药的使用时间不对或者过量使用农药,都会导致菜品出现农药残留超标问题。该问题不仅会导致生态和环境的破坏,而且严重威胁食品安全和生命健康^[2]。面向人民生命健康是习近平总书记对科技事业发展要坚持“四个面向”的重要内容。作为保障人民生命健康的关键环节,食品安全和营养健康是重要的民生工程、民心工程,因此探索高效、快速的农药残留检测手段成为该领域亟待解决的问题之一。

常规的农药残留检测方法包括气相色谱法^[3]、高效液相色谱法^[4]、薄层色谱法、超高效液相色谱-串联质谱法^[5]、气相色谱-串联质谱法^[6]等,这些方法具有灵敏度、准确性和精密度均较好的优点,检测结果可靠,得到了广泛的应用。由于这些传统检测方法存在样品前处理步骤烦琐、仪器设备成本高昂、需要专业技术人员操作、检测过程时间长等缺点,无法满足快速实时和低成本检测的实际需求,因此开发一种无损、简单、低价、环保、样品制备快、结果可靠的农产品农药残留检测技术具有重要的现实意义^[7]。光谱技术通过判定分子结构的各种光谱特性,实现对目标物的定性或定量分析,具有快速、操作简单、应用广泛、成本相对较低等优点,在农药残留快速检测领域已经展现出其独特的优势^[8-10]。常用的光谱技术有荧光光谱技术、拉曼光谱技术、近红外光谱技术、高光谱图像技术等。Zhou 等^[11]利用荧光光谱技术对生菜叶片中不同种类的农药残留进行了鉴定,最优分类模型准确率都高达 90%以上。Liu 等^[12]在对橙子表面农药残留的定量检测分析中,采用共聚焦显微拉曼光谱,以及多种预处理方法进行研究,结果表明,共聚焦显微拉曼光谱技术可以准确地检测农药残留。Sánchez 等^[13]采用近红外光谱测定了辣椒上的农药残留,并对这种方法进行了评估。丛孙丽^[14]以生菜叶为研究对象,利用荧光光谱技术对农药定性判别的预测准确率可达 96.08%。上述研究结果表明,光谱技术可以很好地应用于农药残留检测,但鲜有文献对花椰菜实际生长过程中农药残留的快速检测技术进行研究。

农药安全间隔期指自喷药后到残留量降到最大允许残留量时所需的间隔时间,使用农药时必须提前了解农药在农作物上的安全间隔期。文中使用高光谱图像技术对农场中实际生长的花椰菜表面进行 3 种

农药的残留检测,通过提取花椰菜样本(含农药和不含农药)成像后感兴趣区域的光谱曲线,经过 3 种算法对其进行处理分析后,找到最优的偏最小二乘(PLS)鉴别分析模型,以实现高光谱技术对花椰菜上农药残留的识别。其次,根据最优判别模型研究花椰菜上农药随时间消散的规律和此种农药的安全间隔期,为了解农药安全使用周期提供了一种新的检测方法,有利于花椰菜的安全生产、包装和流通。

1 实验

1.1 样本制作

样本由天津市宝坻区生物中心提供,将生长健康、表面完好无损的花椰菜样本分为 4 组,每组样本按农药品种的要求进行稀释和喷洒。在第 1 组 4 棵花椰菜上喷洒稀释了 1 000 倍后的苏云金杆菌农药(有效成分总含量为 8 000 IU/ μ L,山东慧邦生物科技有限公司)。在第 2 组 4 棵花椰菜上喷洒稀释了 300 倍后的高效氯氰菊酯农药(有效成分的体积分数为 4.5%,陕西益农化工有限公司)。在第 3 组 4 棵花椰菜上喷洒稀释了 1 000 倍后的虫螨腈虫威农药(有效成分为体积分数为 10%的虫螨腈和 4%的茚虫威,青岛金尔农化研制开发有限公司)。在第 4 组 2 棵花椰菜上均匀喷洒清水。将每组施用不同农药的花椰菜分区域进行标记(共 14 棵),经过 1 d 后,按区域采摘花椰菜样本,并进行编号。

1.2 设备

实验使用光谱波段范围为 900~1 700 nm 的高光谱成像系统(Imspector N17, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland),该系统主要由线阵 CCD 相机(Zelos258GV, Kappa optronics Gmb H, Germany)、照明系统、光栅光谱仪、成像镜头、移动平台和数据采集软件等构成。在采集高光谱图像前,先打开照明系统预热 30 min,以保证光源的稳定性,并使高光谱相机达到理想的工作状态。经过多次调试,设定图像采集参数:曝光时间为 20 ms,平台移动速度为 10 mm/s,采集长度为 200 mm,镜头与样本的距离为 430 mm。在某波段下花椰菜高光谱图像的伪彩色图像如图 1 所示。

随后需要将高光谱图像进行黑白校正,在相同的采集条件下,先扫描聚四氟乙烯白板到反射率为 99.99%的全白图像。随后盖上镜头盖,采集反射率几乎为 0%的全黑图像。再根据公式对光谱图像进行校正,校正公式见式(1)。

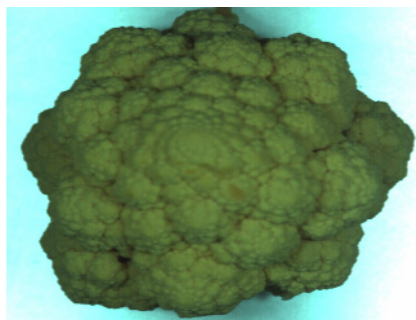


图 1 高光谱系统采集的花椰菜伪彩色图像
Fig.1 Pseudo-color image of cauliflower collected by hyperspectral system

$$I = \frac{R - B}{W - B} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为全白图像的反射率; B 为全黑图像的反射率; R 为原始光谱图像的反射率; I 为校正后光谱图像的反射率。

1.3 光谱数据的提取

使用 ENVI 软件提取高光谱图像的感兴趣区域, 尺寸确定为 50 像素×50 像素, 在每棵样本的光谱图像中提取其中心区域的 10 个感兴趣区域, 即每组有农药样本 40 个, 一共有 120 个含农药样本、20 个无农药的样本。通过计算得到每组的平均光谱 (共 256 个波段), 在喷洒农药 1 d 后, 4 组样本的平均光谱数据如图 2a 所示, 可以明显看出, 花椰菜表面有无农药残留的光谱曲线差异显著。由于光源强度分布不均匀, 光谱仪存在暗电流, 因此采集到的光谱数据存在噪声。特别是光谱数据开头和结尾处的噪声较大, 因此剔除首尾 20 个波段的数据^[15], 剩余 216 个波段 (950~1 666 nm) 的数据如图 2b 所示。

1.4 光谱数据预处理

为了提高模型识别速度和准确性, 在得到 4 组样本的原始光谱数据后, 需要对光谱数据进行预处理。文中采用了卷积平滑 (Convolution Smoothing Method, S-G)、多元散射校正 (Multiplicative Scatter Correction, MSC) 和变量标准化 (Standard Normal Variate, SNV) 等方法。S-G 平滑方法使用最小二乘拟合系数来建立滤波函数, 对平滑点附近一定范围内的光谱数据进行拟合。MSC 算法能够有效消除散射的影响, 在减小光谱差异性的同时保留了原始光谱的有效信息, 从而增强了光谱的吸收信息, 提高了光谱的信噪比。SNV 算法对每条光谱数据进行标准正态化处理, 校正光线散射造成的光谱数据误差^[16]。以第 1 组含有苏云金杆菌农药的花椰菜样本为例, 经过 3 种算法预处理后的结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 预处理后的原始光谱数据提高了信噪比, 优化效果显著。其余 3 组样本的光谱数据也采用同样的方法进行处理, 并对不同预处理结果进行比较, 以选择最佳的判别模型。

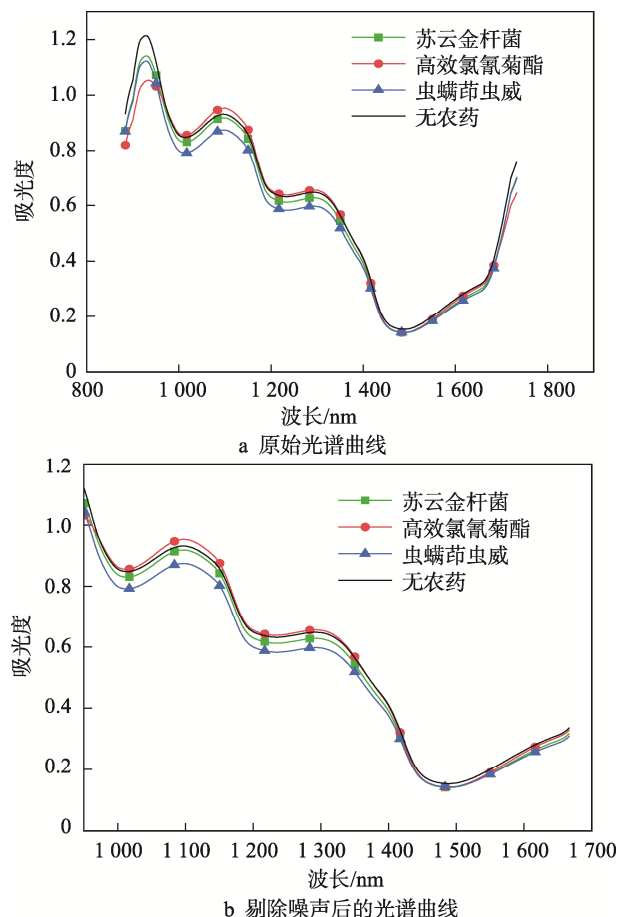


图 2 喷洒农药 1 d 后 4 组样本的平均光谱数据
Fig.2 Average spectral data of four groups of samples one day after spraying of pesticides

2 结果与讨论

2.1 农药残留判别分析

采用偏最小二乘法 (Partial Least Squares, PLS) 对花椰菜样本上无农药及农药的种类进行了判别分析。PLS 是一种常用的多元统计方法, 已广泛用于建立光谱检测模型。该算法对光谱矩阵 X 和浓度矩阵 Y 同时进行主成分分析, 结合因子分析和回归分析找到潜在变量, 通过最小化误差的平方找到该组数据的最佳函数匹配^[17]。建立 PLS 模型, 采用全交叉验证, 3 组含有农药的花椰菜样本共设定 90 个样本为训练集, 30 个样本为测试集; 不含农药的 20 个花椰菜样本中, 设定 15 个样本为训练集, 5 个样本为测试集。其中, 光谱数据 (950~1 666 nm) 为自变量 X , 农药种类和无农药组为因变量 Y 。经不同预处理后的模型判别效果和原始光谱数据所建立的模型判别效果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 在 3 种农药的训练和预测模型中, 经 SNV 处理后的数据模型的判别准确率相对最高。这是由于 SNV 算法对每条光谱数据进行了标准正态化处理, 可以更好地校正散射引起的误差, 降低花椰菜表面的不规则性带来的影响。

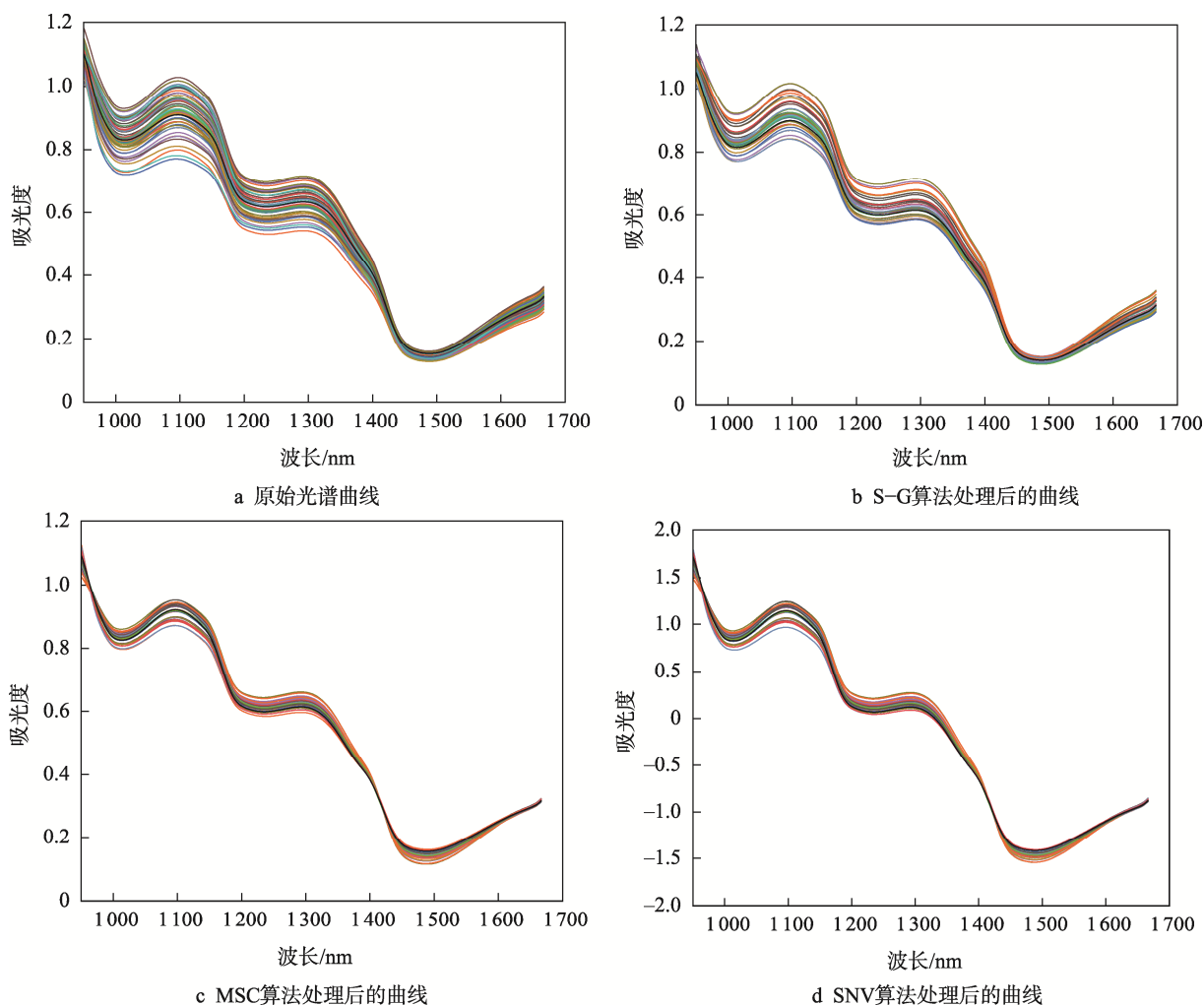


图 3 含有苏云金杆菌农药的花椰菜样本的光谱数据

Fig.3 Spectral data of cauliflower samples containing bacillus thuringiensis pesticides

表 1 不同算法处理后的模型和原始光谱数据建立的模型对花椰菜上不同种类的农药残留判别准确率

Tab.1 Accuracy of the models processed by different algorithms and the models established by the original spectral data to discriminate different types of pesticide residues on cauliflower

农药种类	模型预处理	准确率/%	
		训练集	测试集
苏云金杆菌	S-G	93.33	80.00
	MSC	86.67	90.00
	SNV	100	90.00
	无预处理	90.00	80.00
高效氯氰菊酯	S-G	70.00	70.00
	MSC	80.00	70.00
	SNV	86.67	80.00
	无预处理	73.33	60.00
虫螨茆虫威	S-G	86.67	90.00
	MSC	90.00	90.00
	SNV	96.67	100
	无预处理	93.33	90.00

2.2 基于特征光谱的农药检测快速判别

采用光谱的预处理方法可以有效降低噪声、散光等对光谱成像的影响,但为了更加快速地对不同农药的光谱进行判别,需要在预处理后的光谱数据上选择有效的特征光谱^[18]。特征光谱不仅可以在预测模型中起到关键作用,还能够降低光谱数据的维数,最大程度地保留光谱数据的原始信息,以此来提高农药判别的运算效率。文中选用了竞争性自适应重加权算法(Competitive Adaptive Reweighted, CARS)^[19],其原理如下所述。

1) 在光谱数据中随机抽出一定比例的样本,建立偏最小二乘回归模型,见式(2)。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Y}$ 为品质参数矩阵; $\mathbf{X}$ 为样本的光谱矩阵; $\mathbf{b}$ 为回归系数; $\mathbf{e}$ 为残差。

2) 根据指数衰减函数强行去除相对 $|b_i|$ 值较小的波长,在第*i*次采样后,波长变量点的保存率计算见式(3)。

$$r_i = ae^{-ki} \tag{3}$$

式中: r_i 为第 i 次采样的波长; a 和 k 均为常数。

3) 在第 N 次采样时的波长 r_N 仅 2 个变量参与建模, 即 $r_N=2/p$, 再根据式 (4) — (5) 求出 a 和 k 。

$$a = (p/2)^{1/(N-1)} \tag{4}$$

$$k = \frac{\ln(p/2)}{N-1} \tag{5}$$

式中: p 为参与建模的变量。

4) 通过评价每个波长变量的权重 ω_i 来筛选变量, 计算每次采样后得到的变量子集, 比较变量子集的交互验证均方根误差值, 误差值最小的即为最优变量子集, 计算方法见式 (6)。

$$\omega_i = \frac{|b_i|}{\sum_{i=1}^p |b_i|} \quad i=1, 2, 3, \dots, p \tag{6}$$

将经过 SNV 算法预处理后的 3 种农药的光谱数据导入 Matlab 软件中, 利用 CARS 算法进行不同农药的特征光谱提取。其中, 苏云金杆菌农药的光谱数据采样 26 次时, 变量子集的交叉验证均方根误差值相对最小。得到的最优特征波长共 16 个: 910.64、930.62、990.56、993.89、997.22、1 117.1、1 183.7、1 436.78、1 440.11、1 443.44、1 446.77、1 450.1、1 453.43、1 606.61、1 629.92、1 633.25 nm。

将高效氯氰菊酯和虫螨茛虫威农药的光谱数据按照上述同样的方法进行特征光谱提取。高效氯氰菊酯的最优特征波长共 7 个: 973.91、980.57、1 023.86、1 143.74、1 147.07、1 396.82、1 400.15 nm。虫螨茛虫威的最优特征波长共 8 个: 933.95、1 023.86、1 087.13、1 090.46、1 150.4、1 380.17、1 416.8、1 566.65 nm。再根据 3 种农药的特征波长进行农药残留的判别, 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 苏云金杆菌农药的准确率为 80%; 高效氯氰菊酯的准确率为 70%; 虫螨茛虫威农药的残留判别测试效果相对最好, 准确率为 90%。

表 2 3 种农药的特征波长的判别准确率
Tab.2 Discrimination accuracy rate of characteristic wavelength of three pesticides

农药种类	准确率/%	
	训练集	测试集
苏云金杆菌	73.33	80.00
高效氯氰菊酯	60.00	70.00
虫螨茛虫威	86.67	90.00

由表 1—2 可知, 在采用 3 种算法优化后的光谱数据进行农药残留判别时发现, SNV 算法处理后的光谱数据模型的准确率相对最高, 在测试集中 3 种农

药 (苏云金杆菌、高效氯氰菊酯和虫螨茛虫威农) 各自 10 个样本的判别准确率分别为: 90%、80%、100%。在此基础上, 对经 SNV 处理后的光谱数据进行了特征光谱的提取, 并进行了农药残留检测判别, 3 种农药判别测试集的准确率分别为 80%、70%和 90%。结果表明, 采用高光谱成像技术进行花椰菜表面上的农药残留检测时, 基于 SNV 算法处理原始光谱数据和 CARS 算法提取特征光谱后, 所建立的 PLS 判别模型具有良好的测试效果。由于采用提取特征波长的方法降低了光谱数据的维数, 虽然加速了农药检测的判别速度, 但准确率相对于优化原始数据所建立的判别模型较低, 因此, 在利用高光谱技术对花椰菜进行快速、无损农药残留检测时, SNV-PLS 模型对花椰菜上农药残留具有更高的识别率, 确保了高光谱成像技术检测农药残留的准确率。由于虫螨茛虫威农药的检测结果比较理想, 因此后续工作将采用此模型对该农药的消散规律进行研究。

2.3 农药安全间隔期

随着时间的延长, 含虫螨茛虫威农药样本的农药残留量会逐渐降低, 并趋于无农药样本, 意味着在模型判别中未检测出农药, 视为农药已经消散, 所以采用含农药样本的判别准确率来表示农药的消散程度。即判别准确率越低, 表示农药的含量越少, 农药的消散程度越大。

在完成花椰菜上 3 种农药的定性判别分析后, 每隔 24 h 对含有农药的花椰菜进行采摘, 每次采摘 4 棵再进行光谱图像的采集, 重复 6 次该实验操作, 共采摘 24 棵花椰菜。其次, 农药浓度在花椰菜上会随着时间的变化而降低, 为了提升判别结果的可靠性, 按照前文的分析方法将每天含有农药的花椰菜测试集样本提升到 15 个, 即一共有 90 个测试集样本。在光谱数据模型判别中数值 3 表示所检测的第 3 种农药 (虫螨茛虫威), 随后确定阈值误差来统计整体的判别准确率。利用光谱技术对含虫螨茛虫威农药的花椰菜进行了连续 7 d 的检测后, 对所提取的光谱数据进行判别, 结果中具有代表性的第 1 天、第 4 天和第 7 天的测试集模型判别检测如图 4 所示, 总体农药准确率和模型性能结果如表 3 所示。

由图 4 和表 3 可以看出, 将阈值误差超过±0.2 的样本视为不含农药的样本时, 该农药的消散规律明显; 在第 4 天的模型判别中有 8 个阈值误差外的样本, 即 15 个样本中农药消散程度已达一半以上; 第 5 天和第 6 天的准确率一样, 这可能是由模型判别误差所致。剔除误差数据后, 将该农药消解动态根据一级动力学方程拟合, 其结果为 $C=139.497e^{0.191t}$ 。可推断按推荐剂量施用的虫螨茛虫威农药主要成分虫螨脲农药的半衰期为 3.63 d, 并且在第 7 天仅有 1 个含农药样本, 表示虫螨脲农药的安全间隔期至少为 7 d。总体检测结果较为符合农药的消散规律, 与王翠翠等^[20]

对体积分数为 10% 的虫螨腈农药的半衰期实际检测结果相差 0.57 d, 表明利用高光谱技术检测农药的消散规律具有一定可行性。

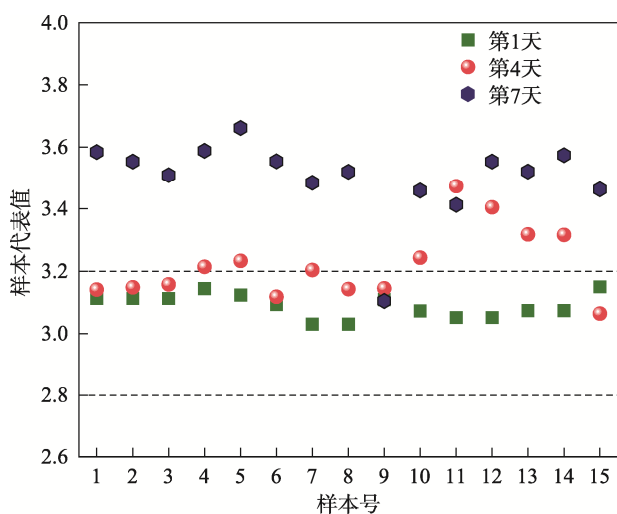


图 4 虫螨茛虫威农药第 1 天、第 4 天和第 7 天的测试集判别结果

Fig.4 Discrimination results of the test set of indoxacarb pesticide on the first day, fourth day and seventh day

表 3 虫螨茛虫威农药光谱检测的准确率
Tab.3 Accuracy of spectral detection of indoxacarb pesticide

时间	农药样品 准确率/%	模型性能	
	测试集	决定系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)
第 1 天	100	0.973	0.101
第 2 天	73.33	0.986	0.112
第 3 天	66	0.993	0.079
第 4 天	46.67	0.993	0.082
第 5 天	13.33	0.996	0.062
第 6 天	13.33	0.990	0.098
第 7 天	6.67	0.991	0.091

针对农药光谱数据的模型判别误差对结果的影响和低浓度农药光谱数据判定结果的误差分析还需进一步探究, 以论证光谱数据的实用性。

3 结语

利用高光谱成像技术对花椰菜上 3 种农药残留进行了检测, 提取了 3 组各含有农药的 40 个样本和对照组 20 个样本的高光谱图像的感兴趣区域, 并计算出 3 种农药在花椰菜上的平均光谱曲线。在模型判别中, 基于 SNV 算法优化后的 PLS 模型对花椰菜上 3 种农药残留具有很高的识别率。其中, 虫螨茛虫威

农药的农药残留判别测试效果最好, 达到了 100% 的准确率。以此为基础, 对该农药的安全间隔期进行了检测, 结果符合农药的消散规律。表明高光谱技术在花椰菜农药残留检测方面具有很好的应用前景, 在一定程度上保障了花椰菜的安全生产。

参考文献:

- [1] 许爱霞, 牟龙, 刘子斌, 等. 不同农药在花椰菜中的安全间隔期研究[J]. 中国果菜, 2019, 39(5): 25-27.
XU Ai-xia, MU Long, LIU Zi-bin, et al. Study on the Safety Interval of Different Pesticides in Cauliflower[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(5): 25-27.
- [2] 姚星伟, 李辉, 刘莉莉, 等. 完全覆盖花椰菜甲拌磷和甲维盐农药残留研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(4): 110-113.
YAO Xing-wei, LI Hui, LIU Li-li, et al. Study on Pesticide Residues of Phorate and Emamectin Benzoate in the Ball Well Protected Cauliflower Variety[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(4): 110-113.
- [3] 刘丽雪. 气相色谱法检测采摘园中草莓有机磷农药残留[J]. 食品安全导刊, 2021(21): 73-74.
LIU Li-xue. Determination of Organophosphorus Pesticide Residues in Strawberries in Picking Garden by Gas Chromatography[J]. China Food Safety Magazine, 2021(21): 73-74.
- [4] 李琴. 高效液相色谱法检测几种蔬菜中啉虫脒农药残留[J]. 轻工科技, 2021, 37(6): 111-112.
LI Qin. Determination of Acetamiprid Pesticide Residues in Several Vegetables by HPLC[J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(6): 111-112.
- [5] 黄兰淇, 张正炜, 陈秀, 等. 超高效液相色谱-串联质谱同时检测蔬菜和水果中 30 种农药残留[J]. 世界农药, 2021, 43(7): 46-53.
HUANG Lan-qi, ZHANG Zheng-wei, CHEN Xiu, et al. Determination of 30 Pesticides Residue in Vegetables and Fruits by Ultra Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry[J]. World Pesticide, 2021, 43(7): 46-53.
- [6] 张艳, 陈子雷, 郭长英, 等. 气相色谱-串联质谱法测定韭菜中拟除虫菊酯类农药残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1463-1467.
ZHANG Yan, CHEN Zi-lei, GUO Chang-ying, et al. Determination of Pyrethroid Pesticide Residues in Chinese Chives by Gas Chromatography-Mass Spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1463-1467.
- [7] JAMSHIDI B, MOHAJERANI E, JAMSHIDI J. Developing a Vis/NIR Spectroscopic System for Fast and

- Non-Destructive Pesticide Residue Monitoring in Agricultural Product[J]. *Measurement*, 2016, 89: 1-6.
- [8] LIN Hong-fang, LIU Lei, ZHANG Yu-ting, et al. Residue Behavior and Dietary Risk Assessment of Spinetoram (XDE-175-J/L) and Its Two Metabolites in Cauliflower Using QuEChERS Method Coupled with UPLC-MS/MS[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110942.
- [9] MOHI ALDEN K, OMID M, RAJABIPOUR A, et al. Quality and Shelf-Life Prediction of Cauliflower under Modified Atmosphere Packaging by Using Artificial Neural Networks and Image Processing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 163: 104861.
- [10] NARENDERAN S T, MEYYANATHAN S N, BABU B. Review of Pesticide Residue Analysis in Fruits and Vegetables. Pre-Treatment, Extraction and Detection Techniques[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109141.
- [11] ZHOU Xin, JUN Sun, ZHANG Bing, et al. Classification of Different Kinds of Pesticide Residues on Lettuce Based on Fluorescence Spectra and WT-BCC-SVM Algorithm[J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(19/21): 1740082.
- [12] LIU Yan-de, HE Bing-bing. Quantitative of Pesticide Residue on the Surface of Navel Orange by Confocal Microscopy Raman Spectrometer[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2015, 8(2): 1550001.
- [13] SÁNCHEZ M T, FLORES-ROJAS K, GUERRERO J E, et al. Measurement of Pesticide Residues in Peppers by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy[J]. *Pest Management Science*, 2010, 66(6): 580-586.
- [14] 丛孙丽. 基于高光谱图像技术的生菜叶片多种农药残留检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 21-30.
- CONG Sun-li. Detection of Multiple Pesticide Residues in Lettuce Leaves Based on Hyperspectral Image Technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 21-30.
- [15] 桂江生, 顾敏, 吴子娴, 等. 基于高光谱图像的西兰花表面多种农药残留检测[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(5): 643-648.
- GUI Jiang-sheng, GU Min, WU Zi-xian, et al. Detection of Multiple Pesticide Residues on the Surface of Broccoli Based on Hyperspectral Imaging[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2018, 44(5): 643-648.
- [16] XU Duo-hua, WANG Huai-wen, JI Hong-wei, et al. Hyperspectral Imaging for Evaluating Impact Damage to Mango According to Changes in Quality Attributes [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(11): 3920.
- [17] 朱逢乐. 基于光谱和高光谱成像技术的海水鱼品质快速无损检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 20—33.
- ZHU Feng-le. Rapid and Non-Destructive Detection of Marine Fish Quality Based on Spectroscopy and Hyperspectral Imaging Technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 20—33.
- [18] 张煜东, 霍元铠, 吴乐南, 等. 降维技术与方法综述 [J]. *四川兵工学报*, 2010, 31(10): 1-7.
- ZHANG Yu-dong, HUO Yuan-kai, WU Le-nan, et al. Overview of Dimensionality Reduction Techniques and Methods[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2010, 31(10): 1-7.
- [19] XUAN Wang, WANG Yan-xue. Competitive Adaptive Reweighted Sampling Method for Fault Detection[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1820(1): 012078.
- [20] 王翠翠, 陈安琪, 董文阳, 等. 虫螨腈与 Bt 混配对小菜蛾的田间防效及虫螨腈在西兰花上的残留消解动态[J]. *农药学学报*, 2021, 23(5): 922-929.
- WANG Cui-cui, CHEN An-qi, DONG Wen-yang, et al. Field Efficacy of the Mixture of Chlorfenapyr and Bt Against *Plutella Xylostella* and the Residue Dissipation Dynamic of Chlorfenapyr in Brassica Oleracea Var. Italica[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2021, 23(5): 922-929.

责任编辑: 彭颖