

基于 PDWT 与高光谱的生菜叶片农药残留检测

孙俊^{1,2} 周鑫¹ 毛罕平² 武小红¹ 杨宁¹ 张晓东²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 在离散小波变换特征提取算法基础上, 结合有机物近红外谱区倍频中心近似位置, 提出一种分段离散小波变换特征提取的方法。以 4 类农药残留水平(重度超标、中度超标、轻微超标、低于国标)生菜为研究对象, 通过透射电镜对生菜叶片微观结构进行检测, 并利用近红外高光谱成像仪采集生菜样本的高光谱图像。在生菜高光谱图像中选取感兴趣区域并提取该区域的平均光谱, 依据常见基团主要中心近似位置对平均光谱进行有效分段, 以 sym5 为小波基函数, 依次对每段光谱数据进行小波变换分解。通过每段不同层次高频小波系数曲线的奇异值分析, 来获取光谱特征波段。为了便于判断特征提取波段的优劣, 提出初步评估参数契合度, 并结合支持向量机分类准确率进一步评估提取特征波段。试验结果表明: 随着农药残留浓度的增加, 生菜叶片内部嗜饿颗粒数量变多, 而淀粉颗粒变少, 细胞间隙逐渐变大。不同浓度农药残留的生菜叶片内部细胞排列结构方式和组织结构存在差异, 从而使不同浓度农药残留的生菜近红外光谱具有一定的差异性。与离散小波变换特征提取算法相比, 分段离散小波变换具有较高的预测分类准确率。分段数取值为 4 时, 取得最佳的契合度、校正集、交叉验证集与预测集准确率分别为 75%、95%、92.86% 和 90.63%。分段离散小波变换结合契合度参数评估, 能有效提高光谱特征提取波段可靠性, 为快速、准确地无损检测生菜农药残留提供了一种新方法。

关键词: 生菜; 农药残留检测; 小波变换; 特征提取; 近红外光谱

中图分类号: S636.2; O433.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0323-07

Detection of Pesticide Residues on Lettuce Leaves Based on Piece-wise Discrete Wavelet Transform and Hyperspectral Data

Sun Jun^{1,2} Zhou Xin¹ Mao Hanping² Wu Xiaohong¹ Yang Ning¹ Zhang Xiaodong²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to fast, accurately and nondestructively detect pesticide residues in lettuce, combining discrete wavelet transform (DWT) algorithm with the approximate position of frequency doubling center of organic compounds in near infrared spectra, a method of feature extraction algorithm of piece-wise discrete wavelet transform (PDWT) was proposed. PDWT was used to extract the feature of four different concentrations of pesticide residues on the lettuce leaves. Transmission electron microscope (TEM) was carried out to detect the microstructure of lettuce. Hyperspectral image acquisition system was used to get information of near infrared hyperspectral image of lettuce, and the region of interest (ROI) was selected to get the near infrared spectrum data of the lettuce samples, which was ranged from 870 nm to 1800 nm. According to the approximate position of organic compounds in near infrared spectral region, appropriate piecewise paragraphs were selected. Each section of the spectral data was divided into seven layers by PDWT in turn, using sym5 as the basis function. Then, based on the analysis of the

收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471413)、江苏高校优势学科建设工程项目(苏政办发 2011 6 号)、江苏大学现代农业装备与技术重点实验室开放基金项目(NZ201306)、江苏省六大人材高峰项目(ZBZZ-019)和江苏省自然科学基金项目(20140550)

作者简介: 孙俊(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事计算机技术在农业工程中的研究, E-mail: sun2000jun@ujs.edu.cn

singular value of the high frequency wavelet coefficient curve, the characteristic band of lettuce was extracted by the optimal decomposition layer, which was the largest corresponding to the characteristic difference of the singular value. In order to evaluate the value of the feature extracted by singular value, a parameter of fit degree (FD) was proposed. Combined with the SVM classification accuracy, the feature extracted by PDWT was further evaluated. The results showed that under different concentrations of pesticide residues, the arrangement and structure of internal cells of lettuce leaves were different. The spectra of different concentrations of pesticide residues were different. PDWT had a higher classification accuracy of predictive classification compared with that of SVM. The classification accuracy of FD, calibration, cross validation and predictive classification accuracy of SVM were 75%, 95%, 92.86% and 90.63%, respectively, under the N value of 4 with PDWT. PDWT combined with FD was suitable for the feature extraction of spectrum, it provided a novel method for fast and nondestructive identification of lettuce pesticide concentration.

Key words: lettuce; pesticide detection; wavelet transform; feature extraction; near infrared spectroscopy

引言

生菜具有较高的营养价值,在我国食用蔬菜中占有重要地位^[1]。为了防治虫害病害而施加农药,会造成生菜农药残留。不同浓度农药胁迫下的生菜外部品质和内部结构具有差异,如何快速精确检测生菜农药残留是农业科研工作者研究的重要课题。

近红外光谱技术因其具有非破坏性、无需样本预处理等优点,广泛应用于农产品(包括水果、蔬菜、谷物等)品质检测中^[2-4]。近红外光射向生菜后得到漫反射光谱,在不同浓度农药胁迫下的生菜上获取的漫反射光谱是不同的,利用这个原理,可以实现农药不同浓度胁迫下的生菜分类鉴别。目前,近红外光谱获取方式主要有2种,一种是通过近红外光谱采集仪器得到^[5],另一种是通过近红外高光谱图像采集仪器得到近红外高光谱图像后,通过对感兴趣区域(Region of interest, ROI)进行处理得到^[6],而后者与前者相比较,通过区域平均光谱处理能较大程度上降低噪声带来的干扰,提高光谱信息可靠性。然而,由于近红外谱区谱峰重叠非常严重,谱峰比较宽,谱区的可分解性较差^[7],为此需要合适的光谱特征提取方法。

小波变换方法具有较强的局部分析能力^[8],能够对局部光谱信息进行多尺度变换分析,通过伸缩和平移运算,得到高频部分的细节信息以及低频部分的近似信号^[9]。近年来,小波变换已成功应用于近红外光谱特征提取中(如油膜检测、癌症诊断、机械诊断等)^[10-12]。在这些小波变换特征提取应用中,缺少合适的特征波段评判参数。此外,由于不同区域光谱包含的信息量具有差异,小波变换特征提

取应用中对所有光谱区域采用相同的分解层,可能导致提取特征波段可靠性较差。为此,本文结合有机物近红外谱区倍频中心近似位置,提出分段离散小波变换(Piece-wise discrete wavelet transform, PDWT)特征提取的方法。并结合近红外谱区化学键和基团的特征振动频率区区域,提出契合度(FD)参数,以期对提取特征波段优劣进行预估。然后结合支持向量机(SVM)建模分类预测准确率,来进一步评估PDWT选择特征波段可靠性。此外,本文通过透射电镜(TEM)对不同浓度农药残留下的生菜叶片微观细胞排列和组织结构进行分析。

1 材料与方法

1.1 试验样本

试验品种为意大利全年耐抽苔生菜,采用珍珠岩袋培方式进行生菜样本培育。栽培地点在江苏大学Venlo型温室。将长势形状相近的生菜分为4组(A、B、C、D组),每组选取40株生菜样本,共计160个样本,在莲座期喷洒农药。

试验类别包含4类乐果农药与水不同配比(1:100、1:500、1:1000、1:1400)残留的生菜。由于存在安全间隔期,为此喷洒农药5d后,采摘生菜相同叶位叶片后依次编号并装入贴有标签的塑料袋密封保存,并放置于专业的植物保鲜箱。随后将生菜样本送往实验室进行高光谱图像采集。待生菜样本高光谱图像采集完成后,选取1mm×2mm生菜叶片(避开生菜主茎干),使用4%戊二醛溶液对其固定(使生菜叶片完全下沉),并利用透射电镜(TEM)对生菜叶片细胞内部结构进行检测。经过化学检测^[13]喷洒农药(乐果,40%乳油)4个梯度浓度(质

量比)依次为 15.78 mg/kg(重度超标)、5.10 mg/kg(中度超标)、1.02 mg/kg(轻度超标)、0.36 mg/kg(低于国标)。其中,国标规定乐果农药每日允许摄入量(Acceptable daily intake, ADI)0.002 mg/kg,生菜表面乐果农药最大检测限量为 1 mg/kg^[14]。

1.2 试验仪器

试验仪器主要包括高光谱图像采集仪和扫描电镜。高光谱图像采集仪所采用的硬件部分由 ImSpector V10E 型高光谱图像摄像机(Spectral Imaging Ltd., Oulu, 芬兰)、2 个 150 W 的 2900-ER+9596-E 型直流可控控光纤卤素灯(Illumination 公司, 美国)、SC100 型暗箱(北京光学仪器厂)、MTS120 型电控位移台(北京光学仪器厂)和计算机等组成。JEM-1400 型透射电镜(日本电子株式会社)选取钨灯丝作为电子枪,加速电压为 40~100 kV,放大倍数为 50~1 000 000 倍,点分辨率达到 0.38 nm,线分辨率达到 0.2 nm。

1.3 离散小波变换

由于高光谱数据涉及的波段数多、包含的数据量大,波段之间具有较大的相关性,从而增加了波段间的信息冗余。小波变换(WT)能够通过原始数据进行降维和压缩,剔除与待测对象无关的信息,简化建模过程,从而实现高光谱数据特征降维。

小波变换可以描述信号时间(空间)和频率(尺度)域的局部特性^[15],通过小波变换将原始数据变换到小波域,原始数据中包含的信息可以由对应的小波系数表示。其中,一个小波由一系列的子函数组成,这些子函数都是由小波基函数衍生出来的,小波基函数也称为小波母函数。

在实际运用中,尤其是在计算机上实现时,必须对信息数据进行离散化处理。此外,执行离散小波变换的有效方法是使用滤波器,即 Mallat 算法^[16]。通过 2 个互补的滤波器组,其中一个滤波器为低通滤波器,通过该滤波器可得到信号的近似值,另一个为高通滤波器,通过该滤波器可得到信号的细节值。

1.4 分段离散小波变换

小波变换分析光谱时,能够通过一个较强的光谱振荡来确定不同位置的光谱区域特征。小波分解所产生的高频细节部分能有效地反映物质的敏感波段,而低频逼近部分可以平滑由局部振荡所产生的噪声。小波变换分析本身不能够实现对原始信号的特征提取。通常情况下,小波变换分析使用特征提取策略,来实现光谱特征选择。并且不同光谱区域包含的信息量具有一定的差异。为此,结合有机物近红外谱区倍频中心近似位置,本文提出了一种分段离散小波变换的方法来实现高维数据的特征提

取,具体流程如下:

(1)对原始近红外高光谱图像数据进行 ROI 光谱提取得到矩阵 $[X \ Y]$,其中 X 为波长, Y 为样本对应漫反射率。对 i 类 ROI 光谱进行取平均值处理得到均值矩阵 $[X \ Y_i]$ 。

(2)依据有机物近红外谱区倍频中心近似位置,对 ROI 光谱矩阵 $[X \ Y]$ 进行 N 段处理,即第 N 段光谱矩阵为 $[X \ Y]_N$,均值矩阵为 $[X \ Y_i]_N$ 。

(3)依次对 N 段光谱矩阵进行小波变换 7 层分解,以 sym5 小波为小波基函数。分解得到近似值矩阵 $[X \ A_7]_N$,其中 A_7 为第 N 段光谱矩阵小波变换第 7 层分解低频近似信号。

(4)依次对 N 段均值矩阵中 i 类均值矩阵 $[X \ Y_i]_N$ 进行小波变换七层分解,以 sym5 小波为小波基函数。分解得到高频细节矩阵 $[X \ D_{7i}]_N$,其中 D_{7i} 为第 N 段光谱矩阵小波变换第 7 次分解高频细节部分。

(5)绘制高频细节矩阵 $[X \ D_{7i}]_N$ 系数曲线,依据奇异值特征差最大,来选择第 N 段最佳分解层以及特征波段。依据选取的奇异值特征波段,提取近似值矩阵 $[X \ A_7]_N$ 特征波长下的漫反射率。

(6)计算契合度(FD)。通过契合度计算来选定特征波长,并用契合度来初步判定选取的奇异值特征波段优劣。基于化学键和基团的特征振动频率区,提出了步骤(4)中选取的奇异值特征波段与化学键和基团的特征振动频率区契合度(FD),其定义公式为

$$F_D = \frac{S_c}{S} \times 100\% \quad (1)$$

其中 S_c 为选取的奇异值特征波段在化学键和基团特征振动频率区的数量判定(判定范围为有机物近红外谱区倍频中心近似位置前后 50 nm 区间), S 为选取的奇异值特征波段数。

1.5 支持向量机

支持向量机(SVM)是建立在统计学习理论基础上的机器学习方法,能有效解决模式识别中的分类问题和判别问题^[17]。此外,与传统的分类算法相比较,SVM 分类性能更佳。利用 SVM 建立的分类模型^[18]为

$$f(\mathbf{x}) = K(\mathbf{w}, \mathbf{x}) + b \quad (2)$$

式中 \mathbf{x} ——样本矩阵 $f(\mathbf{x})$ ——判定阈值
 \mathbf{w} ——自变量参数 $K(\mathbf{w}, \mathbf{x})$ ——核函数
 b ——常数

2 结果与讨论

在采集生菜样本高光谱图像之前,需测试标准

反射板和黑背景以减少误差。采集生菜近红外高光谱数据波段为 870 ~ 1 800 nm (间隔为 ± 4.42 nm), 包含了 256 个光谱波段。本试验统一选取叶片 125 像素 \times 125 像素区域 (避开生菜主茎干) 作为 ROI, 然后求取该区域光谱平均值作为该生菜样本的光谱值。160 个生菜样本的 ROI 近红外光谱图如图 1 所示。

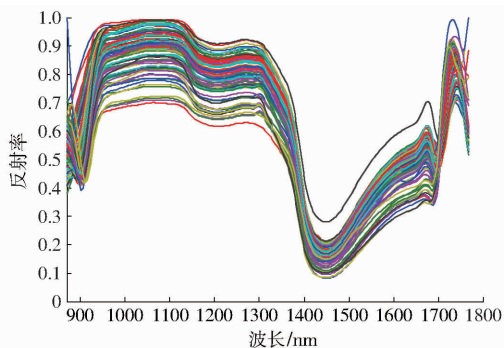


图 1 160 个生菜样本原始光谱

Fig. 1 Raw reflectance spectra of 160 lettuce leaves samples

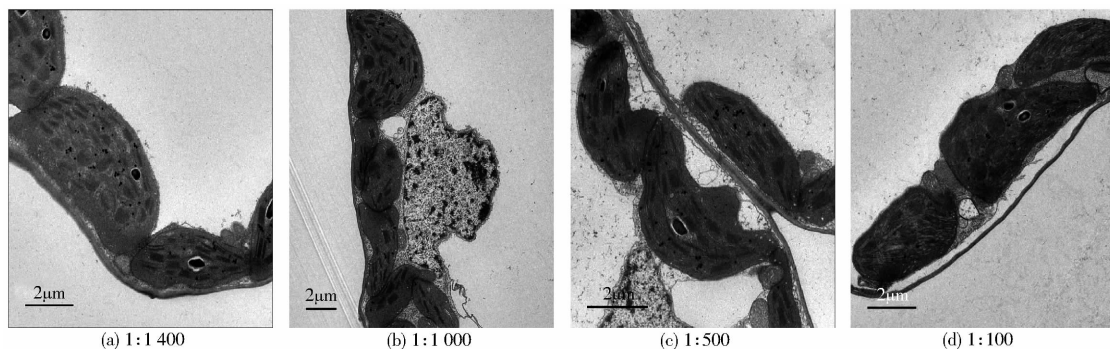


图 2 不同配比乐果农药残留下生菜叶片细胞结构

Fig. 2 Cell structures of lettuce leaves with different concentrations of dimethoate

叶片叶绿体形态及内部结构均未发生较大变化, 表明这些内部结构组织对乐果的侵害具有一定的抵抗力。随着喷洒的乐果农药浓度增加, 生菜叶绿体内的嗜银颗粒变化较为明显, 数量变多, 而淀粉颗粒变少。从图 2 可看出细胞断层纹路清晰, 呈矩形条状, 图 2a、2b 中细胞排列紧凑, 细胞间无缝隙。图 2c 中细胞间已经开始出现了间隙, 图 2d 中细胞间的间隙较为明显。在近红外波段的植被反射光谱主要受叶片细胞的排列结构方式和植被结构影响^[19], 不同配比乐果农药残留下生菜叶片内部组织形态产生了细微变化。为此, 不同配比农药残留的生菜近红外光谱具有一定的差异性。

2.2 高光谱特征提取

2.2.1 离散小波提取特征

采用离散小波变换对生菜样本进行特征提取, 即 N 取值为 1。特征提取波段如图 3 所示。其中, 奇异值特征差最大对应的最佳分解层为 5, 依据高

2.1 生菜农残检测机理

在做透射电镜试验之前, 先对叶片经过洗涤、固定、脱水、浸透、包埋、聚合和超薄切片等处理。洗涤、固定: 过 4 h 后, 用 pH 值为 7.0 的磷酸缓冲液冲洗 1 mm \times 2 mm 叶片 3 次, 1 次约为 20 min, 然后放入 2% 锇酸液中使其完全黑透。脱水、渗透、包埋、聚合: 磷酸缓冲液冲洗 3 次, 1 次约为 20 min, 用 4 个浓度 (质量分数为 30%、50%、70%、90%) 的丙酮按梯度逐步脱水, 随后用 100% 丙酮脱水 2 次, 1 次约 30 min, 然后用包埋剂逐步浸透、包埋, 并在恒温箱中进行 37℃—45℃—60℃ 加温静置 12 h 聚合。超薄切片、染色: 用 RMC 型超薄切片机切取 50 ~ 70 nm 厚度的叶片, 采用铀铅方法染色。最后, 1 mm \times 2 mm 生菜叶片表面微观结构进行透射电镜观察, 观察结构如图 2 所示。

生菜细胞主要包括叶绿体、嗜银颗粒、细胞壁等, 当乐果农药通过气孔进入生菜内部时, 对生菜细胞产生较大影响。喷洒不同配比乐果农药后, 生菜

频细节矩阵 $[X D_s]_N$ 奇异值提取的特征波长依次为 880.42、1 027.53、1 654.87、1 726.56 nm。

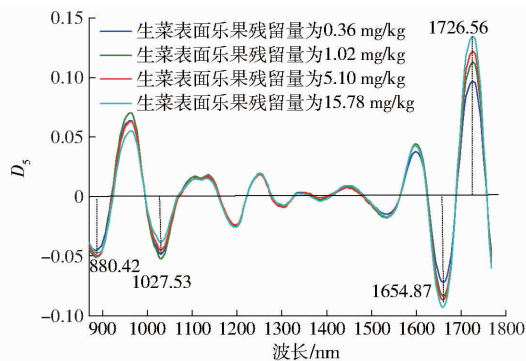


图 3 N 取值为 1 时小波变换提取得到的特征波长

Fig. 3 Characteristic wave bands obtained by wavelet transform when value of N was 1

2.2.2 分段离散小波提取特征

有机物在近红外谱区的吸收峰主要是含氨基团的各级倍频与合频的吸收峰, 表 1 中列出部分常见

基团的基频、倍频、合频吸收峰^[20]。从表 1 中可以得到 870 ~ 1 800 nm 范围内常见基团的中心近似位置主要包括 950、1 000、1 150、1 430、1 515、1 750 nm。

表 1 常见化学基团 C—H、N—H、O—H 倍频吸收峰中心近似位置

Tab. 1 Center of frequency band of absorption band of C—H, N—H and O—H nm

吸收峰类别		基团		
		C—H	N—H	O—H
基频	伸缩振动	3 300	2 940	2 740
	弯曲运动	6 900	6 250	7 700
合频		2 300	2 200	2 000
一级倍频		1 750	1 515	1 430
二级倍频		1 150	1 000	950

表 2 不同 N 取值下分段离散小波变换提取得到的特征波长

Tab. 2 Characteristic wave bands extracted by piece-wise discrete wavelet transform under different values of N

算法	N	提取波段数	契合度/%	每段最佳分解层	特征提取波长/nm
分段离散小波	2	6	66.75	5, 4	923.40, 1 004.40, 1 111.96, 1 633.16, 1 680.74, 1 738.33
	3	4	50.00	5, 7, 4	1 043.67, 1 344.99, 1 684.48, 1 722.67
	4	4	75.00	6, 5, 2, 2	906.42, 1 304.06, 1 392.04, 1 718.79
	5	5	50.00	7, 6, 6, 6, 4	1 068.70, 1 180.83, 1 490.64, 1 726.56, 1 758.25
	6	8	50.00	2, 3, 7, 3, 5, 5	893.50, 906.42, 914.95, 1 184.18, 1 316.69, 1 344.99, 1 647.59, 1 718.79

为了将常见基团主要中心近似位置有效的分布在每段中,本试验采用分段离散小波变换对生菜样本进行特征提取,其中 N 取值为 2、3、4、5、6。依次对 N 段光谱矩阵进行小波变换 7 层分解,以 sym5 小波为小波基函数。其中,不同的分段 N 对应的每段最佳分解层、特征提取波长、契合度(FD)如表 2 所示。从表 2 中可以看出,当 N 取值为 4 时,FD 取得最大值为 75.00%,其特征提取波长如图 4 所示。奇异值特征差最大对应的最佳分解层依次为 6、5、2、2。依据高频细节矩阵奇异值提取的每段特征波长依次为 906.42、1 304.06、1 392.04、1 718.79 nm。

2.3 基于特征提取的 SVM 建模

本试验采用 RBF 核函数,使用交叉验证方法寻

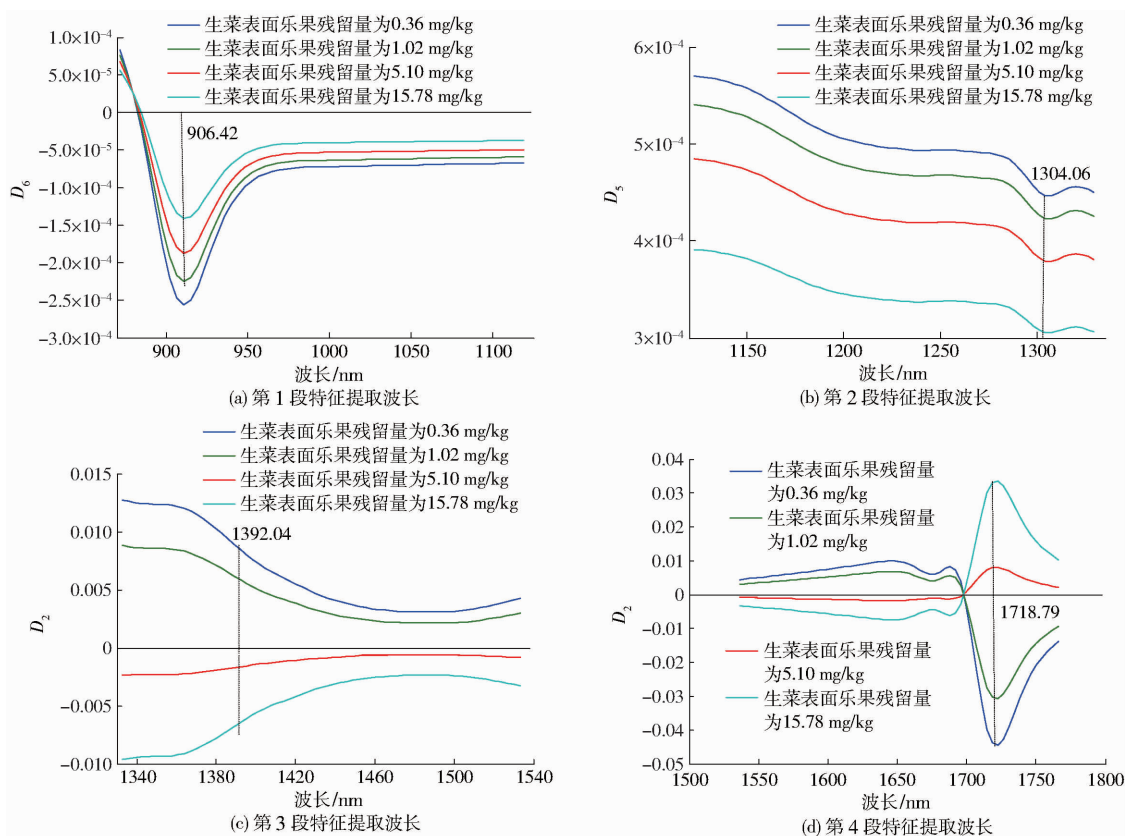


图 4 N 取值为 4 时小波变换提取得到的特征波长

Fig. 4 Characteristic wave bands obtained by wavelet transform when value of N was 4

找最优的参数 c (惩罚因子)和参数 g (RBF 核函数中的方差),利用最优参数建立分类模型。SVM 分

类器对依据选取的奇异值特征波段,提取近似值矩阵 $[X A_7]_N$ 中对应分解层的特征波长下漫反射率

进行分类。其中,样本总数为 160,采用随机挑选法选取 100 个样本作为校正集,28 个样本作为交叉验证集、剩余 32 个样本作为预测集。在 SVM 数据处理时,不同农药残留水平的生菜样本(重度超标、中度超标、轻微超标、低于国标)对应的类别标签为 1、2、3、4(而非化学检测喷洒 4 个农药浓度)。在对结合有机物近红外谱区倍频中心近似位置,分解层数 N 取值 1、2、3、4、5、6 时,得到契合度(FD)、校正集、交叉验证集和预测集合准确率如表 3 所示。由表 3

表 3 不同 N 取值下 DWT + SVM 分类模型的结果

Tab. 3 Classification results of DWT + SVM under different values of N

算法	N	契合度/%	校正集准确率/%	交叉验证集准确率/%	预测集准确率/%
离散小波变换(DWT)	1	50.00	65	53.57	46.88
	2	66.75	85	71.43	71.88
	3	50.00	57	53.57	50.00
分段离散小波变换(PDWT)	4	75.00	95	92.86	90.63
	5	50.00	60	57.14	56.25
	6	50.00	56	53.57	53.13

3 结束语

通过透射电镜观察不同农药残留浓度下生菜叶片内部微观结构变换,结果显示随着农药残留浓度的增加,生菜叶片内部嗜饿颗粒数量变多,而淀粉颗粒变少,细胞间隙逐渐变大。不同浓度农药残留的生菜叶片内部细胞的排列结构方式和组织结构存在差异,从而不同浓度农药残留下生菜叶片近红外光谱具有一定的差异性。此外,本文提出了一种基于小波变换的不同生菜农残光谱特征提取算法,即分段离散小波变换特征提取的方法。该方法利用离散

可知,契合度(FD)能初步估计、反映分段离散小波变换提取特征波段的有效性。PDWT + SVM 分类建模结果,能进一步表明分段离散小波变换提取特征波段的有效性。其中,分解层数 N 取值 4 时,其契合度最高为 75.00%,校正集、交叉验证集与预测集准确率分别为 95%、92.86% 和 90.63%。结合有机物近红外谱区倍频中心近似位置的分段离散小波变换特征提取方法,优于离散小波变换特征提取。

小波变换特征提取算法,结合近红外光区主要含氢原子团(C—H、N—H、O—H)伸缩振动的倍频及组合频中心谱区。通过对光谱分段小波变换不同层次的分解,有效地获取不同区域最佳特征波段。试验结果表明,PDWT 结合 FD 参数评估,与离散小波变换特征提取相比,对 4 类农药残留水平(重度超标、中度超标、轻微超标、低于国标)生菜样本光谱提取特征波段具有较高的可靠性。PDWT + SVM 算法采用分段数为 4 时,可以作为一种快速、准确、无损的新方法用于生菜农药残留检测。

参 考 文 献

- 孙俊,金夏明,毛罕平,等. 基于 Adaboost 及高光谱的生菜叶片氮素水平鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12):3372-3376.
- KALIRAMESH S, CHELLADURAI V, JAYAS D S, et al. Detection of infestation by *Callosobruchus maculatus* in mung bean using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Journal of Stored Products Research, 2012, 52: 107-111.
- GOUVINHAS I, DE A M, CARVALHO T, et al. Discrimination and characterisation of extra virgin olive oils from three cultivars in different maturation stages using Fourier transform infrared spectroscopy in tandem with chemometrics [J]. Food Chemistry, 2015, 174: 226-232.
- RANJAN R, CHOPRA U K, SAHOO R N, et al. Assessment of plant nitrogen stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through hyperspectral indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(20): 6342-6360.
- SRIVICHIAN S, TERDWONGWORAKUL A, TEERACHAICHAYUT S. Quantitative prediction of nitrate level in intact pineapple using Vis-NIRS[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 150: 29-34.
- BARBIN D F, EIMASRY G, SUN D W, et al. Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 719: 30-42.
- 孙俊,张梅霞,毛罕平,等. 基于高光谱图像的桑叶农药残留种类鉴别研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 251-256. SUN Jun, ZHANG Meixia, MAO Hanping, et al. Identification of pesticide residues on mulberry leaves based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 251-256. (in Chinese)
- 李颖,刘丙新,李宝玉,等. 基于小波变换的油膜光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1923-1927. LI Ying, LIU Bingxin, LI Baoyu, et al. Analysis of spectral characteristics of oil film on water based on wavelet transform spectral

- curve [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1923–1927. (in Chinese)
- 9 贾伟宽, 赵德安, 阮承治, 等. 苹果夜视图像小波变换与独立成分分析融合降噪方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 9–17.
JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. Combined method for night vision image denoising based on wavelet transform and ICA[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 9–17. (in Chinese)
- 10 SONG Dongmei, LIU Bin, CHEN Shouchang, et al. Classification of the different thickness of the oil film based on wavelet transform spectrum information[J]. *International Oil Spill Response Technical Seminar, Aquatic Procedia*, 2015, 3: 133–143.
- 11 CHEN Hui, LIN Zan, MO Lin, et al. Continuous wavelet transform-based feature selection applied to near-infrared spectral diagnosis of cancer[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, 151: 286–291.
- 12 ŁUKASZ J, JOZEF J. Early fault detection in gearboxes based on support vector machines and multilayer perceptron with a continuous wavelet transform[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 30: 636–641.
- 13 GB/T 20769—2008 水果和蔬菜中450中农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法[S]. 2008.
- 14 GB/T 2763—2014 食品安全国家标准-食品中农药最大残留限量[S]. 2014.
- 15 EHRENTREICH F. Wavelet transform applications in analytical chemistry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002, 372(1): 115–121.
- 16 ZHANG Chunlin, LI Bing, CHEN Binqiang, et al. Weak fault signature extraction of rotating machinery using flexible analytic wavelet transform[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 4(24): 162–187.
- 17 ROBOTHAM H, BOSCH P, GUTIERREZ-ESTRADA J C, et al. Acoustic identification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks [J]. *Fisheries Research*, 2010, 102(1–2): 115–122.
- 18 ASHOK M, MANOJ T, HARI O G. SVM based zonal setting of Mho relay for shunt compensated transmission line [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 78: 422–428.
- 19 孙金英, 曹宏鑫, 黄云. 油菜叶片气孔导度与冠层光谱植被指数的相关性[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1131–1138.
- 20 WORKMAN Jerry, WEYER Lois. 近红外光谱解析实用指南[M]. 褚小立, 许育鹏, 田高友, 译. 北京: 化学工业出版社, 2009: 31–35.

(上接第336页)

- 16 李虹, 唐秀美, 赵春江, 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 151–156.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 151–156. (in Chinese)
- 17 YU Q, YUE D P, WANG J P, et al. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns: a typical case study of ecological fragile zone located at Dengkou (Inner Mongolia) [J]. *Journal of Cleaner Production*, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.014.
- 18 何雪军, 王进, 陆国栋, 等. 基于约束 Delaunay 三角网的茶鲜叶几何参数识别[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 66–71.
HE Xuejun, WANG Jin, LU Guodong, et al. Geometric parameters recognition of fresh tea leaf based on constrained Delaunay triangulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 66–71. (in Chinese)
- 19 方伟, 宋鑫宏. 基于 Voronoi 图盲区的无线传感器网络覆盖控制部署策略[J]. *物理学报*, 2014, 63(22): 132–141.
FANG Wei, SONG Xinhong. A deployment strategy for coverage control in wireless sensor networks based on the blind-zone of Voronoi diagram[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(22): 132–141. (in Chinese)
- 20 ZHAO Q H, LI Y, HE X J, et al. Multi-look SAR image segmentation based on voronoi tessellation technique and EM/MPM algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 841–854.
- 21 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611–1618.
CHEN Xiaoping, CHEN Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake eco-economic zone [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611–1618. (in Chinese)
- 22 宋鑫宏, 方伟, 熊伟丽. 形心导向虚拟力的无线传感器网络部署算法[J]. *江南大学学报: 自然科学版*, 2015, 14(5): 549–555.
SONG Xinhong, FANG Wei, XIONG Weili. Centroid-based virtual force algorithm in wireless sensor networks [J]. *Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition*, 2015, 14(5): 549–555. (in Chinese)
- 23 叶玉瑶, 苏泳娟, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. *地理学报*, 2014, 69(4): 485–496.
YE Yuyao, SU Yongxian, ZHANG Hongou, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(4): 485–496. (in Chinese)