

小麦盐与物理损伤胁迫下果胶高光谱反演模型

朴兆佳, 于海业, 张郡赫, 周海根, 刘爽, 孔丽娟, 党敬民*

吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 小麦是我国的主要粮食作物,在国民经济发展中具有举足轻重的地位。然而,盐与物理损伤等非生物胁迫,逐渐成为制约小麦产量和品质的重要因素。研究表明,细胞壁是植物细胞直接抵御逆境胁迫的重要防线。盐胁迫下,细胞渗透压增大,质膜的透性会受到一定程度的影响。为了维持细胞的形态和结构,植物细胞壁中的果胶等多糖物质会发生不同程度的转化和改变。物理损伤,会加深植物细胞膜脂过氧化的程度,使膜通透性增大,导致营养物质的流失和降解。受到损伤的部位及其周边细胞还会发生栓化以阻塞病菌的侵入。构成植物细胞壁主要成分且能够反映细胞壁以及膜系统完整性和透过性的果胶,可以作为研究胁迫下植物内部物质响应规律的重要指标。目前,质量法、比色法、液相色谱法等常用的果胶检测方法操作繁琐、实时性不强且对样本损耗较大。亟需一种操作简便、检测速度快、无损的检测方法。将烟农0428小麦作为研究对象,采用水培方式,以向培养液中施加氯化钠(NaCl)溶液和对小麦第一片叶主脉两侧针刺分别模拟盐胁迫和昆虫叮咬造成的物理损伤,并完成小麦叶片果胶及高光谱信息的采集与处理。利用相关分析法筛选光谱敏感波段,将主成分回归(PCR)、偏最小二乘法(PLS)、逐步多元线性回归(SMLR)三种建模方法分别与多元散射校正(MSC)、标准正态变换(SNV)、一阶导数(FD)、卷积平滑(S-G)、Norris导数滤波(NDF)等预处理技术相结合,建立果胶含量反演模型。最终,选定PLS+SNV+FD+NDF方法建立的模型为最优模型,并对其性能进行了测试。结果表明:果胶含量的预测值与实测值一致性较高,拟合系数(R^2)和均方根误差(RMSE)分别为0.9976和0.35;预测值重复性较好,相对标准偏差(RSD)为1.2%。该研究以新方法实现小麦果胶的高精度、快速、无损检测,有助于小麦响应逆境胁迫机理的深入探索,并为大田作物胁迫程度预测及种植环境的精准管控提供参考。

关键词 小麦; 高光谱技术; 果胶; 盐胁迫; 物理损伤; 模型预测

中图分类号: S512 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)09-2935-06

引言

小麦是我国的主要粮食作物,其产量占粮食总产量的五分之一左右,在国民经济发展中具有举足轻重的地位^[1]。然而,随着全球气候变暖,海平面上升,耕地盐渍化问题日趋明显。我国耕地面积约3460万 hm^2 ,发生盐渍化的土壤近760万 hm^2 ^[2]。土壤的盐渍化,导致小麦产量明显降低。与此同时,小麦在生长期经常遭遇昆虫取食。全国农业技术推广服务中心制定的《2020年小麦玉米油菜重大病虫害防控技术方案》指出,我国小麦主要产区虫害发生达3.8亿亩次。昆虫通过对小麦叶片和茎秆等部位进行刺吸和咬食,极易造成物理损伤,进而影响小麦光合作用及营养的吸收和传

导^[3]。由此可见,盐和物理损伤胁迫已经对小麦健康生长和最终产量造成了严重的影响。研究表明,细胞壁是植物细胞直接抵御逆境胁迫的重要防线。盐胁迫下,细胞渗透压增大,质膜的透性会受到一定程度的影响。为了维持细胞的形态和结构,植物细胞壁中的果胶等多糖物质会发生不同程度的转化和改变^[4]。物理损伤,会加深植物细胞膜脂过氧化的程度,使膜通透性增大,导致营养物质的流失和降解。受到损伤的部位及其周边细胞还会发生栓化以阻塞病菌的侵入^[5]。在盐和物理损伤胁迫下,植物的细胞壁和膜系统都会做出相应的响应^[6]。因此,作为植物细胞壁主要成分且能够反映细胞壁以及膜系统的完整性和透过性^[7]的果胶,可以作为研究胁迫下植物内部物质响应规律的重要指标。

目前,检测果胶的常用方法有质量法、比色法、液相色谱

收稿日期: 2021-07-21, 修订日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801259)和国家重点研发计划项目课题(2016YFD0700101)资助

作者简介: 朴兆佳, 1996年生, 吉林大学生物与农业工程学院硕士研究生 e-mail: piaozj18@mails.jlu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: jmdang@jlu.edu.cn

谱法等^[8-10]。张方艳等利用质量法对猕猴桃所含果胶进行了测定。实验中,将氯化钡(BaCl₂)溶液和氯化钙(CaCl₂)溶液作为沉淀试剂加入到各自的目标汁液中。结果表明,通过前者提取的果胶含量比后者提取的高将近 1 个百分点,而且准确性更高^[8]。陶阿丽等采用比色法对豆腐柴叶内的果胶含量进行了研究。实验过程中,对浓硫酸用量、水解温度、咪唑无水乙醇溶液等测定条件进行了优化。此方法的相对标准偏差(RSD)为 1.529%^[9]。吴玉萍等基于液相色谱法分析了烟草中果胶的含量。方法是,先将烟草酸化处理产生半乳糖醛酸,然后测定半乳糖醛酸含量,最终换算成果胶含量。该方法的 RSD 优于 1.4%^[10]。上述果胶含量检测方法操作繁琐、实时性不强、对样本损耗较大,并且难以实现大面积作物果胶含量连续监测。亟需一种操作简便、速度快、无损的检测方法。高光谱技术以其检测速度快、无损、可重复操作等优点,广泛应用于作物生理信息的无损检测^[11-12]。本工作旨在通过高光谱技术,建立一种盐与物理损伤胁迫下小麦果胶含量反演的新方法,从而实现果胶含量的高精度、快速、无损检测。

1 实验部分

1.1 实验环境及设置

实验于吉林大学生物与农业工程学院日光温室内进行。温室配有完善的通风、补光、控温、加湿等装置,能够有效调节小麦生长所需的环境。

将烟农 0428 小麦作为研究对象。先将小麦种子置于 25 °C 恒温培养箱中催芽,一周后选取长势一致的幼苗移栽到定时增氧型水培箱中。培养液选用霍格兰(Hoagland's)标准营养液,水培箱内保持每日增氧时长 8 h 以上。用 TDS&EC 测试仪监测营养液浓度及 pH 值,并对水培环境及时做出调整。

1.2 胁迫实验设计

通过向培养液中施加氯化钠(NaCl)溶液和对小麦第一片叶主脉两侧针刺分别模拟盐胁迫和昆虫叮咬造成的物理损伤。盐胁迫和物理损伤胁迫程度分别由 NaCl 溶液的浓度以及针刺孔数控制。共选取 120 株小麦,分别按单因素胁迫和复合胁迫分组,并设置了对照组(CK)。施加胁迫水平及分组如表 1 所示。

1.3 信息采集与处理

使用美国 Analytical Spectral Devices 公司的 HH2 型地物光谱仪对小麦叶片样本进行测量,并采集高光谱数据。测量点分别位于每株小麦叶片样本的上、中、下部,每点重复测量 10 次取平均值。将叶片样本采集并充分匀浆,加入提取液混合后置于 90 °C 恒温水浴锅中浸提 30 min。取出后冷却,于 5 000 r、25 °C 离心 10 min,除上清液。重复离心后加入 1 mL 提取液,置于 90 °C 恒温水浴锅中水解 1 h。取出冷却后,于 8 000 r、25 °C 离心 15 min,取上清液。分光光度计调至 530 nm,用蒸馏水调零。最后,使用南京建成生物工程研究所研制的试剂盒测定果胶含量。小麦叶片果胶及高光谱数据的处理利用 Origin2018, SPSS. 26, Matlab R2018a,

ViewSpecPro, AvaSoft7. 2, TQ Analyst 等软件。

表 1 盐及物理损伤胁迫实验设计
Table 1 Experimental design of salt and physical damage stresses

分组	盐胁迫	物理损伤	
A1	50 mmol · L ⁻¹ NaCl	—	
A2	100 mmol · L ⁻¹ NaCl	—	
A3	150 mmol · L ⁻¹ NaCl	—	
单因素 胁迫 实验	S1	—	
	S2	—	
	CK	—	
A1S1	50 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 10 孔	
A1S2	50 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 30 孔	
复合 胁迫 实验	A2S1	100 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 10 孔
	A2S2	100 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 30 孔
	A3S1	150 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 10 孔
A3S2	150 mmol · L ⁻¹ NaCl	针刺 30 孔	
CK	—	—	

2 结果与讨论

2.1 不同胁迫条件下小麦叶片果胶含量和高光谱特征

2.1.1 叶片果胶含量

依据设计的方案进行了为期一周的胁迫实验,单因素和复合因素胁迫下小麦叶片果胶含量的变化情况如图 1 所示。其中,A1S1 和 A1S2 组果胶含量均呈现出先下降后上升的趋势。胁迫初期,由于细胞基质多糖间相互作用增强,机体通过增加纤维素含量而降低果胶含量来抵御逆境伤害^[13],小麦叶片细胞壁中层和初生壁中果胶含量均下降。随后,含有抗逆基因的调控蛋白和扩展蛋白发挥作用,通过增加果胶含量来加强细胞间的结合。在 A3S1 和 A3S2 组中,叶片细胞形态遭到严重破坏,果胶甲酯酶活性降低,细胞壁严重甲酯化,离子进入细胞内使大量细胞死亡^[14],最终导致果胶含量迅速下降。图 2 为不同胁迫因素对应的小麦果胶含量七天的平均值。从图中可以看出,经过胁迫处理组小麦叶片的果胶含量均值明显低于对照组,而且果胶含量均值与胁迫程度呈负相关。此外,经差异性分析后可知,A1, A3, S2, A2S1, A2S2, A3S1, A3S2 与 CK 差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 高光谱特征

利用光谱仪获取了不同胁迫条件下,325~1 075 nm 波段范围内小麦叶片的高光谱特征。光谱始末两端冗余噪声较多、光谱信息波动较大,而 500~800 nm 波段内噪声低、光谱信息稳定,且在 750~800 nm 波段形成反射平台,故选取 500~800 nm 波段作为研究对象。在 500~800 nm 波段内,单因素和复合因素胁迫条件下小麦叶片反射光谱如图 3(a)和(b)所示。从图中可以看出,不同胁迫条件下,波峰(550 nm)和反射平台(750~800 nm)处的光谱特征(反射率)均呈现出明显差异,并表现出一定的规律。其中,在单因素胁迫条件下,550 nm 波峰处,A1 组和 S1 组表现出较高的反射率

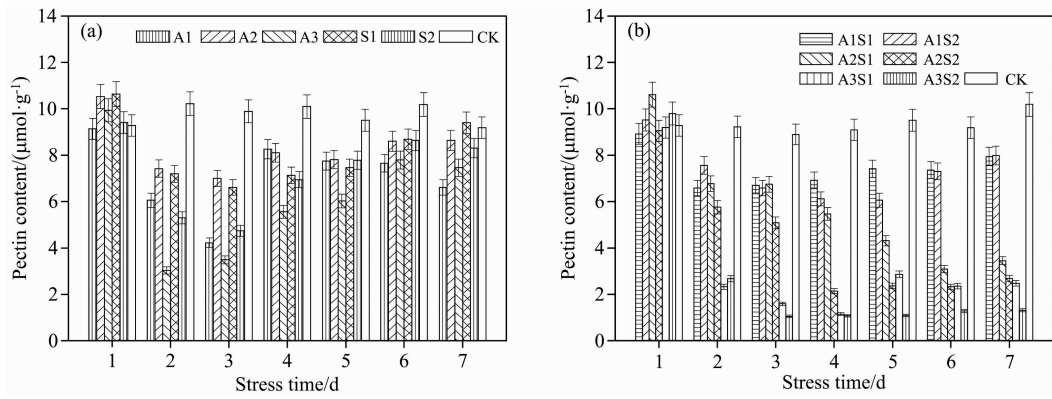


图 1 一周内不同胁迫因素下小麦叶片果胶含量变化

(a): 单胁迫因素下果胶含量变化; (b): 复合胁迫因素下果胶含量变化

Fig. 1 Changes of pectin content in wheat leaves under different stress factors in the first week

(a): Under single stress factor; (b): Under multiple stress factors

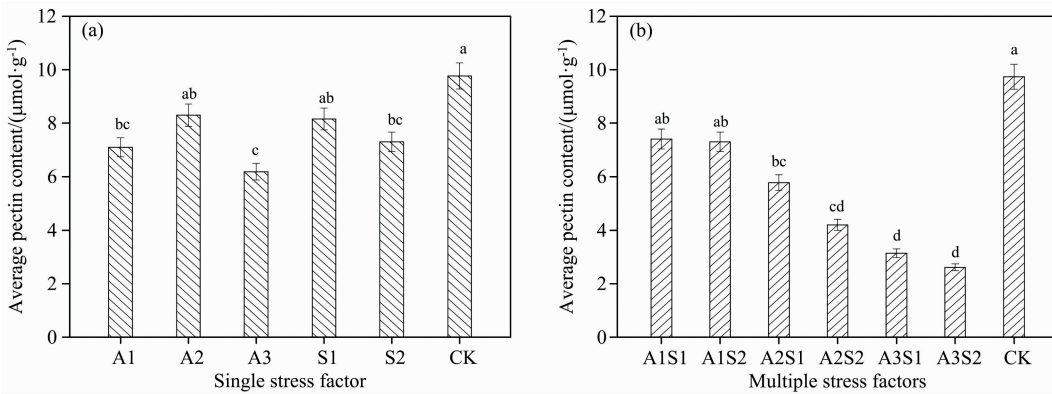


图 2 不同胁迫因素对应的小麦叶片果胶含量七天的平均值

不同小写字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平上差异显著

(a): 单胁迫因素对应的果胶含量均值; (b): 复合胁迫因素对应的果胶含量均值

Fig. 2 Average pectin contents in wheat leaves corresponding to different stress factors in the first week

Different lowercase letters indicate the significant difference between different treatments at $p < 0.05$

(a): Single stress factor; (b): Multiple stress factors

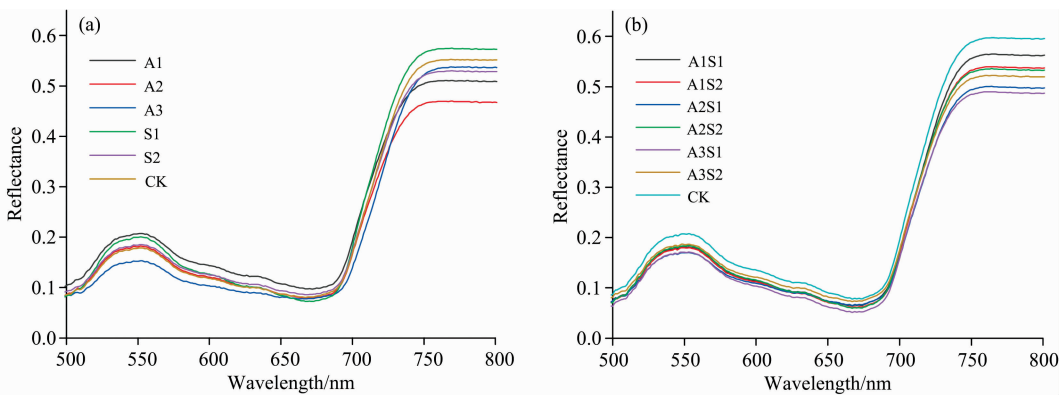


图 3 不同胁迫因素下小麦叶片的高光谱特征

(a): 单胁迫因素下的高光谱特征; (b): 复合胁迫因素下的高光谱特征

Fig. 3 Hyperspectral characteristics of wheat leaves under different stress factors

(a): Under single stress factor; (b): Under multiple stress factors

水平, A2 组、S2 组与 CK 组的反射率水平居中, A3 组的反射率最低。在复合胁迫条件下, 750~800 nm 反射平台内, 当物理损伤处于 S1 水平时, 反射率表现出的变化为 $A1S1 > A2S1 > A3S1$ 。当物理损伤处于 S2 水平时, 反射率的变化为 $A1S2 > A2S2 > A3S2$ 。即物理损伤水平一定时, 反射率与盐胁迫程度呈负相关。因此, 高光谱曲线特征可以在一定程度上反映小麦受胁迫程度, 但难以表征果胶含量的变化规律, 因此需要建立高光谱特征与果胶含量之间的联系。

2.2 基于高光谱技术的果胶含量预测

2.2.1 特征波段提取

利用相关系数法对不同胁迫条件下测得的高光谱数据与小麦叶片果胶含量进行相关性分析, 二者的相关系数随波长的变化关系如图 4(a) 所示。从图中可知, 光谱数据在特定波段与果胶含量具有较好的相关性。选取相关系数大于 0.32 的部分, 即 702~728 nm 波段为原始光谱特征波段, 记为 $W_{702\sim728}$ 。与此同时, 对一阶导数光谱与叶片果胶含量进行了相关性分析, 如图 4(b) 所示。选取相关系数大于 0.45 的部分, 即 690~700 nm 波段为一阶导数光谱的特征波段, 记为 $W_{690\sim700}$ 。

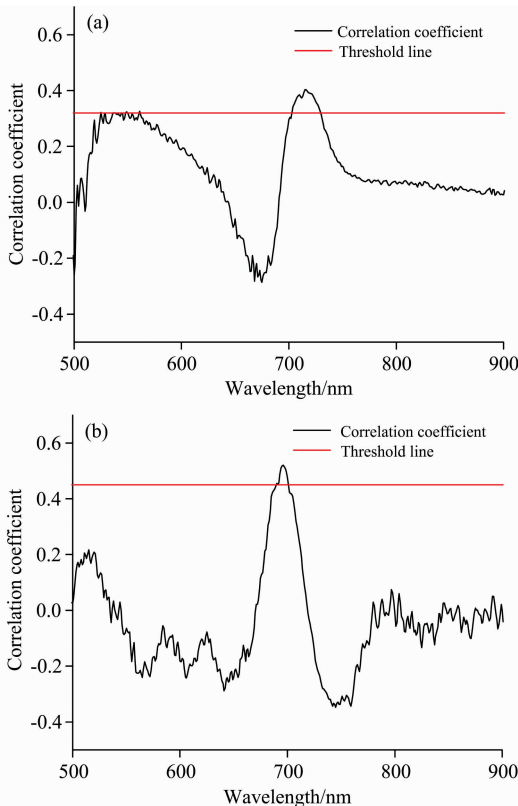


图 4 相关系数法提取特征波长

- (a): 原始光谱与小麦叶片果胶含量的相关性;
(b): 一阶导数光谱与小麦叶片果胶含量的相关性

Fig. 4 Characteristic wavelength extraction by correlation coefficient method

(a): Correlation between original spectra and pectin content in wheat leaves; (b): Correlation between first-derivative spectra and pectin content in wheat leaves

2.2.2 果胶含量预测模型

共采集小麦叶片样本 145 个, 剔除 25 个异常样本后按 1:3 合理划分, 分别为训练集样本 90 个, 验证集样本 30 个。以光谱敏感波段作为模型输入量, 选取主成分回归(PCR)、偏最小二乘法(PLS)、逐步多元线性回归(SMLR)三种建模方法, 并将其与多元散射校正(MSC)、标准正态变换(SNV)、一阶导数(FD)、卷积平滑(S-G)、Norris 导数滤波(NDF)^[15]等五种预处理技术相结合, 共建立 27 种预测模型, 如表 2 所示。

表 2 不同建模方法及预处理技术得到的预测模型

Table 2 Prediction models obtained by different modeling methods and preprocessing techniques

建模对象	建模方法	预处理方法	R_c	R_p
果胶含量	PCR	MSC+SG($W_{702\sim728}$)	0.902 4	0.880 1
		SNV+SG($W_{702\sim728}$)	0.917 6	0.908 7
		MSC+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.906 6	0.877 8
		MSC+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.941 1	0.950 6
		SNV+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.927 4	0.920 4
		SNV+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.936 0	0.943 8
		FD($W_{690\sim700}$)	0.851 5	0.860 6
		$W_{702\sim728}$	0.872 5	0.854 8
		无	0.862 4	0.821 1
		果胶含量	PLS	MSC+SG($W_{702\sim728}$)
SNV+SG($W_{702\sim728}$)	0.912 1			0.906 4
MSC+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.961 2			0.938 2
MSC+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.948 8			0.896 7
SNV+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.952 0			0.930 4
SNV+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.978 2			0.981 4
FD($W_{690\sim700}$)	0.917 4			0.905 8
$W_{702\sim728}$	0.887 6			0.893 4
无	0.876 8			0.889 2
果胶含量	SMLR			MSC+SG($W_{702\sim728}$)
		SNV+SG($W_{702\sim728}$)	0.874 8	0.890 2
		MSC+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.900 3	0.899 6
		MSC+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.871 4	0.902 8
		SNV+FD+SG($W_{690\sim700}$)	0.802 8	0.788 6
		SNV+FD+NDF($W_{690\sim700}$)	0.791 0	0.768 4
		FD($W_{690\sim700}$)	0.785 5	0.817 3
		$W_{702\sim728}$	0.814 0	0.828 0
无	0.779 1	0.773 6		

表 2 中, R_c 和 R_p 分别为评价模型质量的训练集相关系数和验证集相关系数。对比各模型的参数可知, 基于 PLS+SNV+FD+NDF 方法所建的模型为最优模型, R_c 和 R_p 值分别达到了 0.978 2 和 0.981 4。

2.2.3 最优模型性能分析

图 5(a) 为不同胁迫条件下, 最优模型的果胶预测含量与试剂盒测得的果胶含量之间的关系。果胶含量的预测值与实测值一致性较高(拟合系数 $R^2 = 0.997 6$), 均方根误差(RMSE)为 0.35, 表明所建模型具有良好的线性预测性能。为了评估上述最优模型的精密性, 对 A1S2 胁迫条件下、同一小麦叶片样本进行了多次高光谱测量。图 5(b) 为 20 次测

量的模型预测结果。从图中可以看出, 预测结果重复性较好, RSD为1.2%(预测均值 $V_M=9.56 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 说明该

模型具有较高的精度。

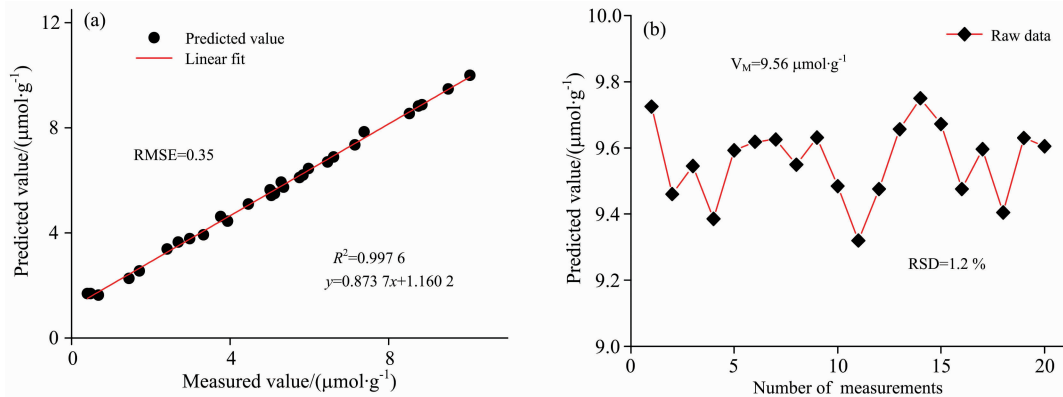


图5 (a) 最优模型的果胶预测含量与试剂盒测得的果胶含量之间的关系; (b) 果胶预测模型的精密度评估

Fig. 5 (a) The relationship between the pectin content predicted by the optimal model and the pectin content measured by the kit; (b) Precision evaluation of the proposed pectin prediction model

3 结论

建立了基于高光谱技术的小麦盐及物理损伤胁迫下果胶反演模型。分析了单因素和复合因素胁迫下小麦叶片果胶含量以及对应高光谱特征的变化规律。针对果胶和高光谱数据, 首先采用相关系数法筛选特征波段, 然后分别将 PCR, PLS 和 SMLR 三种建模方法与 MSC, SNV, FD, S-G 和 NDF 五种预处理技术相结合, 最后得出基于 PLS+SNV+FD+NDF 方法所建的模型为最优模型。该最优模型的 R_p 和

R_p 值分别达到 0.978 2 和 0.981 4。不同胁迫条件下的模型预测实验可知, 果胶含量的预测值与实测值一致性较高(拟合系数 $R^2=0.9976$), 均方根误差(RMSE)为 0.35, 表明所建模型具有良好的线性预测性能。模型精密度实验可得, 预测结果重复性较好, RSD 为 1.2%(预测均值 $V_M=9.56 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 说明该模型具有较高的精度。与质量法、比色法、液相色谱法等传统果胶检测方法相比, 基于高光谱技术的反演模型方法实现了盐及物理损伤胁迫下果胶的高精度、快速、无损检测, 可用于作物响应逆境胁迫机理的研究, 并为大田作物胁迫预警及种植环境的精准管控提供科学参考。

References

- [1] YE Zhi-biao, LI Wen-juan(叶志标, 李文娟). Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning(中国农业资源与区划), 2019, 40(3): 158.
- [2] YANG Jin-song(杨劲松). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2008, 45(5): 837.
- [3] GAO Jia-min, GAO Su-hong, GAO Bao-jia(高佳敏, 高素红, 高宝嘉). Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica(西北农业学报), 2019, 28(9): 1543.
- [4] ZHU Yu-peng, MENG Xiang-hao, GAI Wei-ling, et al(朱玉鹏, 孟祥浩, 盖伟玲, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2017, 33(19): 1.
- [5] Bychkov A L, Podgorbunskikh E M, Ryabchikova E I, et al. Cellulose, 2017, 25(1): 1.
- [6] Rajendran S K, Lin I W, Chen M J, et al. BMC Plant Biology, 2014, 14(1): 112.
- [7] WANG Xue-hua, DAI Li(王学华, 戴力). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2016, 49(22): 4323.
- [8] ZHANG Fang-yan, PU Biao, CHEN An-jun(张方艳, 蒲彪, 陈安均). Food Science and Technology(食品科技), 2013, 38(12): 280.
- [9] TAO A-li, ZHANG Guo-sheng(陶阿丽, 张国升). Journal of Chifeng University • Natural Science Edition(赤峰学院学报 • 自然科学版), 2012, 28(11): 108.
- [10] WU Yu-ping, YANG Guang-yu, WANG Dong-dan(吴玉萍, 杨光宇, 王东丹). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2004, 21(1): 183.
- [11] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHANG Li-fu(童庆禧, 张兵, 张立福). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2016, 20(5): 689.
- [12] PENG Yao-qi, XIAO Ying-xin, LI Xin-xing, et al(彭要奇, 肖颖欣, 李鑫星, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(5): 1356.
- [13] XIAO Jing-lin, QIN Mei, LI Xiao-feng, et al(肖京林, 覃美, 黎晓峰, 等). Guangdong Agricultural Sciences(广东农业科学), 2020, 47(9): 73.
- [14] Endler A, Kesten C, Schneider R, et al. Cell, 2015, 162(6): 1353.

[15] Li W, Qu H. Journal of Pharmaceutical & Biomedical Analysis, 2010, 52(4): 425.

Hyperspectral Inversion Model of Pectin Content in Wheat Under Salt and Physical Damage Stresses

PIAO Zhao-jia, YU Hai-ye, ZHANG Jun-he, ZHOU Hai-gen, LIU Shuang, KONG Li-juan, DANG Jing-min*
College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

Abstract Wheat is the primary grain crop in our country and plays a pivotal role in developing the national economy. However, abiotic stress factors such as salt and physical damage have gradually become essential factors restricting wheat yield and quality. Studies have shown that the cell wall is an important line of defence for plant cells to resist adversity and stress directly. Under salt stress, cell osmotic pressure increases, and the permeability of the plasma membrane will be affected to a certain extent. In order to maintain cell morphology and structure, pectin and other polysaccharides in plant cell walls will be transformed and changed to varying degrees. Physical damage will deepen the degree of lipid peroxidation of plant cell membranes, increase membrane permeability, and lead to the loss and degradation of nutrients. The damaged site and its surrounding cells will also be embolized to block the invasion of bacteria. Pectin, which is the main component of cell wall and can reflect the integrity and permeability of the plant cell wall and membrane system, can be used as an important factor in studying the response mechanism of plant internal substances under stress. At present, commonly used pectin detection methods such as Gravimetric Colorimetric, Liquid chromatography, etc. are cumbersome to operate, not real-time, and large sample consume. There is an urgent need for a simple, fast and non-destructive detection method. This paper used hydroponics to research the wheat (Yannong 0428). The sodium chloride (NaCl) solution was applied to culture medium, and acupuncture was carried out on both sides of the main vein of the first leaf of wheat to simulate the salt damage and the physical damage caused by insect bites, respectively. The pectin and its hyperspectral information of wheat leaf were also collected and processed. The correlation analysis method was used to screen the sensitive spectral band. The three modeling methods of principal component regression (PCR), partial least squares (PLS), and stepwise multiple linear regression (SMLR) were combined with multiple scattering correction processing (MSC), standard normal transformation processing (SNV), first derivative processing (FD), convolution smoothing (SG), and Norris derivative filter processing (NDF) to establish a pectin content inversion model. Finally, the model established by PLS+SNV+FD+NDF method was selected as the optimal model, and its performance was also tested. The results showed that the predicted value of pectin content was consistent with the measured value, and the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) were determined to be 0.997 6 and 0.35, respectively. The repeatability of the predicted value was good, and the relative standard deviation (RSD) was 1.2%. This study uses a new method to realize the high-precision, fast and non-destructive detection of wheat pectin, which is helpful to the in-depth study of the mechanism of the wheat response to stress and provides a reference for the prediction of the stress degree of field crops and the accurate control of planting environment.

Keywords Wheat; Hyperspectral technique; Pectin; Salt stress; Physical damage; Model prediction

(Received Jul. 21, 2021; accepted Oct. 21, 2021)

* Corresponding author