

刘志刚, 徐勤超. 基质破碎度对光谱法检测基质含水率的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1051-1055.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.05.014

基质破碎度对光谱法检测基质含水率的影响

刘志刚¹, 徐勤超²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 华中农业大学工学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为实时、快速、精准地检测基质含水率变化, 利用高光谱检测技术, 采用偏最小二乘回归法(PLSR), 分析 5 种稻壳基质的反射光谱特征及其与基质含水率、基质破碎度间的关系, 建立了基于高光谱检测技术的基质含水率快速预测模型, 探索并分析了基质破碎度对模型预测能力的影响。结果表明, 高光谱技术可以作为稻壳基质含水率的一种快速检测方法, 基质光谱反射率随基质破碎度增大而增大, 随基质含水率增大而减小; 一阶微分处理(R')模型为基质含水率预测最优模型, 对基质 T_2 和 T_3 的含水率预测精度最高, 模型外部验证 $R^2_{val} \geq 0.88$, $RPD \geq 3.06$, 对基质 T_1 含水率预测效果最差, 模型外部验证 R^2_{val} 为 0.60, RPD 为 1.67。基质破碎度介于 25% 至 75% 时, 破碎度对基质含水率与 R' 相关性的影响不明显。

关键词: 基质; 破碎度; 含水率; 高光谱; 预测模型

中图分类号: S38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)05-1051-05

Influences of substrate fragmentation degree on substrate water contents detected by hyper-spectral technology

LIU Zhi-gang¹, XU Qin-chao²

(1. School of the Environment and Safety, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to accurately and quickly monitor substrate water content, hyper-spectral technology was employed to detect the spectral reflectance characteristics of five rice husk substrates, and partial-least square regression was applied for the analysis between the reflectance characteristics and substrate water content and substrate fragmentation degree. As a result, a model for the quick prediction of substrate water content was set up, and the influence of substrate fragmentation degree on the precision of model was analyzed. The results showed that the increase of substrate reflectance was accompanied by the increase of fragmentation degree and the decrease of substrate water content. The first derivatives of reflectance(R') is the best model for the prediction of substrate water content, showing the highest presions for substrates T_2 and T_3 , and the lowest for T_1 . The model presented the best precision in prediction of the water content in substrates fragmented by 25% to 75%.

Key words: substrate; fragmentation degree; water content; hyper-spectral; prediction model

收稿日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509098); 中央高校基本科研业务费专项(2662015BQ051)

作者简介: 刘志刚(1985-), 男, 吉林磐石人, 博士, 讲师, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。(Email) liuzg@mail.hzau.edu.cn

通讯作者: 徐勤超, (Email) hlxcq@mail.hzau.edu.cn

有机废弃物经发酵等工艺处理后用于园艺作物栽培的基质, 具有避免连作障碍, 减少环境污染等优点, 且能充分利用非耕地, 近年来在农业生产中发展较快^[1-7]。基质含水率是基质栽培管理中必须掌握的重要信息, 但目前快速检测基质含水率的方法较少, 限制了基质栽培的大面积推广和应用。

传统的水分测定方法费时、耗力,难以满足需要。国内外学者已开始利用介电传感器法和可见/近红外光谱技术等进行基质含水率快速检测研究^[8-13],介电传感器法易受检测环境因素(如:基质温度、容重、电导率)影响^[14-16],可见/近红外光谱技术易受背景和天气因素等的影响,造成采集的数据可靠性降低^[17]。高光谱技术兼具光谱分析和图像处理的优点,光谱分辨率较高,可以克服外在表现特征和光谱特征融合的不足,已用于土壤水分含量的快速检测^[18-19],但鲜有利用高光谱技术进行基质含水率检测的相关报道,尤其缺少有关基质破碎度对高光谱检测基质含水率影响的相关研究。

中国是水稻种植大国,稻壳资源丰富,发酵后的稻壳理化性质稳定、成本低,不污染环境,现已研发为育苗基质和栽培基质,且已推广应用。经取样观察发现,稻壳基质在长期连续栽培利用中会发生破碎现象,且破碎程度不均匀,部分基质已成粉末,但有部分基质还未破碎,基质物理特性改变较大,进而影响高光谱技术检测基质含水率的精度。因此,为满足实际栽培生产对基质含水率的精准检测需求,本研究以 5 种不同破碎度的稻壳基质为研究对象,通过高光谱仪获取光谱信息,并充分考虑基质破碎度的影响,建立基于数据变换和最小二乘回归分析法(PLSR)的基质含水率高光谱监测模型,旨在为提高高光谱快速精准检测基质含水率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料包括颗粒稻壳基质、粉碎稻壳基质,以

表 1 基质含水率描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of substrate water content

处理	样本总数 (个)	建模样本数 (个)	外部样本数 (个)	最大值 (%)	最小值 (%)	平均值 (%)
T ₁	60	40	20	15.79	4.89	9.98
T ₂	60	40	20	26.31	7.14	16.92
T ₃	60	40	20	50.75	7.52	22.02
T ₄	60	40	20	61.28	7.77	27.20
T ₅	60	40	20	53.76	7.14	23.51

T₁:颗粒稻壳基质;T₂:颗粒稻壳基质:粉碎稻壳基质=3:1;T₃:颗粒稻壳基质:粉碎稻壳基质=1:1;T₄:颗粒稻壳基质:粉碎稻壳基质=1:3;T₅:粉碎稻壳基质。

1.3 光谱数据处理与模型建立

试验采用 ENVI 4.7 和 Matlab R2010a 处理数

据,使用 The Unscrambler X 软件对数据进行基线校正和平滑处理,并对平滑后的光谱反射率数据(R)

1.2 试验方法

1.2.1 仪器设备 采用 Headwall Photonics 公司生产的 Hypersper Vnir n-series 型可见光-近红外高光谱成像光谱仪测定基质反射率,该仪器主要包括可见光-近红外高光谱相机、卤素光源、平移台和计算机,仪器光谱范围 400~1 000 nm,光谱分辨率为 3.2 nm。

1.2.2 基质反射光谱测量 测量开始前,均匀混合待测基质样品,将基质装入半径 5.0 cm,深 1.5 cm 的金属盒内,并置于平移台上,待测基质随平台移动的同时高光谱相机采集样品高光谱图像,并上传计算机储存,整个光谱系统由计算机控制运行。获得的光谱数据经暗电流和白板校正,以消除暗电流和不均匀光照引起的误差。

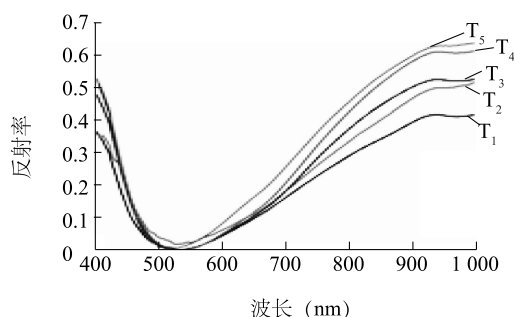
1.2.3 基质样本含水率测定 采用烘干称质量法获得待测基质样品含水率,并以体积含水率表示。通过异常样本检测,剔除异常值,确定总样品集 300 个(包含 100 个预测样品集),基质样本含水率描述性统计见表 1。

进行一阶微分处理(R')和对数处理($\lg R$),建立基于偏最小二乘回归(PLSR)法的基质含水率预测模型,以建模数据集决定系数(R_{cal}^2)、标准误差($RMSEE$),内部交叉验证决定系数(R_{cv}^2)和标准误差($RMSECV$),外部检验数据集决定系数(R_{val}^2)和标准误差($RMSEP$),以及测定值标准偏差与标准预测误差的比值(RPD)为模型精度评价参数,当 $RPD \leq 1.4$ 时,认为该模型不可靠,当 $1.4 < RPD < 2.0$ 时,认为模型较可靠,但可以进一步提高,当 $RPD \geq 2.0$ 时,说明该模型适合于利用高光谱数据来估算稻壳基质含水率^[20-21]。

2 结果与分析

2.1 基质破碎度对基质反射光谱特征的影响

从图1中可以看出,5种基质相同含水率,不同破碎度基质样品的反射光谱曲线变化趋势大致相同,但随着基质的破碎度增大,基质粗糙度变小,孔隙度降低,基质的光谱反射率在波长570~990 nm表现为 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$ 。在波长400~500 nm,5种基质光谱反射率随波长增加呈急剧下降趋势,波长500~570 nm基质反射光谱曲线较为平滑,在波长570~700 nm基质反射光谱曲线随波长增加呈单调缓慢上升趋势,至700~900 nm急剧上升,在波长900~990 nm基质反射光谱曲线变得趋于平缓。但在波长700~990 nm,相同含水率基质样品反射率存在明显差异,反射率随基质破碎度的增大而增大。



T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 见表1注。

图1 相同含水率不同破碎度基质高光谱反射率

Fig.1 Reflectance of differently-fragmented substrates

2.2 基质含水率对基质反射光谱特征的影响

图2显示了不同基质含水率情况下基质的光谱反射率曲线(以基质 T_3 为例说明,其余4种基质的光谱反射率曲线变化趋势与 T_3 基本一致)。在波长

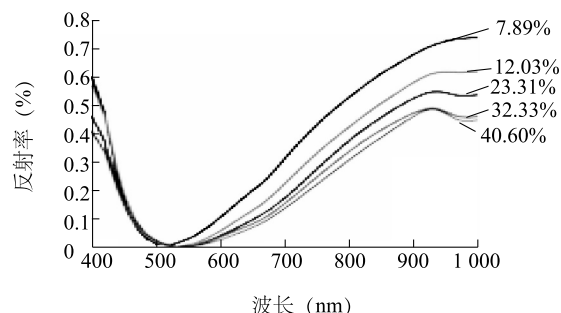


图2 不同含水率 T_3 基质(颗粒稻壳基质:粉碎稻壳基质=1:

1)高光谱反射率

Fig.2 Reflectance of substrate T_3 with different water contents (50% fragmentation)

400~500 nm,5种基质光谱反射率随波长和基质含水率增加呈急剧下降趋势,在波长500~570 nm基质反射光谱曲线较为平滑,在波长570~700 nm基质反射光谱曲线随波长增加呈单调缓慢上升趋势,至波长700~900 nm基质反射光谱曲线急剧上升,在波长900~990 nm,表现出光谱吸收特性。但在700~990 nm,在相同波长情况下,当基质含水率从7.89%增加至32.33%时,稻壳基质光谱反射率随基质含水率增大而急剧减小,而当基质含水率从32.33%增加至40.60%时,稻壳基质光谱反射率下降幅度较小,说明稻壳基质含水率低于32.33%时,基质含水率对基质光谱反射率有着十分显著的影响。这是因为随基质含水率增加,附着于基质表面的水分增加,对入射光的吸收性能增强,降低了基质光谱反射率。

2.3 基质含水率模型建立与预测分析

采用偏最小二乘回归法(PLSR)分析5种稻壳基质的光谱反射数值及其数学变换形式(表2)。由表2可以看出,除基质 T_1 外,平滑处理(R),一阶微分处理(R')和对数处理($\lg R$)等3种数据变换形式的模型预测精度均较好,但略有差异,建模集的 R_{cal}^2 为0.85~0.98,交叉验证的 R_{cv}^2 为0.77~0.89,模型外部验证 R_{val}^2 为0.74~0.92, $RMSEP$ 为1.99%~7.27%, RPD 为1.83~4.02。3种数据变换形式的模型对基质 T_1 的含水率预测效果均不理想,这是由于颗粒稻壳基质表面粗糙度大,孔隙度大,粒间空隙大,持水能力差,稻壳颗粒之间以及颗粒表层和内部水分分布具有显著差异,且基质颗粒形状和排列引起光散射和光程改变。比较5种稻壳基质含水率预

测模型,综合所有评价指标来看,一阶微分处理(R')数据变换形式下,5种稻壳基质的 R^2_{val} 为0.60~0.90, $RMSEP$ 为1.54%~5.84%,基质的 RPD 为1.67~3.93,其中基质 T_1 的 R^2_{val} 为0.60, RPD 为

1.67, $RMSEP$ 为1.54%,在3种数据变换方式中均最小,其余基质的 $R^2_{\text{val}} > 0.84$, $RPD > 2$,说明一阶微分处理(R')模型预测精度最优。

表2 基质含水率PLSR模型

Table 2 PLSR model for substrate water content prediction

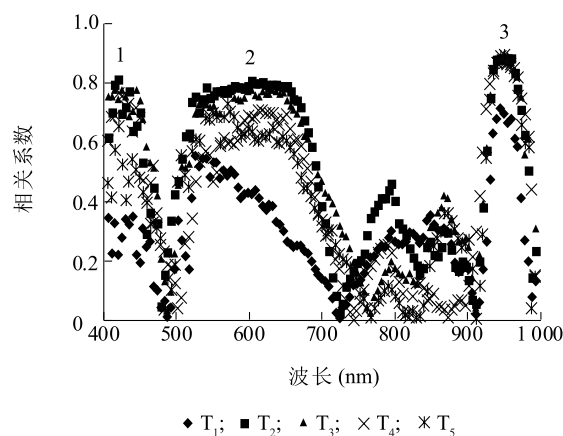
数据变换	基质	PLSR 因子数	模型建立		交叉验证		外部检验		RPD
			R^2_{cal}	$RMSEE$ (%)	R^2_{cv}	$RMSECV$ (%)	R^2_{val}	$RMSEP$ (%)	
R	T_1	4	0.62	1.61	0.53	1.83	0.50	1.58	1.63
	T_2	8	0.95	2.79	0.89	4.13	0.90	2.14	2.84
	T_3	5	0.92	3.41	0.87	4.36	0.92	2.72	4.02
	T_4	6	0.92	3.52	0.86	4.96	0.82	5.98	2.22
	T_5	6	0.86	2.29	0.77	2.97	0.88	3.22	3.78
R'	T_1	15	0.91	0.45	0.67	1.52	0.60	1.54	1.67
	T_2	5	0.92	2.40	0.89	3.02	0.88	1.99	3.06
	T_3	4	0.95	2.93	0.89	3.94	0.90	2.78	3.93
	T_4	4	0.88	3.69	0.85	4.52	0.84	5.84	2.27
	T_5	4	0.92	3.43	0.89	4.12	0.86	3.71	3.28
$\lg R$	T_1	4	0.56	1.73	0.40	2.06	0.34	1.96	1.31
	T_2	13	0.97	2.12	0.87	4.25	0.89	2.67	2.28
	T_3	10	0.98	1.85	0.87	4.36	0.84	3.58	3.05
	T_4	9	0.94	3.11	0.84	5.26	0.74	7.27	1.83
	T_5	8	0.85	2.32	0.83	4.42	0.81	3.60	3.39

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 见表1注。

2.4 基质破碎度对高光谱法估算基质含水率的影响

为进一步分析基质破碎度对高光谱法估算基质含水率的影响,对经一阶微分(R')处理的5种稻壳基质光谱反射率与基质含水率进行了相关性分析(图3)。由图3可以看出,在3个主要敏感波段,5种稻壳基质含水率与 R' 的相关性有一定差异。当稻壳基质破碎度从0增加到25%(T_1 到 T_2)时,基质破碎度的变化明显引起基质含水率与 R' 相关性的变化,而破碎度水平为25%~75%(T_2 到 T_4)时,破碎度的变化对基质含水率与 R' 相关性的变化影响不明显,破碎度水平为75%~100%(T_4 到 T_5)时,基质含水率与 R' 的相关性呈下降趋势。从侧面说明当基质破碎度介于0~25%和75%~100%时,基质含水率光谱特征受不同破碎度的基质光谱特征影响。因此,在利用高光谱技术检测基质含水率时,基质破碎度是一个必须要考虑的因素,这是因为基质

破碎度的变化会改变基质的物理特性,引起光谱特性的改变,进而影响模型预测精度。



T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 见表1注。

图3 基质含水率与高光谱反射率的相关性

Fig.3 Correlation between reflectance and substrate water content at different wave lengths

综合考虑作物对栽培基质物理特性的要求、稻壳基质高光谱 PLSR 模型的预测精度以及基质破碎度对模型预测精度的影响,使用稻壳基质进行栽培生产时,需将基质破碎度控制在 25%~75%,以提高模型预测精度。

3 讨论

本研究在室内通过控制稻壳基质含水率和破碎度水平测得光谱数据,利用基质光谱数据的 R 、 R' 和 $\lg R$ 构建了基质含水率估算的 PLSR 模型。研究结果表明:(1)高光谱技术可以快速、精准地检测稻壳基质含水率。基质光谱反射率受基质破碎度和含水率的影响,随基质破碎度的增大而增大,随基质含水率增大而减小,但减小幅度逐渐变小。(2)对 5 种基质的含水率光谱做了 3 种数据变换,建立了基于偏最小二乘回归分析法(PLSR)的基质含水率预测模型。一阶微分处理(R')模型为最优模型,5 种稻壳基质的 R^2_{val} 为 0.60~0.90, $RMSEP$ 为 1.54%~5.84%,基质的 RPD 为 1.67~3.93,其中基质 T_1 的 R^2_{val} 为 0.60, RPD 为 1.67, $RMSEP$ 为 1.54%,在 3 种数据变换方式中均最小,其余基质的 $R^2_{\text{val}} > 0.84$, $RPD > 2$,模型具有较好的预测能力。(3)基质破碎度对建立的基质水分模型预测精度有一定影响。基质破碎度介于 25%~75% 时,破碎度的变化对基质含水率与 R' 相关性的变化影响不明显,基质破碎度介于 0~25% 和 75%~100% 时,基质含水率光谱特征受不同破碎度的基质光谱特征影响。因此,使用稻壳基质进行栽培生产时,需将基质破碎度控制在 25%~75%,以提高模型预测精度。

参考文献:

- [1] 蒋卫杰,余宏军,朱德蔚,等. 基质高产栽培番茄氮磷钾优化施肥方案研究[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 45-49.
- [2] 常志州,靳红梅,黄红英,等. “十三五”江苏省秸秆综合利用策略与秸秆产业发展的思考[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 534-541.
- [3] 刘超杰,郭世荣,束 胜,等. 醋糟基质粉碎程度对辣椒幼苗生长和光合能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 330-334.
- [4] 董秀霞,吴金娟,刘瑞岭,等. 玉米秸秆发酵物在番茄育苗中的应用研究[J]. 山东农业科学, 2015, 47(8): 71-73.
- [5] INCROCCI L, MALORGIO F, BARTOLA A D, et al. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 107: 365-372.
- [6] MARFA O, LEMAIRE F, CACERES R, et al. Relationships between growing media fertility, percolate composition and fertigation strategy in peat-substitute substrates used for growing ornamental shrubs[J]. Scientia Horticulturae, 2002, 94: 309-321.
- [7] 宋丽芬,陈军霞,杜滨舵,等. 利用工农业废弃物生产无土草皮卷基质的配方研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 166-169.
- [8] 朱咏莉,李萍萍,毛罕平,等. 基于特征光谱提取的有机基质含水量快速测定方法[J]. 江苏大学学报, 2011, 32(2): 140-143.
- [9] 徐 坤,张西良,李萍萍,等. 便携式无土栽培基质多参数无线检测仪[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 302-308.
- [10] NEMALI K S, MONTESANO F, DOVE S K. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates; ECH2O and Theta probes[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112: 227-234.
- [11] 刘志刚,李萍萍,胡永光,等. 电介质型水分传感器测定基质含水量的标定模型研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 199-202.
- [12] LIU Z G, HU Y G, WANG J Z, et al. Wetting patterns and water distributions in cultivation substrates under drip irrigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 200-208.
- [13] SÁNCHEZ-MOLINA J A, RODRÍGUEZ F, GUZMÁN J L, et al. Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design[J]. Agricultural Water Management, 2015, 151: 114-125.
- [14] FARES A, SAFEEQ M, JENKINS D M. Adjusting temperature and salinity effects on single capacitance sensors[J]. Pedosphere, 2009, 19(5): 588-596.
- [15] WU B, HAN H Y, ZHANG J H, et al. Field-specific calibration and evaluation of ech₂o ec-5 sensor for sandy soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78: 70-78.
- [16] ROSENBAUM U, HUISMAN J A, VRBA J, et al. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH₂O sensors[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10: 582-593.
- [17] 冯 雷,张德荣,陈双双,等. 基于高光谱成像技术的茄子叶片灰霉病早期检测[J]. 浙江大学学报, 2012, 38(3): 311-317.
- [18] 王海江,张花玲,任少亭,等. 基于高光谱反射特性的土壤盐状况预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 133-138.
- [19] 姚艳敏,魏 娜,唐鹏钦,等. 黑土土壤水分高光谱特征及反演模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 95-100.
- [20] 栾福明,张小雷,熊黑钢,等. 基于不同模型的土壤有机质含量高光谱反演比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 196-200.
- [21] CHANG C W, LAIRD D A, MAUSBSCH M J, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analysis soil properties[J]. Soil Science Society America Journal, 2001, 652: 480-490.

(责任编辑:陈海霞)