

椰糠基质有效氮近红外检测仪设计与试验

鲁 兵¹ 王旭峰² 何 珂¹ 胡 灿² 高 薪¹ 汤修映¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为了实现椰糠基质有效氮含量的快速实时检测, 基于漫反射光谱设计了椰糠基质有效氮近红外检测仪。该检测仪的硬件系统主要由前处理装置、气力输送装置、重力式沉降样品室、近红外光谱检测装置、样品回收装置和空气压缩机等组成。制备了不同有效氮含量的椰糠基质样本 135 个, 采用研制的检测仪获取了样本原始光谱数据, 并建立了椰糠基质有效氮含量的最优偏最小二乘回归预测模型, 其校正集相关系数和验证集相关系数分别为 0.973 和 0.965, 校正集均方根误差和验证集均方根误差分别为 14.025 mg/(100 g) 和 15.757 mg/(100 g), 残差预测偏差为 3.72。基于 MFC 开发工具, 采用 C/C++ 语言开发了检测仪硬件控制及实时检测分析软件界面, 将建立的最优有效氮光谱预测模型移植到软件程序中, 实现了椰糠基质有效氮近红外检测仪功能硬件控制及有效氮检测的一键式操作。试验验证结果表明, 所研制仪器预测值与国标测量值相关系数为 0.883, 测试集均方根误差为 18.605 mg/(100 g)。该检测仪实现了椰糠基质有效氮含量的快速实时检测, 并且预测性能较好, 可以满足快速评价椰糠基质养分的实际需求。

关键词: 椰糠基质; 有效氮; 近红外光谱; 检测仪器

中图分类号: S-3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)05-0316-09

OSID:



Design and Test of Near Infrared Detecting Instrument for Available Nitrogen in Coco-peat Substrate

LU Bing¹ WANG Xufeng² HE Ke¹ HU Can² GAO Xin¹ TANG Xiuying¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: In order to realize rapid and real-time detection of available nitrogen in coco-peat substrate, a detecting instrument based on near infrared (NIR) diffuse reflectance spectroscopy was designed. The hardware system of this instrument mainly consisted of pretreatment device, pneumatic conveyor, gravity settling sample chamber, near infrared spectrum detection device, sample recovery device and air compressor. Totally 135 samples of coco-peat substrate with different available nitrogen contents were prepared. Original spectral data of these samples were obtained by the hardware system of the developed instrument. An optimal partial least squares regression model for predicting available nitrogen content of coco-peat substrate was established. The corresponding correlation coefficients of correction set and validation set were 0.973 and 0.965, respectively; the root mean square errors of correction set and validation set were 14.025 mg/(100 g) and 15.757 mg/(100 g), respectively; and the residual prediction deviation was 3.72. Based on the MFC development tool, the software interface of hardware control and real-time detection and analysis of the instrument was developed in C/C++ language. The optimal coco-peat substrate available nitrogen prediction model established was built into the software, and the functional hardware control and available nitrogen NIR spectroscopy detection was realized by one-button operation. The test results showed that the correlation coefficient between the predicted value of the developed instrument and the measured value of national standard was 0.883, and the root mean square error was 18.605 mg/(100 g). The instrument can realize the rapid and real-time detection of available nitrogen in coco-peat substrate, and the prediction performance was good, which can meet the actual needs of rapid evaluation of coco-peat substrate fertilizer.

Key words: coco-peat substrate; available nitrogen; near infrared spectroscopy; detecting instrument

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-08-01

基金项目: 兵团科技攻关项目(2019DB001)和广东省乡村振兴战略专项(粤财农[2018]143)

作者简介: 鲁兵(1991—),男,博士生,主要从事设施农业快速光学检测技术研究,E-mail: 1170027843@qq.com

通信作者: 汤修映(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能检测技术与装备研究,E-mail: txying@cau.edu.cn

0 引言

椰糠基质是由椰子外壳经过粉碎、脱盐和干燥等一系列加工形成的可再生栽培基质^[1-2]。另外,椰糠基质具有较好的储水、蓄肥、透气性和重复使用等优点,被广泛应用于我国设施农业番茄、黄瓜和草莓等作物的无土栽培^[3-7]。氮是作物生长所必需的大量营养元素之一,土壤/基质是作物生长氮素供应的重要来源^[8-9]。有效氮表征土壤/基质的近期氮肥供应能力,通过测量其含量可实现氮肥精量科学施肥^[10]。由于传统土壤养分检测方法具有耗时、费力和操作专业性强等缺点,生产中常采用过量施加氮肥来保障种植效益,造成水体富营养化等严重的农业面源污染。因此,研究椰糠基质氮肥快速检测技术十分必要。

近红外作为一种快速无污染的光学检测技术,近年来被广泛应用于农业、食品、石油化工和医学等领域的快速检测^[11-14]。目前,国内外学者对土壤指标近红外光谱检测开展了大量的研究工作,但利用近红外光谱技术对栽培基质指标进行快速检测的研究鲜见报道。例如,张东兴等^[15]、杨柳等^[16]基于可见/近红外光谱技术开发出土壤水分快速测量传感器;焦彩霞等^[17]利用可见-短近红外成像光谱数据实现土壤有机质含量的快速检测;周鹏等^[18]基于土壤全氮和含水率检测的 7 个敏感波长开发出车载式原位土壤参数检测仪;刘燕德等^[19]采用近红外漫反射技术实现赣南脐橙园土壤全磷和全钾同时快速检测;YANG 等^[20]利用卷积神经网络和递归神经网络相结合,实现土壤有机碳、阳离子交换量和 pH 值等指标的高精度近红外光谱预测;MUNNAF 等^[21]利用 4 种不同方法优化得到了土壤 pH 值和有机碳、磷、钾含量的最佳在线可见/近红外光谱预测模型;TARNIK 等^[22]提出最小方差结合贝叶斯算法实现土壤氮、有机碳和水分等 9 种指标的快速定量可见/近红外光谱检测;KODAIRA 等^[23]利用可见/近红外微型光谱仪实现土壤中铵态氮、硝态氮和总氮等 12 种指标的快速精确定量检测。综上所述,采用近红外光谱对椰糠基质有效氮含量进行快速光学检测具有较大的可行性。由于椰糠基质与土壤的物理指标、化学指标和生物学指标均存在显著性差异,土壤养分的可见/近红外光谱预测模型并不能用于椰糠基质的养分评价。因此,采用近红外光谱对椰糠基质有效氮含量进行快速检测研究具有重要的实际意义。

本文基于近红外漫反射光谱分析技术,设计椰糠基质有效氮近红外光谱检测仪,开发实时检测及

控制软件,建立椰糠基质有效氮近红外光谱检测的最佳预测模型,并将建立的最优光谱预测模型嵌入到检测仪器的软件控制程序中,对检测仪器的性能进行试验验证,以实现椰糠基质有效氮的快速实时检测。

1 检测仪硬件设计

1.1 整机结构与工作原理

为了实现椰糠基质有效氮含量的快速稳定检测,基于漫反射测量原理设计了检测波长范围为 950~1 660 nm 的椰糠基质有效氮近红外检测仪。该检测仪器主要由前处理装置、气力输送装置、重力式沉降样品室、近红外光谱检测装置、样品回收装置和空气压缩机等组成,总体结构如图 1 所示。其中,前处理装置主要由粉碎室、粉碎室漏斗、高速交流电机和前处理装置支撑架等组成;气力输送装置主要由软管、文丘里输送管、调压阀和电磁阀等组成;近红外光谱检测装置主要由 Flame NIR 光谱仪、光源、光纤及光纤探头、样品台及检测机箱等组成;样品回收装置主要由真空气动上料器、软管和旋风式除尘器等组成。控制系统不仅实现样本光谱数据采集及检测,还可以通过控制各装置的执行部件实现协同作业。

检测仪工作流程包含以下 4 个步骤:①前处理装置将采集的椰糠基质样本进行快速粉碎/干燥前

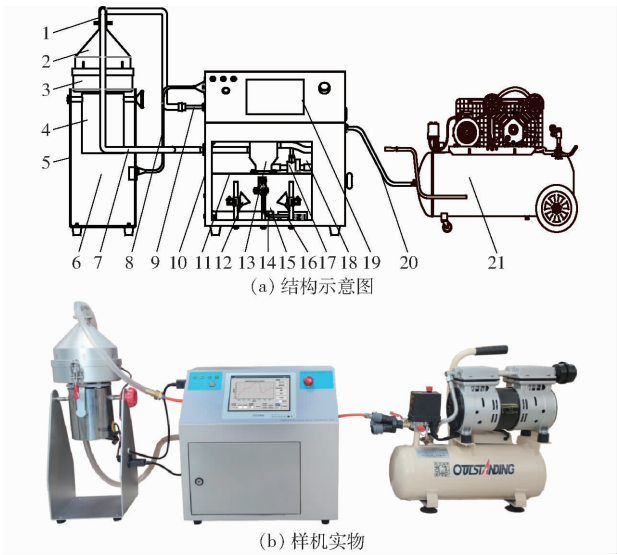


图 1 椰糠基质有效氮近红外光谱检测仪
Fig. 1 NIR spectrum detecting instrument for available nitrogen in coco-peat substrate

- 1. 文丘里输送管 2. 粉碎室漏斗 3. 粉碎室 4. 高速交流电机
- 5. 前处理装置支撑架 6. 前处理装置 7. 物料输送软管 8. 气力输送装置 9. 气流软管 10. 检测机箱 11. 样品台 12. 光源
- 13. 重力式沉降样品室 14. 光纤及光纤探头 15. 近红外光谱检测装置 16. Flame NIR 光谱仪 17. 真空气动上料器 18. 样品回收装置 19. 控制系统 20. PU 管 21. 空气压缩机

处理。②旋转前处理装置 180°,使前处理完成的椰糠基质样本颗粒从粉碎室漏斗出口处流出,利用气力输送装置将样本沿软管输送至重力式沉降样品室。③重力式沉降样品室将气力输送来的气固二相流进行沉降分离,使样本颗粒快速沉降到样品室的底部,再利用近红外光谱检测装置实现样品有效氮含量的快速检测。④利用样品回收装置将检测完成的样品从重力式沉降样品室中气力回收至旋风式除尘器,再利用旋风式除尘器完成样本颗粒的高效气固分离和样本回收,从而准备下一个样品的检测。重复完成上述 4 个步骤,即完成椰糠基质有效氮含量的快速高精度检测。

1.2 关键部件设计与选型

1.2.1 前处理装置

固体颗粒样本粒度变化会引起不同程度的光谱散射现象,光谱散射对近红外光谱检测有显著性影响。同时,近红外光谱对水分中的羟基有敏感响应,样本水分含量变化也会对近红外光谱检测有显著性影响。实际采集椰糠基质样本颗粒粒度及含水率均存在显著性差异,上述样本的差异性对其有效氮近红外光谱检测精度产生显著性影响。为了快速高效地消除椰糠基质样本颗粒粒度及含水率差异性的影响,本文研制了具有快速粉碎及干燥功能的椰糠基质前处理装置,其结构如图 2 所示。

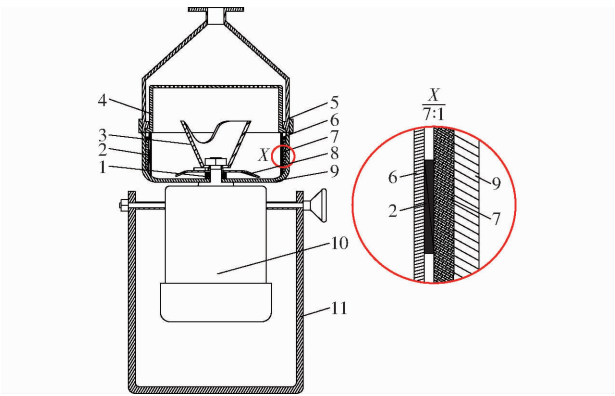


图 2 前处理装置
Fig. 2 Pretreatment device

1. 密封圈 2. 陶瓷加热片 3. 粉碎刀固定件 4. 40 目筛网 5. 粉碎室漏斗 6. 粉碎室内腔 7. 绝热层 8. 粉碎刀 9. 粉碎室 10. 高速交流电机 11. 前处理装置支撑架

由图 2 可知,前处理装置主要由粉碎刀、高速交流电机、陶瓷加热片、绝热层、粉碎室、粉碎室内腔、粉碎刀固定件、40 目筛网、粉碎室漏斗、密封圈和前处理装置支撑架等组成。为了提高椰糠基质样本的前处理效率,在粉碎室内腔外壁安装加热部件,加热部件通过热辐射将热量从粉碎内腔外侧传递至粉碎室内腔中,实现椰糠基质快速粉碎及干燥一体化同时作业。加热部件由 5 个陶瓷加热片均匀布置在粉

碎室内腔外侧组成,陶瓷加热片的中心加热温度为 300℃。陶瓷加热片与粉碎室之间填充纳米气凝胶绝热材料,防止陶瓷加热片产生的热量向粉碎室外辐射。工作时,高速交流电机位于前处理装置下方,将取样器采集挤压后的椰糠基质样品加入前处理装置中进行快速粉碎/干燥作业。每个样品粉碎/干燥前处理 6 min,再旋转高速交流电机 180°,前处理完成样本通过 40 目筛网筛选进入粉碎室漏斗,并从粉碎室漏斗出口处进入文丘里输送管,从而完成样品快速高效物理前处理。

1.2.2 气力输送装置

气力输送装置主要由文丘里输送管、调压阀、电磁阀和软管等组成,其结构如图 3 所示。空气压缩机产生的压缩气体经调压阀进入气力输送管道,通过控制系统控制电磁阀可实现样品气力输送过程的启/停控制。输送气体流经文丘里输送管时,在文丘里输送管与粉碎室漏斗连接处产生局部负压,使粉碎室漏斗中的样品连续进入文丘里输送管中,并与输送气体一起形成气固二相流继续向前输送。输送气压是样品平稳输送以及后续顺利沉降的关键参数,通过试验确定气力输送的最佳气流压力为 0.1 MPa,利用调压阀调节气流输送压力至最佳值。

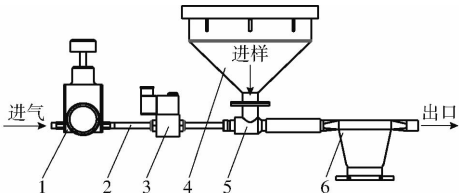


图 3 气力输送装置
Fig. 3 Pneumatic conveyor

1. 调压阀 2. 软管 3. 电磁阀 4. 粉碎室漏斗 5. 文丘里输送管 6. 重力式沉降样品室

1.2.3 重力式沉降样品室

重力式沉降样品室是椰糠基质有效氮近红外光谱检测仪的核心部件之一,其主要作用是将气力输送过来的气固二相流进行气固沉降分离,使粉尘颗粒样本沉降到样品室底部的待检测部位,未分离的粉尘颗粒样本随气流继续向前输送。本文采用重力沉降原理设计了重力式沉降样品室,其结构如图 4 所示。另外,重力式沉降样品室的底部采用高透过率的光学玻璃进行密封。检测光源透过光学玻璃照射到重力式样品室内部样品的下表面,光纤及光纤探头位于光学玻璃的正下方。通过固定重力式沉降样品室与光纤及光纤探头的相对位置,即可保证每个检测样品待检测表面与光纤及光纤探头距离的一致性,也保证了两个检测光源的照射焦点始终位于样品待检测表面上。

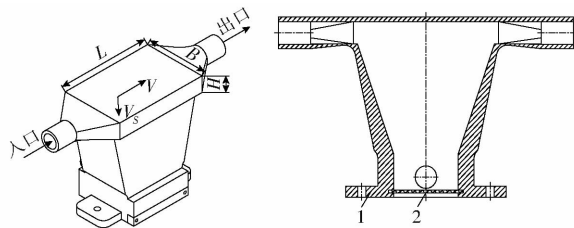


图 4 重力式沉降样品室

Fig. 4 Gravity settling sample chamber

1. 沉降样品室 2. 光学玻璃

重力沉降主要利用椰糠基质粉尘样本颗粒与空气的密度存在显著差异,使椰糠基质样本颗粒在输送过程中自然沉降,从而实现样本气固分离^[24-25]。为了实现椰糠基质粉尘颗粒的自然沉降,样品沉降室的长度和高度必须满足

$$\frac{L}{V} \geq \frac{H}{V_s} \quad (1)$$

其中

$$V_s = \frac{2g(\rho_1 - \rho_0)\varphi^2}{9\mu} \quad (2)$$

式中 L ——沉降样品室的长度, m
 V ——气固二相流流速, m/s
 H ——沉降样品室的高度, m
 V_s ——椰糠基质样本粉尘颗粒沉降速度, m/s
 g ——重力加速度, m/s²
 ρ_1 ——椰糠基质粉尘颗粒密度, kg/m³
 ρ_0 ——空气密度, kg/m³
 φ ——椰糠基质粉尘颗粒直径, m
 μ ——空气粘度, Pa·s

将式(2)代入式(1),再进行不等式变换可得

$$L \geq \frac{9\mu HV}{2g(\rho_1 - \rho_0)\varphi^2} \quad (3)$$

根据沉降样品室的实际安装空间尺寸要求,首先确定重力式沉降样品室的高度 H 为 0.01 m。通过查阅相关文献资料 and 实际测量得出,空气粘度 μ 取 0.000 180 8 Pa·s,气固二相流流速 V 为 1.15 m/s,重力加速度 g 取 9.8 m/s²,椰糠基质密度 ρ_1 为 95.6 kg/m³,空气密度 ρ_0 为 1.29 kg/m³,椰糠基质粉尘颗粒样本平均直径 φ 取 0.000 38 m。根据式(3),沉降样品室的长度 $L \geq 70.1$ mm。

重力式样品沉降室的气固二相流沉降分离量为 Q ,则沉降样品室的宽度 B 为

$$B = \frac{Q}{VH} \quad (4)$$

通过测量,重力式沉降样品室需要处理的气固二相流沉降分离量 Q 为 0.000 36 m³/s。根据式(4),沉降样品室的宽度 $B = 0.000 36 / (1.15 \times 0.01) = 0.031 3$ m。综上所述,对上述设计得到的数据进行取整,则沉降样品室的长 L 、宽 B 和高 H 分

别为 71、31、10 mm。

1.2.4 样品回收装置

样品回收装置主要由真空气动上料器、软管、旋风式除尘器和样品回收箱组成,其结构如图 5 所示。该装置主要利用高速气体在经过真空气动上料器时产生负压,再利用负压将重力式沉降样品室中的样品进行气动清理,清理后的样品随高速气流一起向前输送至旋风式除尘器。通过旋风式除尘器将样品与高速气体进行高效分离,最终实现样品回收和洁净气体返回大气^[26-27]。另外,重力式沉降样品室中未能实现沉降分离的气固二相流也通过旋风式除尘器进行二次气固分离。根据重力式沉降样品室对样本的实际清理需求,选取 ZG3/8 型双头真空气动上料器作为样品回收装置的气力回收动力源部件,该真空气动上料器的耗气量为 0.25 m³/min。

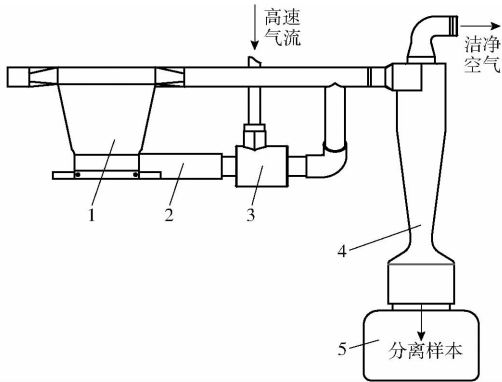


图 5 样品回收装置

Fig. 5 Sample recycling device

1. 重力式沉降样品室 2. 软管 3. 真空气动上料器 4. 旋风式除尘器 5. 样品回收箱

本文设计的旋风式除尘器主要利用气固二相流在除尘器内部进行高速旋转产生的离心力使椰糠基质粉尘样本颗粒从气固二相流中分离,其结构如图 6 所示。根据椰糠基质粉尘颗粒样本回收的气固分离要求,选取切线进口的斯维夫特型旋风分离器作为旋风式除尘器的最终结构,其各部分结构尺寸比例如表 1 所示^[28-30]。

根据旋风式除尘器需要分离的气固二相流处理量,旋风式除尘器圆柱体直径可表示为^[28]

$$D = \sqrt{\frac{10Q_1}{V_1}} \quad (5)$$

式中 D ——旋风式除尘器圆柱体直径, m
 Q_1 ——旋风式除尘器的最大气固二相流处理量, m³/s
 V_1 ——旋风式除尘器入口处的气固二相流速度, m/s

进一步分析可知,样品回收装置的最大气固二

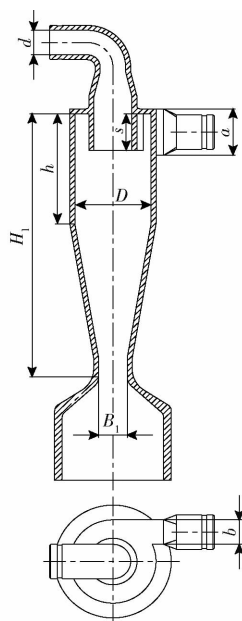


图 6 旋风式除尘器
Fig. 6 Cyclone dust collector

表 1 斯维夫特型旋风式除尘器结构尺寸比例

Tab. 1 Structure dimensions of Swift type cyclone dust collector

参数	圆柱体直径 D	入口高度 a	入口宽度 b	出口深度 s	上出口直径 d	圆柱体高度 h	下出口直径 B_1	筒体高度 H_1
尺寸比例值	1. 0	0. 44	0. 21	0. 5	0. 4	1. 4	0. 4	3. 9

依次添加等体积不同浓度的氮肥溶液,再将样品静置吸收 24 h,从而完成不同有效氮含量的试验样本制备。静置完成的椰糠基质样本在 105℃ 条件下进行干燥处理,以供光谱建模使用。试验共制备不同有效氮含量的椰糠基质样本 135 份,每份样品质量约为 10 g。

2.2 光谱采集及参考值测定

试验采用设计的椰糠基质有效氮近红外检测仪硬件系统进行漫反射光谱数据采集。开启检测仪光源预测 30 min,待检测光源稳定之后再进行光谱数据采集。另外,在采集样本光谱数据之前,采用聚四氟乙烯标准白板进行检测仪黑/白参考校正。每个样本采集 3 个点的光谱数据,将 3 个点的光谱数据求平均值作为该样品的最终原始光谱数据。试验最终成功获取 135 个样本的漫反射光谱数据,如图 7 所示。

由图 7 可知,不同椰糠基质样本的反射率随波长变化的趋势基本相同,不同样本光谱曲线差异主要体现在各波长对应反射率幅值的变化,该结果表明采集的样本光谱数据不存在明显的异常数据。上述光谱曲线在 965、1 120、1 450、1 570 nm 处存在光谱能量吸收。965 nm 和 1 570 nm 处的吸收峰与 NH 基团的倍频振动吸收有关,其变化反映了椰糠基质氮含量^[31-32];1 450 nm 处的吸收峰主要反映水或纤

相流为自真空气动上料器气力输送的样品,则 Q_1 取 0. 25 m³/min。采用风速计测得旋风式除尘器入口处的气固二相流流速约为 25 m/s。将 Q_1 和 V_1 的取值代入式(5),可得旋风式除尘器的圆柱体直径 D 约为 40. 8 mm。根据直径 D 的取值,通过表 1 中的比例关系可确定旋风式除尘器各部分的具体结构参数。

2 椰糠基质有效氮光谱预测模型建立

2.1 试验材料

采用 Sail Substrates 椰糠砖制备试验样品,该椰糠砖产自印度。试验前通过去离子水将椰糠砖浸泡成松散状态,再通过晾晒形成风干的基质样本。利用微型粉碎机对风干样本进行快速粉碎处理,粉碎后的样本过 40 目标标准筛网以供制备不同有效氮含量样本使用。为了制备有效氮含量覆盖范围广的椰糠基质样本集,在相同质量的空白椰糠基质样本中

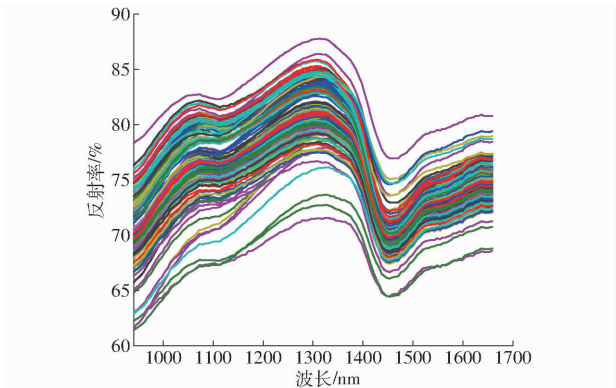


图 7 椰糠基质漫反射光谱

Fig. 7 Diffuse reflectance spectrum of coco-peat substrate

维素中的 OH 基团信息,或者表示椰糠基质木质素中的 CH₂基团信息^[33];1 120 nm 处的吸收峰与C—H (CH₂, CH₃)中的二级倍频和组合频的振动吸收有关^[31]。试验样本完成光谱数据采集以后,采用国家林业标准 LY/T 1229—1999 中规定的化学方法进行样品有效氮参考值测量^[34]。

2.3 光谱预处理与模型建立

2.3.1 样品集合划分

采用国家林业标准 LY/T 1229—1999 对 135 个椰糠基质样本进行有效氮含量(质量比)参考值测量,并根据浓度梯度法以比例 3: 1 对全部样本进行校正集和验证集样本划分,其划分结果如表 2 所示。

表 2 椰糠基质校正集和验证集样本有效氮含量参考值分布情况

Tab.2 Reference measurement of available nitrogen content of coco-peat substrate samples in calibration and prediction sets					
样品集	样本数量/个	有效氮含量/(mg·(100g) ⁻¹)	平均值/(mg·(100g) ⁻¹)	标准差/(mg·(100g) ⁻¹)	
校正集	103	32.485 ~ 262.639	106.731	61.063	
验证集	32	37.273 ~ 238.444	105.458	58.541	

由表 2 可知,校正集有效氮含量参考值范围包含验证集范围,并且校正集和验证集的平均值和标准差之间无明显差异。上述样本集划分满足建立预测性能较优模型的基本要求。

2.3.2 光谱预处理

试验采集的椰糠基质有效氮近红外光谱数据中还包含一些与检测指标无关的噪声和干扰信息,如样品背景、基线漂移、散射和电噪声等^[35-36]。为了减小上述因素的干扰和提高获取数据的信噪比,采用导数、S-G 平滑(Savitzky-Golay smooth)、标准正态变量变换(Standard normal variable transformation, SNV)和多元散射校正(Multiplicative scatter correction, MSC)等对采集的光谱数据进行预处理^[37-38]。

2.3.3 有效氮光谱预测模型建立

利用获取的全部椰糠基质样本光谱数据组合形成光谱矩阵 X ,采用国标法测量全部样本的有效氮参考值组合形成有效氮参考值矩阵 Y 。利用偏最小二乘回归(Partial least square regression, PLSR)建立原始和各种预处理光谱矩阵 X 与有效氮参考值矩阵 Y 之间的定量预测模型。主成分数选取是建立预测性能稳定的 PLSR 模型的关键,采用交互验证法来选取椰糠基质有效氮 PLSR 模型的最佳主成分数。利用校正集相关系数(Correlation coefficient of calibration, R_c)、验证集相关系数(Correlation coefficient of validation, R_v)、校正集均方根误差(Root mean square error of calibration, RMSEC)、验证集均方根误差(Root mean square error of validation, RMSEV)和残差预测偏差(Residual prediction bias, RPD)等指标对预测模型性能进行评价。不同预处理光谱数据建模结果如表 3 所示。

由表 3 可知,光谱预处理对椰糠基质有效氮光谱预测模型性能有显著性影响,所有预处理均对模型的预测性能有不同程度的提升效果。一阶导数、MSC 和 SNV 预处理对模型的预测精度改善效果不明显,二阶导数预处理对模型的预测精度略有提高。导数结合 S-G 平滑预处理对模型的精度有较为明显的提高。SNV 和 MSC 预处理的主要作用是消除检测样本固体颗粒粒度差异和表面散射的影响,故 SNV 和 MSC 预处理后的光谱建模结果相近。试验的椰糠基质样本均采用微型粉碎机进行粉碎和 40

表 3 不同预处理光谱数据的建模结果

Tab.3 Modeling results of different preprocessed spectral data						
预处理方式	主成分数	R_c	RMSEC/		RMSEV/	
			(mg·(100g) ⁻¹)	R_v	(mg·(100g) ⁻¹)	RPD
原始光谱	8	0.921	23.641	0.890	26.926	2.17
一阶导数	6	0.906	25.725	0.895	26.289	2.23
二阶导数	7	0.957	17.596	0.917	22.994	2.55
一阶导数+S-G	7	0.943	20.194	0.937	20.714	2.83
二阶导数+S-G	6	0.972	14.341	0.953	17.530	3.34
S-G	12	0.973	14.025	0.965	15.757	3.72
SNV	8	0.930	22.364	0.894	26.614	2.20
MSC	8	0.930	22.447	0.896	26.330	2.22

目标标准筛网过筛处理,椰糠基质样本粒度差异性和表面散射影响均较小,故 MSC 和 SNV 预处理效果不显著。对比上述各种预处理方式的建模结果,采用 S-G 平滑预处理结合 PLSR 可建立椰糠基质有效氮的最优光谱预测模型。最优模型的 R_c 和 R_v 分别为 0.973 和 0.965, RMSEC 和 RMSEV 分别为 14.025 mg/(100 g) 和 15.757 mg/(100 g),模型的 RPD 为 3.72。上述结果表明,采用近红外光谱技术可实现椰糠基质有效氮的高精度快速检测。

3 检测仪软件开发

基于 Microsoft Visual Studio 中的 MFC 开发工具,利用 OmniDriver 和 aaeonEAPI 二次开发包中的封装函数编写了检测仪的控制系统软件,如图 8 所示。整个控制系统软件包括数据显示模块、参数设置模块、光谱检测模块、前处理模块、输送模块和无线传输模块。数据显示模块主要用于显示采集样品的光谱数据曲线;参数设置模块对光谱采集的积分时间、平均次数和平均宽度等参数进行人机交互设置;光谱检测模块实现光谱仪通信连接控制、黑/白校正和检测触发;前处理模块主要实现前处理时间设置及前处理操作控制;输送模块主要实现样品气力输送以及气力清样过程控制;无线传输模块主要用于将检测结果无线发送至下位机。整个软件程序的流程如图 9 所示。

4 检测仪性能测试

为了验证检测仪的实际检测性能,采用蛇形取

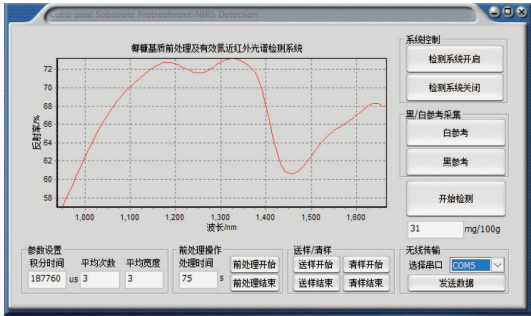


图 8 椰糠基质有效氮近红外检测仪软件界面

Fig. 8 Software interface of coco-peat substrate available nitrogen NIR detecting instrument

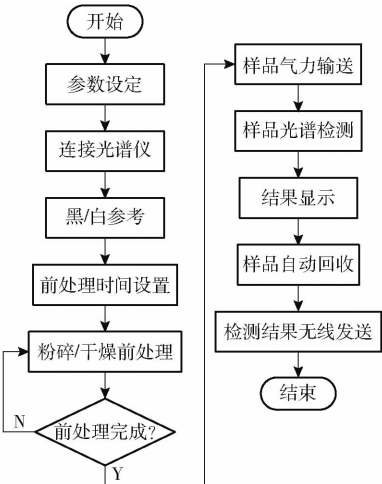


图 9 椰糠基质有效氮近红外检测仪工作流程图

Fig. 9 Working flowchart of coco-peat substrate available nitrogen NIR detecting instrument

样法在广东省农业技术推广总站温室采集实际种植番茄的椰糠基质样本,每次采集样本 15 个,每间隔 5 d 采集一次试验样本,试验共采集 3 次样本,总共获取 45 个椰糠基质样本。通过对采集的椰糠基质样本进行有效氮光谱检测验证检测仪的检测性能。所有采集样品在进行近红外光谱检测之前,均采用椰糠基质有效氮近红外检测仪的前处理装置进行粉碎/干燥前处理。最终,45 个椰糠基质样本有效氮国标测量值与仪器检测值的散点分布图如图 10 所示。

将上述 45 个试验样本形成测试集,并对椰糠基质有效氮近红外检测仪进行性能测试。由图 10 可知,测试集样本的有效氮仪器检测值与国标测量值之间的相关系数(Correlation coefficient of prediction, R_p)为 0.883,测试集均方根误差(Root mean square error of prediction, RMSEP)为 18.605 mg/(100 g)。

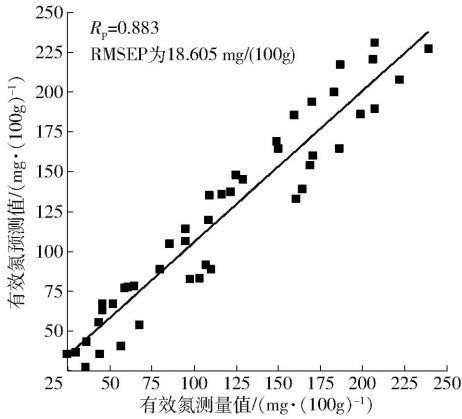


图 10 检测仪测试结果散点图

Fig. 10 Scatter plot of test results of detecting instrument

结果表明,测试集样本的实际检测精度较高,所研制的椰糠基质有效氮近红外检测仪性能满足实际快速检测要求。

5 结论

(1)采用近红外光谱漫反射测量原理,研发了椰糠基质有效氮近红外检测仪,主要包括前处理装置、气力输送装置、重力式沉降样品室、近红外光谱检测装置、样品回收装置和空气压缩机等。通过该仪器可实现椰糠基质样本前处理、气力输送装样、有效氮光谱检测和检测样本高效气力回收等功能。

(2)基于椰糠基质有效氮检测仪硬件系统,采集了椰糠基质 950 ~ 1 660 nm 的漫反射光谱数据。利用导数、S - G 平滑和 MSC 等方法进行光谱预处理,建立椰糠基质有效氮含量的 PLSR 模型。椰糠基质有效氮最优模型的 R_c 和 R_v 分别为 0.973 和 0.965, RMSEC 和 RMSEV 分别为 14.025 mg/(100 g) 和 15.757 mg/(100 g), RPD 为 3.72。

(3)基于 MFC 开发工具,采用 C/C++ 语言开发了检测仪硬件控制及检测分析软件界面,并将建立的椰糠基质有效氮最优光谱预测模型移植到软件程序中。通过软件界面可实现对检测仪前处理装置、气力输送装置和气力回收装置的操作控制和有效氮光谱检测的一键式操作。

(4)验证了所研制椰糠基质有效氮近红外检测仪的检测性能。有效氮的测试集相关系数 R_p 和均方根误差(RMSEP)分别为 0.883 和 18.605 mg/(100 g)。结果表明,该检测仪可实现椰糠基质有效氮含量的快速实时检测。

参 考 文 献

[1] YANG L, WANG Z R, YANG L H, et al. Coco peat powder as a source of magnetic sorbent for selective oil-water separation[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 101: 1 - 10.

[2] SCAGEL C F. Growth and nutrient use of ericaceous plants grown in media amended with sphagnum moss peat or coir dust[J]. HortScience, 2003, 38(1): 46 - 54.

- [3] 黎波, 辜松, 初麒, 等. 椰糠培育叶菜种苗移植机械手设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 18–24.
LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 18–24. (in Chinese)
- [4] FORNES F, BELDA R M, ABAD M, et al. The microstructure of coconut coir dusts for use as alternative to peat in soilless growing media[J]. Animal Production Science, 2003, 43(9): 1171–1179.
- [5] XU X H, SU X Y, BAI B, et al. Synthesis of adipic acid dihydrazide-decorated coco peat powder-based superabsorbent for controlled release of soil nutrients[J]. RSC Advances, 2016(6): 103199–103209.
- [6] 时振宇, 陈健, 贾凯, 等. 不同配比基质对黄瓜、番茄幼苗生长及品质的影响[J]. 天津农业科学, 2020, 26(1): 76–81, 90.
SHI Zhenyu, CHEN Jian, JIA Kai, et al. Effects of different proportioning substrates on the growth and quality of cucumber and tomato seedlings[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(1): 76–81, 90. (in Chinese)
- [7] 汤柔颖, 邱志豪, 韩莹琰, 等. 不同椰糠混配基质对生菜生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(21): 45–47, 95.
TANG Rouying, QIU Zhihao, HAN Yingyan, et al. Effects of different coir dust mixed substrate on growth of lettuce[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 45–47, 95. (in Chinese)
- [8] LIU X Y, KEISUKE K, KOYAMA L A, et al. Nitrate is an important nitrogen source for Arctic tundra plants[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(13): 3398–3403.
- [9] GAO H, SHA Z M, WANG F, et al. Nitrogen leakage in a rice-duck co-culture system with different fertilizer treatments in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 686: 555–567.
- [10] ZHENG X F, YUAN J, ZHANG T, et al. Soil degradation and the decline of available nitrogen and phosphorus in soils of the main forest types in the Qinling mountains of China[J]. Forests, 2017, 8(11): 460.
- [11] WANG J J, ZAREEF M, HE P H, et al. Evaluation of matcha tea quality index using portable NIR spectroscopy coupled with chemometric algorithms[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(11): 5019–5027.
- [12] ALIANO-GONZALEZ M J, FERREIRO-GONZALEZ M, ESPADA-BELLIDO E, et al. A screening method based on visible-NIR spectroscopy for the identification and quantification of different adulterants in high-quality honey[J]. Talanta, 2019, 203(20): 235–241.
- [13] DA SILVA N C, DE GÓES MASSA A R C, DOMINGOS D, et al. NIR-based octane rating simulator for use in gasoline compounding processes[J]. Fuel, 2019, 243: 381–389.
- [14] LIU S S, SHEN H H, CHEN S C, et al. Estimating forest soil organic carbon content using vis-NIR spectroscopy: implications for large-scale soil carbon spectroscopic assessment[J]. Geoderma, 2019, 348(6): 37–44.
- [15] 张东兴, 刘江, 杨丽, 等. 基于 VIS–NIR 的播种机沟内土壤水分测量传感器研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 218–226.
ZHANG Dongxing, LIU Jiang, YANG Li, et al. Soil moisture measurement sensor research in seeding ditch based on VIS–NIR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 218–226. (in Chinese)
- [16] 杨柳, 徐榕, 雷廷武, 等. 近红外反射土壤含水率测量仪设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 1–9.
YANG Liu, XU Rong, LEI Tingwu, et al. Design of near-infrared soil moisture measuring instrument[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 1–9. (in Chinese)
- [17] 焦彩霞, 郑光辉, 解宪丽, 等. 可见–短近红外成像光谱数据的土壤有机质含量估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3277–3281.
JIAO Caixia, ZHENG Guanghui, XIE Xianli, et al. Prediction of soil organic matter using visible–short near-infrared imaging spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(10): 3277–3281. (in Chinese)
- [18] 周鹏, 李民赞, 杨玮, 等. 基于近红外漫反射测量的车载式原位土壤参数检测仪开发[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2856–2861.
ZHOU Peng, LI Minzan, YANG Wei, et al. Development of vehicle-mounted in-situ soil parameters detector based on NIR diffuse reflection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(10): 2856–2861. (in Chinese)
- [19] 刘燕德, 熊松盛, 吴至境, 等. 赣南脐橙园土壤全磷和全钾近红外光谱检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 156–162.
LIU Yande, XIONG Songsheng, WU Zhijing, et al. Detection of total potassium and total phosphorus in soil in GAN NAN navel orange orchard using near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 156–162. (in Chinese)
- [20] YANG J B, WANG X L, WANG R H, et al. Combination of convolutional neural networks and recurrent neural networks for predicting soil properties using Vis-NIR spectroscopy[J]. Geoderma, 2020, 380: 114616.
- [21] MUNNAF M A, GUERRERO A, NAWAR S, et al. A combined data mining approach for on-line prediction of key soil quality indicators by Vis-NIR spectroscopy[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 205: 104808.
- [22] TARNIK M G, GHAFARI S, BAHRAINI T, et al. Minimum variance based-bayes combination for prediction of soil properties on Vis-NIR reflectance spectroscopy[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2020, 207: 104194.
- [23] KODAIRA M, SHIBUSAWA S. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping[J]. Geoderma, 2013, 199: 64–79.
- [24] 陈杨华. 谷糙分离实验装置设计[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
CHEN Yanghua. Design of experimental equipment for grain separation[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019. (in Chinese)
- [25] 侯先瑞. 重力式油水分离器性能的数值模拟[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
HOU Xianrui. The numerical simulation on properties of gravity-type oil-water separator[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [26] 迟媛, 李蒙福, 杨月斌, 等. 禽蛋壳膜旋风式气流清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 339–350.
CHI Yuan, LI Mengfu, YANG Yuebin, et al. Cyclone device collecting eggshell membranes and eggshells separately from eggshells mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 339–350. (in Chinese)

- [27] 胡婷. 旋风除尘器提高微细粉尘除尘效率的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
HU Ting. Research on improving the dust separation efficiency of cyclone dust collector[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [28] 徐新阳, 郝文阁. 环境工程设计教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [29] 侯建龙. 高压系统旋风分离器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
HOU Jianlong. Study on cyclone separator of high pressure system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [30] 李鹏. 旋风式收集柴油机尾气颗粒装置研究[D]. 柳州: 广西工学院, 2011.
LI Peng. The cyclone collection of diesel exhaust particles' device research[D]. Liuzhou: Guangxi Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [31] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [32] ZHANG Y, LI M Z, ZHENG L H, et al. Soil nitrogen content forecasting based on real-time NIR spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 29–36.
- [33] RINNAN R, RINNAN A. Application of near infrared reflectance (NIR) and fluorescence spectroscopy to analysis of microbiological and chemical properties of arctic soil[J]. Soil Biochemistry, 2007(39): 1664–1673.
- [34] LY/T 1229—1999 森林土壤水解性氮的测定[S]. 1999.
- [35] 郭志明, 陈全胜, 张彬, 等. 果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 245–250.
GUO Zhiming, CHEN Quansheng, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectrometer for determination of fruit and vegetable quality[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 245–250. (in Chinese)
- [36] 邹小波, 崔雪平, 石吉勇, 等. 基于近红外与中红外光谱技术的淀粉会生度检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 341–346, 417.
ZOU Xiaobo, CUI Xueping, SHI Jiyong, et al. Detection of retrogradation degree of starch based on near-infrared and mid-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 341–346, 417. (in Chinese)
- [37] 刘亚超, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式大米多品质参数无损检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 351–357.
LIU Yachao, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Portable rapid nondestructive detecting instrument for multi-quality parameters of rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 351–357. (in Chinese)
- [38] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 348–354.
WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Hand-held device for non-destructive detection of potato quality parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 348–354. (in Chinese)

(上接第 236 页)

- [18] HENTEN E, HEMMING J, TUIJL B, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241–258.
- [19] 关辉, 张长利, 张春媛. 基于图像处理的黄瓜叶片病斑分级方法的研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 94–97.
GUAN Hui, ZHANG Changli, ZHANG Chunyuan. Grading method of cucumber leaf spot disease based on image processing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 94–97. (in Chinese)
- [20] 李冠林, 马占鸿, 王海光. 基于图像处理的葡萄霜霉病单叶严重度自动分级方法[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(6): 88–93.
LI Guanlin, MA Zhanhong, WANG Haiguang. Image recognition of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on support vector machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(6): 88–93. (in Chinese)
- [21] SUN K, XIAO B, LIU D, et al. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach: IEEE, 2019: 5693–5703.
- [22] SUN K, ZHAO Y, JIANG B, et al. High-resolution representations for labeling pixels and regions[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach: IEEE, 2019.
- [23] YUAN Y, CHEN X, WANG J. Object-contextual representations for semantic segmentation[C]//European Conference on Computer Vision (ECCV), 2020: 173–190.
- [24] HAMUDA E, GLAVIN M, JONES E. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 125: 184–199.
- [25] 马浚诚, 杜克明, 郑飞翔, 等. 基于卷积神经网络的温室黄瓜病害识别系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 186–192.
MA Juncheng, DU Keming, ZHENG Feixiang, et al. Disease recognition system for greenhouse cucumbers based on deep convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 186–192. (in Chinese)
- [26] 高程程, 惠晓威. 基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(6): 195–198.
GAO Chengcheng, HUI Xiaowei. GLCM-based texture feature extraction[J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(6): 195–198. (in Chinese)
- [27] 袁培森, 曹益飞, 马千里, 等. 基于 Random Forest 的水稻细菌性条斑病识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 139–145.
YUAN Peisen, CAO Yifei, MA Qianli, et al. Identification method of rice bacterial leaf streak based on Random Forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 139–145. (in Chinese)