



骆立, 孙绘骐, 史苏安, 张红美, 杨增玲, 韩鲁佳. 基于NIRS的农业废弃物堆肥检测研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 179-189.
LUO Li, SUN Huiqi, SHI Su'an, ZHANG Hongmei, YANG Zengling, HAN Lujia. Research progress on NIRS-based detection of agricultural waste composting [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(8): 179-189.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.15

基于NIRS的农业废弃物堆肥检测研究进展

骆立¹ 孙绘骐¹ 史苏安^{1*} 张红美^{2,3} 杨增玲¹ 韩鲁佳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, 新疆阿拉尔市 843300;

3. 新疆维吾尔自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室, 新疆阿拉尔市 843300)

摘要 为深入系统地了解近红外光谱技术(Near-infrared spectroscopy, NIRS)在农业废弃物堆肥研究中的研究进展与应用现状, 基于Web of Science核心数据库与CNKI数据库, 以“近红外光谱”“农业废弃物”“堆肥”和“好氧发酵”等为关键词进行检索, 共计筛选出58篇相关文献, 并从堆肥基础特性检测、过程监测和质量评估等3个方面对现有研究工作进行归纳总结。结果表明: 1) 在堆肥基础特性检测中, 提高模型精度需增加样本、提取相关波段和适配更多算法; 2) NIRS对堆肥进行过程监控实现精细化管理需优化通用模型、加强硬件开发; 3) 进一步完善堆肥NIRS评价系统可通过迁移学习、多特性同步预测和质量分级提高评价的准确性与可靠性。未来NIRS应与机器学习、深度学习、计算机视觉和高光谱成像等新技术融合, 从而为农业领域数据密集型科学创造新的机遇, 为农业废弃物堆肥的现场监测与质量控制提供参考。

关键词 近红外光谱技术; 农业废弃物; 堆肥; 过程监测; 质量评估

中图分类号 S216

文章编号 1007-4333(2024)08-0179-11

文献标志码 A

Research progress on NIRS-based detection of agricultural waste composting

LUO Li¹, SUN Huiqi¹, SHI Su'an^{1*}, ZHANG Hongmei^{2,3}, YANG Zengling¹, HAN Lujia¹

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

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

3. Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Alar 843300, China)

Abstract In order to gain an in-depth and systematic understanding of the research advances and current applications of near-infrared spectroscopy (NIRS) in the study of agricultural waste composting, a literature search was conducted based on the Web of Science core database and the CNKI database. 'Near-infrared spectroscopy', 'agricultural waste', 'composting' and 'aerobic fermentation' were used as keywords. A total of 58 relevant literature articles were screened through this search. Subsequently, a synthesis and summary of existing research work were undertaken, which focused on three aspects of composting fundamental characteristic detection, process monitoring and quality assessment. The results are as follows: 1) To improve the accuracy of models in detecting basic composting features, it's important to increase the number of samples, identify relevant spectral bands, and adapt different algorithms;

收稿日期: 2023-12-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2002103); 国家现代农业产业技术体系资助(CARS36); 教育部“创新团队发展技术”项目(IRT1293)

第一作者: 骆立 (ORCID: 0009-0003-3368-1797), 博士研究生, E-mail: luoli@cau.edu.cn

通讯作者: 史苏安 (ORCID: 0000-0002-5907-3082), 副教授, 主要从事生物质资源利用研究, E-mail: suanshi@cau.edu.cn

2) Effective real-time monitoring of the composting process using NIRS requires refining universal models and improving hardware to ensure greater sensitivity and reliability; 3) Further improvements in the NIRS evaluation system for composting can be achieved through methods like transfer learning, predicting multiple characteristics simultaneously, and grading quality. These contribute to better accuracy and reliability in assessments. Looking ahead, the integration of NIRS with emerging technologies such as machine learning, deep learning, computer vision and hyperspectral imaging is expected to create new opportunities for data-intensive scientific exploration in agriculture and provide practical guidance for on-site monitoring and quality control in agricultural waste composting.

Keywords near-infrared spectroscopy; agricultural waste; compost; process monitoring; quality assessment

农业废弃物资源化利用是改善环境污染、发展循环经济、实现农业可持续发展的有效途径,国家农业农村部于2023年提出了全国秸秆综合利用率高于86%的年度目标^[1],发布了推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见^[2]。我国主要的农业废弃物有农作物秸秆、畜禽粪污、蔬菜尾菜和糟渣等^[3]。堆肥是实现农业废弃物无害化处理与资源化利用的重要手段。目前普遍认为堆肥是指在人工控制和一定的水分、C/N及通风条件下通过微生物的发酵作用,将废弃有机物转变为肥料的过程^[4]。堆肥的特性检测、过程监测和质量评估对堆肥工艺优化及调控具有重要意义,有助于生产出符合国家标准的有机肥料。然而,常规检测方法耗时耗力、操作复杂、成本高,难以适应现代农业的信息化、智能化、智慧化发展^[5]。因此,如何实现堆肥实时监测与质量控制,是推动当前堆肥产业转型升级和提质增效的关键。

近红外光谱技术(Near-infrared spectroscopy, NIRS)是一项无损检测技术,具有操作简便、检测迅速和多组分同时预测等优点,已广泛被应用于农业^[6]、林业^[7]、石油化工^[8]和生命科学^[9]等领域。与传统方法相比,NIRS不仅绿色环保,而且可快速、高效、准确评价堆肥质量^[10]。目前,基于NIRS的堆肥检测研究主要侧重于污水污泥^[11]、工业废弃物^[12]和城市垃圾^[13]等,对农业废弃物资源的相关研究较为有限。因此,为全面了解近年来国内外采用NIRS检测以农业废弃物为原料的堆肥研究现状,本研究拟以“近红外光谱”“农业废弃物”“堆肥”和“好氧发酵”等为关键词,基于Web of Science核心数据库与CNKI数据库检索相关文献,并从堆肥基础特性检测、过程监测和质量评估3个方面对现有研究工作归纳总结,同时,指出当前研究中存

在的问题并展望未来的研究方向,旨在为堆肥现场快速检测拓展新思路,促进农业废弃物的综合利用和堆肥产品开发。

1 基于NIRS的堆肥检测方法

NIRS起源于1800年,发展于20世纪50年代早期,在20世纪70年代得到应用,并逐渐发展成为当今主要的分析技术。近红外光是介于可见光与中红外光之间的电磁波,波长为780~2 500 nm,其光谱产生于共价化学键非谐能级振动,是非谐振动的倍频和合频。

NIRS可对堆肥进行定量与定性分析:定性分析基于样品吸收特定波长的光谱特征,与已知标准进行比较,从而确定样品中是否存在目标成分;定量分析则依赖于样品中不同成分对近红外光的吸收特性,更侧重于测定样品中特定成分的浓度。这2种方式都必须依赖校正模型解析光谱信息^[14]。图1展示了NIRS检测堆肥的技术路线,主要分为以下步骤:1)数据采集。数据能够决定一个模型的上限,因此需要制定详细、具体、合适的光谱数据采集方案以获得准确可靠的数据,包括搭建光谱采集系统、设置采集参数和制定采集方式等;2)特征处理。在建模前需要对数据进行清洗和组织,从而提高模型的性能。在NIRS的实际应用中,特征处理主要包含光谱预处理与特征提取:光谱预处理目的是剔除光谱中包含的仪器噪声、环境背景和基线漂移等其他无关信息,常用方法有平滑、标准化、归一化、导数法和标准正态变量变换等^[15];而特征提取是为了最大限度地从原始数据中提取特征以供算法和模型使用,包括波长选择、波长压缩和波长重组等^[16];3)模型构建。获得近红外光谱数据库后,算法及其参数决定了如何逼近校正模型的上限,因此

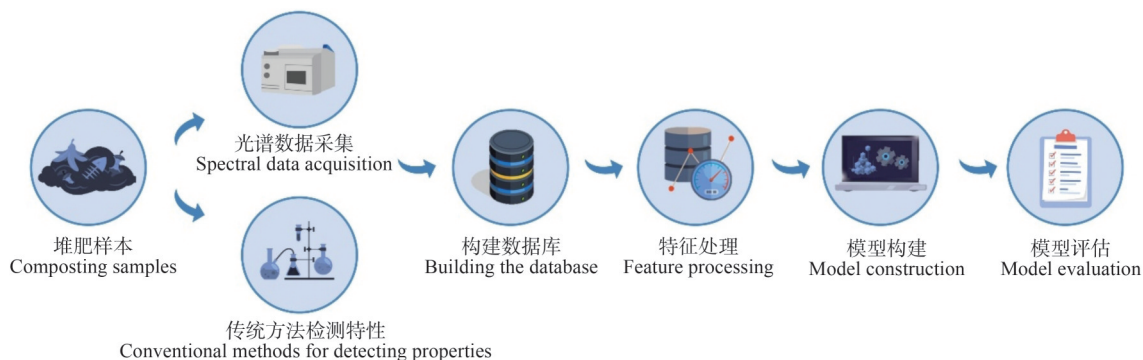


图1 NIRS检测堆肥的技术路线

Fig. 1 Technical route to NIRS detection of compost

需要根据不同的数据集选择合适的算法^[17],常用的化学计量学算法有多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)、主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)和偏最小二乘回归法(Partial Least Squares, PLS)等,评估模型的指标有决定系数(R^2)、校正均方根误差(RMSEC)、预测均方根误差(RMSEP)等^[18]。

2 NIRS检测技术在堆肥中的应用

2.1 堆肥基础特性检测

堆肥基础特性检测对工艺优化及质量控制具有重要意义,国际上采用NIRS检测堆肥特性的应用研究始于20世纪90年代^[19],随后大量的研究工作表明NIRS可有效分析堆肥的含水率、有机质(OM)、总氮(TN)、总碳(TC)、总有机碳(TOC)、C/N、粗灰分、金属元素和纤维素类物质含量等特性。农业废弃物堆肥的原料与工艺具有多样性与复杂性,本研究对相关研究工作的原料种类、仪器选择、校正模型和样本量等归纳总结详见表1。在原料方面,主要有畜禽粪污和秸秆作物两大类,包括猪粪、牛粪、禽粪、小麦秸秆、稻草秸秆和玉米秸秆等。原料的具体类别则依据地区特色,如狐狸粪便^[21]、马粪^[40-41]、葡萄秸秆^[22]和橄榄壳^[42]等,可单项处理也可联合堆肥。采集的波段涵盖了80%以上的近红外光谱波段,通常采用特征选择与特征降维对原始光谱数据进行提取与压缩^[43]。然而,NIRS存在波段重叠严重、吸收强度低、易受外界环境影响等不足,因此如何最大限度地从原始数据中提取特征以供算法和模型使用,从而提高模型精度与运行速度至关重要。目前,为了提高模型精度,大都采用降维技术提取光谱特征,但这也带来了降维后

数据不具备解释性的挑战。若能针对不同的原料提取与特性相关度较高的波段进行建模,不仅能提高模型精度,还能解析光谱与堆肥特性之间的响应规律。

从仪器选择上看,多数采用实验室用台式光谱仪,生产商来自国内外知名公司,例如 Thermo、PerkinElmer、Bruker、FOSS等。相较之下,采用便携式近红外光谱仪检测堆肥特性的应用较少^[44],主要是因为便携式近红外光谱仪的精度不如台式光谱仪,且在实验室条件下开展的研究不利于评价便携式近红外光谱仪检测效果的真实性^[45]。

在校正模型的选择上,目前采用PLS、PCA、MLR等线性算法较为普遍。通过箱型图分析这些文献中各项特性指标的模型预测效果,结果如图2所示。可见堆肥各个特性的预测精度存在较大差异,同一特征的模型决定系数较为离散。其中:TN和TC的预测效果较好但变异性大;pH的预测效果较为稳定;OM和C/N的预测效果有待提高。当数据集中蕴含高度非线性关系时,线性算法无法揭示出数据集的内在非线性结构。随着研究的深入与数据集的扩大,此类线性模型是否仍然适用需要进一步验证。采用支持向量机、孤立森林、人工神经网络等机器学习算法建立校正模型将有利于探索数据集中的非线性关系,消除干扰因素,提高模型的可靠性、预测准确性和适用性^[46]。

在样本量方面,大多数研究样本量不超过1000份,以此建立的近红外光谱数据库均属于小型数据库。然而,尽管畜禽粪便、秸秆作物和蔬菜尾菜等堆肥原料特性受生物遗传学的限制^[47],为确保构建这些生物质材料校正模型的可靠性,至少需要上千个样本^[48]。

表1 农业废弃物堆肥的NIRS检测相关研究
Table1 Studies related to NIRS detection of agricultural waste composting

文献来源 References source	原料 Raw material	光谱范围/nm Spectral range	仪器型号 Instrument type	建模方法 Modeling algorithm	样本量/个 Sample size
[20]	畜禽粪污	1 100~2 500	近红外分光光度仪 FOSS公司 6500 型号	多元线性回归 MLR	90
[21]	畜禽粪污、食物垃圾、庭院垃圾	905~1 682	近红外光谱仪 Sentronic 公司	偏最小二乘回归法 PLS	207
[22-23]	葡萄渣、牛粪、污水污泥	830~2 600	傅里叶近红外光谱仪 Bruker 公司 MPA 型号	惩罚回归	≈300
[24]	畜禽粪污	—	近红外光谱仪 Foss 公司	MLR	44
[25]	橄榄油固体废弃物	780~2 500	傅里叶近红外光谱仪	PLS	—
[26]	畜禽粪污、玉米秸秆	1 000~2 000	便携式传感装置	PCR	—
[27-29]	畜禽粪污	1 000~2 500	傅里叶变换近红外光谱仪 Perkin Elmer 公司	PLS 支持向量机	120
[30]	鸡粪、菊花渣	1 000~2 500	傅里叶变换近红外光谱仪 Thermo 公司	MLR、PCR、PLS	14
[31]	畜禽粪污	1 000~2 500	光栅栏在线分析近红外光谱仪,自制	PLS	60
[32]	牛粪、玉米秸秆	1 000~2 500	傅里叶变换近红外光谱仪 Perkin Elmer 公司	Local PLS	—
[33]	小麦秸秆	1 000~2 500	傅里叶变换近红外光谱仪,自制	PLS	120
[34-36]	绿色废弃物、树皮、污水污泥	400~2 500	近红外分光光度仪 FOSS 公司 6500 型号	PLS、Pearson	44、426
[37-38]	猪粪、牛粪	700~2 500	近红外分光光度仪 FOSS 公司 6500 型号	MLR	52、100
[39]	水稻秸秆、猪粪	350~1 700	便携式高光谱仪 Avantes 公司 AvaField-2 型号	PLS	84

综上所述,针对单一的、静态的堆肥基础特性检测,关注点应集中在提高校正模型的预测精度,以期缩小与标准化学检测方法的误差。然而,基于NIRS的堆肥基础特性检测仍存在样本量不足、模型难以解释、线性模型适用范围受限等问题。为提

升模型在堆肥特性检测中的准确性与可靠性,可从以下3个方面进行:1)增加样本量,扩大数据库。通过增加样本数量,扩展数据集的规模,旨在提高模型的泛化能力,使其更好地适应不同条件下的堆肥特性;2)优选特征波段。针对不同的堆肥原料,提

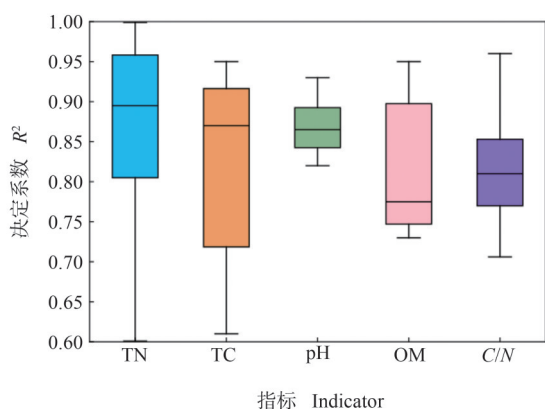


图 2 各项指标模型决定系数的箱型图

Fig. 2 Boxplot of model determination coefficients for each indicator

取与特性高度相关的波段,以确保模型更为精准地捕捉有效信息,提升效率;3)适配学习能力更强的算法。借鉴机器学习等新兴算法,更有效地处理数据中的复杂关系,增强模型的稳健性,以便工业应用与推广。

2.2 堆肥过程监测

在单一的、静态的堆肥基础特性检测无法满足生产需求的情况下,采用多角度、多方面的监测方式

对堆肥过程中的各项特性进行动态变化的跟踪至关重要。这种综合的过程监测方式有助于优化工艺参数,提高堆肥产品的质量。然而,目前堆肥监测领域的相关研究仍处于起步阶段,采用的检测方式相对传统,存在环境适应性差、准确度不足的问题,未能充分利用新兴技术来提升堆肥环境监测水平^[49]。

过程分析技术通过对原料、中间产品和工艺过程的关键质量品质 and 性能特征进行即时测量,来设计、分析和控制生产加工过程,以确保最终产品质量^[50]。在化工、石油和制药领域,NIRS作为一种新型过程分析技术已得到了广泛应用,实现了生产的精细管理,取得了巨大的经济和社会效益^[51],例如石化企业在汽油管道配方中采用在线近红外光谱分析仪进行调合与优化^[52]。在堆肥领域,NIRS已被用于测定污水污泥堆肥过程中的生物和化学变化^[53],但在农业废弃物堆肥方向上的应用大幕刚刚拉开。由图 3 可见,采用近红外对农作物秸秆、畜禽粪便、蔬菜废弃物和锯末等原料的特性进行预测,优化物料复配工艺,在堆肥过程中,NIRS可实时监测物料的 C/N、腐殖质和温室气体排放量等关键参数,有利于控制加工过程,缩短发酵周期,因此,可基于 NIRS 快速评估堆肥产品的质量。

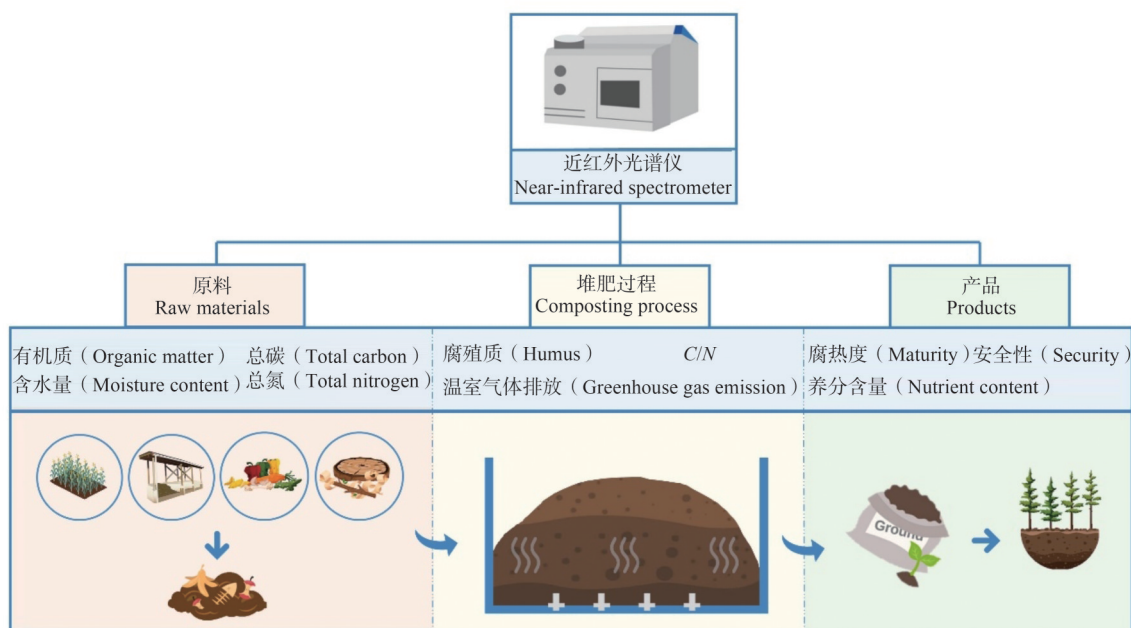


图 3 堆肥过程的近红外监测

Fig. 3 NIRS monitoring of composting processes

王晓燕等^[30]采用 MLR、PLS 和 PCA 建立鸡粪工厂化堆肥过程中的 OM 含量预测模型,模型的 R^2 为

0.95,可用于实际检测工作。杨增玲等^[31]利用在线近红外光谱仪采集有机肥料厂原始堆肥样本的光谱数

据,结合PLS实时分析堆肥全过程中的关键参数,结果表明预测含水率、TC、TN的模型效果较佳,但电导率和OM的预测结果不理想。黄圆萍等^[32]以牛粪和玉米秸秆为原料,采用NIRS结合Local-PLS算法对2种不同堆肥工艺的关键参数建立通用预测模型。从图4膜覆盖和槽式好氧堆肥现场图和取样位置来

看,取样点均匀地分布在堆体的空间。含水率、OM和C/N预测模型的 R^2 分别为0.95、0.74和0.77。新一代小型化近红外分析仪被设计成紧凑、小巧、轻便、成本低的设备,为现场或农场产品测量提供了强大的能力^[54],在药品^[55]和乳制品^[56]的生产过程中得到了充分应用,但在堆肥领域的应用十分有限。

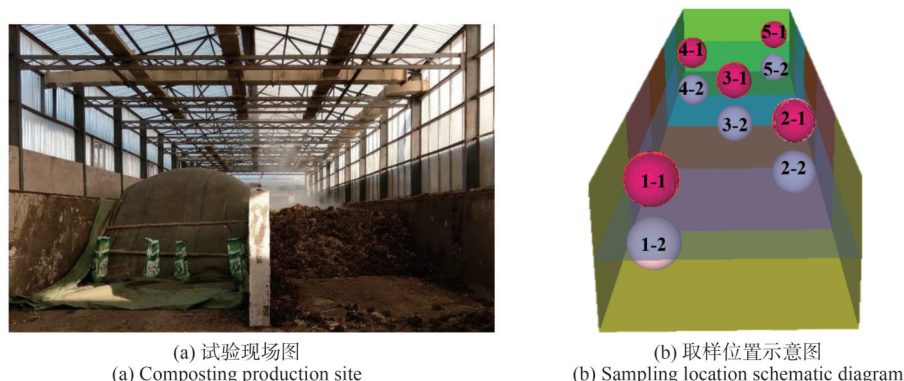


图4 膜覆盖和槽式好氧堆肥现场图和取样位置^[32]

Fig. 4 Schematic diagrams of membrane-covered composting and trough composting production conditions and sampling location

综上所述,采用NIRS对堆肥原料、中间产品关键品质和性能特征进行过程监控,通过分析实时产品质量与目标产品质量,实现生产过程的精细闭环调整,有利于保证成品质量的稳定性,为堆肥工艺优化和质量控制提供技术指导。然而,与基础特性检测不同,堆肥过程监测不能仅追求模型预测的高准确度,而需关注原位光谱测定的适用性与实时性。事实上,堆肥过程监测的环境对设备稳定性、可靠性、安全性和可维护性提出较高的要求。然而,便携式、在线式近红外光谱仪为了仪器紧凑性而牺牲了光谱扫描范围与光谱分辨率等性能。为了在微型化、光谱性能和仪器成本之间取得平衡,可从以下2个方面开展研究工作:1)针对常见原料的堆肥工艺建立通用模型。目前绝大部分研究工作针对某一工艺或原料的单一预测,无法满足多种工艺的预测应用。若能建立一个近红外通用模型,能够对多种物料的同—指标进行检测。虽然精确度可能有所下降,但具有建模成本低、工作量小等优势,对NIRS的工业化利用具有推广意义;2)研发出小型化、智能化、可实时监测的近红外光谱检测设备。为了满足堆肥过程监测对设备稳定性、可靠性和实时性的需求,针对特定应用场景进一步改进和优化近红外光谱检测设备性能。这涉及到综合考虑最小样品数量、光谱可重复性、噪声水平、样品

处理方案以及校正模型的分析速率等因素。同时,提供基于云端的解决方案,方便访问、存储和分析近红外数据,将有助于推动NIRS在堆肥领域更广泛的应用。

2.3 堆肥质量评估

在农业废弃物转化为有机肥料的进程中,堆肥质量的精准评估尤为重要,对确定发酵终点起着关键性作用。然而,目前对堆肥质量的评价缺乏统一的标准,这导致在实际应用中难以确保有机肥料质量的一致性。为解决这一问题,在非破坏性的情况下获取堆肥的近红外光谱,从腐熟度、养分含量和安全性等方面进行测评,以期为生生产者提供一种高效可靠的手段进行质量控制。腐熟的堆肥应既对植物无毒性,又有益于植物生长^[57]。腐熟度指堆肥中有机物经过矿化、腐殖化过程后达到稳定的程度,主要通过以下三方面进行评估:1)OM含量。Shen等^[39]采用NIRS结合PLS测定水稻秸秆两种堆肥方式中的OM含量,均达到了可接受的预测精度,为快速无损评价堆肥腐熟度提供了可能;2)腐殖化程度相关参数。堆肥腐殖酸的形成过程被称为腐殖化^[58],其结构中包含碳水化合物、蛋白及脂类等^[59],常采用NIRS检测胡敏酸和富里酸。Albrecht等^[36]采用NIRS监测堆肥过程中胡敏酸和富里酸含量,结果表明胡敏酸、富里酸和两者之比

校正模型的 R^2 分别为0.807、0.806和0.864。李自刚等^[60]基于牛粪堆肥的近红外数据库,提出一种基于离散小波变换处理后得到小波系数的PLS预测模型;3)其余辅助评定指标如pH、脂质含量、纤维素含量等。Fujiwara等^[37]通过NIRS检测猪粪堆肥中的脂质含量来判断其对植物生长的抑制程度,从而间接评估堆肥腐熟度。任兰天等^[33]采用NIRS结合PLS预测小麦秸秆堆肥过程中纤维素、半纤维素和木质素含量,建立了一种快速、准确的秸秆腐熟程度评估方法。Wang等^[61]提出一种NIRS结合PLS的商用有机肥质量评估技术,研究表明可准确预测TOC、pH、OM和种子发芽率,但含水率、TN和电导率的预测效果不理想。

堆肥产品最终要作为土壤改良剂或有机肥料进行生产使用,养分指标主要考虑有氮、磷、钾等营养元素^[62]。Galvez-Sola等^[23]建立了常量营养元素氮、磷、钾的近红外预测模型,模型 R^2 分别为0.80、0.85、0.71。Devianti等^[26]采用NIRS结合主成分回归检测有机肥料中的磷含量,模型的 R^2 高达0.99,指出NIRS可作为有机肥样品中磷含量测定的替代方法。Xu等^[63]分别采用激光诱导击穿光谱技术、NIRS与两者相结合快速分析复合肥中的氮、磷、钾含量,结果表明基于CARS-EWF与CARS-OPF的激光诱导击穿光谱技术和NIRS数据融合方法均比单光谱法具有更高的准确度。

此外,NIRS检测还有助于鉴别和排除潜在的有害物质,确保堆肥产品的安全性和环境友好性。为了促进动物生长和预防疾病,饲料中添加了许多重金属,导致重金属在畜禽粪污中累积,对环境甚至人体健康造成严重危害^[64]。国家标准对有机肥料中砷、汞、铅、镉和铬5种重金属含量制定了安全限量标准。NIRS检测重金属含量原理是低浓度的重金属元素离子与铁氧化物、粘土及有机质结合后生成有光谱响应的螯合物或者有机物。Ko等^[65]对77个堆肥样品中的铬、砷、镉、锌、铜和铅等重金属含量进行了检测,证实了NIRS用于堆肥安全性检测的可行性。Shen等^[66]在中国4个省份共采集了118份猪粪样品,利用NIRS检测粪便中的铜,模型结果 R^2 为0.81。畜禽粪便中重金属含量和超标率明显高于秸秆作物,其中猪粪最为明显,NIRS检测方法能较好地预测畜禽粪便堆肥中的钾含量,但对钙、镁、铅等含量的预测效果不理想^[67]。随着“双

碳”目标下堆肥环境效益的备受关注^[68],因此有学者还对臭气污染^[69]、微塑料污染^[70-71]等其余无害化指标进行检测。

综上所述,NIRS在农业废弃物堆肥领域展现了科学、高效的质量管理潜力,为农业可持续发展和资源循环利用提供了重要的支持。然而,堆肥质量NIRS评价在腐熟度上缺乏全面性,养分元素的预测精度亦需提升,而在安全性和环境友好性方面面临更为严峻的挑战。为进一步完善堆肥质量NIRS评价系统,可从以下角度展开:1)迁移学习。相比与堆肥质量评估,NIRS在果蔬^[72]、中药材^[73]、油粮作物^[74]等产品的质量评价上有着更深入的研究与探索,因此可以将这些领域的知识和模型迁移到堆肥质量评估中,以提高堆肥评价系统的准确性和可靠性;2)多特性同步预测。充分利用NIRS多组分同时预测的优点,建立基于同一近红外光谱数据库的多特性同步预测模型。同时,随着数据的增加,需要不断更新与维护模型,增强模型的稳健性;3)质量分级。在某些特性的预测精度较差的情况下,可以将回归任务转化为分类任务,对堆肥产品进行质量分等,有助于更有针对性地进行管理与调控。

3 结论与展望

本研究综述了基于NIRS的农业废弃物堆肥检测领域的研究进展,主要涵盖堆肥基础特性检测、过程监测和质量评估3个方面,主要结论如下:

1)针对单一、静态的堆肥基础特性检测,校正模型预测精度是首要任务。为提高模型在堆肥特性检测中的准确性与可靠性,可通过增加样本量、提取高相关性波段、适配学习能力更强的算法等方式优化模型;

2)通过NIRS实现堆肥过程监控,为生产过程提供精细的闭环调整,以确保最终产品质量的稳定性。在应对堆肥过程监测方面的挑战时,需要深入研究通用模型的建立和硬件开发,以在模型准确度和光谱实时性之间取得平衡;

3)NIRS为农业废弃物堆肥提供科学高效的质量管理手段,构建完善评价系统可通过迁移学习、多特性同步预测和质量分级等方式,提高准确性与可靠性;

4)传统的化学计量学方法已难以适应更复杂

的应用场景,亟需扩大数据库资源和寻找更为高效、适用度更广的建模方法。将NIRS与机器学习、深度学习、计算机视觉、高光谱成像等新兴技术相融合,可为多学科交叉的农业领域数据密集型科学创造新的机遇。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 农业农村部办公厅关于做好2023年农作物秸秆综合利用工作的通知[EB/OL]. [2023-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm
The Central People's Government of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Development on the Comprehensive Utilization of Crop Straw in 2023 [EB/OL]. [2023-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm (in Chinese)
- [2] 国家标准化管理委员会. 关于推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见[EB/OL]. [2023-12-01]. https://www.sac.gov.cn/xw/bzhdt/art/2023/art_f372b18eb4e546f8918446bb213b4f53.html
Standardization and administration. Guiding Opinions on Promoting the Construction of a Standard System for the Resourceful Utilization of Livestock and Poultry Wastewater [EB/OL]. [2023-12-01]. https://www.sac.gov.cn/xw/bzhdt/art/2023/art_f372b18eb4e546f8918446bb213b4f53.html (in Chinese)
- [3] 马现永. 农业废弃物无害化处理与资源化利用技术[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2021
Ma X Y. *Harmless Treatment and Resource Utilization Technology of Agricultural Waste* [M]. Second edition. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [4] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2011
Li J, Peng S P. *Practical Handbook of Composting Engineering* [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011 (in Chinese)
- [5] 骆立, 徐兆军, 王晓羽, 周康, 那斌. 基于支持向量机的木材树种识别模型[J]. 林业工程学报, 2022, 7(4): 122-127
Luo L, Xu Z J, Wang X Y, Zhou K, Na B. Identification of wood species using support vector machine[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(4): 122-127
- [6] Jiang Q, Chen Y, Guo L, Fei T, Qi K. Estimating soil organic carbon of cropland soil at different levels of soil moisture using VIS-NIR spectroscopy[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 755
- [7] Luo L, Xu Z J, Na B. Building machine learning models to identify wood species based on near-infrared spectroscopy[J]. *Holzforschung*, 2023, 77(5): 326-337
- [8] Balabin R M, Safieva R Z. Motor oil classification by base stock and viscosity based on near infrared (NIR) spectroscopy data[J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2745-2752
- [9] Giovenzana V, Beghi R, Buratti S, Civelli R, Guidetti R. Monitoring of fresh-cut *Valerianella locusta* Laterr. shelf life by electronic nose and VIS-NIR spectroscopy[J]. *Talanta*, 2014, 120: 368-375
- [10] Reda R, Saffaj T, Bouzida I, Saidi O, Belgir M, Lakssir B. Optimized variable selection and machine learning models for olive oil quality assessment using portable near infrared spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 303: 123213
- [11] Zhou C, Zhang J. Simultaneous measurement of chemical oxygen demand and turbidity in water based on broad optical spectra using backpropagation neural network [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2023, 237: 104830
- [12] Biyada S, Merzouki M, Imtara H, Alajmi M F, Elkarrach K, Mechchate H, Benlemlih M. Advanced characterization of organic matter decaying during composting of industrial waste using spectral methods [J]. *Processes*, 2021, 9(8): 1364
- [13] Samadi A, Delnavaz M, Rashtizadeh A, Heidarzadeh N. Highly efficient photodegradation of raw landfill leachate using cost-effective and optimized g-C₃N₄/SnO₂/WO₃ quantum dots under Vis-NIR light [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 19457
- [14] Diaz E O, Iino H, Koyama K, Kawamura S, Koseki S, Lyu S. Non-destructive quality classification of rice taste properties based on near-infrared spectroscopy and machine learning algorithms [J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136907
- [15] 张进, 胡芸, 周罗雄, 李博岩. 近红外光谱分析中的化学计量学算法研究新进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1196-1203
Zhang J, Hu Y, Zhou L X, Li B Y. Progress of chemometric algorithms in near-infrared spectroscopic analysis [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1196-1203 (in Chinese)
- [16] Ong P, Jian J, Li X, Zou C, Yin J, Ma G. New approach for sugarcane disease recognition through visible and near-infrared spectroscopy and a modified wavelength selection method using machine learning models[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 302: 123037
- [17] 骆立, 王静仪, 徐兆军, 那斌. 基于近红外光谱技术建立木材产地鉴别模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(11): 3372-3379
Luo L, Wang J Y, Xu Z J, Na B. Geographic origin discrimination of wood using NIR spectroscopy combined with machine learning techniques. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(11): 3372-3379 (in Chinese)
- [18] Arroyo-Cerezo A, Yang X, Jiménez-Carvelo A M, Pellegrino M, Savino A F, Berzaghi P. Assessment of extra virgin olive oil quality by miniaturized near infrared instruments in a rapid and non-destructive procedure[J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 137043
- [19] Ben-Dor E. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2 500 nm) during a controlled decomposition process [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(1): 1-15
- [20] Fujiwara T, Murakami K. Application of near infrared spectroscopy for estimating available nitrogen in poultry manure compost[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1): 102-107
- [21] Lillhonga T, Grünwald J, Geladi P. Chemometric monitoring of designed composting processes using laboratory measurements and near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2009, 17(5): 275-287
- [22] Galvez-Sola L, Morales J, Mayoral A M, Marhuenda-Egea F C, Martinez-Sabater E, Perez-Murcia M D, Moral R. Estimation of phosphorus content and dynamics during composting: Use of near infrared spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(1): 13-21
- [23] Galvez-Sola L, Moral R, Perez-Murcia M D, Perez-Espinosa A, Bustamante M A, Martinez-Sabater E, Paredes C. The potential of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of agroindustrial compost quality [J]. *Science of the Total Environment*,

- 2010, 408(6): 1414-1421
- [24] Ravivson N R, Razafimbelo T, Masse D, Ramahefarison H, Thuriès L. Organic resources from Madagascar: Dataset of chemical and near-infrared spectroscopy measurements[J]. *Data in Brief*, 2022, 43: 108350
- [25] Kavdir Y, Ilay R, Camci Cetin S, Buyukcan M B, Kavdir I. Monitoring composting process of olive oil solid waste using FT-NIR spectroscopy [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(6): 816-828
- [26] Devianti D, Yusmanizar Y, Syakur S, Munawar A A, Yunus Y. Organic fertilizer from agricultural waste: Determination of phosphorus content using near infrared reflectance [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 644(1): 012002
- [27] 黄光群, 韩鲁佳, 杨增玲. 近红外漫反射光谱法快速测定畜禽粪便堆肥多组分含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007(11): 2203-2207
- Huang G Q, Han L J, Yang Z L. Rapidly determination of compositions of animal manure compost using near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007 (11): 2203-2207 (in Chinese)
- [28] 黄光群, 韩鲁佳. 基于非线性径向基核函数支持向量机的堆肥产品近红外光谱分析研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3556-3560
- Huang G Q, Han L J. Near infrared reflectance spectroscopy analysis of compost products using nonlinear support vector machine With RBF nucleus[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3556-3560 (in Chinese)
- [29] Huang G, Han L, Yang Z, Wang X. Evaluation of the nutrient metal content in Chinese animal manure compost using near infrared spectroscopy (NIRS)[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17): 8164-8169
- [30] 王晓燕, 黄光群, 韩鲁佳. 鸡粪工厂化堆肥过程中有机质含量预测模型[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1): 101-105
- Wang X Y, Huang G Q, Han L Y. Prediction model for organic matter content in chicken manure during plant-field composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 101-105 (in Chinese)
- [31] 杨增玲, 黄圆萍, 沈广辉, 梅佳琪, 韩鲁佳. 基于在线近红外光谱的堆肥全过程关键参数快速检测[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 356-361, 384
- Yang Z L, Huang Y P, Shen G H, Mei J Q, Han L J. Rapidly detection of key parameters in whole composting process based on online near infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 356-361, 384 (in Chinese)
- [32] 黄圆萍, 沈广辉, 廖科科, 吴亚蓝, 韩鲁佳, 杨增玲. 基于NIRS和Local PLS算法的堆肥关键参数实时动态分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 195-202
- Huang Y P, Shen G H, Liao K K, Wu Y L, Han L J, Yang Z L. Real-time and dynamic analysis of key composting parameters using NIR Sand Local PLS algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(13): 195-202 (in Chinese)
- [33] 任兰天, 唐飞, 邵庆勤, 宋长刚, 刘庆, 梅艳艳, 张从军. 基于近红外光谱法快速测定秸秆堆腐过程中纤维素、半纤维素和木质素含量的研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(6): 33-39.
- Ren L T, Tang T, Shao Q Q, Song C G, Liu Q, Mei Y Y, Zhang C J. Rapid contend determination of cellulose, hemicellulose and lignin during wheat straw compose period based on Near-Infrared reflectance spectroscopy [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 33-39 (in Chinese)
- [34] Albrecht R, Joffre R, Gros R, Le Petit J, Terrom G, Périsol C. [J]. *Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of transformation of organic matter in the composting process. Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 448-455
- [35] Albrecht R, Joffre R, Petit J L, Terrom G, Périsol C. Calibration of chemical and biological changes in cocomposting of biowastes using near-infrared spectroscopy [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(3): 804-811
- [36] Albrecht R, Le Petit J, Terrom G, Périsol C. Comparison between UV spectroscopy and Nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4495-4500
- [37] Fujiwara T, Murakami K. Lipid analysis by near infrared spectroscopy to evaluate inhibitory effects of swine waste compost on plant growth [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2008, 16(5): 481-486
- [38] Fujiwara T, Murakami K, Tanahashi T, Oyanagi W. Applicability of near infrared spectroscopy as an alternative to acid detergent analysis for cattle and swine manure compost[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(1): 170-178
- [39] Shen G, Chen Y, Zhang J, Wu Y, Yi Y, Li S, Yin S. Quantitative analysis of index factors in agricultural compost by infrared spectroscopy [J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e14010
- [40] Cascant M M, Sisouane M, Tahiri S, Krati M E, Cervera M L, Garrigues S, de la Guardia M. Determination of total phenolic compounds in compost by infrared spectroscopy[J]. *Talanta*, 2016, 153: 360-365
- [41] Sisouane M, Cascant M M, Tahiri S, Garrigues S, Krati M E, Bouchich G E K, de La Guardia M. Prediction of organic carbon and total nitrogen contents in organic wastes and their composts by infrared spectroscopy and partial least square regression[J]. *Talanta*, 2017, 167: 352-358
- [42] Rueda M P, Comino F, Aranda V, Ayora-Canada M J, Dominguez-Vidal A. Understanding the compositional changes of organic matter in torrefied olive mill pomace compost using infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 293: 122450
- [43] Kaboré T W, Pansu M A, Hien E, Brunet D, Barthès B G, Houot S, Masse D. Near infrared reflectance spectroscopy applied to model the transformation of added organic materials in soil [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2012, 20(3): 339-351
- [44] 王永, 杨国耀, 乔俊峰, 范兴, 杨博, 李昀欣, 农永红, 杨梅, 资文华. 便携式近红外光谱仪及其在农业中的应用现状[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(7): 10-17
- Wang Y, Yang G Y, Qiao J F, Fan X, Yang B, Li Y X, Nong Y H, Yang M, Zi W H. Portable near-infrared spectrometer and its application in agriculture[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(7): 10-17 (in Chinese)
- [45] 刘建学, 尹晓慧, 韩四海, 李璇, 徐宝成, 李佩艳, 罗登林. 便携式近红外光谱仪研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(4): 662-670
- Liu J X, Yin X H, Han S H, Li X, Xu B C, Li P Y, Luo D L. Review of portable near-infrared spectrometers. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(4): 662-670 (in Chinese)
- [46] Guindo M L, Kabir M H, Chen R, Huang J, Liu F, Li X, Fang H. Chemometric approach based on explainable AI for rapid assessment of macronutrients in different organic fertilizers using fusion spectra [J]. *Molecules*, 2023, 28(2): 799
- [47] Bellon-Maurel V, Fernandez-Ahumada E, Palagos B, Roger J M, McBratney A. Critical review of chemometric indicators commonly used

- for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy[J]. *TrAC-Trends in Analytical Chemistry*, 2010, 29(9): 1073-1081
- [48] Brown D J, Shepherd K D, Walsh M G, Dewayne Mays M, Reinsch T G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2006, 132(3-4): 273-290
- [49] 李梦洋, 孙耀杰, 张馨, 郑文刚. 堆肥过程环境感知分析技术研究现状与展望[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 21-27
- Li M Y, Sun Y J, Zhang X, Zheng W G. Research status and prospect of environmental sensing and analyzing technology for composting process[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 21-27 (in Chinese)
- [50] Munson J, Freeman Stanfield C, Gujral B. A review of process analytical technology (PAT) in the US pharmaceutical industry[J]. *Current Pharmaceutical Analysis*, 2006, 2(4): 405-414
- [51] 陈夕松, 苏曼, 蒋立沫. 近红外光谱过程分析与控制技术融合及展望[J]. *测控技术*, 2018, 37(9): 5-9
- Chen X S, Su M, Jiang L M. Integration and prospect of process analysis and control technologies based on near infrared spectroscopy[J]. *Measurement and Control Technology*, 2018, 37(9): 5-9 (in Chinese)
- [52] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 刘丹, 许育鹏. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(10): 1181-1188
- Chu X L, Chen P, Li J Y, L D, Xu Y P. Progresses and perspectives of near infrared spectroscopy analytical technology[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1181-1188 (in Chinese)
- [53] Vergnoux A, Guiliano M, Le Dréau Y, Kister J, Dupuy N, Doumenq P. Monitoring of the evolution of an industrial compost and prediction of some compost properties by NIR spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2390-2403
- [54] Yan H, de Gea Neves M, Noda I, Guedes G M, Silva Ferreira A C, Pfeifer F, Chen X Y, Siesler H W. Handheld near-infrared spectroscopy: State-of-the-art instrumentation and applications in material identification, food authentication, and environmental investigations[J]. *Chemosensors*, 2023, 11(5): 272
- [55] 曾孟晴, 牛剑钊, 许鸣镝, 刘倩. 药品连续制造中常用的过程分析工具及其应用进展[J]. *中国医药工业杂志*, 2022, 53(10): 1402-1407
- Zan M Q, Niu J Z, Xu M D, Liu Q. Process analysis tools commonly used in continuous pharmaceutical manufacturing and their application progress[J]. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, 2022, 53(10): 1402-1407 (in Chinese)
- [56] Pu Y, Pérez-Marín D, O'Shea N, Garrido-Varo A. Recent advances in portable and handheld NIR spectrometers and applications in milk, cheese and dairy powders[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2377
- [57] 黄红丽, 曾光明, 黄国和, 郁红艳. 堆肥中木质素降解微生物对腐殖质形成的作用[J]. *中国生物工程杂志*, 2004(8): 29-31
- Huang H L, Zeng G M, Huang G H, Yu H Y. Current study on the effect of lignolytic organisms on humus formation in composting[J]. *China Biotechnology*, 2004(8): 29-31 (in Chinese)
- [58] 王宇蕴, 赵兵, 马丽婷, 李兰, 邓亚琴, 徐智. 堆肥腐殖化过程及微生物驱动机制[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(5): 22-28
- Wang Y Y, Zhao B, Ma L T, Li L, Deng Y Q, Xu Z. Humification process and microbial driving mechanism of composting[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(5): 22-28 (in Chinese)
- [59] 解新宇, 史明子, 齐海石, 吴迪, 张旭, 张椿浩, 吴占海, 魏自民. 堆肥腐殖化: 非生物学与生物学调控机制概述[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(5): 29-35
- Xie X Y, Shi M Z, Qi H S, Wu D, Zhang X, Zhang C H, Wu Z H, Wei Z M. Compost humification: An overview of abiotic and biological regulatory mechanisms[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(5): 29-35 (in Chinese)
- [60] 李自刚, 岳晓禹, 李长滨, 张春辉, 魏庆葆, 刘世亮. 基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 300-304
- Li Z G, Yue X Y, Li Z B, Zhang C H, Wei Q B, Liu S L. Near infrared spectral modeling analysis based on variable selection of compost humic acid content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 300-304 (in Chinese)
- [61] Wang C, Huang C, Qian J, Xiao J, Li H, Wen Y, Yu G. Rapid and accurate evaluation of the quality of commercial organic fertilizers using near infrared spectroscopy[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88279
- [62] García-Sánchez F, Galvez-Sola L, Martínez-Nicolás J J. Using near-infrared spectroscopy in agricultural systems[J]. *Kyprianidis KG, Skvaril J. Developments in near-infrared spectroscopy*. London: IntechOpen, 2017: 97-127
- [63] Xu Z, Li X, Cheng W M, Zhao G X, Tang L W, Yang Y, Wu Y J, Zhang P F, Wang Q. Rapid and accurate determination methods based on data fusion of laser-induced breakdown spectra and near-infrared spectra for main elemental contents in compound fertilizers[J]. *Talanta*, 2024, 266: 125004
- [64] Wu S, Tursenjan D, Sun Y. Impact of compost methods on humification and heavy metal passivation during chicken manure composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116573
- [65] Ko H J, Choi H L, Park H S, Lee H W. Prediction of heavy metal content in compost using near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2004, 17(12): 1736-1740
- [66] Shen X, Yang Z, Huang G, Han L. Near infrared spectroscopy detection of copper in pig manure and the spectral basis of the analysis[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2014, 22(4): 305
- [67] 黄光群, 韩鲁佳, 樊霞, 杨增玲. 近红外光谱分析技术在畜禽粪便堆肥研究中的应用[J]. *中国农业大学学报*, 2006(3): 93-97
- Huang G Q, Han L J, Fan X, Yang Z L. Application survey of analytical technique of near infrared spectroscopy on studies of livestock manure compost[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006(3): 93-97 (in Chinese)
- [68] 刘明辉, 沈红, 张世早, 胡素柳, 胡春华, 肖香, 唐子君, 方平. 畜禽粪便堆肥大气污染物排放及其控制研究进展[J]. *农业工程*, 2022, 12(5): 36-44
- Liu M H, Shen H, Zhang S Z, Hu S L, Hu C H, Xiao X, Tang Z J, Fang P. Research progress on air pollutant emission and control of livestock manure compost[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(5): 36-44 (in Chinese)
- [69] Toledo M, Gutiérrez M C, Siles J A, García-Olmo J, Martín M A. Chemometric analysis and NIR spectroscopy to evaluate odorous impact during the composting of different raw materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 154-162
- [70] Zhao J, Liu L, Zhang Y, Wang X, Wu F. A novel way to rapidly monitor microplastics in soil by hyperspectral imaging technology and chemometrics[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 121-129
- [71] Wander L, Lommel L, Meyer K, Braun U, Paul A. Development of a low-cost method for quantifying microplastics in soils and compost using near-infrared spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(7): 075801
- [72] Grabska J, Beć K B, Ueno N, Huck C W. Analyzing the quality parameters of apples by spectroscopy from vis/NIR to NIR region: A

- Comprehensive Review[J]. *Foods*, 2023, 12(10): 1946
- [73] Wang Q, Li H Q, You J L, Yan B J, Jin W F, Shen M L, Sheng Y J, He B Q, Wang X R, Meng X Y. An integrated strategy of spectrum: Effect relationship and near-infrared spectroscopy rapid evaluation based on back propagation neural network for quality control of *Paeoniae Radix* Alba[J]. *Analytical Sciences*, 2023: 1-15
- [74] Walelegne M, Meheret F, Derseh M B, Dejene M, Asmare Y, Prasad K V, Duncan A. Near-infrared reflectance spectroscopy using a portable instrument to measure the nutritive value of oilseed meal as livestock feed [J]. *Frontiers in Animal Science*, 2023(4): 1203449

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介： 骆立, 中国农业大学工学院博士研究生, 农业工程专业。2020 年于北京林业大学获得学士学位, 2023 年于南京林业大学获得硕士学位, 曾获得国家励志奖学金、优秀学生奖学金和三好学生等奖项。目前以第一作者发表学术期刊论文 4 篇, 其中 SCI 论文 2 篇, EI 论文 1 篇。曾参与 3 项国家重点研发计划子课题, 对人工智能技术在农林领域的应用具有浓厚兴趣。



通讯作者简介： 史苏安, 博士, 中国农业大学副教授, 主要研究方向为木质纤维素类生物质材料的资源转化。近 5 年在 *Chemical Engineering Journal*, *Industrial Crops and Products*, *Biotechnology for Biofuels* 等期刊上发表 SCI 论文 19 篇。目前主持国家自然科学基金青年项目 1 项, 承担国家重点研发计划子课题 2 项。