

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.040

基于在线近红外光谱的堆肥全过程关键参数快速检测

杨增玲 黄圆萍 沈广辉 梅佳琪 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为探究在线近红外光谱仪对堆肥全过程含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比等关键参数进行实时分析的可行性,以采集的60个堆肥全过程样品为研究对象,利用在线近红外光谱仪、结合偏最小二乘法,建立了有机肥堆肥过程中含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比的近红外定量分析模型。研究结果显示:在线近红外光谱仪可实现堆肥全过程上述关键参数的速测($R_{SD} < 10\%$),其中,含水率和总氮质量分数的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为0.94和3.62、0.92和3.14,模型效果优秀;pH值、总碳质量分数和碳氮比的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为0.90和1.89、0.83和2.12、0.82和2.15,模型效果良好;电导率和有机质质量分数的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为0.79和1.85、0.80和1.93,模型效果一般,模型精度有待提高。各参数近红外预测值与实际测量值之间的偏差很小,并且近红外预测值与实际测量值随堆肥时间的变化趋势具有较好的一致性。

关键词: 堆肥; 关键参数; 过程分析; 在线近红外光谱

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)05-0356-06

Rapidly Detection of Key Parameters in Whole Composting Process Based on Online Near Infrared Spectroscopy

YANG Zengling HUANG Yuanping SHEN Guanghui MEI Jiaqi HAN Lujia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Livestock and poultry manure may result in significant environmental challenges. Meanwhile, it is an advantageous raw material for the production of organic fertilizer due to the rich nutrients such as organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium. Aerobic composting is an effective way to solve the livestock manure pollution problem and realize utilization of this valuable resource. However, composting is an extremely complex process of physical and chemical changes. Online detection tools of the key parameters are important for both composting process control and organic fertilizer quality assurance. Aiming to investigate the feasibility of online near infrared (NIR) spectrometer to conduct real-time analysis of moisture content (MC), pH value, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), total carbon (TC), total nitrogen (TN) and carbon to nitrogen (C/N ratio) ratio in the whole composting process and evaluate its ability to accurately predict these changes. Totally 60 samples in the whole composting process were collected. The NIR quantitative analysis models of MC, pH value, EC, OM, TC, TN and C/N ratio were established by using the online NIR spectrometer combined with partial least square method. The research results showed that the online NIR spectrometer can realize the rapid detection of key parameters in the whole composting process ($R_{SD} < 10\%$), with excellent predictions for MC and TN with R_C^2 and R_{PD} value of 0.94 and 3.62, 0.92 and 3.14, respectively, good predictions for pH value, TC and C/N ratio with R_C^2 and R_{PD} value of 0.90 and 1.89, 0.83 and 2.12, 0.82 and 2.15, respectively, approximate predictions for EC and OM with R_C^2 and R_{PD} value of 0.79 and 1.85, 0.80 and 1.93, respectively; the deviation between the NIR-predicted and measured values of each parameter was small, the NIR predictions were in good agreement with measured values as the composting process progressed. The above research results laid the foundation for realizing the process analysis of organic fertilizer production based on the online NIR spectroscopy.

Key words: composting; key parameters; process analysis; online near infrared spectroscopy

收稿日期: 2018-11-15 修回日期: 2018-12-03

基金项目: 国家奶牛产业技术体系项目(CARS36)和教育部创新团队发展计划项目(IRT-17R105)

作者简介: 杨增玲(1977—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: yangzengling@cau.edu.cn

通信作者: 韩鲁佳(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

0 引言

高温好氧堆肥技术可以有效解决畜禽粪便污染问题,并实现其资源化和无害化利用^[1]。然而堆肥过程极其复杂,受含水率^[2-3]、有机质含量^[4-5]、碳氮比^[6-7]、pH值^[8-9]等过程参数的影响,且这些参数往往相互交错影响,呈现非线性关系,这给堆肥过程的认识和过程实时控制带来了极大的挑战。为优化有机肥生产工艺、保证有机肥的品质,在有机肥生产过程中进行过程分析,对关键参数进行全程实时检测至关重要。

过程分析技术(PAT)是通过对原料、中间产品的关键品质和性能特征的过程监控,设计、分析和控制生产加工过程,以确保最终的产品质量^[10]。其中,近红外光谱分析技术以其方便、快捷、高效、准确、不污染环境和适宜在线分析等优点^[11],成为目前发展最快和最具有前景的过程分析技术之一。近红外光谱分析技术已被用于测定污水污泥堆肥过程中的生物和化学变化^[12-13],堆肥过程中的pH值、电导率、有机质、有机碳和碳氮比^[14],以及动物粪便堆肥中的微量金属含量^[15]等。然而,上述研究主要是基于实验室近红外光谱仪,多采用干燥粉碎样品而不是原始样品进行分析。此外,随着近红外仪器设备的发展,在线近红外光谱仪的应用越来越受到关注,已在制药、饲料、肉制品、果品筛选等方面应用^[16-20]。文献^[18]基于在线近红外光谱仪建立玉米籽粒中水分、粗蛋白、粗灰分和总能定量分析模

型,模型校正集相关系数分别为0.90、0.92、0.78和0.92。文献^[19-20]采用在线近红外光谱仪测定玉米秸秆中的水分、灰分、挥发性物质、固定碳、纤维素、半纤维素和木质素等含量,相对标准偏差均小于10%。然而,目前基于在线近红外光谱仪检测堆肥全过程关键指标的研究尚未见报道。

本文旨在探究利用在线近红外光谱仪对堆肥全过程含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比等关键参数进行实时分析的可行性。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

所有样品采自北京市北郎中有机肥料厂,厂内设有露天的原料场地(图1a)、堆肥车间(图1b)以及后熟车间和成品间(图1c)。采用槽式发酵的堆肥模式,生产车间有两条堆肥工艺相同的堆肥槽(槽A和槽B),槽长40m、宽4m、深1.8m。混合均匀的原料从投料口进,每2d翻堆一次,每一次翻堆都会使物料向前推进4m,因而沿着发酵槽长度方向的样品可分为10个不同的发酵阶段(图1d),样品进后熟车间进一步腐熟后转移至成品仓。如图1所示,鲜羊粪和鸡粪混合均匀后置于原料场地,随机采取4个原料样品;堆肥过程采集48个样品,具体取样时每4m长为一个区段,如图1e所示,每区段每层采用五点法混匀取样,从8个区段的上、中、下层分别取样24个,槽A和槽B共采集48个样品;

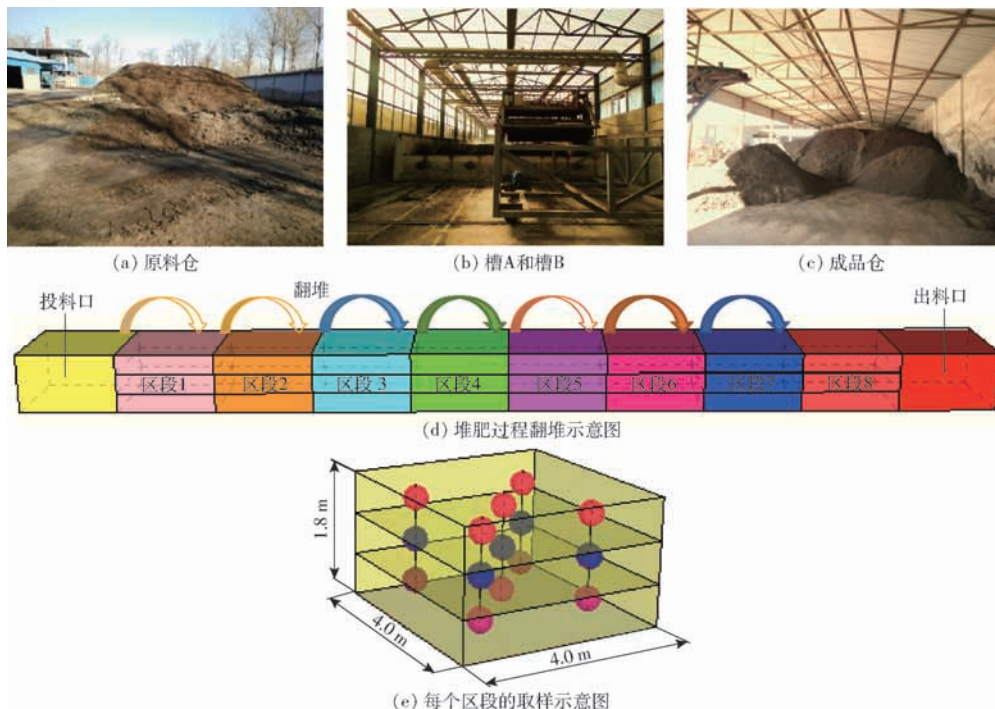


图1 堆肥生产工况及取样示意图

Fig.1 Compost production conditions and schematic of sampling

在成品仓随机采集8个成品。合计采集60个样品,涵盖了堆肥的全过程。每个样品质量约1.0 kg,置于-20℃的冷藏柜中,用于后续的实验室化学分析和在线近红外光谱采集。

1.2 样品实验室化学分析

堆肥过程的关键参数主要有含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比等,参考美国堆肥协会堆肥测定方法(TMECC)^[21],其具体测定方法如表1所示,每个试样取两个平行样进行测定,以其算术平均值作为最终测定结果。

表1 样品实验室化学分析方法

Tab.1 Methods of sample laboratory chemical analysis

参数	测定方法	参考标准
含水率	热风干燥法(75℃,24 h)	TMECC 03.09A
pH值	pH计测定	TMECC 04.11A
电导率	电导率测定仪测定	TMECC 04.10A
有机质质量分数	马弗炉燃烧法(575℃,24 h)	TMECC 03.02A
总碳质量分数	燃烧法,元素分析仪测定	TMECC 04.01A
总氮质量分数	燃烧法,元素分析仪测定	TMECC 04.02A
碳氮比	数学公式计算	TMECC 05.02A

1.3 在线近红外光谱采集

在线近红外光谱仪(图2)为实验室开发的光栅型在线分析近红外光谱仪。采用全息数字式光栅和高灵敏度铟镓砷检测器相结合的光学设计,漫反射模式下进行光谱采集,波长范围为1 000~2 500 nm,光谱分辨率为1 nm,扫描次数为32次,每个样品重新装填3次,取平均光谱作为样品的光谱。

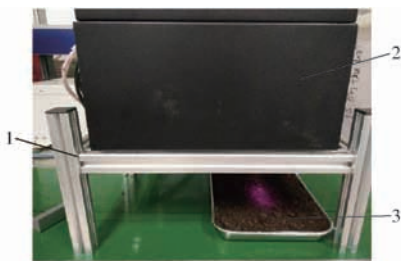


图2 在线近红外光谱采集系统

Fig.2 Online near infrared spectroscopy acquisition system

1. 光谱仪支架 2. 在线近红外光谱仪 3. 堆肥过程样品

1.4 近红外定标模型的建立与评价

采用偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)建立关键参数的在线近红外预测模型。首先根据光谱影响值和化学分析值绝对误差分别对光谱和化学值进行异常值检验,剔除异常样品,结合平滑、标准正态变换和去趋势等预处理方法进行光谱预处理^[22-24],最后采用留一交互验证建立模型,避免模型过拟合。定量分析模型的评价指标主要包括:模型决定系数 R^2 (校正决定系数 R_c^2 和

交互验证决定系数 R_{CV}^2)、校正标准偏差 R_{MSEC} 、交互验证标准偏差 R_{MSECV} 、相对分析误差 R_{PD} 和相对标准偏差 R_{SD} 等。

参考文献[25-26]对模型进行评价,即: $R^2 > 0.9, R_{PD} > 3$,认为该模型效果优秀; $0.82 < R^2 \leq 0.90, 2.0 < R_{PD} \leq 3.0$,认为该模型效果良好; $0.66 < R^2 \leq 0.82, 1.6 \leq R_{PD} \leq 2.0$,模型可进行近似定量预测; $R^2 \leq 0.66, R_{PD} < 1.6$,则认为该模型不可用。并结合 R_{SD} 值进行综合评价,当 $R_{SD} < 5\%$ 时模型效果良好, $R_{SD} < 10\%$ 时模型可用于定量分析。本研究所有数据处理均采用Matlab R2013b。

2 结果与分析

2.1 样品实验室化学分析结果

将每个区段上、中、下3层测量的化学值取平均,其平均值和标准差如表2所示。槽A和槽B为两条工艺相同的生产线,其堆肥过程参数随堆肥时间的变化趋势基本一致。本研究反映的是堆肥厂实际生产过程中关键参数的变化情况,由于每次投料的原料可能存在差异性,使得某些区段存在突变,但总体呈现以下的变化趋势。随着堆肥的进行,堆体的含水率逐渐下降,这是由堆肥过程中温度较高、通风及频繁翻堆引起的^[27],堆肥结束时含水率降低至30%左右,符合有机肥行业标准,便于有机肥的储存和运输。pH值呈上升趋势,这是由于堆肥过程中产生氨气,使得堆体的碱性增强。电导率反映物质中含盐量的高低,由于堆肥过程中微生物的生命活动,大量的有机质被分解,因而堆肥过程中电导率在逐渐下降^[28]。随着堆肥过程中有机质的降解,堆体中的有机质、总碳和总氮的绝对含量在逐渐减少,但由于含水率的明显下降,原样中有机质、总碳和总氮的相对含量增加,其质量分数呈上升趋势。微生物对碳源消耗比氮源多,因而碳氮比呈下降趋势。

由表2还可看出,由于样品采集自堆肥过程的不同发酵阶段,因此,各成分含量的覆盖范围较广,变异性较大,并且覆盖了堆肥的全过程,对于堆肥过程的分析具有很好的代表性,可满足过程检测的要求。

2.2 样品近红外光谱分析

图3为60个畜禽粪便堆肥全过程样品的在线近红外光谱图,光谱信息主要集中在1 300~2 400 nm,在1 450 nm和1 950 nm附近有明显的吸收峰,1 450 nm特征峰为O—H键二级振动,1 950 nm特征峰为O—H键一级振动,都是水的吸收峰^[18]。

表2 堆肥过程样品在各区段的化学值分析结果(鲜基基础)

Tab.2 Chemical value analysis results of samples in each section during composting process

参数	槽	区段							
		1	2	3	4	5	6	7	8
含水率/%	A	45.77 ± 1.36	39.34 ± 1.24	40.95 ± 1.67	38.69 ± 0.24	36.58 ± 1.52	31.36 ± 0.59	29.55 ± 1.44	28.85 ± 1.16
	B	41.61 ± 0.45	33.44 ± 1.47	36.86 ± 0.92	39.66 ± 2.10	36.55 ± 0.99	34.91 ± 1.43	35.39 ± 0.24	31.02 ± 1.09
pH值	A	8.41 ± 0.08	8.65 ± 0.05	8.55 ± 0.04	8.53 ± 0.08	8.61 ± 0.12	8.92 ± 0.01	9.00 ± 0.07	9.13 ± 0.08
	B	8.46 ± 0.05	8.79 ± 0.10	8.55 ± 0.06	8.49 ± 0.06	8.68 ± 0.02	8.75 ± 0.05	8.69 ± 0.06	8.83 ± 0.07
电导率/(mS·cm ⁻¹)	A	8.44 ± 0.32	7.52 ± 0.13	7.73 ± 0.24	7.34 ± 0.27	6.72 ± 0.42	5.61 ± 0.26	6.05 ± 0.29	6.56 ± 0.16
	B	7.55 ± 0.18	6.60 ± 0.11	6.89 ± 0.11	7.30 ± 0.19	6.98 ± 0.18	6.70 ± 0.22	6.65 ± 0.18	6.13 ± 0.22
有机质质量分数/%	A	26.30 ± 0.66	29.21 ± 1.07	28.49 ± 0.77	29.99 ± 0.71	28.85 ± 0.17	30.31 ± 0.96	32.38 ± 1.78	34.77 ± 2.36
	B	23.91 ± 0.74	30.71 ± 1.64	25.89 ± 0.83	28.50 ± 0.52	30.04 ± 0.38	30.45 ± 0.44	30.13 ± 0.45	32.46 ± 0.24
总碳质量分数/%	A	14.06 ± 0.23	15.12 ± 0.64	14.67 ± 0.41	15.61 ± 0.59	15.42 ± 0.79	16.42 ± 0.59	16.76 ± 0.41	17.42 ± 0.26
	B	12.55 ± 0.11	15.55 ± 0.47	13.20 ± 0.34	14.31 ± 0.22	15.81 ± 0.47	16.16 ± 0.29	15.85 ± 0.24	16.81 ± 0.31
总氮质量分数/%	A	0.85 ± 0.04	0.98 ± 0.05	0.91 ± 0.03	1.00 ± 0.03	1.06 ± 0.06	1.21 ± 0.01	1.29 ± 0.02	1.39 ± 0.02
	B	0.76 ± 0.01	1.01 ± 0.04	0.80 ± 0.02	0.87 ± 0.03	1.00 ± 0.04	1.05 ± 0.03	1.05 ± 0.02	1.15 ± 0.03
碳氮比	A	16.64 ± 0.47	15.48 ± 0.38	16.17 ± 0.32	15.57 ± 0.21	14.61 ± 0.12	13.60 ± 0.40	12.99 ± 0.29	12.52 ± 0.03
	B	16.62 ± 0.07	15.35 ± 0.17	16.58 ± 0.15	16.53 ± 0.47	15.84 ± 0.17	15.38 ± 0.16	15.05 ± 0.13	14.64 ± 0.14

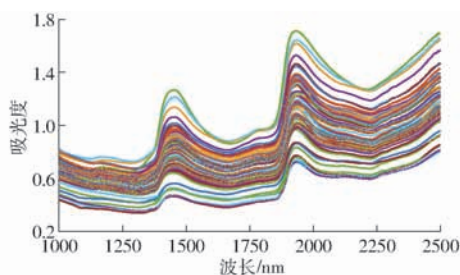


图3 原始样品在线近红外光谱图

Fig.3 Online near infrared spectrometer of original samples

2.3 堆肥全过程关键参数在线近红外定标模型

综合考虑模型评价指标,剔除异常值,选用最优光谱预处理方法和潜变量数建立模型,堆肥过程关

键参数的光谱预处理方法及模型结果如表3所示。从表3可知,含水率和总氮质量分数的 R_C^2 分别为 0.94 和 0.92, R_{PD} 均大于 3, R_{SD} 小于 10%, 模型效果优秀; pH 值的 R_C^2 为 0.9, 虽然 R_{PD} 小于 2, 但 R_{SD} 小于 5%, 因而模型效果也非常理想; 总碳质量分数和碳氮比的 R_C^2 分别为 0.83 和 0.82, R_{PD} 大于 2, R_{SD} 小于 10%, 模型效果良好; 电导率和有机质质量分数的 R_C^2 分别为 0.79 和 0.80, R_{PD} 大于 1.6, R_{SD} 小于 10%, 模型可近似定量预测, 但精度有待提高。本研究结果与文献[12,14]基于实验室近红外光谱的结果相比较, 模型效果相当, 可实现堆肥全过程参数的快速检测。

表3 在线近红外光谱仪定量预测模型结果

Tab.3 Quantitative prediction model results of online near infrared spectrometer

关键参数	潜变量数	光谱预处理方法	R_C^2	R_{MSEC}	R_{CV}^2	R_{MSECV}	R_{PD}	$R_{SD}/\%$
含水率	3	自动标尺化	0.94	2.19%	0.92	2.40%	3.62	6.73
pH值	4	标准正态变换,去趋势,自动标尺化	0.90	0.08	0.88	0.09	1.89	1.03
电导率	4	标准正态变换,自动标尺化	0.79	0.35 mS/cm	0.71	0.41 mS/cm	1.85	6.00
有机质质量分数	5	标准正态变换,去趋势,平滑,自动标尺化	0.80	1.45%	0.73	1.69%	1.93	5.72
总碳质量分数	4	标准正态变换,平滑,自动标尺化	0.83	0.59%	0.78	0.68%	2.12	4.42
总氮质量分数	4	标准正态变换,去趋势,平滑,自动标尺化	0.92	0.06%	0.90	0.07%	3.14	6.48
碳氮比	3	标准正态变换,去趋势,平滑,自动标尺化	0.82	0.70	0.78	0.78	2.15	5.31

图4为堆肥全过程关键参数的近红外预测值和化学测量值的散点图及随堆肥时间的变化趋势图。散点图可以直观反映模型的效果,拟合线和45°线的重合度越高,模型效果越好。散点图不仅反映了近红外的模型效果,还反映了堆肥过程中关键参数的变化,并且近红外预测值与实际测量值的变化趋势具有较好的一致性。如图4a,绿色正方形点为发酵槽A中8个区段的样品,蓝色三角点为发酵槽B

中8个区段的样品,与图4b中的点是一一对应的,反映了随着堆肥的进行,堆体中的含水率在逐渐下降,从图4b可以看出,近红外预测值与实际测量值之间的偏差很小,说明含水率预测结果准确性很高。pH值和总氮质量分数(图4d和图4l)也有较理想的结果。由图4e和图4g可知,电导率和有机质质量分数的模型效果一般,精度有待提高,其模型散点图中拟合线和45°线的重合度较低,近红外预测值

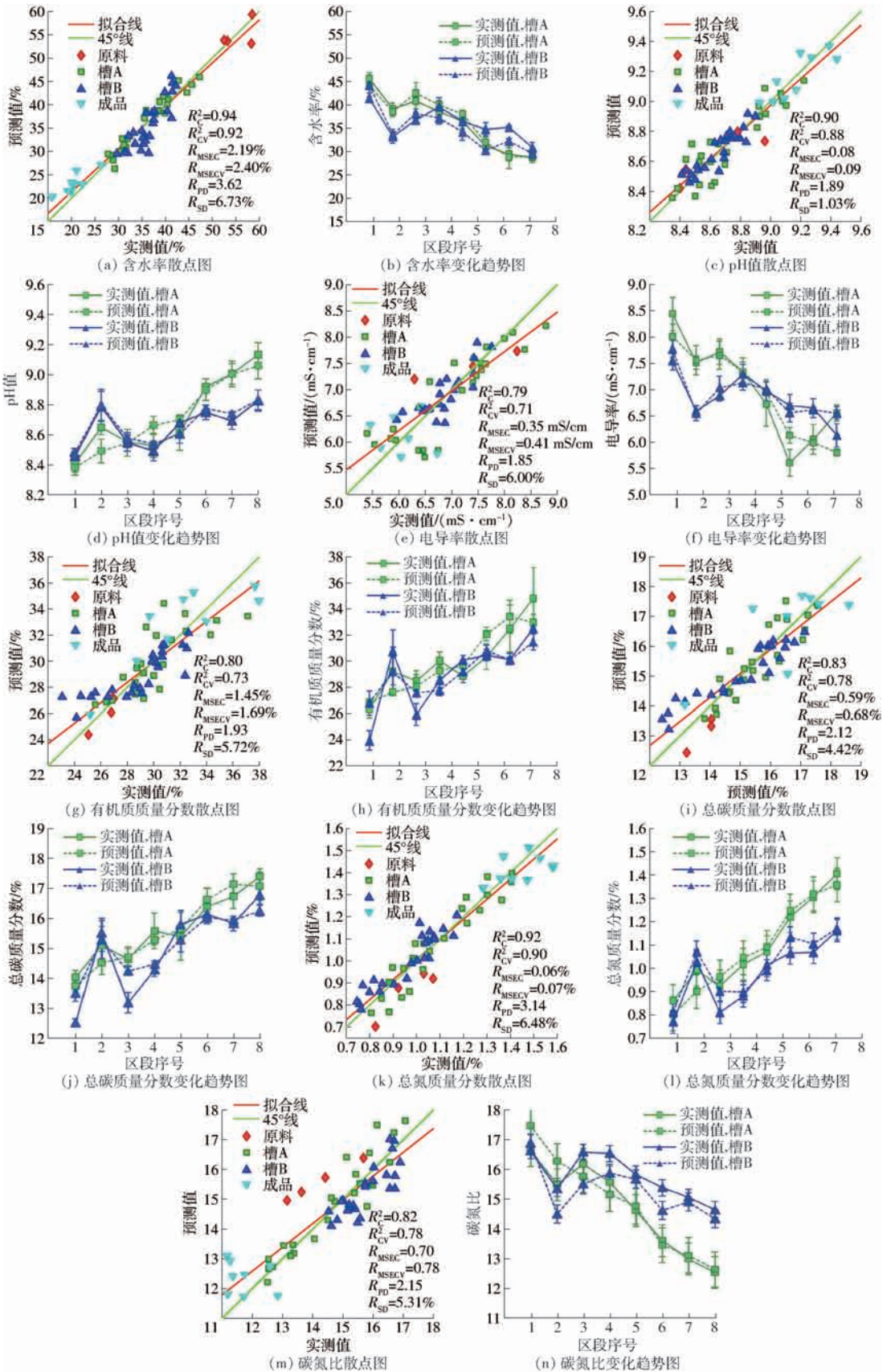


图4 堆肥过程关键参数的近红外预测值与实际测量值的散点图以及随堆肥时间的变化趋势

Fig.4 Scatter plots of NIR-prediction and measured values of key parameters in composting process and their changing trends as composting process progressed

与实际测量值之间的偏差较大(图4f和图4h),但它们的近红外预测值与实际测量值随堆肥时间的变

化趋势是一致的。以上结果表明了在线近红外光谱可以检测堆肥全过程的关键参数。

3 结束语

以60个畜禽粪便有机肥生产全过程样品为研究对象,探索基于在线近红外光谱对堆肥全过程含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比等关键参数进行实时分析的可行性。结果表明:在线近红外光谱仪可实现含水率、pH值、电导率、有机质质量分数、总碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比的预测($R_{SD} < 10\%$),

含水率和总氮质量分数的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为 0.94 和 3.62、0.92 和 3.14,模型效果优秀;pH值、总碳质量分数和碳氮比的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为 0.90 和 1.89、0.83 和 2.12、0.82 和 2.15,模型效果良好;电导率和有机质质量分数的 R_C^2 和 R_{PD} 分别为 0.79 和 1.85、0.80 和 1.93,模型效果一般,模型精度有待提高。各参数近红外预测值与实际测量值之间的偏差很小,并且近红外预测值与实际测量值随堆肥时间的变化趋势具有较好的一致性。

参 考 文 献

- [1] MA S, FANG C, SUN X, et al. Bacterial community succession during pig manure and wheat straw aerobic composting covered with a semi-permeable membrane under slight positive pressure[J]. *Bioresour. Technol.*, 2018, 259:221–227.
- [2] MAIA G D, GATES R S, TARABA J L, et al. Moisture effects on greenhouse gases generation in nitrifying gas-phase compost biofilters[J]. *Water Res.*, 2012, 46(9):3023–3031.
- [3] MAKAN A, ASSOBHEI O, MOUNTADAR M. Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco[J]. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2013, 10(1):3.
- [4] LOPEZ-GONZALEZ J A, LOPEZ M J, VARGAS-GARCIA M C, et al. Tracking organic matter and microbiota dynamics during the stages of lignocellulosic waste composting[J]. *Bioresour. Technol.*, 2013, 146:574–584.
- [5] ZHANG Y, LASERMES G, HOUOT S, et al. Modelling of organic matter dynamics during the composting process[J]. *Waste Manage.*, 2012, 32(1):19–30.
- [6] SCHUCHARDT F. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting[J]. *J. Environ. Sci.*, 2011, 23(10):1754–1760.
- [7] RUI G, LI G, TAO J, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresour. Technol.*, 2012, 112:171–178.
- [8] KHAN E, KHAODHIR S, RUANGROTE D. Effects of moisture content and initial pH in composting process on heavy metal removal characteristics of grass clipping compost used for stormwater filtration[J]. *Bioresour. Technol.*, 2009, 100(19):4454–4461.
- [9] SUNDBERG C, DAN Y, FRANKWEHITTLE I, et al. Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting[J]. *Waste Manage.*, 2013, 33(1):204–211.
- [10] 卞正岗. 流程工业分析技术及分析仪表的发展[J]. *中国仪器仪表*, 2008(5):34–39.
BIAN Zhenggang. The development of analysis technology and analytical instrument for process industry [J]. *China Instrumentation*, 2008(5):34–39. (in Chinese)
- [11] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京:中国石油化工出版社, 2007.
- [12] ALBRECHT R, JOFFRE R, LE P J, et al. Calibration of chemical and biological changes in co-composting of biowastes using near-infrared spectroscopy[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, 43(3):804–811.
- [13] VERGNOUX A, GIULIANO M, DREAU Y L, et al. Monitoring of the evolution of an industrial compost and prediction of some compost properties by NIR spectroscopy[J]. *Sci. Total Environ.*, 2009, 407(7):2390–2403.
- [14] GALVEZ-SOLA L, MORAL R, PEREZMURCIA M D, et al. The potential of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of agrindustrial compost quality[J]. *Sci. Total Environ.*, 2010, 408(6):1414–1421.
- [15] HUANG G, HAN L, YANG Z, et al. Evaluation of the nutrient metal content in Chinese animal manure compost using near infrared spectroscopy (NIRS) [J]. *Bioresour. Technol.*, 2008, 99(17):8164–8169.
- [16] 彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(3):347–353.
PENG Yankun, YANG Qinghua, WANG Wenxiu. On-line detection and classification of pork moisture based on near-infrared spectra[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3):347–353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180343&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.043. (in Chinese)
- [17] 孙旭东, 刘燕德, 李铁凡, 等. 鸭梨黑心病和可溶性固形物含量同时在线检测研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):227–233.
SUN Xudong, LIU Yande, LI Yifan, et al. Simultaneous and online detection of blackheart and soluble solids content for ‘Yali’ pear by visible-near infrared transmittance spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):227–233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160130&journalid=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.030. (in Chinese)

- [17] 刘凯. 核机器学习在地图自动综合中的道路网智能选取研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
LIU Kai. Research on intelligent selection of road network automatic generalization based on kernel-based machine learning [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)
- [18] MAJI S, BERG A C, MALIK J. Classification using intersection kernel support vector machines is efficient [C] // IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2008.
- [19] 魏丽冉, 岳峻, 李振波, 等. 基于核函数支持向量机的植物叶部病害多分类检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 166-171.
WEI Liran, YUE Jun, LI Zhenbo, et al. Multi-classification detection method of plant leaf disease based on kernel function[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 166-171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s027&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.027. (in Chinese)
- [20] 张新林, 谢晶, 郝楷, 等. 不同低温条件下三文鱼的品质变化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(17): 316-321.
ZHANG Xinlin, XIE Jing, HAO Kai, et al. Effects of different cold storage conditions on quality of salmon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(17): 316-321. (in Chinese)
- [21] 丁婷. 三文鱼新鲜度综合评价和货架期模型的建立[D]. 锦州: 渤海大学, 2015.
DING Ting. Comprehensive evaluation of freshness and establishment of the shelf-life model of salmon[D]. Jinzhou: Bohai University, 2015. (in Chinese)
- [22] 包海蓉, 张奎. 不同冷藏温度对生鲜三文鱼品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 344-347.
BAO Hairong, ZHANG Kui. Effect of different refrigeration temperatures on quality changes of fresh salmon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 344-347. (in Chinese)
- [23] 奉轲, 花中秋, 伍萍辉, 等. 用于检测糖尿病标志物的电子鼻优化设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 13-18.
FENG Ke, HUA Zhongqiu, WU Pinghui, et al. Optimal design of electronic nose for detecting diabetes markers[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 13-18. (in Chinese)
- [24] KUANG F J, ZHANG S Y, JIN Z, et al. A novel SVM by combining kernel principal component analysis and improved chaotic particle swarm optimization for intrusion detection[J]. Soft Computing, 2015, 19(5): 1187-1199.
- [25] 赵丽娟, 王慧琴, 王可, 等. 基于多核支持向量回归的光谱反射率重建方法[J]. 液晶与显示, 2018, 33(12): 1008-1018.
ZHAO Lijuan, WANG Huiqin, WANG Ke, et al. Spectral reflectance reconstruction based on multi-kernel support vector regression[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(12): 1008-1018. (in Chinese)

(上接第 361 页)

- [18] 沈广辉, 刘贤, 张月敬, 等. 基于在线近红外光谱快速检测玉米籽粒主要品质参数的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(1): 105-109.
- [19] 薛俊杰, 韩鲁佳, 杨增玲, 等. 玉米秸秆饲料营养成分 NIRS 在线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 216-223.
XUE Junjie HAN Lujia YANG Zengling, et al. On-line measurement of nutrient content of corn stover using NIRS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 216-223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160730&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.030. (in Chinese)
- [20] XUE J, YANG Z, HAN L, et al. On-line measurement of proximates and lignocellulose components of corn stover using NIRS [J]. Appl. Energy., 2015, 137: 18-25.
- [21] United States Composting Council (USCC), the US Department of Agriculture. Test methods for the examination of composting and compost[M]. New York: US Composting Council, 2002.
- [22] 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.
- [23] MODROÑO S, SOLDADO A, MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ A, et al. Handheld NIRS sensors for routine compound feed quality control: real time analysis and field monitoring[J]. Talanta, 2017, 162: 597-603.
- [24] SISOUANE M, CASCANT M M, TAHIRI S, et al. 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.
- [25] PREECE S L M, AUVERMANN B W, MACDONALD J C, et al. Predicting the heating value of solid manure with visible and near-infrared spectroscopy[J]. Fuel, 2013, 106(2): 712-717.
- [26] WILLIAMS P. Near-infrared technology-getting the best out of light[M]. Nanaimo: PDK Grain, 2007.
- [27] HE X, CHEN L, HAN L, et al. Evaluation of biochar powder on oxygen supply efficiency and global warming potential during mainstream large-scale aerobic composting in China[J]. Bioresour. Technol., 2017, 245, Part A: 309-317.
- [28] 马双双, 孙晓曦, 韩鲁佳, 等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 344-349.
MA Shuangshuang, SUN Xiaoxi, HAN Lujia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 344-349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171142&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.042. (in Chinese)