

基于机器学习的鸡、牛骨颗粒 Micro-CT 原位可视化鉴别

朱 瀛 高 冰 史卓林 解茹越 刘 贤 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 不同种属动物源肉骨粉的快速鉴别分析技术是加强饲料监管、防范疯牛病传播的重要保障。为了探索使用显微 X 射线计算机断层成像技术 (Micro-computed tomography, Micro-CT) 快速鉴别分析不同种属动物源肉骨粉的可行性,本研究以制备的哺乳动物源牛骨颗粒和非哺乳动物源鸡骨颗粒各 100 个作为样品集,以不同相对位置鸡、牛骨颗粒以及鸡骨颗粒中牛骨颗粒质量分数约 0.97% 分别制备验证集,使用 Bruker Skyscan 1275 Micro-CT 对所有样品进行扫描和图像重构(管电压 80 kV、管电流 125 μ A,图像分辨率 10 μ m,重构灰度图像灰度阶为 0~255,对应 X 射线吸收系数为 0~0.035);提取不同骨颗粒样品的感兴趣区域进行图像分割,并结合 PLS-DA 和 SVM-DA 机器学习算法分别构建鸡和牛骨颗粒分割模型。研究结果表明,鸡、牛骨颗粒图像分割感兴趣区域灰度区间为 165~255,基于 PLS-DA 和 SVM-DA 模型的鸡、牛骨颗粒鉴别交互验证总准确率均为 94%,验证集样品的 Micro-CT 三维原位可视化表征结果经验证与样品实际结果一致。结果表明,Micro-CT 结合 PLS-DA 和 SVM-DA 机器学习算法进行哺乳和非哺乳动物源骨颗粒的鉴别分析是可行的。本研究为不同种属动物源饲料的快速、无损鉴别提供了新的三维原位可视化表征手段。

关键词: 动物源骨颗粒; 鉴别; Micro-CT; 三维原位可视化; 机器学习

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0394-05 OSID: 

Machine Learning Based 3D in Situ Visual Discriminant Analysis of Mammalian and Non-mammalian Bone Meals by Micro-CT

ZHU Ying GAO Bing SHI Zhuolin XIE Ruyue LIU Xian HAN Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Rapid discriminant analysis of meat and bone meal from different animal origin species is an important guarantee to strengthen feed supervision and prevent the spread of BSE disease. In order to explore the feasibility of using advanced micro-computed tomography (Micro-CT) to rapidly identify and analyze meat and bone meal from different species of animals, a calibration sample set and two validation sample sets consisted of different amount of avian origin and bovine bone particles were prepared. The Bruker Skyscan 1275 Micro-CT system was used to build method for 3D in situ visual characterization. The Micro-CT conditions for sample scanning and images reconstructing were: tube voltage of 80 kV, tube current of 125 μ A, image resolution of 10 μ m, reconstructed gray-scale image of from 0 to 255, and the corresponding X-ray absorption coefficient was from 0 to 0.035. The regions of interest of different bone particle samples were extracted for image segmentation. Combined with PLS-DA and SVM-DA machine learning algorithms, avian origin and bovine origin bone particle image segmentation models were constructed, respectively. Finally, the Micro-CT in situ 3D visual discriminant analysis of avian origin and bovine bone particles were carried out. The main results were as follows: the gray range of the regions of interest for image segmentation of chicken and bovine bone particles was 165~255. The total accuracy of cross validation of chicken and bovine bone particles based on PLS-DA and SVM-DA models was 94%. The Micro-CT 3D in situ visualization results of the verification set samples were verified to be consistent with the actual results of the samples. The

收稿日期: 2022-06-24 修回日期: 2022-07-14
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业(奶牛)产业技术体系建设专项(CARS-36)和教育部创新团队发展计划项目(IRT1293)
作者简介: 朱瀛(1990—),男,博士生,主要从事动植物源饲料 Micro-CT 快速分析方法研究,E-mail: zhuy@cau.edu.cn
通信作者: 韩鲁佳(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事农业生物质工程研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

verification results showed that the established Micro-CT 3D in situ visual discriminant analysis method achieved very consistent results with that of the actual samples. The research result can provide an imaging methodology for 3D in situ visual discriminant analysis for rapid and non-invasive identification of different species of animal origin material in feed.

Key words: animal-derived bone; discriminant; Micro-CT; 3D in situ visualization; machine learning

0 引言

朊病毒,是牛海绵状脑病(俗称疯牛病)、羊瘙痒病和人克雅氏病等传染性海绵状脑病的致病因子。感染这类病毒会致人畜脑组织海绵化,进而引发神经系统紊乱,直至最终死亡。由于尚无有效的治愈方法,只能依靠阻断致病因子传播降低这类疾病的发生。相关研究已证实,肉骨粉作为朊病毒传播的重要载体,经饲料—动物—人食物链感染人畜^[1]。

肉骨粉是以肉品加工厂和畜禽屠宰场中的碎骨、碎肉和内脏等为原料经高温灭菌、脱脂和粉碎后制得的高蛋白产品^[2],其氨基酸组成平衡,富含钙、磷等重要营养元素,曾在饲料行业得到广泛应用^[3]。快速、有效的不同种属肉骨粉的检测技术是饲料安全领域的一项重要课题,与人类和动物的健康安全息息相关。

目前,肉骨粉的检测方法主要有:基于组织学结构特征的显微镜检测法^[4]、基于 DNA 分析的聚合酶链反应法^[5]和基于官能团特征的各类光谱分析法^[6-9]等。虽然这些方法得到了一定的实际应用,但优缺点各异,持续提高方法的精密度、操作的鲁棒性仍是重要研究方向。

显微 X 射线计算机断层成像(Micro-computed tomography, Micro-CT)是一种先进的快速、无损、高分辨率(高达几微米)显微原位三维断层成像技术。Micro-CT 根据待测样品密度不同其 X 射线吸收率亦然不同,利用 X 射线照射在进行 360°匀速旋转的样品,获取二维的投影图像,通过对这些二维图像进行大量的计算和重构生成样品的数字三维结构,实现样品的三维原位、可视化表征^[10-12]。基于 Micro-CT 的分析技术目前已在医学^[13-15]、食品^[16-18]、地质^[19]、材料^[20]和农业^[21-22]等多个领域得到研究和应用。

Micro-CT 输出的灰度图像反映的是样品对 X 射线的衰减程度,当 X 射线能量一定时,某一像素点的样品密度越大则其对 X 射线的衰减越大,对应于灰度图像中的灰度值就越大^[23]。理论而言,不同种属的骨颗粒样品在蛋白质、脂肪和骨质的组成和含量上存在差异,利用 Micro-CT 进行不同种属骨

颗粒的分析是可行的。但是,由于不同种属骨颗粒质构差异过于微小,其对应获取的灰度图像相似度高,这是基于 Micro-CT 对其进行有效分析所面临的主要挑战。机器学习算法是解析相似成像的重要工具^[24-27]。在分类学习上,偏最小二乘判别分析法(Partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)和支持向量机判别分析法(Support vector machine-discriminant analysis, SVM-DA)是两种典型的机器学习算法,PLS-DA 是一种基于偏最小二乘回归模型的多元分析技术,其目的是通过降低数据集的维度获取新的潜变量对原数据集进行描述;SVM-DA 法则相反,其解决的是不能依靠超平面分类的非线性问题,SVM 采用映射方法将其映射到更高维的空间,并求得最佳区分各类样本点的超平面方差,作为判别未知样本的依据^[28-29]。为此,本研究选择哺乳动物源牛骨颗粒和非哺乳动物源鸡骨颗粒为对象,深入开展基于机器学习的不同种属骨粉的 Micro-CT 三维原位可视化分析方法研究。

1 样品制备与处理

1.1 鸡和牛源骨颗粒样品制备

本研究所有鸡和牛骨颗粒样品均来自中国农业大学生物质资源利用工程实验室饲料样品库。所有样品经加热、干燥、脱脂(133℃, 20 min, 300 kPa)处理后,使用配备 0.5 mm 孔径的超离心研磨机(ZM200, Retsch, Haan, 德国)进行研磨制成骨粉,冷藏于-20℃冰柜,备用^[30-31]。

样品集:分别随机选取制备的鸡骨颗粒和牛骨颗粒样品各 100 个,用于 Micro-CT 扫描与分析方法的构建。

验证集 1:用于验证不同种属颗粒在不同相对位置情况下成像分割效果,分别随机选取鸡骨颗粒样品 12 个、牛骨颗粒样品 6 个。将样品按照不同方式进行摆放,以模拟两类样品混合时存在的 3 种不同形式(图 1a),即:鸡、牛骨颗粒分离;鸡、牛骨颗粒左右紧密相邻;鸡、牛骨颗粒上下覆盖,下方 4 个鸡骨颗粒,上方 1 个牛骨颗粒。每种形式平行设置重复 1 次。

验证集 2:用于验证在极低掺杂量情况下的所提方法的可行性。随机选取牛骨颗粒样品 9 个,经

精确称量其质量为 0.33 mg;另随机选取鸡骨颗粒样品,经精确称量其质量为 33.86 mg。将鸡骨颗粒随机覆盖在摆放成 X 形状的牛骨颗粒周围和上方(图 1b)。验证集 2 中牛骨颗粒在鸡骨颗粒中的含量约为 0.97%。

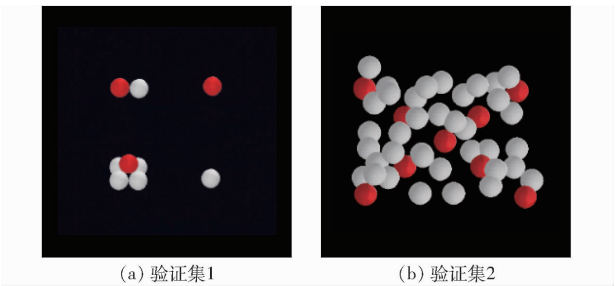


图 1 验证集中鸡骨颗粒和牛骨颗粒样品相对位置示意图(红色为牛骨颗粒,白色为鸡骨颗粒)
Fig. 1 Relative positions of chicken and bovine bone particles in validation sample sets (red represented bovine bone particle and white represented chicken bone particles)

1.2 Micro-CT 及其扫描与重构条件

使用 Bruker Skyscan 1275 Micro-CT (Bruker Skyscan, 比利时)对样品进行扫描。

根据前期与预研究成果, Micro-CT 扫描条件确定为:电压和电流为 80 kV、125 μ A, 360°扫描、图像分辨率为 10 μ m、旋转步长 0.20°(每个步长提取 2 帧图像取平均值作为结果)、曝光时间 46 ms。

Micro-CT 图像重构条件确定为:环形伪影矫正系数为 3,射线硬化矫正系数为 30%,图像平滑系数为 1。所有样品图像均在 X 射线吸收系数为 0 ~ 0.035 范围内进行重构,得到灰度阶为 0 ~ 255 的 8 位 BMP 图像^[32]。

1.3 骨颗粒 Micro-CT 图像分割方法

1.3.1 感兴趣区域(ROI)提取

按照上述扫描和重构条件,使用 Micro-CT 对样品集中的所有样品进行扫描,使用 Bruker CTan (Bruker Skyscan, 比利时)软件分别获取鸡骨颗粒

和牛骨颗粒样品的断层图像。由于 Micro-CT 处理样品后输出灰度阶为 0 ~ 255,采用 Matlab R2015a 中的全局阈值分割法扣除所获断层图像中的背景信息,并采用 K-means 聚类方法对每个骨颗粒的断层图像进行阈值分割。基于骨颗粒样品断层灰度图像,确定建立图像分割模型的感兴趣区域。

1.3.2 PLS-DA 和 SVM-DA 机器学习算法的鸡、牛骨颗粒样品图像分割模型构建

按照 1.3.1 节方法提取样品集 1 中的所有颗粒样品断层图像的感兴趣区域,然后获取其区域内的灰度分布数据集。

本研究将上述灰度分布数据集中不同种属骨颗粒样品的 Micro-CT 图像在各个灰度阶的占比作为特征向量,在 Matlab R2015a 及 PLS-Toolbox 平台上,创建基于 PLS-DA 和 SVM-DA 的鸡、牛骨颗粒图像分类模型。使用总准确率(Total accuracy)、敏感性(Sensibility)、特异性(Specificity)和分类误差(Classification error)4 个参数进行模型评价,其中,总准确率为所有样品正确分类的比率^[33]。

1.4 鸡、牛骨颗粒的 Micro-CT 三维原位可视化

使用建立的 PLS-DA 和 SVM-DA 机器学习算法对验证集不同种属骨颗粒样品所有断层图像进行处理,使用 Dataviewer (Bruker Skyscan, 比利时)软件可视化表征样品的断层图像,使用 CTan (Bruker Skyscan, 比利时)对断层图像进行渲染,其中牛骨颗粒渲染为红色,鸡骨颗粒渲染为白色。

2 结果与讨论

2.1 鸡和牛骨颗粒感兴趣区域提取结果

图 2 为鸡和牛骨颗粒样品的断层图像原始灰度图和 K-means 阈值分割图像。可以看出样品经 K-means 阈值分割后呈现 3 个不同的灰度区域,边缘区域均为灰度值最小的区间、中心区域为灰度

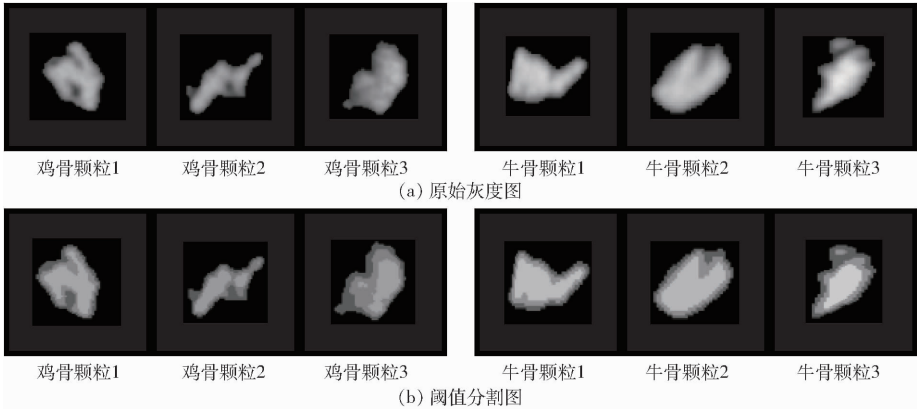


图 2 鸡和牛骨颗粒样品断层图像原始灰度图和 K-means 阈值分割图

Fig. 2 Gray scale image and K-means threshold segmentation image of chicken and bovine bone samples

值最大的区间,且样品最大灰度位于 165 ~ 255 灰度区间。基于这一发现,为去除颗粒样品边缘区域对后续图像分割带来的不利影响,本研究将灰度区间 165 ~ 255 作为建立图像分割模型的感兴趣区域。

2.2 样品集鸡、牛骨颗粒图像分割模型交互验证结果

表 1 为使用样品集样品(鸡、牛骨颗粒样品各 100 个)分别建立的 PLS-DA 和 SVM-DA 模型的交互验证结果。由表 1 可以看出,无论 PLS-DA 模型还是 SVM-DA 模型,均取得了较好的分析结果,交互验证总准确率均为 94%,分类误差均为 6%,两种机器学习算法均可用于鸡、牛骨颗粒样品 Micro-CT 图像的分类识别。

表 1 PLS-DA 和 SVM-DA 模型交互验证结果

Tab.1 Cross validation results of PLS-DA and SVM-DA models

模型	样品集	敏感性	特异性	分类误差	总准确率
PLS-DA	鸡骨颗粒	94	94	6	94
	牛骨颗粒	94	94	6	
SVM-DA	鸡骨颗粒	93	95	6	94
	牛骨颗粒	95	93	6	

2.3 基于 PLS-DA 和 SVM-DA 的鸡、牛骨颗粒 Micro-CT 原位三维可视化表征结果

图 3 和图 4 分别为基于 PLS-DA 和 SVM-DA 的验证集 1 鸡、牛骨颗粒的 Micro-CT 分析结果。

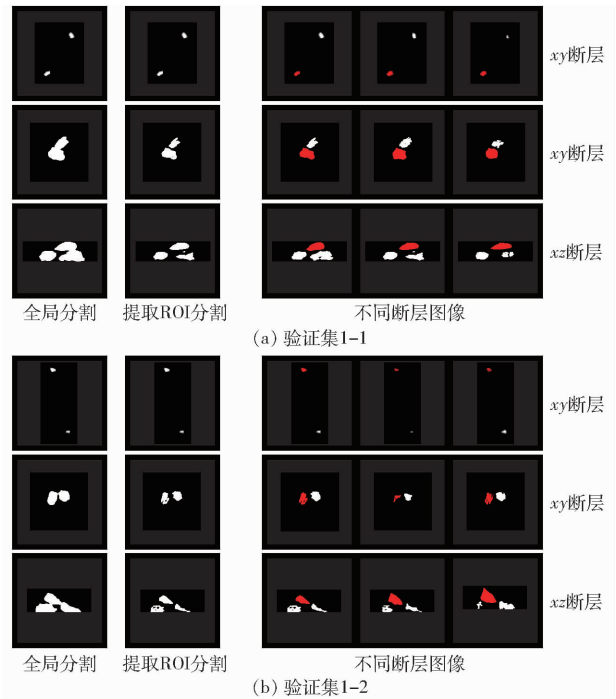


图 3 基于 PLS-DA 模型的鸡、牛骨颗粒 Micro-CT 原位三维可视化分析结果

Fig.3 Results of Micro-CT 3D in situ visualization of chicken and bovine bone particles based on PLS-DA

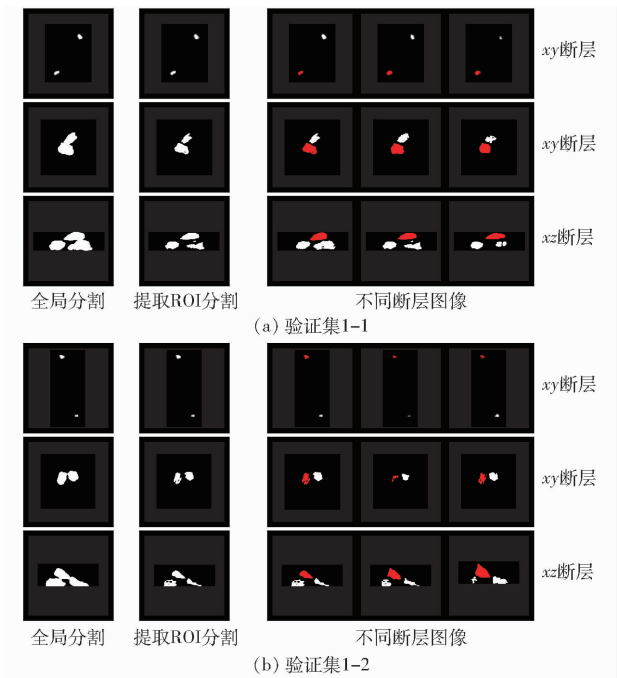


图 4 基于 SVM-DA 模型的鸡、牛骨颗粒 Micro-CT 原位三维可视化分析结果

Fig.4 Results of Micro-CT 3D in situ visualization of chicken and bovine bone particles based on SVM-DA

由图 3 和图 4 可以看出,采用 PLS-DA 和 SVM-DA 模型的分析结果一致,且 Micro-CT 三维原位表征结果与验证集 1 样品的实际结果相同。此外,在鸡和牛骨颗粒分离放置情况下,无需提取感兴趣区域直接进行全局分割图像处理即可;在鸡和牛骨颗粒紧密相邻和重叠放置情况下,仅采用全局图像分割处理获得的样品成像存在重合,而提取感兴趣区域后获得的成像中不同颗粒样品实现了有效分割,可清晰获得不同颗粒样品的有效成像信息。进一步的 Micro-CT 断层成像结果显示,将提取感兴趣区域处理的样品成像信息用于后续三维原位可视化表征,均取得了与实际结果一致的理想分析结果。

图 5 为验证集 2 样品的 Micro-CT 原位三维可视化分析结果。由图 5 可以看出,采用全局分割处理后的断层呈现鸡骨颗粒和牛骨颗粒密集聚集在一起,无法直接识别。提取感兴趣区域后再经 PLS-DA 或 SVM-DA 图像分割模型处理后,即实现了不同种属骨颗粒的清晰识别。对比样品集 2 中样品的实际结果, Micro-CT 三维可视化表征结果与样品集 2 的实际结果非常一致,即 9 个牛骨颗粒全部识别出,正确率 100%。表明,使用 Micro-CT 可以实现对鸡骨颗粒中含量低至约 1% 的牛骨颗粒的准确鉴别。

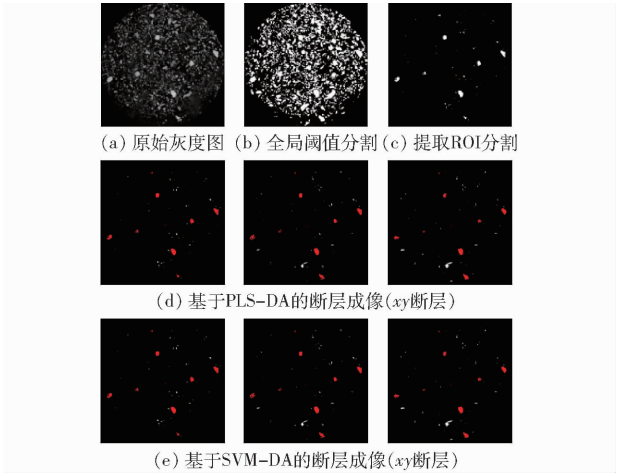


图5 基于 PLS-DA 和 SVM-DA 的鸡、牛骨颗粒
Micro-CT 原位三维可视化分析结果

Fig.5 Results of Micro-CT 3D in situ visualization of
chicken and bovine bone particles based on PLS-DA
and SVM-DA

3 结束语

提出了一种基于 PLS-DA 和 SVM-DA 的哺乳和非哺乳动物骨颗粒的 Micro-CT 三维原位可视化表征方法。Micro-CT 扫描条件为:电压和电流为 80 kV、125 μ A,360°扫描,图像分辨率为 10 μ m、旋转步长 0.20°(图像 2 帧取平均),曝光时间 46 ms;图像重构条件为:环形伪影校正系数为 3,射线硬化校正系数为 30%,图像平滑系数为 1,样品图像均在 X 射线吸收系数为 0~0.035 范围内进行重构;以灰度区间 165~255 提取样品感兴趣区域。经验证, Micro-CT 三维原位可视化表征结果与样品实际结果一致。研究表明,利用 Micro-CT 技术进行不同种属动物源骨颗粒的鉴别分析是可行的。本研究为不同种属动物源饲料的快速、无损鉴别提供了新的三维原位可视化表征手段。

参 考 文 献

[1] HILL A, DESBRUSLAIS M, JOINER S, et al. The same prion strain causes vCJD and BSE[J]. Nature, 1997, 389: 448-450.

[2] LECRENIER M, VEYS P, FUMIE R E O, et al. Official feed control linked to the detection of animal byproducts: past, present, and future[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8093-8103.

[3] CASCAROSA E, BECKER J, FERRANTE L, et al. Pyrolysis of meat-meal and bone-meal blends in a mechanically fluidized reactor[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 91(2): 359-367.

[4] 全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中动物源性成分检测 显微镜法: NY/T 3002—2016[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016.

[5] HAN Y H, HAN L J, YAO Y M, et al. Key factors in FTIR spectroscopic analysis of DNA: the sampling technique, pretreatment temperature and sample concentration[J]. Analytical Methods, 2018, 10(21): 2436-2443.

[6] GAO B, XU X D, HAN L J, et al. A novel near infrared spectroscopy analytical strategy for meat and bone meal species discrimination based on the insight of fraction composition complexity[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128645.

[7] GAO F, HAN L J, YANG Z L, et al. Technical note: characterization of lipid constitution in Fourier transform infrared spectra and spectroscopic discrimination of animal-derived feedstuffs from different species[J]. Journal of Animal Science, 2017, 95(6): 2794-2800.

[8] GAO F, XU L Z, ZHANG Y J, et al. Analytical Raman spectroscopic study for discriminant analysis of different animal-derived feedstuff; understanding the high correlation between Raman spectroscopy and lipid characteristics[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 989-996.

[9] GAO F, ZHOU S M, HAN L J, et al. A novel FT-IR spectroscopic method based on lipid characteristics for qualitative and quantitative analysis of animal-derived feedstuff adulterated with ruminant ingredients[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 342-349.

[10] DU PLESSIS A, BROECKHOVEN C, GUELPA A, et al. Laboratory X-ray micro-computed tomography: a user guideline for biological samples[J]. GigaScience, 2017, 6(6): 1-11.

[11] KALENDER W. X-ray computed tomography[J]. Physics in Medicine and Biology, 2006, 51(13): 29-43.

[12] LANDIS E, KEANE D. X-ray microtomography[J]. Materials Characterization, 2010, 12(61): 1305-1316.

[13] FENG T, GE Y, XIE Y, et al. Detection of collagen by multi-wavelength photoacoustic analysis as a biomarker for bone health assessment[J]. Photoacoustics, 2021, 24: 100296.

[14] KENNETH M C, YEUNG K W, LAM K O, et al. A biodegradable polymer-based coating to control the performance of magnesium alloy orthopaedic implants[J]. Biomaterials, 2010, 31(8): 2084-2096.

[15] MA S, LI J, GUO Y, et al. Three-dimensional radiographic and histological tracking of rat mandibular defect repair after inferior alveolar nerve axotomy[J]. Arch. Oral. Biol., 2021, 131: 105252.

[16] SCHOEMAN L, WILLIAMS P, DU PLESSIS A, et al. X-ray micro-computed tomography (μ CT) for non-destructive characterisation of food microstructure[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 47: 10-24.

[17] VAN RAAMSDONK L, PRINS T W, MEIJER N, et al. Bridging legal requirements and analytical methods: a review of monitoring opportunities of animal proteins in feed[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2019, 36(1): 46-73.

[18] VICENT V, VERBOVEN P, NDOYE F, et al. A new method developed to characterize the 3D microstructure of frozen apple using X-ray Micro-CT[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 154-164.

[39] 张俊江,徐立友,刘孟楠. 增程式电动拖拉机阈值调整控制策略设计[C]//第十三届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集,2016:366-370.
ZHANG Junjiang, XU Liyou, LIU Mengnan. Threshold adjustment control strategy design for extended-range electric tractors [C] // Proceedings of the 13th Henan Province Automotive Engineering Technology Symposium, 2016: 366 - 370. (in Chinese)

[40] 胡悦. 混合动力电动汽车控制系统设计与能量管理策略研究[D]. 深圳: 中国科学院大学(深圳先进技术研究院), 2018.
HU Yue. Research on control system design and energy management strategy of hybrid electric vehicle [D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences(Shenzhen Institutes of Advanced Technology), 2018. (in Chinese)

[41] 施德华. 功率分流式混合动力汽车能量管理系统混杂动态建模与优化控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
SHI Dehua. Research on hybrid dynamic modeling and optimal control of the energy management system for power split hybrid electric vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[42] WANG Z, ZHOU J, WANG X, et al. Design and verification of a modular reconfigurable test platform for electric tractors[J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(4): 1881.

[43] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 412-420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412 - 420. (in Chinese)

(上接第 398 页)

[19] MOONEY S J, PRIDMORE T P, HELLIWELL J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil [J]. Plant and Soil, 2012, 352(1-2): 1-22.

[20] JACQUIN P, LONGUETAUD F, LEBAN J, et al. X-ray microdensitometry of wood: a review of existing principles and devices [J]. Dendrochronologia, 2017, 42: 42-50.

[21] KOTWALI WALE N, SINGH K, KALNE A, et al. X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(1): 1-15.

[22] LI Z Y, ZHANG X X, LIU Y. Pore-scale simulation of gas diffusion in unsaturated soil aggregates: accuracy of the dusty-gas model and the impact of saturation [J]. Geoderma, 2017, 303: 196-203.

[23] MIZUTANI R, SUZUKI Y. X-ray microtomography in biology [J]. Micron, 2012, 43: 104-115.

[24] 吴龙海. 高分辨率 CT 图像的肺部病变计算机辅助诊断研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
WU Longhai. Research on computer-aided diagnosis of lung disease based on high resolution CT images [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)

[25] 王倩, 杨正, 方正. 基于 X 射线吸收谱的不同生物组织的辨识 [J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(7): 1434-1439.
WANG Qian, YANG Zheng, FANG Zheng. Biological tissue recognition based on X-ray absorption spectral detection [J]. Chemical Journal of Chinese University, 2018, 39(7): 1434-1439. (in Chinese)

[26] KAMILARIS A, PRENAFETA-BOLDÚ F X. Deep learning in agriculture: a survey [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 61-88.

[27] 方正, 王仁彬, 陈思媛. 基于 GA-BP 神经网络的塑料 X 射线吸收光谱的辨识 [J]. 应用化工, 2019, 48(1): 238-241.
FANG Zheng, WANG Renbin, CHEN Siyuan. Identification of X-ray absorption spectroscopy of plastics based on GA-BP neural network [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(1): 238-241. (in Chinese)

[28] LI S X, FAN X, MEI J Q, et al. Identification of antibiotic mycelia residues in cottonseed meal using fourier transform near-infrared microspectroscopic imaging [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 204-212.

[29] LIN Y F, YANG Z L, LIANG H, et al. Identification of antibiotic mycelia residue in protein rich feed using on near-infrared microscopy imaging [J]. Food Additives and Contaminants Part A—Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2018, 35(5): 818-827.

[30] European Parliament and of the Council. Animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing regulation; No. 1774/2002 [S]. Official Journal of the European Union, 2009.

[31] European Parliament and of the Council. The methods of analysis for the determination of constituents of animal origin for the official control of feed; No. 152/2009 [S]. Official Journal of the European Union, 2013.

[32] 余晓镔. CT 原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[33] 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.