

# X 射线荧光光谱在土壤重金属检测中的应用进展

## Application progress of X-ray fluorescence spectroscopy in the detection of heavy metals in soil

孟蕾<sup>1,2</sup> 韩平<sup>2</sup> 王世芳<sup>2</sup> 任东<sup>1</sup> 王纪华<sup>1,2</sup>

MENG Lei<sup>1,2</sup> HAN Ping<sup>2</sup> WANG Shi-fang<sup>2</sup> REN Dong<sup>1</sup> WANG Ji-hua<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学计算机与信息学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

(1. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Department of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China)

**摘要:** 文章阐述了 X 射线荧光光谱分析技术的应用, 重点介绍了不同土壤样品制备条件和仪器检测条件对 X 射线荧光光谱检测的影响, 以及解谱技术与模型优化的应用, 并展望了 X 射线荧光光谱检测技术的发展前景。

**关键词:** X 射线荧光光谱; 土壤; 重金属; 检测条件; 模型分析

**Abstract:** This paper first describes the X-ray fluorescence analysis technology application. Secondly, the effects of different soil preparation conditions and detection conditions on the detection of X-ray fluorescence spectroscopy and the application of spectral analysis and model optimization are introduced. Finally, the development prospect of X-ray fluorescence spectrum detection technology is briefly discussed.

**Keywords:** X-ray fluorescence spectrometry; soil; heavy metals; detection conditions; model analysis

2014 年中国环境保护部和国土资源部联合发布全国土壤污染调查公报, 调查表明, 全国土壤环境状况总体不容乐观, 土壤总的超标率为 16.1%, 污染类型以无机型为主, 超标点位数占全部超标点位的 82.8%<sup>[1]</sup>。土壤污染会导致农作物减产、污染地下水和地表水、污染大气和微生物活动, 且重金属难降解、毒性大, 并通过食物链迁移, 从而危害人体健康<sup>[2-4]</sup>。因此, 开展土壤重金属快速检测技术研究实现现场低成本监测对中国农业安全生产和保障人类健康有着重大的意义。

目前, 传统的土壤重金属检测方法多采用化学分析仪器, 如原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、电感耦合等离子体光谱法、电感耦合等离子体发射光谱法<sup>[5]</sup>等, 这些检测方法精度高, 但是检测过程中存在一定的环境污染且效率低成本高, 不利于土壤重金属的快速检测<sup>[6]</sup>。现阶段基于多学科交叉的新型检测方法取得了长足的进步, 比如: 免疫学检测方法<sup>[7]</sup>、酶抑制法与生物传感器技术<sup>[8]</sup>、X 射线荧光光谱分析方法<sup>[9]</sup>等。X 射线荧光(X-ray fluorescence, XRF)光谱分析法作为一种快速无损检测方法, 在国内外各个领域都取得了广泛应用, 如常规分析领域、原位分析领域和新兴领域等<sup>[10]</sup>。XRF 在土壤重金属元素检测方面也得到了快速发展, 可现场及时确定土壤中金属元素的污染水平<sup>[11-13]</sup>, 对于土壤污染调查和土壤中各种重金属元素的快速探测、筛查工作有重要意义。美国环境保护署(EPA)制定了使用 XRF 光谱技术现场测定土壤和沉积物中的元素含量的标准, 规定了仪器的使用范围和方法, 但是其对检测方法还缺乏更细致的探讨<sup>[14]</sup>。

XRF 光谱分析是利用初级 X 射线光子或其他微观粒子激发待测物质中的原子, 使之产生荧光(次级 X 射线), 并根据土壤样品中待测元素的荧光强度与其含量之间的线性关系进行定量分析<sup>[15]</sup>。但是由于土壤中元素组成的复杂, 产生的本底和基体效应严重, 会干扰 X 射线荧光光谱中的有效信息。土壤的物理化学性质和仪器检测条件都会给土壤中重金属元素的 X 射线荧光光谱带来影响, 导致元素检测的准确度较低。

本文综述了 XRF 光谱检测技术在土壤重金属检测领域的研究进展, 比较了以往研究中不同检测条件对检测结果的影响, 分析了解谱技术对光谱解析的必要性和定量模型建立算法, 并展望了 X 射线荧光光谱检测技术的发展前景。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(编号: 2017YFD0801201); 北京市农林科学院所级科技创新团队建设项目(编号: JNKST201620)

**作者简介:** 孟蕾, 女, 三峡大学在读研究生。

**通信作者:** 任东(1976—), 男, 三峡大学教授, 博士。

E-mail: rendong5227@163.com

**收稿日期:** 2017-04-02

# 1 检测条件对 XRF 光谱检测土壤重金属的影响

## 1.1 土壤样品制备条件

在土壤重金属检测的实际应用中,土壤相对于岩石、合金等待测对象,样品组成更加复杂,土壤的物理化学性质的差异都会给土壤中重金属元素的 X 射线荧光光谱带来影响<sup>[9]</sup>。针对土壤样品制备条件,陆安祥等<sup>[14]</sup>利用便携式 X 射线荧光光谱对土壤中的重金属元素进行测试,试验表明,土壤粒径影响了测试的精密度,土壤粒径从 0.425 mm (40 目)降低到 0.150 mm (100 目),检测的相对标准偏差从 15.6%降低至 6.9%;土壤含水量影响了样品检测的特征峰强,土壤含水量从 5%提高到 25%,与无水样品相比的相对峰强从 86%降低到 69%。胡明情<sup>[12]</sup>研究发现土壤样品厚度、粒径和含水量对低能量 X 射线的影响大于对高能量 X 射线的影响,并证实,检测时土壤样品应完全干燥,混合均匀,样品厚度统一为 10 mm。Mejía-Piña 等<sup>[16]</sup>建议使用手持式 XRF 仪器检测土壤重金属的分析条件为样品层厚度 >0.4 cm,含水率 5%,颗粒尺寸均匀即可。对于土壤样品的制备,刘江斌等<sup>[17]</sup>采用粉末压片法,将土壤制成直径为 32 mm 的圆片,以国家标准物质为基体自制校准物质绘制标准曲线,拓宽了土壤重金属元素测定范围(10~20 000 μg/g)。Zheng Chen 等<sup>[18]</sup>利用薄膜扩散梯度技术(DGT)现场定量检测不稳定金属 Mn、Cu、Zn、Pb 和 As 的含量,并得到所有元素的相关系数均 >0.992,该技术可使土壤中的金属离子被预先浓缩在 DGT 器件的薄膜中,并快速生成元素信息,为 XRF 非破坏性检测提供了依据。

为了更快得到准确的检测数据,以最少的试验次数考查多因素对试验结果的影响。杨桂兰等<sup>[19]</sup>应用均匀设计试验方法,以检测时间、土壤粒径、压片压力和土壤含水量作为试验因素,整体相对标准偏差值作为评价因子,并结合二次多项式逐步回归法建立整体平均相对标准偏差与检测条件之间的回归模型,结果表明,检测条件为风干样品、粒径 0.125 mm、制样压力 3 MPa、检测时间 115 s 时,该模型的预测相对误差 <5%。

## 1.2 仪器检测条件

针对土壤中痕量重金属检测精度低的问题,还需进一步对 X 射线荧光光谱仪的检测条件进行改进,如探测器等对检测造成的影响。为了减少反射 X 射线的影响,喻杰等<sup>[20]</sup>使入射 X 射线与样品垂直照射,探测器与光源垂直放置,优化效果明显,检测 Mo、Zn、Cu、Pb、Zr、Nb 元素的对数偏差均在 0.00~0.05,元素含量在 3 倍检出限以上的 RSD <7%,元素含量在 3 倍检出限内的 RSD <15%。除了入射角度的选择,合适的滤光片也会提高 XRF 检测灵敏度。M.J dos Anjos 等<sup>[21]</sup>使用了滤光片为 Ti 的 X 射线光管的能量色散型 XRF 光谱仪来检测城市垃圾有机物堆放处的土壤重金属元素含量,精确度均可达到 10<sup>-6</sup> 数量级。黄秋鑫等<sup>[22]</sup>检测重金属元素时,对元素 Cr 选择 Ti 滤光片,元素 Cd 选择 Mo 滤光片, Ni、Cu、Zn、As、Hg、Pb 元素选择 Ag 滤光片,结果表明,谱线的降噪效果明显,并提高了检测的信噪比和灵敏度。吴

晓玲等<sup>[23]</sup>通过 MCNP(美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的软件包)模拟得到了探测装置的最佳条件,即“探一样”距为 0.8 cm,入射角和出射角的取值范围在 45°~55°和 65°~75°,为 X 射线荧光光谱仪在土壤重金属检测的应用设计提供了科学指导。

# 2 土壤重金属 XRF 光谱分析研究

## 2.1 光谱解谱方法

在 XRF 光谱分析中,解谱方法和定量模型建立是光谱分析的关键。解谱技术是一种提高 XRF 光谱分析精度、更深挖谱线信息的一种数学处理方法。在解谱过程中,信号脉冲处理和数据采集的过程往往会出现噪声的干扰,基体效应和本底的产生都会对定量分析产生不利影响<sup>[24]</sup>。解谱方法主要包括光谱去噪、本底扣除及基体效应等。建立模型前,首先要对光谱进行预处理,减少噪声对检测的影响。目前,光谱去噪方法主要有傅里叶变换、Savitzky-Golay 多项式滤波器、移动平均法、匹配滤波器、低通滤波器、小波变换等。小波变换具有低熵性、去相关性、选基灵活性强等特点,已经成为重要的去噪方法之一,主要应用见表 1。由表 1 可知,小波变换在 XRF 光谱分析中的应用具有一定优越性。

表 1 光谱去噪方法分析对比

Table 1 Analysis and comparison of spectral denoising methods

去噪方法	去噪效果	参考文献
Savitzky-Golay 多项式滤波器和移动平均法	保持原信号的特征信号, Savitzky-Golay 平滑效果比移动平均法好	[25]
小波变换	在高信噪比情况下,小波变换比傅立叶变换法和移动平均法去噪效果好	[26]
小波阈值去噪	对光谱平滑去噪,降噪后标准曲线效果更好,提高了模型稳定性与准确度	[27]
小波变换	通过利用互相关系数对小波基函数进行优化,之后小波变换,去噪效果达到最优	[28]
匹配滤波器	选择高斯函数作为匹配滤波器对能谱进行平滑处理,消除了噪声及系统误差,使用残差变化最小二乘方法拟合高斯函数,简化了数据处理过程,取得了很好的效果	[29]
ε-采样离散小波变换	利用平稳小波变换结合最优阈值对光谱进行去噪,能够有效改善信噪比,减小均方根误差	[30]

小波变换进行去噪处理时,谱线光滑效果显著,稳定性高,信噪比更加显著,更适合于 XRF 荧光光谱进行光滑去噪处理。不仅如此,小波变换在去除本底上也有重要应用,是当前光谱分析研究热点,光谱处理效果更加智能化。

XRF 法快速检测样品时,X 射线与样品间相互作用产生的相干及非相干散射、康普顿散射等,会导致 X 射线信号峰生成本底,产生基线漂移现象<sup>[31]12-27</sup>。为此,在进行光谱解

析前必须扣除本底。Zhang 等<sup>[32]</sup>采用傅立叶变换和削峰法相结合的方法,将光谱进行傅里叶变换后用低通滤波器滤出光谱中的高频成分,依次进行上述过程直至将本底扣除。Omer 等<sup>[33]</sup>利用削峰法扣除本底使得分辨率能提高 50%,但该方法需要选择适当的参数,对使用者要求过高。小波变换具有多分辨率的特点,估计的本底优于上述方法,可以将特征峰剥离出来。赵奎奎等<sup>[34]</sup>使用的复数小波扣除本底的新方法,结合了实数小波局部时频分析和多分辨率等优点,比一般实数小波变换更加精准,能保持有效信号不变,并解决实数小波变换系数在奇点附近剧烈波动的问题。在检测过程中,基体效应产生的增强、吸收效应会影响 X 射线荧光与金属元素含量之间的线性关系,为此必须考虑基体效应的问题。陈霄龙<sup>[35]</sup>在 EDXRF(能量色散型 X 射线荧光光谱仪)分析中,利用影响系数法对元素间的基体效应进行校正,使仪器工作在线性范围之内。曹发明<sup>[36]</sup>在波长色散型 XRF 研究中,选择了理论  $\alpha$  系数法对基体效应进行校正,建立了各检测元素的工作曲线,同时验证了该分析方法的准确度、

检出限满足测量要求,对于快速精准检测有重要意义。

## 2.2 定量模型的建立

解谱技术有效去除了干扰信息,有利于定量模型的建立,最优模型的建立需要特征波段的选取以及模型的优化,常见的模型建立方法有多元线性回归(MLR)、偏最小二乘(PLS)、神经网络算法(BP)、支持向量机(SVM)、遗传算法(GA)等。由于偏最小二乘的简便实用性,已成为 XRF 光谱检测重金属的重要方法之一。定量模型的具体应用见表 2。由表 2 可知,偏最小二乘算法应用广泛,但 PLS 是一种线性模型,容错能力低,当样本中重金属含量较低时模型的预测稳定性会降低,对于痕量重金属的预测效果不佳,所以需要采用 BP 等非线性模型提高较低含量样本的预测精度<sup>[37]</sup>。BP 具有很强的非线性处理能力,对于处理复杂的问题,其容错能力和泛化能力会使预测结果不易出现较大错误,与人工神经网络(ANN)联合使用可以得到更好的建模效果,结合遗传算法、蚁群算法等可以进一步优化模型,提高模型的预测精度。

表 2 X 射线荧光光谱建模分析比较

Table 2 Comparison and analysis of X-ray fluorescence spectrum modeling

检测元素	检测模型	模型效果	参考文献
铬、铜、锌、铅、砷	SVM	通过与基于网格寻优算法、粒子群算法对比,经过遗传算法优化的 SVM 模型,各元素决定系数均高于 0.95,预测精度高;经过优化的	[31] <sup>40-70</sup>
	LM-BP-ANN	LM-BP-ANN 模型,迭代次数少、收敛快、结果精度高,且不容易收敛于局部极值,各元素的决定系数均高于 0.98,达到良好的预测效果,多元线性回归的决定系数在 0.90 以上,预测模型准确性良好	
	多元线性回归		
铅	PLS	对铅相关的 2 个波段建模后相关系数达到 0.966 6,预测均方根误差为 0.873 2,与传统方法比较更加快捷、准确,达到无损检测效果	[38]
铅、锌、铜、铬	PLS	对重金属元素含量达到了良好的预测效果	[39]
铬、铜、锌、铅、砷	一元线性回归	在均匀设计法优化的测试条件下,一元线性回归模型的决定系数大于 0.97	[19]
稀土	PLS、普通最小二乘法	两者建模方法对比,偏最小二乘精度更高	[40]
镍、铜、锌	PLS	应用正交信号校正(OSC)和偏最小二乘法(PLS)算法分析重叠的 X 射线荧光光谱可以有效消除 XRF 谱重叠的影响,提高预测精度	[41]

## 3 展望

X 射线荧光光谱检测技术在土壤重金属检测方面应用广泛,该技术具有无损检测、操作简单、价格低廉等诸多优势,具有十分良好的发展空间。目前已有研究者开发出通过蓝牙控制光谱仪与手机之间的通信,极大方便了使用者<sup>[42]</sup>,使得该技术更加方便快捷。但在检测条件和解谱技术方面还需进一步深化来提高仪器检测的准确度和智能化<sup>[43]</sup>。在定量模型方面,结合化学计量学方法,不断优化并提高模型的预测精度;在成果转化上,将模型应用在仪器上并推广使用,实现测量的自动化和数据分析的智能化。在标准制定方面,目前中国只有冶金行业将 WDXRF(波长色散型 X 射线荧光光谱仪)作为测定 Ni、Si、P、Mn、Co、Cr 和 Cu 含量的国标方法。XRF 作为土壤重金属检测的标准方法,在推广应用方面还有很多工作需要完成,如逐步完善 X 射线荧光光谱法,制定土壤重金

属检测方面的使用标准<sup>[44]</sup>。

## 参考文献

- [1] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 油气田环境保护, 2014(3): 66.
- [2] 杨梦昕, 付湘晋, 李忠海. 湘江流域重金属污染情况及其对食物链的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 103-106.
- [3] WANG Xiao-yu. Characteristic and environmental risk assessment of heavy metals in farmland soil of based on speciation analysis [J]. Informatics and Management Science, 2013, 204: 213-220.
- [4] 王丽娟. 土壤重金属污染的危害及修复[J]. 现代农业, 2017(1): 73-75.
- [5] 周斌, 钱园凤, 潘仪超. 土壤重金属检测方法研究进展[J]. 种子科技, 2016, 34(7): 25-26.
- [6] WU Cheng-Mau, TSAI Hung-Teh, YANG Kai-Hsing, et al.

- How reliable is X-ray fluorescence (XRF) measurement for different metals in soil contamination? [J]. *Environmental Forensics*, 2012, 13(2): 110-121.
- [7] HE Huan, TANG Bo, SUN Chen, et al. Preparation of hap-ten-specific monoclonal antibody for cadmium and its ELISA application to aqueous samples[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2011, 5(3): 409-416.
- [8] SHUKOR M Y, BAHAROM N A, MASDORN A, et al. The development of an inhibitive determination method for zinc using a serine protease[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, 30(1): 17-22.
- [9] 王纪华, 韩平, 陆安祥. 重金属快速测定方法与仪器研发应用[J]. *农产品质量与安全*, 2012(1): 48-52.
- [10] 吉昂. X射线荧光光谱三十年[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(3): 383-398.
- [11] 张玉琴. 固定污染源排气中铬酸雾测定的主要影响因素分析[J]. *辽宁化工*, 2010, 39(3): 336-337.
- [12] 胡明情. XRF法检测土壤重金属的影响因素[J]. *环境监控与预警*, 2016, 8(2): 23-24.
- [13] RADU T, DIAMOND D. Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1): 1 168-1 171.
- [14] 陆安祥, 王纪华, 潘立刚. 便携式X射线荧光光谱测定土壤中Cr, Cu, Zn, Pb和As的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2 848-2 852.
- [15] SUBRAMANIAN V. Quantitative analysis of elements in sediments and soils by X-ray fluorescence: a discussion[J]. *Clays & Clay Minerals*, 1977, 25(2): 73-77.
- [16] MEJÍA-PIÑA K G, HUERTA-DIAZ M A, GONZÁLEZ-YAJI-MOVICH O. Calibration of handheld X-ray fluorescence (XRF) equipment for optimum determination of elemental concentrations in sediment samples[J]. *Talanta*, 2016, 161: 359-367.
- [17] 刘江斌, 党亮, 殷桃刚. 粉末压片—X射线荧光光谱法测定土壤中的铜铅锌砷镉钴铬镍等重金属元素[J]. *分析测试技术与仪器*, 2015, 21(1): 42-46.
- [18] CHEN Zheng, WILLIAMS P N, ZHANG Hao. Rapid and non-destructive measurement of labile Mn, Cu, Zn, Pb and As in DGT by using field portable-XRF[J]. *Environmental Sciences Processes & Impacts*, 2013, 15(9): 1 768-1 774.
- [19] 杨桂兰, 商照聪, 李良君. 基于均匀设计的土壤重金属PXRF检测方法优化研究[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(12): 2 123-2 129.
- [20] 喻杰, 洪旭, 马英杰. 改进X荧光光谱仪快速检测土壤中重金属(英文)[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3 429-3 433.
- [21] ANJOS M J D, LOPES R T, JESUSE F O D, et al. Quantitative analysis of metals in soil using X-ray fluorescence[J]. *Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy*, 2000, 55(7): 1 189-1 194.
- [22] 黄秋鑫, 孙秀敏. 粉末标准曲线XRF法检测土壤中的重/类金属[J]. *环境科学与技术*, 2014(9): 92-98.
- [23] 吴晓玲. XRF分析土壤重金属元素含量的方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016: 28-43.
- [24] NEWLAND D E. An introduction to random vibrations and spectral analysis[J]. Longman, 1984, 108(2): 140-147.
- [25] AZAMI H, MOHAMMADI K, BOZORGTABAR B. An improved signal segmentation using moving average and savitzky-golay filter[J]. *Journal of Signal & Information Processing*, 2012, 3(1): 39-44.
- [26] ALSBCRG B K, WOODWARD A M, WINSON M K, et al. Wavelet denoising of infrared spectra[J]. *Analyst*, 1997, 122(7): 645-652.
- [27] 李芳, 陆安祥, 王纪华. 基于支持向量机的X射线荧光光谱重金属检测模型的建立[J]. *分析仪器*, 2016(4): 68-73.
- [28] MA X, ZHOU C, KEMP I J. Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(3): 446-457.
- [29] 贾静. 能量色散X射线荧光分析软件及算法设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001: 23-37.
- [30] 赵春奎. 能量色散型X射线荧光光谱仪关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 17-44.
- [31] 李芳. 基于小波变换的能量色散X射线荧光光谱建模方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [32] ZHANG Qing-xian, GE Liang-quan, GU Yi, et al. Background estimation based on Fourier Transform in the energy-dispersive X-ray fluorescence analysis[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2012, 41(2): 75-79.
- [33] OMER M, NEGM H, KINJO R, et al. Analysis of SNIP Algorithm for Background Estimation in Spectra Measured with LaBr<sub>3</sub>: Ce Detectors [M]// *Zero-Carbon Energy Kyoto 2012*. Tokyo: Springer Japan, 2013: 245-252.
- [34] 赵春奎, 王爱民. 基于复数小波的X射线荧光光谱本底扣除法[J]. *冶金分析*, 2015(7): 10-14.
- [35] 陈青龙. X射线荧光光谱法检测土壤中重金属的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 17-21.
- [36] 曹发明. XRF分析技术在土壤重金属检测中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 39-48.
- [37] 王世芳, 韩平, 王纪华. X射线荧光光谱分析法在土壤重金属检测中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(11): 4 394-4 400.
- [38] 黄启厅, 周炼清, 史舟. FPXRF—偏最小二乘法定量分析土壤中的铅含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1 434-1 438.
- [39] 钱原铭. X射线荧光光谱定量分析土壤中重金属方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012: 21-27.
- [40] KIRSANOV D, PANCHUK V, GOYDENKO A, et al. Improving precision of X-ray fluorescence analysis of lanthanide mixtures using PLSR[J]. *Spectrochim Acta Part B*, 2015, 113: 126-131.
- [41] ZHANG Wei, ZHANG Yu-jun, CHEN Dong, et al. Quantitative analysis of overlapping X-ray fluorescence spectra for Ni, Cu, Zn in soil by orthogonal signal correction and partial least squares algorithm[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 705: 70-74.
- [42] 胡锐, 赖万昌, 曾国强. 基于Android系统的X射线荧光光谱测量软件开发[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(2): 243-248.
- [43] 李哲. X射线探测器响应机制及应用建模技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2013: 14-31.
- [44] 钱原铭, 赵春江, 陆安祥. X射线荧光光谱检测技术及其研究进展[J]. *农业机械*, 2011(23): 137-141.