

基于太赫兹光谱的土壤重金属铅含量检测初步研究

李 斌<sup>1,2</sup> 赵春江<sup>2,3</sup>

(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.农业部农业信息技术重点实验室,北京 100097;  
3.北京农业信息技术研究中心,北京 100097)

**摘要:** 探索应用太赫兹时域光谱用于农田土壤重金属含量检测的机理和可行性,尝试发展一种新的检测方法和手段。研究了样品制备测量方法,确定了最佳的制备参数为:聚乙烯样品盒尺寸为 35 mm × 3.5 mm × 35 mm,中间空隙 1.5 mm;压片法样品质量 220 mg,2.5 t 压力;分别制作一定浓度梯度(30 ~ 900 mg/kg)的含铅土壤样品 30 组,使用 Z-2 型太赫兹时域光谱仪采集相应的土壤样品太赫兹透射光谱数据,对光谱数据进行预处理,包括平滑处理、多元散射校正、基线校正,采用全谱-偏最小二乘法、区间-偏最小二乘法和遗传算法-偏最小二乘法建立土壤样品中重金属元素铅含量的定标模型并对预测集样本进行预测。实验结果表明,采用样品盒法制作土壤样品并且基于遗传算法进行特征波段选择、结合偏最小二乘法的建模效果最佳,含重金属铅的土壤样本模型的标定集和预测集的相关系数分别为 0.86 和 0.81,标定均方根误差和预测均方根误差分别为 23.55 mg/kg 和 39.52 mg/kg。本研究通过分析土壤样品的太赫兹透射光谱吸收系数与重金属元素铅含量的相关关系,建立了较好的预测模型。

**关键词:** 太赫兹时域光谱; 土壤重金属; 检测; 铅; 偏最小二乘法; 遗传算法

**中图分类号:** X833; O433.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0291-06

Preliminary Research on Heavy Metal Pb Detection in Soil  
Based on Terahertz Spectroscopy

Li Bin<sup>1,2</sup> Zhao Chunjiang<sup>2,3</sup>

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China  
2. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China  
3. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to realize the detection of heavy metal Pb<sup>2+</sup> in soil, the content of heavy metal Pb element in soil was detected by terahertz spectroscopy. The relationship between spectral absorption rate and Pb<sup>2+</sup> content in soil was analyzed. A basic method for the detection of heavy metal content in soil by terahertz technology was provided. The soil samples with a certain concentration gradient (30 ~ 900 mg/kg) were produced by sample holder method and pressed-slice method. The spectral data of terahertz transmission soil were collected and pre-processed, including smoothing, multiple scatter correction and baseline correction. The model of heavy metal Pb<sup>2+</sup> element in soil samples was established by using the method of full spectral, interval partial least squares and genetic algorithm, respectively. The results showed that the model established by sample box method and genetic algorithm method was the optimal one. The correlation coefficients of calibration set and prediction set were 0.86 and 0.81, root mean square errors of calibration set and prediction set were 23.55 mg/kg and 39.52 mg/kg, respectively. This research provided a theoretical and methodological reference for important parameters detection of

收稿日期: 2016-07-20    修回日期: 2016-08-26  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31301237)、北京市自然科学基金面上项目(6132009)、北京市农林科学院重点实验室建设项目(KJCXPT2016-04)和北京市农林科学院级创新团队项目(JNKYT201604)  
**作者简介:** 李斌(1983—),男,副研究员,博士,主要从事太赫兹光谱技术及其在农业领域的应用研究,E-mail: lib@nercita.org.cn  
**通信作者:** 赵春江(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: zhaojcj@nercita.org.cn

farmland soil using terahertz and the preliminary applications research of terahertz.

**Key words:** terahertz time-domain spectroscopy; heavy metal in soil; detection; Pb; partial least squares; genetic algorithm

引言

土壤重金属污染是世界性的环境污染问题,主要由于冶炼、化石燃料燃烧等人类活动因素使重金属或其化合物渗入到土壤中致使土壤中重金属含量超过背景值<sup>[1-2]</sup>。伴随着人类活动,土壤中重金属含量越来越多,并且会通过食物链对人体造成伤害<sup>[3-5]</sup>。铅是典型的且当前污染较为严重的重金属之一。土壤对重金属元素铅有吸附作用<sup>[6-7]</sup>,铅进入人体主要通过食物链、不经意的摄入、皮肤接触和呼吸作用<sup>[8]</sup>。当人体摄入过量重金属铅后,会对人的健康造成较大伤害,影响神经、造血、消化、泌尿、生殖和发育、心血管、内分泌、免疫、骨骼等各类人体系统和器官<sup>[9]</sup>。

传统的土壤中重金属元素铅的测定采用原子吸收分光光度计法<sup>[10]</sup>,该方法需要预先对土壤样品进行复杂的化学处理,包括对土壤样品经盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,萃取-火焰原子吸收法测定,石墨炉原子吸收分光光度法测定,检测过程复杂,耗时较长。近年来,一些新型的检测技术也被应用到土壤重金属检测中,例如生物传感器法、酶抑制法、免疫分析法等结合生物学的检测方法。基于生物学方法制备特异性生物抗体较困难,灵敏准确度较低,并且酶与相关络合物的匹配较困难,成本较高<sup>[11]</sup>。太赫兹光谱包含频率在 0.1 ~ 30 THz 之间的频谱区域<sup>[12]</sup>,是介于微波和红外波段之间的电磁辐射,太赫兹波的应用研究涉及物理、材料、信息、生物和医学等多个领域,但在农田土壤检测方面报道很少。LI 等<sup>[13]</sup>对含有金属离子的土壤样品进行了太赫兹光谱的初步探索和研究。其在土壤样品中配制了不同浓度的硫酸铜和硫酸锌,进行 0.2 ~ 1.6 THz 波段太赫兹光谱的测量。结果表明,在 0.2 ~ 1.6 THz 波段内,样品呈现出较为显著的特征。

土壤的组成成分复杂,太赫兹光谱穿透土壤对土壤中重金属络合物分子振动特性具有一定的探测能力<sup>[14]</sup>,经透射后的太赫兹光谱包含丰富的土壤物理信息和化学信息。本文尝试利用太赫兹光谱技术检测土壤中重金属元素铅含量。通过采集透过土壤后的太赫兹光谱,对光谱数据进行预处理,利用区间-偏最小二乘法和遗传算法-偏最小二乘法对土壤中重金属铅含量进行预测。

1 材料与方法

1.1 土壤采样

使用的“裸土”采自北京小汤山实验田。采样时,选取一块长、宽均约 10 m 的农田区域,分别沿长、宽方向,使用土铲每隔 2 m 采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤,将采集到的土壤均匀混合,约 5 kg,装入塑料器皿中。采样过程中,避免使用金属质地的采集工具和容器,并且记录实时采样的具体情况。将采集到的土壤样品取部分送至权威检测机构进行土壤的主要成分检测,根据国家标准《土壤环境质量标准》<sup>[15]</sup>检测土壤样品中的重金属元素是否已经超标。在北京龙科测试中心测试后,采集的土壤样品中铅含量为 19.7 mg/kg,符合国家标准。

1.2 土壤样品制备

“裸土”经过去杂、风干处理后,考虑到重金属检测标准,选取了重金属元素铅进行检测,制作 30 个相等梯度的样品,重金属铅含量范围为 30 ~ 900 mg/kg,共 30 组土壤样品,依次编号,经过计算、称取、混合、溶解、搅拌、干燥、研磨,根据编号,装袋密封保存。由于土壤样品呈颗粒状,需将土壤样品固定成特定厚度的薄层进行太赫兹实验,采用样品盒法和压片法 2 种方法对样品进行处理。

样品盒法是将土壤样品承载在尺寸为 35 mm × 3.5 mm × 35 mm 的聚乙烯无色透明盒中,样品盒单侧壁厚 1 mm,中间空隙 1.5 mm,两侧壁平行,该材料样品盒对太赫兹光谱吸收较少,侧壁表面光滑,无任何纹理和摩擦痕迹,保证太赫兹光谱能均匀地穿透该样品,避免入射光线发生漫发射,影响透射光谱的测量。样品盒的粘合剂采用环氧树脂胶,对聚乙烯有着良好的粘合效果,同时可以耐强酸强碱,满足本实验对土壤样品检测的要求。研究中使用的样品盒三视图如图 1 所示。

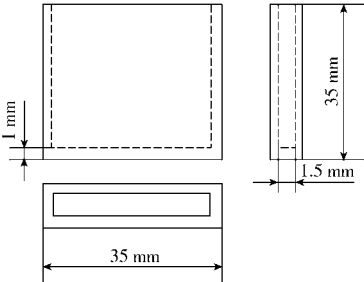


图 1 样品盒三视图

Fig. 1 Three-view drawings of sample-box

压片法指将土壤样品通过压片处理,获得厚度均匀的土壤压片样本,用于后续光谱测量。使用手动液压型压片机(SPECAC 公司,0~15 t 量程),将配置好的土壤样品放在模具中。压片时,若压片过厚,太赫兹光谱衰减严重,压片过薄,回波现象比较严重。若压力过大,样品内部键能会遭到破坏,压力过小,样品将无法成型,无法获得准确的样品光谱信息。实验中选择样品 220 mg,2.5 t 压力下制作土壤样品。由于土壤样品本身特性,在压片过程中,易“松片”,为了解决压片过程中遇到的问题,保证压片厚度均匀,在制作压片时,添加聚乙烯粉末,实现样品制备过程工艺的优化,得到较理想的土壤样品。

### 1.3 仪器与光谱数据采集

使用 Z-2 型太赫兹时域光谱仪(Z-2 THz-TDS)采集样品的太赫兹光谱数据,Z-2 THz-TDS 设备紧凑、技术完善、系统稳定性较好。该设备基于 ZnTe 晶体光电探测头,采用飞秒激光器提供激光,在室温下可操作,带宽光谱覆盖面(0.1~3.0 THz),动态测量范围宽。不论是传输或者反射,光谱分辨率可达 5 GHz。

用样品盒法获取太赫兹光谱时,在设计好的样品盒内装满含铅土壤样品,采取边加入边震荡的方式,让土壤样品在样品盒内压实,避免人为因素对样品盒施压,将装满土壤样品的样品盒粘合在夹持平台上;用压片法获取样品的太赫兹光谱时,将制备好的压片样品放入太赫兹测量平台的立式光学元件的槽内,为防止测量过程中压片掉落,在槽内粘贴少量双面胶,进行后续太赫兹光谱测量。

测量时,将样品装载并固定在测试平台上,测量波段范围为 0.1~2.0 THz。为减少测量误差,每个样品重复采集 3 次太赫兹光谱曲线,求取 3 次测量的平均值代表该样品的太赫兹光谱数据,用于后续数据建模。采集太赫兹光谱曲线时,实验室内温度约为 21.6℃,相对湿度约为 9.4%;设备内温度约为 21.6℃,相对湿度小于 4%。整个测试过程中,保持纯净、干燥的氮气不断冲入密封罩,每次测量大约耗时 5 min。

研究中 2 种样品制备方法每组分别选用 30 个含铅土壤样本作为标定集,10 个土壤样本作为预测集。样品盒法制备的含铅土壤重金属含量的太赫兹原始吸收谱如图 2 所示。

### 1.4 模型建立及评价

利用 Matlab 软件对光谱数据进行预处理及建模,分别用区间-偏最小二乘法 and 遗传算法-偏最小二乘法进行最佳波段的优选,建立对应的标定模型,并对预测集样本进行预测,利用标定集相关系数

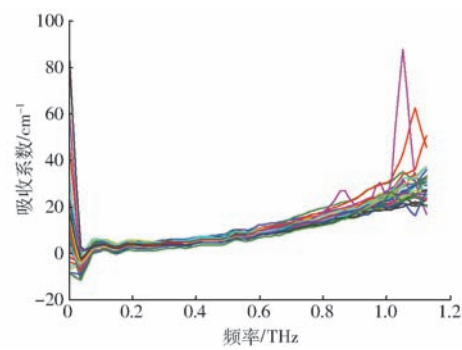


图2 土壤样品的原始吸收谱  
Fig.2 Original absorption curves of soil samples

( $R_c$ )、预测集相关系数( $R_p$ )、标定均方根误差(RMSEC)和预测均方根误差(RMSEP)对模型的精度进行评价,优选最佳模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 光谱数据预处理

太赫兹设备所采集的光谱包含了电噪声、样品背景等其他无关信息和噪声。因此,在建立标定模型之前,必须消除太赫兹光谱数据中无关的信息和噪声,从而保证光谱数据和组分之间良好的相关性。

数据预处理过程主要采用多元散射校正(MSC)、Savitzky-Golay 平滑和基线校正等方法对光谱数据进行整合,减少噪声、样品粒度和光程变化等因素对光谱产生的影响,消除太赫兹光谱数据中的无关信息和随机误差等因素对建模结果的影响,为建立稳定、可靠的标定模型奠定基础。

#### 2.1.1 多元散射校正

多元散射校正(MSC)主要用于消除由于土壤中颗粒大小及分布不均匀而引起的光谱变化可能大于重金属成分引起的光谱变化的问题。通过多元散射校正,可以实现曲线的归一化,并且保留了与原有化学成分相关的信息,提高了有效光谱质量。经过多元散射校正后的光谱曲线如图 3 所示。

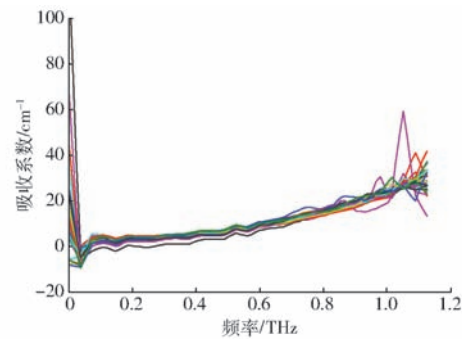


图3 经过 MSC 处理后的光谱数据  
Fig.3 Spectra after MSC process

#### 2.1.2 数据平滑与微分处理

采集到的数据需要进行平滑处理与微分处理,

采用 Savitzky - Golay 多项式拟合方法,对光谱数据进行平滑,利用权重系数确定平滑函数来对原光谱进行卷积处理,进一步减小噪声对光谱信息的干扰,通过一阶微分处理,能提供新的光谱信息,使重叠峰的分辨信息得到提高。在 Savitzky - Golay 平滑处理过程中,平滑间隔要根据具体情况来设定,间隔太小分辨效果不好,太大会扭曲光谱的形状。经过平滑和微分处理后的光谱曲线如图 4 所示。

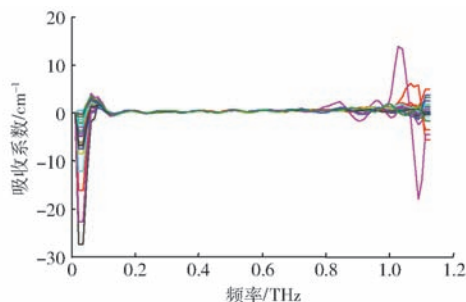


图 4 经过平滑和一阶微分处理后的光谱数据

Fig. 4 Spectra after smoothing and first-order differential process

### 2.1.3 基线校正

基线校正能扣除仪器背景或漂移对信号的影响,使原始光谱中不含光谱信息的谱段平整并表现为零吸收,从而突出样本信息。基线校正通常有偏置扣减、基线倾斜和峰谷点扯平等方法。本研究中,采用基线倾斜的方法对所有光谱数据进行基线校正,选择了波长最大处和最小处的吸收系数作为新的基线。经过基线校正后的光谱曲线如图 5 所示。

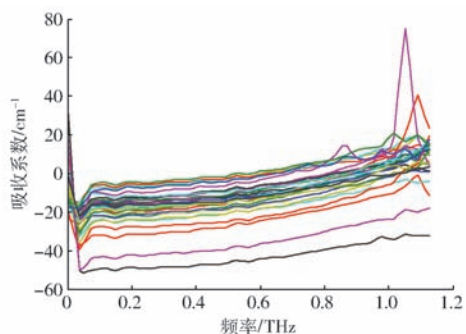


图 5 经过基线校正后的光谱图

Fig. 5 Spectra after baseline correction

## 2.2 模型建立与结果比较

### 2.2.1 全波段偏最小二乘法建模结果

用偏最小二乘法对全波长光谱建模分析,对样品盒法获取太赫兹光谱数据进行分析时,选用前 4 个主成分就能代表全部的光谱信息,选用前 4 个主成分建立标定集模型并进行预测,模型的标定集与预测集的相关系数分别为 0.85 和 0.79,标定均方根误差和预测均方根误差分别为 187.39 mg/kg 和 258.24 mg/kg;压片法获得光谱数据选择前 7 个主

成分建立对应模型,标定集和预测集的相关系数分别为 0.77 和 0.62,标定均方根误差和预测均方根误差分别为 135.94 mg/kg 和 161.59 mg/kg。

### 2.2.2 区间-偏最小二乘法建模结果

区间-偏最小二乘法<sup>[16]</sup>是将太赫兹光谱分成若干个子区间,利用 PLS 对每个子区间建模,计算每个子区间的标定均方根误差与全波长标定均方根误差作比较,子区间的均方根误差最小时,对应的局部 PLS 模型为最佳,对不同的有效局部 PLS 模型组合,建立 PLS 模型,比较标定均方根误差,当标定均方根误差最小时,对应的区间组合即为最佳建模组合波段。将全波长数据分别分为 5 组不同子区间,子区间个数分别为 6、8、10、12、15,根据 PLS 建立对应子区间模型,计算各子区间的标定均方根误差,并对不同的有效波段进行组合,计算不同组合的标定均方根误差,比较各组合的标定均方根误差,其中标定均方根误差最小的组合波段为最优建模波段组合。

对样品盒法获得的太赫兹光谱利用 PLS 对太赫兹全波长范围建模得到的模型为 187.35 mg/kg,根据不同的组合结果,当将波长分为 8 个子区间,其中有 4 个局部 PLS 建模波段 RMSEC 值小于全波段,优选其中 4 个均方根误差最小的波段进行组合,其有效波段建模效果最佳,根据这 4 个波段组合建立最佳 PLS 模型,标定集的相关系数为 0.87,均方根误差为 48.64 mg/kg。比较区间-偏最小二乘法优选最佳波段建模和全波长建模结果,前者的模型稳定性有了较大提高。

### 2.2.3 遗传算法-偏最小二乘法建模结果

遗传算法<sup>[17]</sup>具有随机的全局优化、避免陷入局部极小点、易实现等特点,在利用偏最小二乘法建模时能得到广泛应用。遗传算法选用含铅土壤的样品盒法测量太赫兹光谱,在 0.1 ~ 1.3 THz 进行变量优选,该算法中所用的 3 大算子:选择算子采用轮盘赌法,交叉算子采用单点交叉法,变异算子采用基本位变异,最后通过基于适应度值的重插入子代到种群产生新的子代。其算法的具体参数设定为:初始群体为 30,最大繁殖代数 200,交叉概率 0.5,变异概率 0.01。该算法在 Matlab 7.0 程序环境下完成,程序编写时调用遗传算法工具箱 GATBX (Genetic algorithms optimization toolbox) 实现。通过不同的样品制备方法,结合不同的数据预处理方法,对太赫兹光谱数据用不同的建模方法进行标定和预测,得到结果如表 1 所示。

根据表 1 中不同方法组合的建模结果,比较压片法和样品盒法,当利用压片法制备检测样本时,模

表 1 含铅土壤样品的太赫兹光谱建模及预测结果

Tab. 1 Modeling and prediction results of terahertz spectrum model for soil samples containing Pb

| 测量方法 | 预处理方法                            | 建模方法     | 参数选择              | 标定集(30 个样本) |                                          | 预测集(10 个样本) |                                          |
|------|----------------------------------|----------|-------------------|-------------|------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|
|      |                                  |          |                   | $R_c$       | RMSEC/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | $R_p$       | RMSEP/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
| 样品盒法 | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正 + MSC | 全谱-PLS   | $P_C = 4$         | 0.85        | 187.35                                   | 0.79        | 258.24                                   |
|      | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正 + MSC | i - PLS  | $i = 8, P_C = 4$  | 0.81        | 46.64                                    | 0.76        | 94.33                                    |
|      | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正 + MSC | GA - PLS | $P_C = 4$         | 0.87        | 42.96                                    | 0.81        | 58.75                                    |
| 压片法  | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正       | 全谱-PLS   | $P_C = 7$         | 0.77        | 135.94                                   | 0.62        | 161.59                                   |
|      | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正       | i - PLS  | $i = 12, P_C = 5$ | 0.81        | 47.41                                    | 0.77        | 61.49                                    |
|      | Savitzky - Golay 平滑 + 基线校正       | GA - PLS | $P_C = 4$         | 0.86        | 23.55                                    | 0.81        | 39.52                                    |

型的相关性和稳定性较高,表明在检测土壤中重金属铅时,压片法制备检测样本优于样品盒法。压片法中,当采用相同的预处理方式,通过遗传算法优选建模波长,利用偏最小二乘法的建模效果最佳,模型的稳定性最高。表明利用压片法制备含铅土壤样品,并采集太赫兹光谱图,经过 Savitzky - Golay 平滑、基线校正的预处理过程,利用遗传算法-偏最小二乘法建模其预测集相关系数最高,模型稳定性最好,建模效果最佳,模型标定集样本相关系数为 0.86,标定均方根误差为 23.55 mg/kg,预测集样本的相关系数为 0.81,预测均方根误差为 39.52 mg/kg。其建模结果如图 6 所示。

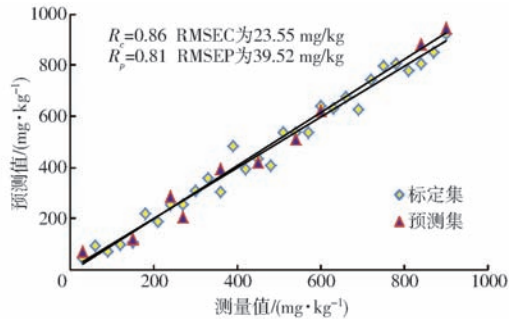


图 6 遗传算法-偏最小二乘法建模结果

Fig.6 Results of genetic algorithm and partial least squares modeling

3 结束语

运用太赫兹光谱技术进行了农田土壤重金属铅含量检测的探索性研究。利用 2 种不同的土壤样品制备方法制备了土壤样本,并通过太赫兹光谱采集样本的光谱图,分别利用全波段偏最小二乘法、区间-偏最小二乘法和遗传算法-偏最小二乘法对波段进行了选择,建立了标定集的样本模型,并通过评价参数比较了不同样品制备方法和不同建模方法下的建模结果。根据建模结果,通过压片法制备土壤样本,利用基于遗传算法-偏最小二乘法建立的数学模型较好,稳定性较高,评价参数分别为:标定集的相关系数为 0.86,标定均方根误差为 23.55 mg/kg,预测集相关系数为 0.81,预测均方根误差为 39.52 mg/kg。本研究通过分析土壤样品的太赫兹透射光谱吸收系数与重金属元素铅含量的相关关系,建立了较好的预测模型,研究结果表明利用太赫兹光谱技术检测土壤中重金属的含量具有较好的可行性,但建模结果仍需要进一步优化,测试样本量也有待进一步增加。该研究结果可为太赫兹光谱技术应用于农田土壤重要理化参数的检测与应用技术开发研究提供理论和方法依据。

参 考 文 献

1 周宝宣,袁琦. 土壤重金属检测技术研究现状及发展趋势[J]. 应用化工,2015,44(1):131 - 137.  
ZHOU Baoxuan,YUAN Qi. Current situation and development trend of soil heavy metal detection[J]. Applied Chemical Industry, 2015,44(1):131 - 137. (in Chinese)

2 ZHANG Mingkui,PU Jincheng. Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils[J]. Journal of Environmental Sciences,2011,23(4):607 - 615.

3 王璐,蔺启忠,贾东,等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究[J]. 遥感学报,2007,11(6):906 - 912.  
WANG Lu,LIN Qizhong,JIA Dong,et al. Study on the prediction of soil heavy metal elements content based on reflectance spectra [J]. Journal of Remote Sensing,2007,11(6):906 - 912. (in Chinese)

4 ETIENNE Muller,HENRI Deâcamps. Modeling soil moisture—reflectance[J]. Remote Sensing of Environment,2000,76(1): 173 - 180.

5 ALGUACIL M M, TORRECILLAS E, CARAVACA F,et al. The application of an organic amendment modifies the carbuncular mycorrhizal fungal communities colonizing native seedlings grown in a heavy-metal-polluted soil [J]. Soil Biology and Biochemistry,2011,43(7):1498 - 1508.

6 MENG Zhaofu,ZHANG Yiping, WANG Guodong. Sorption of heavy metal and organic pollutants modified soils [J]. Pedosphere,

- 2007, 17(2):235-245.
- 7 杨金燕,杨肖娥,何振立,等. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展[J]. 生态环境,2005,14(1):102-107.  
YANG Jinyan,YANG Xiaoe,HE Zhenli,et al. Advance in the studies of Pb absorption and desorption in soil[J]. Ecology and Environment,2005,14(1):102-107. (in Chinese)
- 8 常夏源,童仁军,司友斌,等. 某再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性及其对人体的健康风险评价[J]. 安徽农业大学学报,2014,41(6):1055-1060.  
CHANG Xiayuan,TONG Renjun,SI Youbin,et al. Bioaccessibility and risk assessment to human health of lead and cadmium in the soil around recycled lead industrial park[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2014,41(6):1055-1060. (in Chinese)
- 9 崔岩山,陈晓晨,付瑾. 污染土壤中铅、砷的生物可给性研究进展[J]. 生态环境学报,2010,19(2):480-486.  
CUI Yanshan,CHEN Xiaochen,FU Jin. Progress in study of bioaccessibility of lead and arsenic in contaminated soils[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(2):480-486. (in Chinese)
- 10 周姣花,钟莅湘,来克冰,等. 原子荧光光谱法测定土壤中的锗[J]. 黄金,2010,31(7):53-55.  
ZHOU Jiaohua,ZHONG Lixiang,LAI Keping,et al. Determination of Germanium in soil and stream sediment samples by atomic fluorescence spectrometry[J]. GOLD,2010,31(7):53-55. (in Chinese)
- 11 吕彩云. 重金属检测方法研究综述[J]. 资源开发与市场,2008,24(10):887-890.  
LÜ Caiyun. Review on the detection methods of heavy metals[J]. Resource Development & Market,2008,24(10):887-890. (in Chinese)
- 12 LEE Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2012:2-3.
- 13 LI Jiusheng, ZHAO Xiaoli, LI Jianrui. Study on the THz spectra of metallic ion in soil [J]. International Symposium on Photo Electronic Detection and Imaging 2009: Terahertz and High Energy Radiation Detection Technologies and Applications, 2009, 7385:1-6.
- 14 李斌,赵春江. 我国当前农产品产地土壤重金属污染形势及检测技术分析[J]. 农业资源与环境学报,2013,30(5):1-7.  
LI Bin,ZHAO Chunjiang. Current situation of heavy metals pollution in soil at farmland and detection technologies analysis in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2013,30(5):1-7. (in Chinese)
- 15 GB 15618—2008 土壤环境质量标准[S]. 2008.
- 16 王菊香,韩晓,刘洁. 组合区间偏最小二乘法结合红外光谱法测定在用润滑油的运动粘度[J]. 理化检验:化学分册,2015,51(5):639-641.  
WANG Juxiang,HAN Xiao,LIU Jie. Rapid determination of dynamic viscosity in used lubricating oil by BiPLS with IR[J]. PTCA Part B: Chem. Anal.,2015,51(5):639-641. (in Chinese)
- 17 王志美,陈传仁. 遗传算法理论及其应用发展[J]. 内蒙古石油化工,2006(9):44-45.  
WANG Zhimei,CHEN Chuanren. Genetic algorithm theory and application development [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2006(9):44-45. (in Chinese)

(上接第248页)

- 12 现代农装科技股份有限公司. 一种果秧分离装置及具有该装置的番茄收获机:中国,201320807480.3[P]. 2014-06-11.
- 13 李智国. 基于番茄生物力学特性的采摘机器人抓取损伤研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.  
LI Zhiguo. Study on the grasp damage of harvesting robot based on the biomechanical properties of tomato fruits[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2011. (in Chinese)
- 14 李智国,刘继展,李萍萍. 机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系[J]. 农业工程学报,2010,26(5):112-116.  
LI Zhiguo, LIU Jizhan, LI Pingping. Relationship between mechanical property and damage of tomato during robot harvesting [J]. Transactions of the CASE,2010,26(5):112-116. (in Chinese)
- 15 刘继展,李萍萍,李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报,2008,24(12):66-70.  
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo,et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(12):66-70. (in Chinese)
- 16 韩泽群,姜波. 加工番茄品种多性状综合评价方法研究[J]. 中国农业科学,2014,47(2):357-365.  
HAN Zequn,JIANG Bo. A study on comprehensive evaluation of the processing tomato varieties multiple traits [J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(2):357-365. (in Chinese)
- 17 岳绚丽. 加工番茄滴灌栽培的机械采收技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.  
YUE Xuanli. The research of mechcal harvesting technology with drip irrigation on processing tomatoes[D]. Yangling:Northwest A&F University,2007. (in Chinese)