

农田土壤重金属污染物含量检测方法研究进展

孙晓波, 谢雪珍, 郭松, 张鹏, 王小明* (广西科技师范学院食品与生化工程学院, 广西来宾 546199)

摘要 随着我国工业化和城镇化进程的推进, 发展过程中出现的重金属污染已对农田土壤构成危害, 并通过食物链对人体造成潜在威胁。介绍了国内外土壤重金属检测的常用方法如: 光谱分析法、电化学分析法、生物传感器法, 以及一些新型检测方法如太赫兹光谱法、环境磁学法、高光谱遥感分析法。重点阐述各方法的检测原理及优缺点, 以期为农田土壤中重金属检测和土壤修复提供理论参考。

关键词 农田土壤; 检测方法; 重金属; 污染物; 研究进展

中图分类号 X 833 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)08-0022-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.08.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress on Detection Methods of Heavy Metal Contaminants in Agricultural Soils

SUN Xiao-bo, XIE Xue-zhen, GUO Song et al (College of Food and Biochemical Engineering, Guangxi Science and Technology Normal University, Laibin, Guangxi 546199)

Abstract With the progresses of industrialization and urbanization in China, heavy metal pollution during the process of development has become a hazard to agricultural soils and a potential threat to humans through the food chain. This paper introduces the common methods used in soil heavy metal detection at home and abroad, such as spectroscopic analysis, electrochemical analysis, and biosensor methods. It also introduces some new detection methods, such as terahertz time-domain spectroscopy, environmental magnetism and hyperspectral remote sensing analysis. This paper focuses on the principles, advantages and disadvantages of each method, in order to provide a theoretical reference for the detection of heavy metals in agricultural soils and soils remediation.

Key words Agricultural soils; Detection methods; Heavy metal; Contaminants; Research progress

土壤是自然界生物赖以生存的基础, 也是人类赖以生存的根本。然而, 随着人类活动范围的不断扩大和人类工业化进程的加快, 土壤重金属污染问题日益突出。重金属即相对密度大于 5 的金属元素, 如铜、铅、铬、锰、镍、镉等^[1]。根据土壤重金属污染来源的不同, 一般将污染源分为 2 个方面: 一是自然因素, 主要来自地壳岩石风化、水土流失、火山喷发等, 含量一般较低不会对环境造成污染; 二是人为因素, 人类在发展过程中出现的工农业生产、化石燃料燃烧、生活废弃物、污水灌溉等行为, 致使重金属污染物从化石燃料、岩石中释放扩散, 才是土壤重金属污染的主要来源^[2]。重金属污染长期存在, 难以在土壤中有有效降解, 往往通过食物链富集到人体内, 对人体健康造成潜在危害。近年来, 我国食品领域重金属污染事件频发, 已严重危害人类的身体健康^[3-4]。该研究梳理了土壤重金属污染物检测分析的相关研究, 分析了当前主流分析检测方法的检测原理及优缺点, 并展望了今后分析检测方法的发展趋势, 以期为土壤重金属污染物检测技术的发展提供理论参考。

1 常规重金属检测方法

1.1 光谱分析法 光谱分析法是目前技术发展最为成熟的土壤重金属检测技术, 是基于光与物质相互作用后产生的与被测物的物理化学性质相关而建立的定性、定量分析检测技术, 分为光谱分析法和非光谱分析法两种。其中光谱分析法

分为分子光谱和原子光谱, 涉及物质内部能级跃迁, 包括吸收辐射后的跃迁和发射辐射后的跃迁, 由此建立了原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、原子发射光谱法、电感耦合等离子体发射光谱法、紫外-可见吸收光谱法、X 射线荧光光谱法、激光诱导击穿光谱法等检测方法。

1.1.1 原子吸收光谱法。原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy), 也称为原子分光光度法, 原理是基于基态原子外层电子对其共振发射波长的吸收进行定量分析的一种方法, 该方法能够测定周期表中 60 多种金属元素的含量, 检出限在 ng/mL 水平, 具有选择性强、精密度高、灵敏度高、抗干扰能力强等优点。自 1955 年澳大利亚科学家瓦尔西发表《原子吸收光谱在化学分析中的应用》并展示原子吸收光谱仪以来, 原子吸收光谱法已发展成为应用广泛的低含量元素的定量检测方法^[5-6]。目前, 该方法存在测定不同元素时必须更换不同元素灯、不能实现多元素同时测定、对实验技术人员理论知识要求较高、设备价格昂贵等缺点。

1.1.2 原子荧光光谱法。原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry)是基于气态自由原子吸收特征波长的辐射后激发到高能态, 高能态又跃迁回基态或低能态时发射出具有特征波长的荧光, 通过荧光强度对待测元素进行定量测量的方法。原子荧光光谱法是目前测定微量砷、锑、铋、汞、硒、碲、锗等元素最成功的分析方法之一^[7]。自 1964 年 Winefordner 等^[8]提出原子荧光光谱概念后, 经过半个世纪的发展, 原子荧光光谱法因其高灵敏度、多元素同时检出等优点, 使得原子荧光光谱法广泛使用于冶金、农业、材料科学、生物医学等领域^[9]。林海兰等^[10]建立了一种新的测定土壤和沉积物中砷、汞、硒、锑和铋含量的方法——王水水浴消解-原子荧光光谱法, 该方法具有设备简单、普及性强、检出限低、重复性高等优点。钟雪雯等^[11]通过建立石墨消解-

基金项目 2019 年度广西壮族自治区中青年教师基础能力提升项目(2019KY0862); 广西科技师范学院糖蔗资源绿色高效技术开发与应用青年科研创新团队项目(GXKS2020QNTD01); 广西科技师范学院青年科研创新团队项目(GXKS2020QNTD04)。

作者简介 孙晓波(1987—), 女, 河南安阳人, 讲师, 硕士, 从事糖资源及天然产物活性成分分析研究。*通信作者, 高级工程师, 硕士, 从事糖资源与食品工程技术研发。

收稿日期 2021-08-02

原子荧光光谱法测定了土壤中总硒的含量。

1.1.3 原子发射光谱法。原子发射光谱法(atomic emission spectroscopy)是基于受激原子或离子外层电子发射特征光学光谱而回到低能级的定量、定性分析方法,可以测定周期表中 70 多种元素。原子发射光谱法具有灵敏度高、选择性好、分析速度快、可实现多元素的同时测定等优点^[12-13]。自 1859 年德国学者 Kirchhoff 和 Bunsen 设计制造了第一台光谱分析仪器以来^[14],原子发射光谱法已逐渐发展成为微量金属元素成分定性分析的常用方法。

1.1.4 电感耦合等离子体发射光谱法。电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry),其原理是在传统的原子发射光谱基础上,将原子发射光谱光源更换为 ICP,通过高频电感耦合产生等离子体放电的光源将待测物质蒸发、解离、电离并激发使之产生特定波长的谱线,再根据光谱图中谱线波长判断是否存在某种元素,根据谱线强度测定元素含量。ICP 具有环形结构、高温和高电子密度的特点,采用 ICP 作为激发光源具有分析速度快、线性范围广、干扰少、准确度和精密度高等优点,克服了原子发射光谱法本身的不足,已成为农业、冶金、材料科学等领域重金属元素定量测量的常用方法^[15-16]。

1.1.5 紫外-可见吸收光谱法。紫外-可见吸收光谱法(ultraviolet-visible absorption spectroscopy)也是测定土壤重金属元素含量最常用的方法之一。紫外-可见吸收光谱法是基于分子内部电子跃迁产生的吸收光谱而进行分析的方法,该方法通过测定待测物质在 190~760 nm 光谱区内特定波长的吸光度,对该物质进行定性定量分析。该方法使用设备简单、分析检出速度快、前处理方便快捷,因此在土壤、食品、材料等领域重金属元素的分析方面应用较为广泛^[17-18],由于有时需要向待测物质中加入显色剂,也会引入附带物的干扰从而导致测量存在误差。冯泳兰等^[19]合成了可逆的专一性显色剂 3,5-二氯水杨醛缩罗丹明 B 酰肼,高选择性地测定出溶液中 Cu^{2+} 浓度,最低检测限达到了 9.30×10^{-8} mol/L;袁跃华等^[20]基于罗丹明 B 酰肼和三苯胺染料合成了分子探针(RTPA),该探针在水溶液中可以实现高选择识别,最低检测限达到了 6.35×10^{-7} mol/L。

1.1.6 X 射线荧光光谱法。X 射线荧光光谱法(X-Ray fluorescence spectrometry)是所有元素分析方法中最常用的一种,具有灵敏度高、测定范围广、快速方便、待测样无损等优点^[21-22],其原理是基态原子吸收特定波长的辐射后被激发至高能态,以光辐射的形态发射出特征波长荧光,通过测定荧光强度进行定量分析。李亚等^[23]将高含量有机碳样品灼烧后烧熔制样,使用 X 射线荧光光谱仪测定铝、铁、钛、锰等元素含量,检出限到达 0.01%,检测结果相对偏差均小于 1.00%;李强等^[24]采用高压粉末制样法测定出富钴结壳样品中 20 种金属元素含量,测定结果的相对标准偏差为 0.22%~0.91%。

1.1.7 激光诱导击穿光谱法。激光诱导击穿光谱法(laser induced breakdown spectroscopy LIBS)是基础原子发射光谱且

激光作为激发源的新兴元素分析技术,脉冲激光聚焦在待测样品上,使得样品形成高温、高密度的激光等离子体,等离子体在衰减过程中会发射出特定波长的光谱,光谱线的波长和强度将用于定性、定量分析,具有检测速度快、消耗样品少、多元素同时检出等优点,广泛应用于冶金分析、医疗诊断、土壤污染检测等领域,缺点是准确度相对较低^[25]。张珉等^[26]对 2015 年以来 LIBS 技术在常见疾病和恶性肿瘤等医学领域的应用情况进行了统计,发现 LIBS 技术在医学检测领域具有明显的应用空间和发展意义,认为 LIBS 与纳米技术等融合可作为精密医学诊断的新工具;林晓梅等^[27]使用 LIBS 技术对土壤中重金属铬进行定量分析,特征谱线检测限在 70 mg/kg 附近,相关系数 R^2 超过 0.97;李红莲等^[28]使用 LIBS 技术对土壤中铅、铬元素进行定量分析发现,谱线峰值积分面积的内标法可以降低最大相对误差和检测限,提高测量精确度。

1.2 电化学分析法 电化学分析法(electrochemical analysis)是一种基于物质组分的电化学性质和变化规律分析其性质和数量的方法^[29],具有仪器体积小、操作简单、检测速度快等优点,但存在样品前处理复杂、易受杂质离子干扰等缺点^[30-31]。根据电流、电压等与待测金属离子电化学特性相关的电信号变化,电化学分析法包含溶出伏安分析法、离子选择性电极法和极谱分析法等。利健文等^[32]使用壳聚糖-超高纯单壁碳纳米管修饰电极,采用溶出伏安法对溶液中 Pb^{2+} 进行检测,溶出峰电流与其浓度在 $(0.5 \sim 30.0) \times 10^{-6}$ g/L 范围内呈良好线性关系,检出限为 1.0×10^{-7} g/L;陈瑶等^[33]研发出一种以低维度纳米材料作为基本单元构建而成的新型气凝胶多孔材料,使用该凝胶对电极进行修饰后,同时对水溶液中重金属离子 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Hg^{2+} 进行检测,表现出较高的灵敏度和选择性,各重金属离子检出限分别为 9×10^{-9} mol/L、 1×10^{-9} mol/L、 8×10^{-9} mol/L 和 0.9×10^{-9} mol/L;陈秀梅等^[34]通过碱性消解-伏安极谱法测定土壤中六价铬,方法检出限为 7.65×10^{-6} g/L,表明极谱法有一定的测定土壤重金属含量的能力。

1.3 生物传感器法 生物传感器法(biosensors)是综合信息科学和生命科学技术研发出的一种新型检测技术,其原理是利用某些具有生物活性的物质作为敏感材料,通过物理和化学转换器和信号放大器记录活性物质与重金属离子结合所引起的物理和化学性质变化。根据生物活性物质的不同,可分为 DNA 传感器、酶传感器、免疫传感器、微生物传感器、细胞传感器等。其中,DNA 传感器、酶传感器和细胞传感器常用于环境重金属离子检测领域^[35-37]。Naik 等^[38]研制出一种单室圆柱形微生物燃料电池(MFC),研究铜、铬、锌、镍等金属离子对电话性生物菌群的传感能力,结果表明当铜等重金属离子浓度高于 10 mg/L 时,MFC 表现出较高的敏感性;Sciuto 等^[39]设计出一种新型便携式生物传感器用于测定水体中的砷、汞等离子含量,结果显示该传感器对砷的检测限为 1.5×10^{-6} g/L,定量限为 5.0×10^{-6} g/L,其中检测限值比世界卫生组织要求的危险值低一个数量级,表现出良好的检测

性能; Ji 等^[40]利用水稻铬蛋白 D6A3 与 N 端红色荧光蛋白 mApple 融合构建蛋白生物传感器,结果显示传感器与铜、铬、镍等 3 种重金属离子结合能力由强到弱依次为铜、铬、镍,传感器荧光浓度与金属离子浓度在一定范围内呈现强线性关系,表明该蛋白传感器具备较好的重金属离子定量检测能力。

2 新型重金属检测法

2.1 太赫兹光谱法 太赫兹光谱技术(terahertz time-domain spectroscopy)是近年来发展起来的前沿技术,在生命科学、材料科学、通信和环境保护等方面有着广泛的应用前景^[41]。太赫兹光是波长介于红外和微波之间的特殊电磁波谱,频率在 0.1~10.0 THz,具有高极性分子强吸收性、指纹光谱特性、高带宽、高穿透性、光子能量低等特点,是人类目前了解最少、开发最少的一个电磁波段^[42]。太赫兹光谱技术的原理是利用太赫兹光探测分子间及分子内部介于氢键和范德华力等内部作用力振动引发的能量吸收特性,同时也探测重金属络合物分子的振动特性,从而得到样品信息^[43]。李帅帅等^[44]基于太赫兹光谱技术对水体中的重金属进行检测,发现在 1.7 与 1.2 THz 处汞溶液和镉溶液在一定重金属浓度范围内的吸收系数谱有明显吸收峰变化,通过搭建的主成分分析、概率神经网络模型,重金属离子浓度识别率达到 95% 以上。燕芳等^[45]使用太赫兹光谱技术对溶液中重金属离子浓度进行定性分析,得到不同处理方式秸秆吸附重金属离子前后的太赫兹光谱图,证明太赫兹光谱技术在水体重金属污染检测中具有良好的应用前景。

2.2 环境磁学法 1986 年,国际上第一本环境磁学专著《Environmental Magnetism》出版,系统地介绍了矿物磁学性质及其在不同领域的应用^[46]。环境磁学是基于古地磁学和岩石磁学的技术与方法,根据磁场效应定量测定岩石或土壤中的重金属含量,在环境污染、油气勘探、古环境研究等领域有广泛应用前景^[47]。NGUYEN THI THU HIEN^[48]基于地球化学和环境磁学特征对越南红河沉积物重金属污染物进行了研究,通过聚类分析和主成分分析发现,红河流域沉积物中重金属铬、钒主要富集在富含铁锰氧化物黏土中。Li 等^[49]基于环境磁学对巢湖沉积物磁性参数和重金属浓度进行分析,探明沉积物中主要磁性矿物为铁磁性矿物,镉、汞、锌中度富集,镉、汞构成相当大的生态风险。

2.3 高光谱遥感分析法 高光谱遥感技术(hyperspectral remote sensing)将光谱技术与成像技术结合,能够获取待测区域光谱信息和空间分布信息,具有大面积、无损伤及非接触等优势^[50-51]。钱家炜等^[52]搭建出基于砷、镉、铬、铜等 8 种土壤重金属含量与高光谱数据建立的定量模型,实验模型具有良好的拟合度,可用于预测张家港市的农田土壤重金属含量。阿依努尔·麦提努日等^[53]以吐鲁番盆地葡萄园土壤中重金属铅为研究对象,分析土壤原始光谱在内多种光谱变换下的土壤光谱反射率数据与铅含量的关系,构建土壤铅含量模型,模型准确度可达 0.866。陈红艳^[54]以山东德州农田土壤为实验区,通过高光谱遥感技术获得的土壤主要成分与实

验室测定值相似度超过 0.90,具备较好的预测精度。

3 结语

随着科学技术的飞速发展,现有的土壤重金属离子分析检测技术迭代更新速度越来越快,新的技术也不断出现,为今后土壤重金属污染的检测和土壤修复提供了重要参考。由于每种检测手段各有优缺点,因此实际工作中应结合具体需求采用恰当的检测方法。随着人们对检测技术认识的不断深入,快速便捷、自动化、智能化、易操作等特质将成为检测技术发展的重要方向。

参考文献

- [1] 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, 898.
- [2] 周韬焜. 我国农田土壤重金属污染及其防治策略研究进展[J]. 南方农机, 2021, 52(10): 33-35.
- [3] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某城市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5552-5561.
- [4] LIU R Q, BAO K S, YAO S C, et al. Ecological risk assessment and distribution of potentially harmful trace elements in lake sediments of Songnen Plain, NE China[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2018, 163: 117-124.
- [5] ROBINSON J W. Atomic absorption spectroscopy[J]. Analytical chemistry, 1960, 32(8): 17A-29A.
- [6] 贡利伟, 郑慧艳. 原子吸收光谱法测定土壤、蘑菇和植物样品中的重金属[J]. 山东化工, 2020, 49(14): 101-102, 107.
- [7] 李刚, 胡斯究, 陈琳玲. 原子荧光光谱分析技术的创新与发展[J]. 岩矿测试, 2013, 32(3): 358-376.
- [8] WINEFORDNER J D, VICKERS T J. Atomic fluorescence spectroscopy as a means of chemical analysis[J]. Analytical chemistry, 1964, 36(1): 161-165.
- [9] 雍厚辉, 周丽娟. 原子荧光光谱分析过程中若干问题的讨论[J]. 广东化工, 2019, 46(9): 158, 163.
- [10] 林海兰, 朱日龙, 于磊, 等. 水浴消解-原子荧光光谱法测定土壤和沉积物中砷、汞、硒、锑和铋[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1528-1533.
- [11] 钟雪雯, 杨曦, 刘方, 等. 石墨消解-原子荧光光谱法测定土壤中的总砷[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(3): 42-46.
- [12] 卢祝靛. 地表水中重金属污染监测及铋的检测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [13] HIEFTJE G M. Atomic emission spectroscopy-It lasts and lasts and lasts[J]. Journal of chemical education, 2000, 77(5): 577-583.
- [14] KOIRTYOHANN S R A history of atomic absorption spectroscopy[J]. Spectrochimica acta part B: Atomic spectroscopy, 1980, 35(11/12): 663-670.
- [15] 孙玉梅, 段晓婷, 吴琦, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法同时测定饲料中 13 种元素[J]. 饲料研究, 2021, 44(6): 114-117.
- [16] 薛宁. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定萤石中 11 种元素[J]. 冶金分析, 2021, 41(3): 62-67.
- [17] 孙会会, 仲建军, 袁明俊, 等. 土壤中重金属检测的研究进展[J]. 化学工程师, 2020, 34(6): 50-54.
- [18] 司福龙. 食品重金属污染源危害及其检测方法的探讨[J]. 科技创新导报, 2019, 16(7): 245-246.
- [19] 冯泳兰, 方敬贤, 刘超, 等. 3,5-二氯水杨醛缩罗丹明 B 酰肼的合成及对 Cu²⁺ 高选择性识别[J]. 无机化学学报, 2016, 32(1): 56-62.
- [20] 袁跃华, 王迎洁, 付晓璐, 等. 基于三苯胺-罗丹明染料荧光探针针对 pH 和 Cu²⁺ 的选择性识别[J]. 分析试验室, 2020, 39(2): 197-202.
- [21] 段鹤阳, 潘俊帆. X 射线荧光光谱法的应用和发展前景[J]. 化工管理, 2021(14): 55-56.
- [22] PERALTA E, PÉREZ G, OJEDA G, et al. Heavy metal availability assessment using portable X-ray fluorescence and single extraction procedures on former vineyard polluted soils[J]. Science of the total environment, 2020, 726: 1-9.
- [23] 李亚, 王英凯, 张旭, 等. X 射线荧光光谱法测定高含量有机碳样品中的钾、钠、钙、镁、硅、铝、铁、钛、锰、磷[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(2): 57-61.
- [24] 李强, 张学华, 程思海, 等. 高压粉末制样-X 射线荧光光谱法测定富钴结壳样品中 20 种组分[J]. 冶金分析, 2021, 41(4): 20-26.

- [25] 杨家宝.激光诱导击穿光谱在土壤重金属检测上的应用[J].环境与发
展,2020,32(6):79-80.
- [26] 张琨,徐宗伟,陈传松,等.激光诱导击穿光谱在疾病诊断中的应用前
景[J].光谱学与光谱分析,2021,41(6):1961-1965.
- [27] 林晓梅,曹玉莹,赵上勇,等.激光诱导击穿光谱技术对土壤中重金属
元素 Cr 的定量分析[J].光谱学与光谱分析,2021,41(3):875-879.
- [28] 李红莲,康沙沙,谢红杰,等.土壤中 Pb、Cr 元素激光诱导击穿光谱技
术定量分析[J].光电子·激光,2020,31(10):1036-1043.
- [29] 张子仪,冯建远,郭旋,等.电化学分析电极的应用研究进展[J].化工
设计通讯,2020,46(8):186-187.
- [30] CUI L, WU J, JU H X. Electrochemical sensing of heavy metal ions with
inorganic, organic and bio-materials[J]. Biosensors and bioelectronics,
2015,63:276-286.
- [31] BANSOD B, KUMAR T, THAKUR R, et al. A review on various electro-
chemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing
platforms[J]. Biosensors and bioelectronics, 2017,94:443-455.
- [32] 利健文,黄象金,韦寿莲,壳聚糖-超高纯单壁碳纳米管修饰电极检测
Pb²⁺[J].化学研究与应用,2020,32(5):813-818.
- [33] 陈瑶,文丹.新型气凝胶在电分析传感领域的应用研究进展[J].分析
化学,2021,49(6):922-930.
- [34] 陈秀梅,黄俐,王敏敏.碱性消解-伏安极谱法测定土壤中六价铬[J].
环境监控与预警,2015,7(4):34-36.
- [35] HYNINEN A, VIRTA M. Whole-cell bioreporters for the detection of
bioavailable metals[J]. Advances in biochemical engineering/ biotech-
nology, 2010,118:31-63.
- [36] 高一娜,陈福海,栾慧,等.农业土壤重金属含量检测方法研究进展
[J].黑龙江农业科学,2018(1):102-105,109.
- [37] 王明华,赵二芳,李杜娟.检测重金属离子生物传感器的研究进展[J].
生物技术通报,2013(10):46-51.
- [38] NAIK S, JUJJAVARAPU S E. Self-powered and reusable microbial fuel
cell biosensor for toxicity detection in heavy metal polluted water[J/OL].
Journal of environmental chemical engineering, 2021,9(7/8)[2021-03-
17].https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105318.
- [39] SCIUTO E L, PETRALIA S, VAN DER MEER J R, et al. Miniaturized
electrochemical biosensor based on whole-cell for heavy metal ions detec-
tion in water[J]. Biotechnology and bioengineering, 2021,118(4):1456-
- 1465.
- [40] JI Y Y, GUAN F F, ZHOU X, et al. Construction of a mApple-D6A3-
mediated biosensor for detection of heavy metal ions[J]. AMB express,
2020,10(1):213-221.
- [41] HAO S B, HUANG H C, MA Y Y, et al. Sensitive characterizations of
natural dolomite by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics com-
munications, 2020,456:524-529.
- [42] 武帅,屈浩,徐昊,等.太赫兹技术应用进展[J].电子技术应用,2019,45
(7):3-7,18.
- [43] 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):131-138,145.
- [44] 李帅帅,罗慧,卢伟.基于太赫兹光谱的水体重金属检测[J].南京农业
大学学报,2021,44(5):895-902.
- [45] 燕芳,邹粮徽,王志春.太赫兹时域光谱技术的重金属离子吸附检测方
法研究[J].光谱学与光谱分析,2018,38(4):1044-1048.
- [46] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental magnetism[M].London:
Allen & Unwin, 1986.
- [47] 周洪英.徐州城市表层土壤重金属污染特征与环境磁学响应[D].徐
州:中国矿业大学,2016.
- [48] NGUYEN THI THU HIEN.基于地球化学和环境磁学特征的越南红河
沉积物重金属污染研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [49] LI X L, YANG Y, YANG J X, et al. Rapid diagnosis of heavy metal pol-
lution in lake sediments based on environmental magnetism and machine
learning[J/OL]. Journal of hazardous materials, 2021,416[2021-03-17].
https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126163.
- [50] 刘彦平,罗晴,程和发.高光谱遥感技术在土壤重金属含量测定领域的
应用与发展[J].农业环境科学学报,2020,39(12):2699-2709.
- [51] 郭学飞,曹颖,焦润成,等.土壤重金属污染高光谱遥感监测方法综述
[J].城市地质,2020,15(3):320-326.
- [52] 钱家伟,刘晓青,张静静,等.张家港市农田土壤重金属含量高光谱遥
感监测模型构建[J].浙江农业学报,2020,32(8):1437-1445.
- [53] 阿依努尔·麦提努日,麦提吐尔逊·艾则孜,麦尔哈巴·图尔贡,
等.吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属铅含量高光谱估算[J].遥感技术与
应用,2021,36(2):362-371.
- [54] 陈红艳.土壤主要养分含量的高光谱估测研究[D].泰安:山东农业大
学,2012.

(上接第 21 页)

- [44] GILL A L, SCHILLING J, HOBBI S E. Experimental nitrogen fertilisation
globally accelerates, then slows decomposition of leaf litter[J]. Ecology
letters, 2021,24(4):802-811.
- [45] ALLISON S D, HANSON C A, TRESEDER K K. Nitrogen fertilization
reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal e-
cosystems[J]. Soil biology and biochemistry, 2007,39(8):1878-1887.
- [46] HANDA I T, AERTS R, BERENDSE F, et al. Consequences of biodiversity
loss for litter decomposition across biomes[J]. Nature, 2014,509(7499):
218-221.
- [47] BARDGETT R D, VAN DER PUTTEN W H. Belowground biodiversity and
ecosystem functioning[J]. Nature, 2014,515(7528):505-511.
- [48] HUANG W, GONZÁLEZ G, ZOU X M. Earthworm abundance and func-
tional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon
level: A global meta-analysis[J]. Applied soil ecology, 2020,150:1-8.
- [49] XIN W D, YIN X Q, SONG B. Contribution of soil fauna to litter decom-
position in songnen sandy lands in northeastern China[J]. Journal of arid
environments, 2012,77:90-95.
- [50] BAHAM M, HILDEBRAND F, FORSLUND S K, et al. Structure and
function of the global topsoil microbiome[J]. Nature, 2018,560(7717):
233-237.
- [51] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynam-
ics of soil[J]. Soil biology and biochemistry, 2010,42(3):391-404.
- [52] ZHANG L, XU M G, LIU Y, et al. Carbon and phosphorus exchange may
enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phos-
phate-solubilizing bacterium[J]. New phytologist, 2016,210(3):1022-
1032.
- [53] XU J, LIU S J, SONG S R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi influence
decomposition and the associated soil microbial community under different
soil phosphorus availability[J]. Soil biology and biochemistry, 2018,120:
181-190.
- [54] VERESOGLOU S D, SEN R, MAMOLOU A P, et al. Plant species identity
and arbuscular mycorrhizal status modulate potential nitrification rates in
nitrogen-limited grassland soils[J]. Journal of ecology 2011,99(6):1339-
1349.
- [55] 杨林.凋落物分解中酶活性影响因素研究[J].生物化工,2020,6(5):
151-153.
- [56] 路锦,张筱,黄樱,等.氮沉降对森林凋落物分解过程中土壤酶和微生
物影响的研究进展[J].湖南生态科学学报,2020,7(4):54-61.
- [57] 许子君,万晓华,梁艺凡,等.根系在凋落物层生长对凋落叶分解及酶
活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):31-38.
- [58] 夏磊,吴福忠,杨万勤,等.川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物
对红桦凋落物质量损失的贡献[J].应用生态学报,2012,23(2):301-
306.