

土壤生态环境健康监测与评价技术现状与展望

高旭¹, 罗浩¹, 张光¹, 王栋¹, 丁亮^{1*}, 史薇²

(1. 江苏省环境工程技术有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 污染控制与资源化利用国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023)

摘要:综述了国内对土壤生态环境健康的研究进展,总结了传统土壤环境监测技术的不足,介绍了土壤生态环境健康监测技术,包括植物、动物、微生物等生态监测方法,旨在通过对各项技术的比较,了解各项监测技术对土壤健康监测和评价现状。对土壤生态环境健康监测与评价技术的发展趋势进行展望,提出未来需要对土壤生态健康监测技术进行标准化和定量化;开展多生物指标联合监测;结合遥感和物联网技术扩大土壤时空监测尺度,形成完整的土壤生态环境健康监测与评价体系,为环境管理部门有效监测土壤生态环境提供依据。

关键词:监测技术;土壤健康;生态监测;评价

中图分类号:X833

文献标志码:C

文章编号:1674-6732(2021)05-0038-07

Current Status and Prospects of Soil Ecological Environment Health Monitoring Technology

GAO Xu¹, LUO Hao¹, ZHANG Guang¹, WANG Dong¹, DING Liang^{1*}, SHI Wei²

(1. Jiangsu Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210019, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: This article reviews the research progress of soil environmental monitoring technologies, summarizes the shortcomings of traditional soil environmental monitoring technologies, and introduces the soil ecological environment health monitoring technologies, which include botanic, zoological and microbial monitoring technologies. Comparing the research progress of related technologies helps to comprehend the current status of soil health monitoring and evaluation of various monitoring technologies. Finally, this article looks forward to the future development trend of soil ecological environment health monitoring technology. Standardization and quantitation of soil ecological environment health monitoring technology, joint monitoring of multiple biological index, enlarging spatio-temporal monitoring scale by combination of remote sensing with internet of things, the above measurements should be taken to form a complete system of soil health monitoring and evaluation and well provides a basis for helping environmental management departments to effectively monitor the soil ecological environment.

Key words: Monitoring technology; Soil health; Ecological monitoring; Evaluate

0 前言

2021年联合国粮食及农业组织与联合国环境规划署发表的《全球土壤污染评估》报告指出,日益加剧的土壤污染和四处扩散的废弃物正在威胁着未来全球的粮食生产以及人类和环境的健康^[1]。2014年《全国污染土壤环境调查公报》报

道,我国工矿业废弃地引起了严重土壤环境问题,其中工业废弃地、重污染企业用地、采矿区等场地的土壤超标点位都在30%以上^[2]。2020年中国地质调查局等团队利用地质累积指数(Igeo)等和美国环保局(USEPA)推荐的健康风险评估方法,对我国193个地级以上城市规划区表层土壤13种微

收稿日期:2021-07-02;修订日期:2021-07-28

基金项目:江苏省生态环境科研课题基金资助项目(2020001);江苏省自然科学基金资助项目(BK20181094);国家自然科学基金资助项目(41807141,41902276);国家重点研发计划基金资助项目(2018YFC1801006,2019YFC1804000);

作者简介:高旭(1995—),男,助理工程师,硕士,主要从事土壤及地下水污染调查防治工作。

*通讯作者:丁亮 E-mail:dingliang@jsep.com

量元素的污染水平和健康风险进行了评价,结果表明汞(Hg)的 Igeo 在东部沿海和黄河中游地区较高,达到中度污染水平。湖南省郴州市等 5 个城市规划区土壤重金属暴露对未成年人具有潜在非致癌风险^[3]。土壤污染不仅会直接导致土壤质量和耕地生产力的降低,直接危及食品、生态安全和人体健康^[4],还会通过水力作用等对地下水造成污染,而流通的地下水会将污染扩散到其他土壤中,严重破坏了土壤生态系统的稳定性^[5]。2020 年第 7 个世界土壤日的主题为“保持土壤生命力、保护土壤生物多样性”,目标是提升土壤管理水平,应对土壤生物多样性丧失等问题,维持健康的土壤生态系统^[6]。

土壤生态健康是生态系统健康的重要组成部分。杨晓霞等^[7]认为,土壤健康首先是能生产出对人体具有健康效益的动植物产品,其次是应该具有改善水和大气质量的能力以及有一定程度的抵抗污染物的能力。当然,更为重要的是,还应该能够直接或间接地促进植物、动物、微生物以及人体的健康。朱永官等^[8]认为土壤健康是指土壤可以保障粮食安全和维持陆地生态系统功能。康奈尔大学的 Johannes 等^[9]认为土壤健康是指土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要生命生态系统,将农业和土壤科学、利益需求和可持续供应链管理联系起来。历史上土壤健康评估侧重于农业作物生产,但今天的土壤健康还包含了土壤在土壤质量安全、人类健康和气候变化等方面的作用^[9]。

如何有效判断土壤健康状态,是实现绿色发展的基本问题。由 Moebius^[10]所在的康奈尔土壤健康团队提出的土壤健康评价系统草案中选取了 39 个指标(其中物理指标 16 个、生物指标 11 个、化学指标 12 个),经过筛选最后选取了 12 个易检测、低成本的指标,以此衡量农田土壤生态健康状况。澳大利亚学者 Pankhurst 等^[11]提出了表征土壤健康的生态指标体系,主要包括微生物量、土壤微生物、根系微型土壤动物区系、中型土壤动物区系、大型土壤动物区系、土壤酶和植物。Rinot 等^[12]利用最小数据集(minimum dataset, MDS)模型来评估土壤健康,通过专家预先评估最小数据集的多种土壤健康指标,经数理统计分析,最终选取指标数量通常在 6~8 个。Bhandari 等^[13]则通过牧场土壤微生物生物量、群落结构和酶活性,与植物(紫花苜蓿)相互作用反映土壤健康。由此可见,不同区域、不

同类型的土壤有各自的健康监测指标,但是各自的生态健康评价体系基本都是基于物理、化学和生物等监测方法。现总结了土壤生态环境健康监测与评价技术,包括植物、动物、微生物等生态监测方法,比较了土壤传统理化监测方法与生态环境健康监测方法的优缺点,为环境管理部门有效监测土壤生态环境提供依据。

1 土壤理化监测技术

因土壤理化监测方法具有易采样、成本低、检测快等优点,目前许多土壤环境健康监测多采用此方法。各个国家和地区的监测体系目前都包含物理化学参数在内的土壤健康体系,如美国土壤质量研究所开发的评估框架(SMAF);康奈尔土壤健康团队开发的土壤健康监测体系;法国土壤质量监测系统(RMQS)计划;荷兰国家公共卫生与环境研究所(RIVM)开发的一套土壤生态系统服务指标用于荷兰土壤质量监测网络^[14]。常用的物理监测指标包括土壤质地、水分、容重、导水率、团聚体、渗透力、土层深度、孔隙度等。化学监测指标包括 pH 值、有机质、重金属、有效养分、含盐量等。很多学者对土壤环境理化监测方法已有研究,例如 Seaton 等^[15]在威尔士的不同生境中采集了 1 350 多块表层土壤,对碳、碳氮比、氮、总磷、电导率等参数进行检测并建模评估土壤环境。Soto 等^[16]使用有机质、温度、湿度、土壤肥力、土壤渗透性等综合指数监测半干旱地区农业土壤健康状况。Khosravi 等^[17]通过在伊朗的铜矿废弃场地检测 pH 值、锌、铅等指标来监测矿山场地的危害性。陆元昌等^[18]对森林土壤质量进行物理特征监测,包括含水量测定、土壤粒径等;土壤化学特征监测,包括碳酸钙、有机碳、交换性酸根、阳离子交换量及土壤中的磷、钾、钙、镁等元素含量。

目前基于如电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)及总有机碳(TOC)分析仪等仪器的土壤环境理化监测方法仍存在以下不足:(1)随着化学物质种类的快速增加,传统的理化监测无论在成本还是效率上,已不能满足生态监测的需要;(2)环境中的污染因素复杂,污染物之间的相互作用不是多个单一因素的简单加合;(3)理化分析难以对多种污染物以及多种暴露途径的综合暴露进行累积风险评价;(4)理化分析只能对已知化学物质精确定量,不能对未知监

测指标进行评价,不能反映污染物对生物体的整体生态效应^[19]。因此,目前仍迫切需要以土壤生态健康为核心的监测方法作为土壤环境质量监测的补充。

2 土壤生态环境健康监测与评价技术

由于土壤生物参与大部分土壤生物化学过程,直接或间接影响着土壤生态系统功能,因此,土壤生态监测技术能够更加全面快速地反映土壤健康程度。土壤生态环境包括土壤的物理、化学和生物特性,土壤生态健康指标对土壤质量的动态变化十分敏感,其生物监测指标比物理、化学指标对外界环境改变的响应更加迅速。土壤健康的生物指标除了包括土壤植物、动物的种群数量等,还包括微生物生物量、群落结构等。此外,土壤生物代谢过程如呼吸作用等,以及与土壤有机质分解有关的微生物活动也可作为土壤生态变化的监测指标^[20]。

2.1 植物监测

土壤是植物生活的基质,植物的形态及生理的变化因其敏感性和普遍性,而更适合作为土壤健康指标开展研究。植物对土壤污染物产生的反应主要表现为:生理代谢异常,如呼吸作用加强、蒸腾速率降低;植物化学成分改变;生长发育异常;叶片出现伤斑等。植物的根、茎、叶均可出现受害症状,如铜、镍、钴会抑制新根伸长^[21]。因此,通过对指示植物的观测可确定土壤污染及污染程度。例如,有学者发现在西班牙南部矿井事故后,橄榄树叶子和果实的污染程度(As、Cd、Pb、Ti)就达到了危害人类健康的水平^[22]。陆元昌等^[18]对树冠落叶和褪色的直接观测判断林地土壤健康。左思艺等^[23]调查了贵州省张家湾子金矿苔藓植物,对重污染区、中污染区和清洁区苔藓植物优势种及土壤基质 6 种重金属元素(Cu、Zn、Cd、Pb、Hg、As)含量进行测定,研究发现苔藓重金属含量与土壤重金属含量呈正相关,苔藓植物能监测该矿区重金属污染。以上案例虽然表明植物对污染土壤存在监测价值,但是该监测方法尚存在很多局限性,植物指示不能反映出同一土壤的质量,只能反映出不同土壤的性质,如酸性、碱性或者重金属污染的水平等。由于植物生长发育和各种环境因素密切相关,并且植物的生长周期长,分析技术较复杂,所以植物监测方法在土壤生态环境的快速监测上还有待进一步研究。

2.2 动物监测

土壤动物作为活的有机体,受到土壤类型、温度、气候等自然因素和人类耕作以及土地管理利用方式等人为因素的影响,所以土壤生态环境的监测必然少不了土壤动物指示,如土壤节肢动物、蚯蚓和线虫。蚯蚓非常适合作为土壤中化学物质存在的生物监测指标,可以通过蚯蚓动物群的丰度和种类组成^[24],蚯蚓与土壤基质接触的行为(偏好/回避)^[25],化学物质从土壤进入蚯蚓的积累,蚯蚓的生化/细胞学应激生物标志物^[26]来监测土壤污染情况。Ling 等^[27]对某金属矿区的蚯蚓种群结构和数量进行研究,发现蚯蚓种类在重金属(Cd、Zn、Pb、Cu)污染严重的区域快速减少,且不同污染物对不同种群的蚯蚓影响明显。蚯蚓通过摄食等途径富集土壤中的重金属,使土壤中重金属含量显著下降。不同蚯蚓对土壤中的不同重金属富集量不同。Espinosa 等^[28]研究发现,赤子爱胜蚓暴露在吠喃丹污染的土壤中,既无环带发育,也不能产卵。

土壤线虫广泛分布于各种类型的土壤中,是土壤中最丰富的后生动物,对土壤环境变化响应迅速。线虫的多样性可作为环境变化和生产影响的生物指标^[29]。王赢利等^[30]采集了电子拆解厂附近稻田的土壤样品,经检测发现随着重金属污染程度的增加,土壤线虫 c-p2 类群的比例增加,而 c-p3 类群与之相反。研究表明,在电子垃圾重金属污染区域,线虫群落数量和结构可作为其监测指标。

Parisi 等^[31]研究发现适应土壤生境的节肢动物类群数量越高,土壤质量越高。Santorufu 等^[32]利用土壤蝉虫/跳虫比值以及节肢动物多样性对意大利 5 个城市土壤质量进行评价。结果表明,土壤动物群落多样性较丰富,表明土壤有机质和水分含量较高,重金属(Cu、Pb)含量较低,研究还发现,土壤跳虫对土壤性质的变化特别敏感,其可作为环境指示动物。此外,土壤动物的抗氧化酶活性、金属硫蛋白、乙酰胆碱酯酶等生物标志物由于具有较高的灵敏度,通常可用于低剂量污染物的监测,而个体及种群水平的土壤动物主要用于高剂量的污染物监测。其中,部分土壤动物产卵量、卵孵化率和生长率等监测指标对污染物反应灵敏,也可用于低剂量污染物的长期监测^[33]。

2.3 微生物监测

土壤微生物通过自身代谢参与土壤元素循环

和污染物降解等过程,同时在增强根际免疫,提高土壤肥力和作物产量方面扮演关键角色,对土壤健康乃至人类健康具有重要意义^[8]。目前已有多种微生物指标被用来指示土壤健康状况,如微生物群落多样性、微生物功能、基因多样性、土壤酶活性、微生物生物量、病原菌和土壤生物网络复杂性等。

(1)土壤微生物多样性监测。传统土壤微生物多样性研究通常采用培养鉴定法、底物利用分析法和磷脂脂肪酸(PLFA)分析法等。传统分析方法快速且较为可靠,但分类水平较低。随着分子生物学和测序技术的进步,宏基因组学的进展能够更全面地描述土壤中营养水平较低的微生物和无脊椎动物群落的生物多样性,为微生物群落对土壤健康的重要性以及环境变化对土壤生态的早期预警指标提供了新的视角^[34]。Pankaj 等^[35]通过宏基因组分析(454 测序)发现,非耕地土壤中酸杆菌门、变形杆菌门、放线菌门和蓝细菌门的相对丰度显著高于农业土壤。Wolińska 等^[36]利用半导体基因测序仪(Ion Torrent)技术调查了耕地和非耕地土壤中的潜在固氮细菌,发现农田土壤中的固氮细菌主要由变形杆菌门类和伯克霍德氏菌属的微生物组成,蓝细菌门在农田土壤中比在荒地中明显占优势。上述细菌可作为响应农业管理模式的生物多样性指标。宏基因组分析所确定的微生物群落和特定基因的多样性有可能成为污染的生物标志物,例如 Fajardo 等^[37]利用高通量测序仪(Illumina MiSeq)测序技术和生物信息学分析了不同暴露时间下,不同重金属暴露下土壤微生物的功能和结构演变。研究发现细菌代谢活性显著降低,厚壁菌门是最具抗性的微生物种群,取代了其他细菌门(变形菌门、放线菌门等)。Feng 等^[38]发现镉污染增加了对重金属具有潜在耐受能力的微生物的相对丰度,降低了其他对重金属敏感的微生物的丰度,进而改变土壤微生物群落结构。

(2)土壤微生物功能监测。土壤微生物在全球生物多样性中扮演着重要角色,土壤微生物功能包含土壤有机物分解、元素生物地球化学循环、污染物转化、维持生物多样性和生态系统生产力等方面。土壤微生物功能监测的主要方法包括微生物生态生理或代谢功能的测定,如对土壤呼吸和功能性基因等的研究。土壤呼吸作用强度和土壤微生物活性密切相关,呼吸作用强度变化能够反映土壤微生物的活跃程度,其可作为土壤生态环境变化良

好的生物学指标。李明珠等^[39]利用密闭法发现抗生素与重金属复合污染先促进土壤呼吸后减弱,复合污染对土壤微生物呼吸代谢的影响与其培养时间及添加剂量密切相关。单爱琴等^[40]发现四氯化碳与四氯乙烯复合污染增强了对土壤呼吸作用的抑制,四氯化碳与四氯乙烯的交互作用对土壤呼吸的影响主要表现为协同作用。通过土壤微生物功能基因的变化来反映土壤微生物的生理代谢功能的技术也日益成熟,如基因芯片用于研究微生物群落功能活性和生物地球化学循环微生物过程,基因芯片含有探针,涵盖了基因家族中数以万计的基因,而这些基因涉及碳、氮、磷、硫循环,能量代谢,抗生素抗性,重金属抗性和有机污染物降解等功能^[41]。通过高通量宏基因组测序,靶向基因的实时荧光定量 PCR 可检测微生物功能基因的组成,如土壤中特定已知基因(如 *amoA*、*nifk*)的丰度,某一个基因的丰度越大,表明与该基因相关过程的速率越大。

(3)土壤微生物活性监测。微生物活性又称为微生物代谢活力,严格意义上是指微生物在某一时段内所有生命活动的总和,或在环境介质中微生物介导的所有过程的总和^[42]。调查发现,土壤微生物活性是反映土壤受污染程度的敏感指标,也是衡量土壤生产力的重要参数^[43-45]。目前有关土壤微生物活性的研究主要采用土壤微生物呼吸测定法、酶(脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶等)活性测定法等。土壤呼吸和微生物呼吸熵是综合反映土壤污染对微生物活性影响的重要指标,程坤等^[46]发现石油原油以及重金属 Pb、Cd 的复合污染对土壤基础呼吸和微生物呼吸熵具有激活作用,并且重金属复合污染的土壤呼吸强度最大。陈欣瑶等^[47]也发现重金属 Cu 和抗生素类强力霉素单一及复合污染在培养期内均会显著抑制土壤微生物呼吸强度。土壤酶是土壤中一种重要组分,主要由土壤微生物分泌产生,分为胞内酶和胞外酶^[48]。土壤酶活性反映土壤中进行的各种生物化学过程的方向和强度。Lenka 等^[49]研究表明,随着重金属(Cu、Pb)复合污染程度的增加,土壤脲酶、酸性磷酸酶的活性降低。Lipińska 等^[50]研究了在多环芳烃(PAHs)的污染下土壤芳基硫酸酯酶的变化,结果表明土壤在 PAHs 的作用下芳基硫酸酯酶持续失调。

此外,目前利用微生物手段来监测土壤健康的研究还包含以下内容^[51]:如利用底物诱导呼吸、实

时荧光定量 PCR、氯仿熏蒸、土壤微生物群落磷脂脂肪酸 (PLFA) 分析等方法检测微生物生物量, 微生物量越大, 土壤越健康; 利用实时荧光定量 PCR 和 PLFA 等检测真菌和细菌比, 较高的真菌与细菌比例表明土壤系统更具可持续性; 利用实时荧光定量 PCR 和高通量标记基因测序等方法检测菌根的丰度和组成, 菌根的丰度和丰富度越高, 对植物和微生物生态区系越有利^[52]。

3 遥感监测技术

上述的土壤生态监测都是基于在较小空间尺度的研究, 无法获取大尺度空间上土壤污染分布信息。遥感作为远距离探测技术为宏观快速获取土壤生态环境信息提供了新方法, 尤其是近年来卫星遥感在时空分辨率、光谱分辨率等方面发展迅猛, 推动了遥感技术在土壤污染监测方面的应用。近年来已有利用遥感技术在矿区、石油开采区等区域开展土壤环境监测, 主要监测的污染物是重金属和烃类等^[53]。此外, 由于植被受土壤污染胁迫后也会产生光谱变化, 所以结合污染区域植物的胁迫反应, 可以进行土壤污染物以及污染区域生物有效性的遥感监测^[54]。遥感探测技术具有宏观连续等优势, 可以监测土壤污染对生态环境的影响范围与损害程度, 但是其精度受限, 未来仍需要结合已有生态监测技术对土壤环境进行全面快速的生态监测与健康评价。

4 展望

2021 年, 生态环境部召开“十四五”生态环境监测规划编制会议。“十四五”期间, 我国生态环境监测目标主要为构建“大监测”格局, 补齐生态短板, 加快高质量转型。借此, 对土壤生态环境健康监测技术提出以下展望:

(1) 对土壤生态环境健康监测技术进行标准化和量化。相对于常规土壤物理化学测试, 土壤生态环境监测的可重复性和时空变异性仍需完善^[55]。一旦选定了一套土壤健康指标, 就迫切需要对现场采样和处理程序以及实验室方法和指南进行标准化。在取样方案(如用足够数量的样本来推断取样区域)、取样方法(如土壤体积和深度)、取样时间和统计方法的应用方面需要注意^[56]。同时土壤生物种类多、数量大、变化快, 在监测中一定程度上存在功能冗余性, 所以也要逐步

完善生物指标的量化。

(2) 完善多生物指标联合监测体系。单一受试生物或单一生物指标不能对土壤健康进行全面评价, 可应用多种生物测试和微宇宙试验监测污染物在生态系统水平上产生的整体生态效应。同一种土壤污染物对不同的生物指标影响不同, 且不同的污染物对同一种生物也会产生不同的毒性影响。利用同一营养级的多指标生物测试, 以及不同营养级的生物测试监测土壤健康状况, 成为未来土壤生态环境健康监测的发展趋势。

(3) 利用遥感技术和物联网扩大土壤健康时空监测尺度。遥感不仅应包括土壤特性的空间信息, 还可以通过数学模型评估与土壤生态功能相关的环境因子。相关监测设备应当运用于实现分布式传感器部署、快速数据传输、存储和处理, 并利用计算机和 5G 通信技术, 结合生物生态监测技术, 开发用于土壤生态环境快速全面监测的物联网传感器网络。

生态环境监测工作在我国逐步兴起和发展, 其内容复杂且涉及面广, 需各方面工作互相关联、互相支撑。未来需要对土壤生态环境健康监测技术进行标准化和量化; 利用多生物指标进行土壤联合监测; 结合遥感和物联网技术扩大土壤时空监测尺度, 形成完整的土壤生态环境监测体系, 加快土壤生态环境监测与评价体系的平台建设, 以便更好地为环境管理工作服务。

[参考文献]

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global assessment of soil pollution: Report[R]. 2021.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2021-05-02]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [3] 李括, 彭敏, 杨峥, 等. 中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1825-1837.
- [4] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006(5): 505-508.
- [5] PÉREZ-LUCAS G, VELA N, EL AATIK A, et al. Environmental risk of groundwater pollution by pesticide leaching through the soil profile[M]. IntechOpen, 2018.
- [6] 杨顺华. 12·5 世界土壤日: 保护土壤, 保护的不仅你我他[J]. 地球, 2020(12): 76-80.
- [7] 杨晓霞, 周启星, 王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研

- 究展望[J]. 生态科学, 2007(4): 374-380.
- [8] 朱永官, 彭静静, 韦中, 等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 1-11.
- [9] LEHMANN J, BOSSIO D A, KÖGEL - KNABNER I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(10): 544-553.
- [10] MOEBIUS B N, VAN ES H M, SCHINDELBECK R R, et al. Evaluation of laboratory - measured soil properties as indicators of soil physical quality[J]. Soil Science, 2007, 172(11): 895-912.
- [11] PANKHURST C E, DOUBE B M. Biological indicators of soil health: synthesis[M]. Cab International, 1997.
- [12] RINOT O, LEVY G J, STEINBERGER Y, et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1484-1491.
- [13] BHANDARI K B, WEST C P, ACOSTA - MARTINEZ V, et al. Soil health indicators as affected by diverse forage species and mixtures in semi - arid pastures[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 132: 179-186.
- [14] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, et al. Soil quality—A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105-125.
- [15] SEATON F M, BARRETT G, BURDEN A, et al. Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 72: 20-36.
- [16] SOTO R L, PADILLA M C, DE VENTE J. Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impacts of regenerative agriculture on ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2020, 45: 101157.
- [17] KHOSRAVI V, ARDEJANI F D, YOUSEFI S, et al. Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods[J]. Geoderma, 2018, 318: 29-41.
- [18] 陆元昌. 森林健康状态监测技术体系综述[J]. 世界林业研究, 2003(1): 20-25.
- [19] 王春香, 李媛媛, 徐顺清. 生物监测及其在环境监测中的应用[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(5): 628-638.
- [20] WEI Z, MARLÈNE E, RUTH M D, et al. Soil health and gender: why and how to identify the linkages[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2021, 19: 269-287.
- [21] PANDOLFINI T, GREMIGNI P, GABBRIELLI R. Biomonitoring of soil health by plants[J]. Biological Indicators of Soil Health, 1997, 29: 325-347.
- [22] MADEJÓN P, DOMÍNGUEZ M T, MADEJÓN E, et al. Soil - plant relationships and contamination by trace elements: a review of twenty years of experimentation and monitoring after the Aznalcóllar (SW Spain) mine accident[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 50-63.
- [23] 左思艺, 王智慧, 张朝晖. 张家湾子金矿苔藓植物物种多样性及其对重金属污染的监测[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 412-417.
- [24] VALDEZ A S, BOSCH - SERRA À D, YAGÜE M R, et al. Earthworm community and soil microstructure changes with long - term organic fertilization[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(7): 957-970.
- [25] RASTETTER N, GERHARDT A. Continuous monitoring of avoidance behaviour with the earthworm *Eisenia fetida*[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 957-967.
- [26] FRÜND H C, GRAEFE U, TISCHER S. Earthworms as bioindicators of soil quality[M]. Biology of Earthworms, 2011.
- [27] XIAO L, LI M H, DAI J, et al. Assessment of earthworm activity on Cu, Cd, Pb and Zn bioavailability in contaminated soils using biota to soil accumulation factor and DTPA extraction[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 195: 110513.
- [28] ESPINOSA - REYES G, ILIZALITURRI C A, GONZALEZ - MILLE D J, et al. DNA damage in earthworms (*Eisenia* spp.) as an indicator of environmental stress in the industrial zone of Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2010, 45(1): 49-55.
- [29] MOURA G S, FRANZENER G. Biodiversity of nematodes biological indicators of soil quality in the agroecosystems[J]. Arquivos do Instituto Biológico, 2017, 84: 1-8.
- [30] 王赢利, 王宏洪, 廖金铃, 等. 电子垃圾拆解地重金属污染对稻田土壤线虫群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 874-881.
- [31] PARISI V, MENTA C, GARDI C, et al. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 105(1-2): 323-333.
- [32] SANTORUFO L, VAN GESTEL C A, ROCCO A, et al. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality[J]. Environmental Pollution, 2012, 161: 57-63.
- [33] 郭佳威, 周世萍, 刘守庆, 等. 蚯蚓生物标志物在土壤生态系统监测中的应用研究进展[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(5): 69-81.
- [34] EDGE T A, BAIRD D J, BILODEAU G, et al. The Ecobiomics project: Advancing metagenomics assessment of soil health and freshwater quality in Canada[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 135906.
- [35] PANKAJ T, MANUEL D B, CAI, et al. Response of soil properties and microbial communities to agriculture: Implications for primary productivity and soil health indicators[J]. Frontiers in Plant Science, 2016(7): 990.
- [36] WOLIŃSKA A. Metagenomic achievements in microbial diversity determination in croplands: A review[J]. Microbial Diversity in the Genomic Era, 2019, 25: 15-35.
- [37] FAJARDO C, COSTA G, NANDE M, et al. Pb, Cd, and Zn soil contamination: monitoring functional and structural impacts on the microbiome[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 56-64.
- [38] FENG G, XIE T, WANG X, et al. Metagenomic analysis of mi-

- icrobial community and function involved in cd - contaminated soil[J]. *BMC Microbiology*, 2018, 18(1): 1 - 13.
- [39] 李明珠, 廖强, 董远鹏, 等. 铜胁迫下磺胺嘧啶对土壤呼吸及酶活性影响分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(9): 2121 - 2128.
- [40] 单爱琴, 肖洁, 杨秀娟. 四氯化碳与四氯乙烯复合污染对土壤呼吸率的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(2): 364 - 367.
- [41] 钟毅, 张旭, 梁玉婷, 等. 基于基因芯片技术的石油污染土壤微生物群落结构[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(9): 1396 - 1399.
- [42] 车荣晓, 王芳, 王艳芬, 等. 土壤微生物总活性研究方法进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2103 - 2112.
- [43] 陈凯丽, 吴蔓莉, 叶茜琼, 等. 生物修复对石油污染土壤微生物活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 279 - 285.
- [44] 刘爱菊, 刘敏, 李梦红, 等. Cu、抗生素协同污染对土壤微生物活性的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(11): 1825 - 1829.
- [45] 李文, 叶旭红, 韩冰, 等. 不同灌溉方式下 3 种土壤微生物活性测定方法比较[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 4084 - 4090.
- [46] 程坤, 周际海, 金志农, 等. 土壤微生物活性对石油原油、铅镉及其复合污染的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(5): 1976 - 1982.
- [47] 陈欣瑶, 肖祖飞, 祝妍华, 等. 铜和强力霉素复合污染对土壤微生物与酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 1 - 11.
- [48] 何紫晨, 胡雪峰, 陆思文, 等. 柴油和镉污染对土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2021, 27(6): 1 - 9.
- [49] LENKA A, MARTIN L, ESA T, et al. Effect of heavy metals on soil enzyme activity at different field conditions in Middle Spis mining area (Slovakia)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 93(6): 670 - 675.
- [50] LIPIŃSKA A, KUCHARSKI J, WYSZKOWSKA J. Activity of arylsulphatase in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2014, 225(9): 1 - 11.
- [51] FIERER N, WOOD S A, DE MESQUITA C P B. How microbes can, and cannot, be used to assess soil health[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108111.
- [52] GUPTA M M. Arbuscular mycorrhizal fungi: The potential soil health indicators[M]. *Soil Health*, 2020.
- [53] GHOLIZADEH A, SABERIOON M, BEN - DOR E, et al. Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state - of - the - art and future perspectives[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(3): 243 - 278.
- [54] LIU W, LI M, ZHANG M, et al. Hyperspectral inversion of mercury in reed leaves under different levels of soil mercury contamination[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(18): 22935 - 22945.
- [55] HURISSO T T, CULMAN S W, ZHAO K. Repeatability and spatiotemporal variability of emerging soil health indicators relative to routine soil nutrient tests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(4): 939 - 948.
- [56] STOTT D. Recommended soil health indicators and associated laboratory procedures[M]. *Soil Health Technical Note*, 2019.

栏目编辑 王 湜 谭 艳 周立平