

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0626

李明, 姜锦林, 盛峰, 等. 国内外土壤健康评估研究管理现状及展望[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(11): 1504–1514.

LI Ming, JIANG Jin-lin, SHENG Feng, et al. Current Status and Prospects of Soil Health Assessment Research Management at Home and Abroad[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025, 41(11): 1504–1514.

国内外土壤健康评估研究管理现状及展望

李明^{1,2}, 姜锦林^{1,2}, 盛峰^{1,2}, 裴翔宇³, 谢佳怡³, 万金忠^{1,2}, 祝欣^{1,2①}, 龙涛^{1,2②} (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 生态环境部土壤环境管理与污染控制重点实验室, 江苏 南京 210042; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 土壤健康作为陆地生态系统可持续发展的核心要素, 已成为全球土壤科学研究的重点。笔者系统梳理了土壤健康概念的历史演进过程, 基于文献计量学和 VOSviewer 软件分析了 1980—2024 年国内外土壤健康评估研究主题分布, 对比分析了国际主流土壤健康评估框架, 深入总结了土壤健康评估指标体系和评估方法的研究进展, 并提出了我国土壤健康研究的不足与未来发展方向。土壤健康概念经历了从单一粮食生产目标到多生态系统服务功能的认知转变, 土壤健康评估研究主要以农田、森林土壤为主(占总发文量的 76.65%), 对于城市、湿地和草地等生态系统土壤健康评估研究较少。农田土壤质量或健康评估主要侧重耕地质量、最小数据集的构建、土壤有机质和养分状态等方面, 而城市土壤质量或健康评估则主要关注评估方法、城市绿地、重金属和有机污染物含量等主题。土壤健康评估指标体系仍以物理、化学属性为主, 需充分认识反映土壤健康最直接的生物指标的重要性, 并开发便捷、低成本、实时监测工具。传统的土壤健康评估框架主要关注耕地土壤、小空间尺度土壤管理, 需构建基于多生态系统服务功能、减污-固碳-安全-绿色多管理目标协同的土壤健康评估技术体系。

关键词: 土壤健康; 指标体系; 评估框架; 土壤多功能; 生物指标

中图分类号: X82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2025)11-1504-11

Current Status and Prospects of Soil Health Assessment Research Management at Home and Abroad. LI Ming^{1,2}, JIANG Jin-lin^{1,2}, SHENG Feng^{1,2}, PEI Xiang-yu³, XIE Jia-yi³, WAN Jin-zhong^{1,2}, ZHU Xin^{1,2①}, LONG Tao^{1,2②} (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 3. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soil health as a core element for the sustainable development of terrestrial ecosystems has become a key area of global soil science research. This research systematically reviewed the historical evolution of the soil health concept, analyzed the distribution of research topics on soil health assessment (1980–2024) globally using bibliometrics and VOSviewer software, compared the common international soil health assessment frameworks, comprehensively summarized research advances in soil health indicator systems and assessment methodologies, and identified gaps and future directions for soil health research in China. The study reveals that the conceptualization of soil health has shifted from a singular focus on food production to a broader recognition of multiple ecosystem services. Research on soil health assessment were predominantly centered on agricultural and forest soils (accounting for 76.65% of total publications), while studies on urban, wetland, and grassland ecosystems remain limited. Assessments of agricultural soil quality/health primarily emphasized the aspects of cultivated land quality, minimum data set (MDS) development, soil organic matter, and nutrient status, whereas urban soil quality/health assessments focused on evaluation methods, urban green spaces, and heavy metal/organic pollutant content. Current soil health assessment frameworks are predominantly relying on physical and chemical indicators, and need to underscor the biological indicators as the most direct indicators of soil health and to develop convenient, low-cost, real-time monitoring tools. Traditional assessment frameworks prioritized the cultivated soils and small-scale soil

收稿日期: 2025-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3713304); 中挪气候变化背景下的中国生物多样性保护合作项目(CHN-2152, 18/0015)

① 通信作者 E-mail: zhuxin@nies.org

② 共同通信作者 E-mail: longtao@nies.org

management; future efforts should establish integrated technical systems that align with multi-ecosystem services and synergistic management goals (pollution reduction-carbon sequestration-safety-green development).

Key words: soil health; indicator system; assessment framework; soil multifunctionality; biological indicators

土壤是人类赖以生存的不可再生资源,是维系地球生命系统的核心要素。健康土壤是保障耕地产能和粮食安全、维护生态环境及人类健康、缓解全球气候变化、维持生物多样性的重要基础^[1-3]。2015 年 9 月,联合国大会发布的《2030 年可持续发展议程》中涵盖 17 项可持续发展目标(SDGs),其中有 13 项直接或间接依赖于健康土壤所提供的生态系统服务功能(如养分循环、水净化、生物栖息地等),这凸显了健康土壤是实现全球可持续发展目标的重要基础^[4]。我国土壤环境法规和技术规范不断完善,《土壤污染防治行动计划》《中华人民共和国土壤污染防治法》的施行、土壤污染防治攻坚战的系统实施使土壤污染加重趋势得到初步遏制。预计到“十五五”末期,全国土壤污染风险能够得到基本管控,初步达成“安全土壤”目标。未来,我国土壤生态环境管理的中长期目标将从以污染防治为主,逐步转为生态环境质量的持续提升。“健康土壤”将成为继“安全土壤”“清洁土壤”之后我国土壤管理的新要求。

健康的土壤对于维护生态系统韧性、保障农业生产力及环境可持续性具有不可替代的作用^[5-6]。我国土壤健康研究与实践仍处于起步阶段,尤其是在管理标准制定、评价方法学、综合指标体系构建及健康土壤培育技术等方面尚未形成系统和可操作性强的土壤健康评估策略^[7]。国内外有关土壤健康的评估框架多聚焦于实现单一的土壤功能,指标体系对土壤生物学指标的考量不足,评估实践多局限于小区域且评估技术方法缺乏系统性,难以建立适用于不同土地利用情景的土壤健康评估可推广模式^[8]。我国“双碳”战略目标刚性约束和农业高质量发展转型,生态系统多样性、稳定性和持续性提升需求都对土壤健康管理提出了新的挑战^[4]。构建具有中国特色、多目标协同、多过程监测、多主体参与的土壤健康评价与培育体系,协调提升土地资源的数量、质量与生态效益,已成为我国土壤学研究领域亟待解决的重要任务。

笔者基于对土壤健康的概念与内涵的阐释,在系统梳理国内外有关土壤健康评估的政策、指标体系及方法框架的基础上提出我国土壤健康研究的未来关注方向,以期为我国土壤健康评估和生态环境质量管理工作提供参考。

1 土壤健康的内涵和研究管理现状

1.1 土壤健康的概念与内涵演进

土壤健康概念与内涵的不断演进反映了人类对土壤功能认识的逐渐深化过程,随着研究的不断深入,土壤质量或土壤健康的内涵不断丰富和发展。1910 年“土壤健康(soil health)”的概念被首次提出,其主要关注与土壤肥力相关的物理、化学属性(如土壤持水能力、养分含量等)^[9]。20 世纪 80 年代末美国土壤学会首次提出“土壤质量”概念,强调了土壤在生态系统中支持植物生长、维护环境质量以及促进动植物和人类健康的能力^[10]。20 世纪 90 年代美国土壤学家 DORAN 等^[5]正式提出了“土壤健康”的概念,即“土壤作为关键的生命系统在生态系统边界内支撑动植物生产、维持或改善水体和大气环境、促进动植物和人类健康的能力”,这标志着该方向的研究视角开始向生态系统服务功能转变。2014 年美国农业部(USDA)进一步强调了土壤健康的生态服务属性,即土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要有生命生态系统持续发挥其功能的能力,这一阐述也成为当前被广泛接受的土壤健康定义^[9]。2020 年联合国粮农组织(FAO)的土壤跨政府技术小组(ITPS)将土壤健康概念拓展为“土壤持续保持陆地生态系统生产力、生物多样性和环境服务的能力”,实现了土壤健康概念从保障耕地产能和粮食安全向维持陆地生态系统生产力、生态系统多样性和环境服务能力的跨越^[11]。

土壤健康的核心内涵包含 3 个层次^[1,3,12]:(1)考虑其对农业生产、人居环境和生态系统等方面的服务支撑功能,满足农业绿色发展和环境质量需要,维持生态系统稳定。(2)考虑其本身作为陆生植物、动物、微生物等生物栖息地和活动空间的重要生态功能,优化生态系统内各要素间的平衡,保护生物多样性稳定。(3)考虑其农业生产的可持续性和土壤质量的稳定性,确保土壤资源的永续利用。部分学者还将政策、文化等因素纳入土壤健康应考虑范畴,更体现了土壤健康内涵的丰富性和复杂性。土壤健康更强调土壤在支撑生态系统和可持续性方面的重要性。LEHMANN 等^[1]指出,土壤健康的核心是实现土壤生态系统多功能性的协同与可持续发展,如可持续生产、水质调控、人类健

康、气候变化,土壤健康不应仅局限于与人类健康相关联的范围内,而应拓展至包含整个星球的健

康,以实现更可持续性发展目标(图 1)。

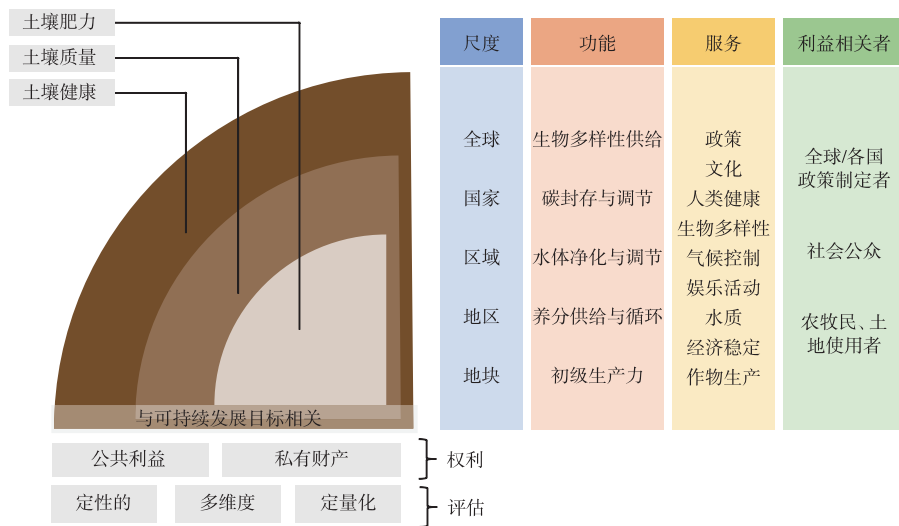


图 1 土壤健康相关概念关系图^[1]

Fig. 1 Relationship of diagram of soil health-related concepts^[1]

土壤健康的概念是在土壤质量的基础上发展而来的。赵其国等^[13]于 1997 年首次将土壤质量的定义、指标与定量化方法引入国内。张华等^[14]指出,土壤质量是反映土壤保持生物生产力、环境质量以及动植物健康能力的土壤的内在属性。梁文举等^[15]在国内较早使用土壤健康这一表述,并提出要用可计量的特性或参数对土壤健康进行评价。周启星^[16]认为,健康的土壤首先应能生产出有健康效益的动植物产品,其次应具有改善水和大气质量及抵抗一定程度污染的能力,更为重要的是能直接或间接促进植物、动物、微生物以及人体健康。我国学者对土壤健康的研究也逐渐更加全面考量土壤生态系统多功能的协同实现^[6]。GB/T 33469—2016《耕地质量等级》标准中将土壤健康定义为“作为一个动态生命系统具有的维持其功能的持续能力”。健康的土壤应具有较强的韧性和恢复力,在受到人类活动干扰、极端气候因素影响下仍能保持或快速恢复土壤生态功能,凸显了土壤健康在实现全球可持续发展中发挥着关键作用的功能^[17]。

1.2 国内外土壤健康评估研究主题

土壤健康的评估和培育已成为全球土壤学领域研究的热点^[18-19],主要包括土壤健康评估指标体系和评估方法的建立、健康土壤培育过程与技术、障碍退化土壤的质量提升、落地实施方案与政策等^[20]。吴霞等^[21]分析得出,土壤健康评估领域正处于快速发展期。笔者基于 Web of Science (WOS)

和中国知网 (CNKI) 数据库,利用文献计量学对 1980—2024 年国内外发表的以农田土壤、森林土壤、草地土壤、湿地土壤、城市土壤这 5 种主要生态系统土壤健康或土壤质量评估为主题的研究文献进行分析,发现土壤健康评估大致可分为 3 个阶段: 1980—2000 年为起步阶段,此时段总发文量为 8 篇;2001—2015 年为发展期,此时段发文量为 89 篇;2016—2024 年为快速增长期,此时段发文量为 237 篇。从土壤健康评估关注的生态系统类型看,主要以农田和森林土壤为主 (占总发文量的 76.65%),对于城市、湿地和草地等生态系统的土壤健康评估研究较少 (图 2)。

土壤质量或健康评估研究领域的关注点可归纳为 4 类^[19]:土壤肥力与生产力、土壤环境与安全、土壤健康与养护、土壤评价与管理。早期研究主要关注土壤的作物生产力,以应对人口增长对食品供给造成的压力;近些年的研究越来越强调定量分析,以提高土壤质量或土壤健康评估的准确性,并致力于构建精准反映土壤质量或健康变化规律的评价模型和最优最小数据集。张江周等^[20]分析得出,耕地质量、耕地产能、土壤污染、健康土壤培育和土壤微生态等主题可能会成为土壤健康领域的研究热点^[22]。基于 WOS 和 CNKI 数据库,利用 VOSviewer 可视化软件对农田和城市生态系统土壤健康评估研究的关注点进行分析,发现主要研究包括土壤健康评估方法、土壤肥力与微生物学特性、

土壤物理和化学指标、土壤质量评价与管理利用（图 3）。

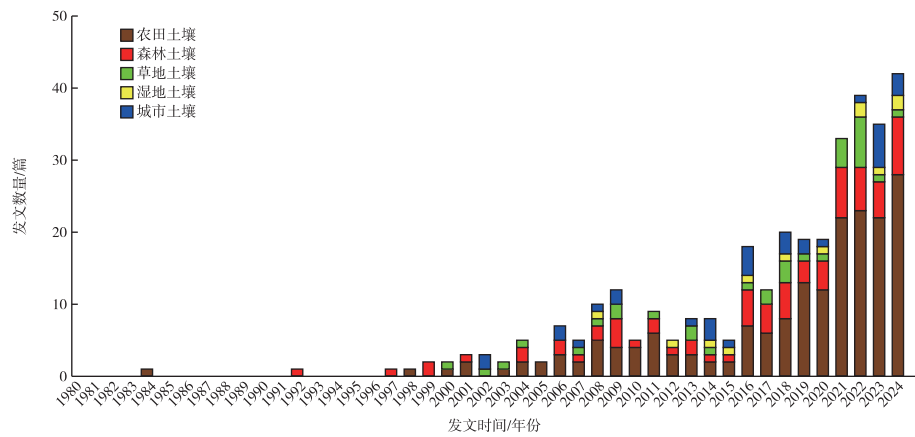


图 2 1980—2024 年以土壤健康评估为主题的发文量统计

Fig. 2 Annual publications on the theme of soil health assessment from 1980 to 2024

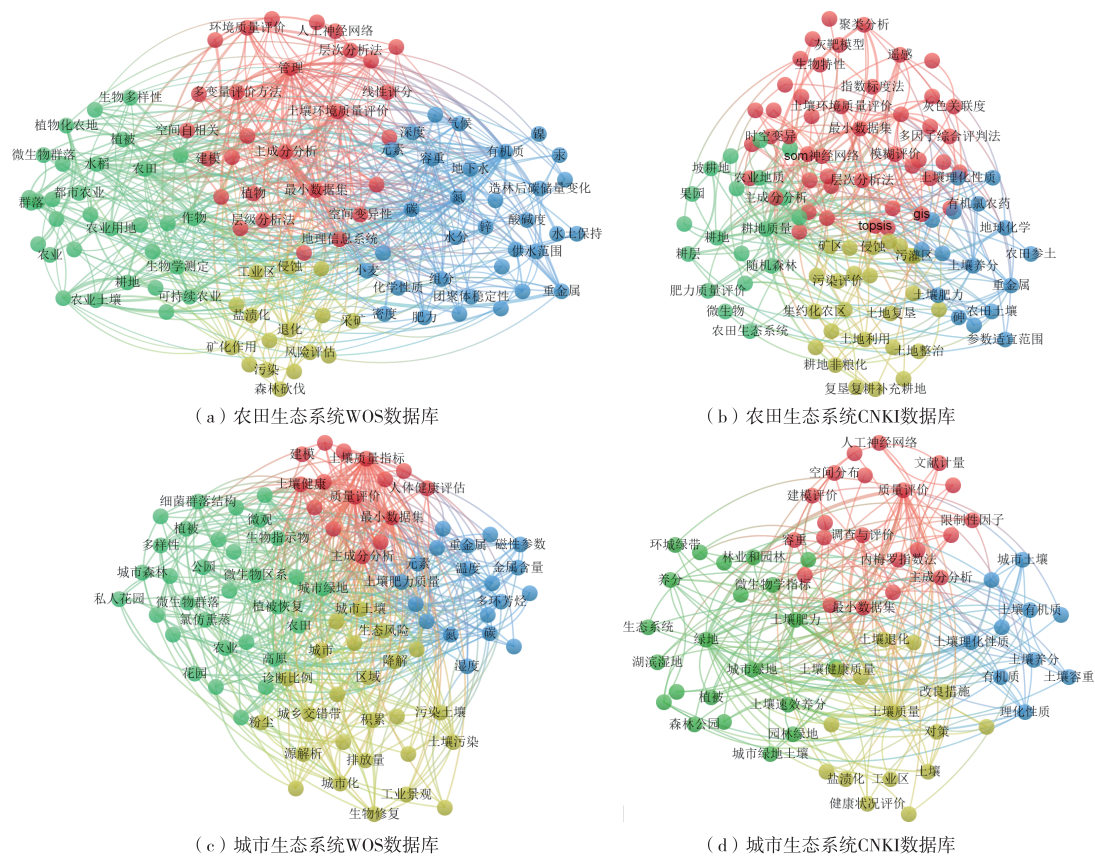


图 3 农田和城市生态系统土壤健康研究主题分布情况

Fig. 3 Distribution of research topics on soil health in farmland and urban ecosystems

农田生态系统土壤质量或健康评估研究主要关注耕地质量、最小数据集的构建、土壤有机质和养分状态以及遥感和空间分析等区域土壤健康评估技术；城市生态系统土壤质量或健康评估研究主要关注土壤质量评估方法、城市绿地、重金属和有

机污染物含量、利用管理对策等。随着人们对土壤质量退化和污染威胁带来的粮食安全、环境问题等的持续关注,作为同一健康(One Health)的重要组成部分,土壤健康的合理评估与培育成为农业可持续发展和生态系统服务功能发挥的重要部分^[10]。

1.3 国内外土壤健康管理政策

随着对土壤生态系统服务功能研究的不断深入,土壤健康日益成为国内外政府和组织关注的焦点,部分国家(地区)已发布了土壤健康相关的法律法规^[23]。2012 年 FAO 发起了全球土壤伙伴计划(GSP),标志着土壤健康议题正式纳入全球可持续发展议程。2015 年联合国“国际土壤年”的主题为“健康土壤带来健康生活”。2017 年美国与大自然保护协会(TNC)出版的“ReThink Soil: A Roadmap for U. S. Soil Health”(《土壤健康:反思与重构》),构建了旨在转变美国耕地管理模式的土壤健康路线图,提出 50% 的农田在 2025 年要采用土壤健康管理措施^[24]。2020 年欧盟发布了土壤健康行动计划,并于 2021 年提出了“Soil Strategy for 2030”(《2030 年土壤战略》),主要通过可持续土壤管理、恢复退化土壤和修复受污染的场地、增加对土壤的研究和数据监测等行动措施,在 2050 年实现土壤健康的愿景和目标。同时,通过“Soil Monitoring Law”(《土壤监测法,2023 年》)和 BENCHMARKS 土壤健康项目,系统形成了统一且具有成本效益的多空间尺度、多用户群体的土壤监测框架^[23]。2015 年印度启动了 Soil Health Card(土壤健康卡)制度来评估耕地土壤健康状况,以提升农民对土壤及土壤管理的专业水平^[25]。2021 年澳大利亚发布了“National Soil Strategy”(《国家土壤战略》)与“Commonwealth Interim Action Plan: National Soil Strategy”(《联邦政府国家土壤战略临时行动计划》),详细阐述了该国 2021—2041 年如何评价、管理和改善土壤健康状况,制定了土壤监测、堆肥和土壤碳测量等一系列计划。与此同时,“昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架”(2022)也首次将恢复、维护和增强土壤健康列为全球生态治理的核心指标。可见,针对土壤健康面临的退化、污染以及气候变化影响等多方面的严峻挑战,不同国家都已经或正在开展土壤健康研究和管理实践行动,以实现土壤资源的可持续利用和健康管理。

我国土壤健康管理政策体系也不断发展和完善。随着《耕地质量保护与提升行动方案》(2015)和《土壤污染防治行动计划》(2016)的提出,2016—2018 年国家陆续出台了《污染地块土壤环境管理办法(试行)》《农用地土壤环境管理办法(试行)》、GB 36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》和 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,系统构建了土壤健康风险管控体系。2018 年中国土壤

学会成立了土壤健康工作组,研究健康土壤的培育思路及行动路径。2019 年 1 月 1 日《中华人民共和国土壤污染防治法》正式开始施行,奠定了土壤环境保护的法律制度基础。随着第三次全国土壤普查(2022—2025)工作的展开以及《中华人民共和国黑土地保护法》(2022)的施行,土壤健康质量管理的相关政策逐步转为土壤生态功能的恢复和维持。与国家“双碳”战略相呼应,生态环境部发布了《关于促进土壤污染风险管控和绿色低碳修复的指导意见》(环办土壤[2023]19 号),指出要推动土壤健康管理和生态功能提升,增强土壤固碳增汇能力。《土壤污染源头防控行动计划》(环土壤[2024]80 号)指出要全面管控土壤污染风险,促进土壤健康和永续利用。同时,土壤健康在地方性的政策实践中也逐渐被提出,浙江省《土壤健康行动实施意见》(2022)强调了要加强耕地质量建设,提升耕地综合产能。然而我国现行的土壤环境管理政策多侧重农用地、建设用地的土壤环境质量提升和污染控制等,在土壤健康管理政策体系方面仍存在一定的短板,现有标准(GB/T 28407—2012、GB/T 33469—2016)仍存在侧重传统理化指标、主要关注农用地土壤肥力等问题,这与国外(如美国和欧盟)在土壤健康监测、管理框架体系方面相比还存在一定不足,相关的研究和管理工作亟须展开。

2 土壤健康评估通用程序和技术框架

随着全球粮食安全、气候变化和环境退化等问题的出现,土壤健康评估体系研究的重要性日益凸显。当前,土壤健康的评估指标已经从传统的理化属性向物理、化学和生物综合指标不断发展,评估体系也从单一粮食生产向多种生态系统服务功能角度转变,评估的方法学也在不断完善,如方法模型已经从专家经验转向系统建模为主,技术上更是将微生物组学、地理信息系统、遥感等新兴方法不断地融入评估体系中。

2.1 土壤健康评估程序研究

土壤健康的评估程序主要涵盖 3 个步骤:(1)土壤属性指标的筛选:通过主成分分析、相关性分析和聚类分析等统计学方法实现变量的降维,从而获得最小数据集(MDS),并选择出最佳的土壤健康指标。(2)数据的标准化:在 MDS 的基础上综合运用标准化、差值法等方法将其转化到具有可比性的相同维度上。(3)数据的整合分析:采用因子分析、层次分析等方法确定各指标的加权重,通过专家估值、主成分分析或偏最小二乘法计算得到统

一的土壤健康指数。土壤健康评估程序的研究和应用为土壤功能的系统性评价提供了实现路径。RINOT 等^[26]基于土壤健康的多元复合评估方法,立足于“土壤生态服务功能”,通过建立最小数据集、数据标准化和整合分析研究实现了土壤健康关键指标的筛选,深入刻画了土壤所能提供的生态系统服务功能。WADE 等^[27]提出了一种将管理措施、定量进行土壤健康评估与土壤健康目标相结合的评估手段,成功建立了土壤指标与功能之间的评价关系。

2.2 土壤健康评估指标体系研究

定量评价土壤健康是基础创新、技术研发与政策法规制定等各项工作的前提。土壤健康指标的筛选是评估体系构建的核心基础,直接影响评估结果的可靠性和后续健康土壤培育决策的科学性^[28]。土壤健康指标应能有效反映土壤特定健康属性,一般由定性和定量指标构成,按指标属性可分为物理指标、化学指标和生物指标,按指标变化特性可分为动态指标(敏感性)和静态指标(渐变性)。

土壤健康指标的筛选一般遵循 4 个原则^[26]: (1)相关性,即所选择的指标应代表土壤系统中发生的关键过程。(2)敏感性,即指标应对土壤管理、气候变化及人类活动等扰动引起的土壤功能变化具有较强响应能力。(3)可解释性,指标需能清晰反映土壤污染过程、功能与管理目标的时空关联,为管理决策提供依据。(4)可操作性,指标测定方法应相对简便、成本可控、适用性强。值得注意的是,同时满足以上所有原则的指标较为有限^[1],例如土壤质地、深度等与土壤健康的衡量密切相关,但不能完全满足上述原则。此外,反映土壤健康的可测量土壤特性也具有挑战^[29]。

国内外通常采用的土壤健康评估指标体系中,物理和化学指标占主导地位^[1],其中化学指标如土壤有机质(SOM)含量、pH 值、氮磷钾含量等应用尤为广泛,生物学指标的使用频率相对较低(图 4)。李鑫等^[30]对 415 篇文献的计量分析显示,在统计的 155 个最小数据集(MDS)中,有机质含量、速效磷含量、容重、pH 值、全氮和速效钾含量等指标的使用频率超过 20%,生物指标出现频次普遍偏低。物理指标如容重、含水量、团聚体稳定性、质地等常用于评估土壤结构和孔隙状况,化学指标尤其是 SOM 含量及其活性组分、pH 值、养分含量等则在多数评估框架中占比显著(超过 40%),SOM 含量更是被公认为最核心的指标^[21]。然而,生物指标如微生物量碳(MBC)含量、土壤呼吸、酶活性、群落多样性、基因

多样性、病原菌和土壤生物网络复杂性等能更敏感地指示土壤动态过程与生态功能,反映土壤生物组(细菌、真菌、原生动物、线虫等)通过自身代谢参与元素循环和污染物降解等过程中的关键作用^[31-33]。目前,已有多种微生物学指标被用来指示土壤健康,利用微生物群落特征对土壤健康综合指数进行预测的准确率可达到 80%^[34]。土壤酶活性与土壤有机质含量、土壤物理性质密切相关,可用作土壤生产力和污染程度的量度^[35],特定微生物类群也可用来预测土壤可溶性有机碳含量、容重和 pH 值等的变化^[36]。随着高通量测序等技术的发展,量化土壤生物多样性和群落结构对土壤功能的影响已成为研究热点^[33]。事实上,面向不同的土壤健康管理目标,如农业生产、环境保护、人体健康风险防控或应对气候变化时,土壤健康评估指标的选择应具有针对性。例如,非农用地评价应纳入与人体健康、水质相关的指标;评估土壤固碳潜力需关注不同保护机制下的有机碳组分稳定性。尽管生物多样性指标意义重大,但其量化、标准化以及与具体健康功能的匹配仍存在挑战,限制了其在现有框架中的广泛应用^[37]。此外,某些传统的土壤健康指标分析方法耗时长、成本高,也不能满足大规模、实时性的土壤健康管理需求。张江周等^[7]建议构建层级化指标体系,即可区分为即时响应的动态指标(如部分生物活性指标)和反映长期累积效应的静态指标(如土壤有机质和质地)。随着分析技术的不断发展,一些快速、准确、价廉和高通量的新兴分析技术,如同步辐射微 CT、红外光声光谱、宏基因组、新一代传感与能量收集、遥感和数字建模等技术,给土壤健康评估的创新带来契机^[38-41]。

土壤健康评估的本质是对土壤提供的生态系统服务功能的量化,整合多指标形成单一的“土壤健康指数”(SHI)是区域(国家)尺度评估的常用策略,构建过程中需对众多指标(含分类属性)进行最小指标集构建、定量转换、加权集成,并依据区域土壤类型和条件仔细校准以避免偏差^[27]。因此,SHI 指数的构建并非易事,如何将定量土壤健康评估的结果与土地管理者感兴趣的土壤功能或服务(如水质、养分利用效率、减少侵蚀)建立因果联系仍存在挑战。RINOT 等^[26]提出了多变量复合的土壤健康指数计算概念方法,以量化土壤属性与土壤提供的生态系统服务功能的关系。LEHMANN 等^[1]强调采用多标准决策分析方法构建整体指数,并利用机器学习、深度学习等先进数据分析工具和交互式可视化手段进行量化与表达。ROS 等^[42]提出了一种可

操作且可重复的开放土壤指数 (OSI) 方法来评估土壤健康, 以促进可持续土壤管理。

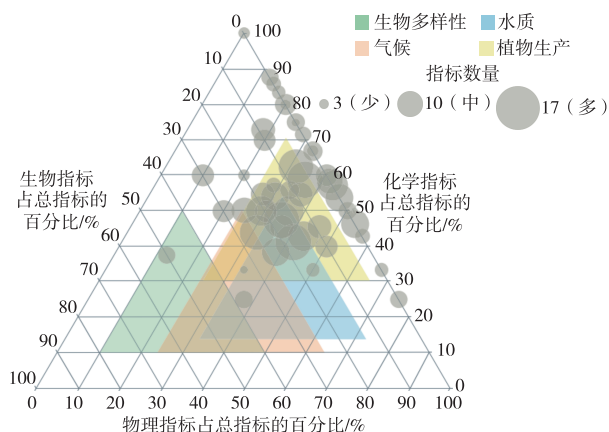


图 4 列入了土壤健康评估方案中的指标^[1]

Fig. 4 Indicators incorporated into the soil health assessment protocol^[1]

2.3 土壤健康评估方法框架

土壤健康评估框架是指导评估实践的核心方法与程序体系。MORROW 等^[43]提出了理想框架应满足的关键标准:(1)足够的事实依据,即来源于可靠的科学原理和可测量的土壤特性和过程;(2)对外界变化较为敏感,可响应土壤管理措施并适用于各种土壤条件;(3)在逻辑上可行,可在较短时间内有效地帮助决策;(4)成本较低,可在经济承受范围内进行评估;(5)具有较高的准确性和精确性,有标准化评估方法和可重复的结果;(6)待测样品应是原位的或是未被扰动的,以便获得真实信息;(7)能够及时地为管理者决策提供有价值的信息。这些标准为框架设计提供了核心准则。

目前,多个国家(地区)已建立了主要面向耕地土壤健康的评估方法框架。加拿大于 20 世纪 90 年代率先推出国家评估与监测计划^[44]。美国在土壤健康评估体系构建方面的研究已累积了较多的成果,有代表性的是美国农业部的 Soil Management Assessment Framework (土壤管理评估框架, SMAF)^[45]、Soil Health Tool (土壤健康评估工具, SHT)和康奈尔大学的 Comprehensive Assessment of Soil Health (土壤健康综合评价系统, CASH)^[46]。其中, SMAF 和 CASH 已相对成熟。印度建立了指导农业生产的土壤健康卡制度,新西兰、法国、英国、澳大利亚、德国、泰国等也建立了国家(地区)级土壤健康评估框架体系。这些国家所建立的评估体

系大多数明确了针对性的相关利益者目标群、评估目标、应用尺度、评估指标等信息(表 1)^[25,47-51]。总体上,基于土壤管理评估框架(如 SMAF)可以比较全面地反映土壤健康状况。基于土壤功能的土壤健康评价方法(如 Soil Navigator 模型等)既可以应用于田块尺度和县域尺度,也可以应用于省域和国家尺度的土壤健康评价^[52]。虽然各类土壤健康评价体系在数据集来源、指标筛选、权重确定、赋分函数、健康指数计算和验证方法上存在差异,但目标均是通过掌握不同利用类型土壤健康状况,实现土壤资源的可持续管理。针对城市公园、农业、棕地等土壤生态系统,也开展了土壤健康评估技术方法和框架体系的研究,以反映其土壤健康状况和促进生态系统服务功能^[53-54]。

我国尚未建立国家层面统一的土壤健康评估体系,但相关研究与实践工作一直在开展^[8,55]。耕地地力综合指数被广泛应用于我国主要区域耕地质量的衡量,其主要利用德尔菲法(DELPHI)和层次分析法(AHP)来确定评价指标及其相应的权重^[56]。2018 年中国土壤学会成立土壤健康工作组,确立了土壤生态系统多功能协同可持续的培育目标。JIAN 等^[57]在编制聚焦于农业措施的土壤健康数据库(Soil Health DB)中发现,目前土壤健康研究中包含综合指数的框架体系极少。吴克宁等^[58]提出了以表征耕地土壤功能与重金属胁迫为核心的耕地土壤健康评价全流程研究框架。WANG 等^[59]利用系统建模方法来捕捉气候、土壤、作物和管理之间的相互作用,以量化土壤的价值和质量状况。赵瑞等^[60]和杨颖等^[61]基于土壤生态系统的多功能性分析,开展了县域尺度的耕地土壤健康产能评价工作。LI 等^[62]提出基于自然土壤生产力与人类管理的土壤健康指数——基于 10 d 的归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),以快速量化农业生产对土壤健康的影响。张江周等^[7]基于土壤质地、作物类型、土地利用方式、气候条件等因素,提出针对我国农田土壤的 n (基础指标)+ X (约束性指标)模式土壤健康评价体系的构建思路。HUANG 等^[63]利用 20 项土壤理化指标建立的最小数据集,采用土壤健康指数(SHI)模型初步研究了城市、森林土壤的健康状况和空间差异。我国土壤健康评估研究仍主要关注耕地土壤,未来需发展新的评估方法和框架,以构建适用于不同利用方式土壤的健康评估框架体系^[64]。

表 1 国际上常用的土壤健康评估框架
Table 1 Current commonly used frameworks for soil health assessment

国家/地区	方法/项目名称	发布年份	目标群体	评估目标	评估范围/尺度	涵盖指标	诠释方式	参考文献
美国农业部	土壤管理评估框架 SMAF (Soil Management Assessment Framework)	20 世纪 90 年代	土地管理者、一般公众	评估管理实践,普及土壤质量	田块	拥有 13 个指标的评分曲线或解释算法	评分曲线,总体得分,累加指数	[45]
美国康奈尔大学	康奈尔土壤健康综合评价系统 CASH (Comprehensive assessment of soil health)	2016 年	农场主	解决土壤退化造成的土壤质量下降,提高土壤生产力和农民受益率	田块	共 43 个指标,包括物理指标 (17 个)、化学指标 (15 个)、生物指标 (11 个)	评分曲线,总体得分	[46]
美国农业部	土壤健康评估工具 SHT	2015 年	农场主	通过科学地评估养分有效性以及碳、氮和磷循环等信息,为农业生产者提供决策建议	田块	生物指标: 24 h 土壤呼吸、水溶性有机碳、氮含量	评分曲线,总体得分	[65]
德国	M - SQR (Muencheberg Soil Quality Rating)	2012 年	农场主	利用综合评分分数的高低来表征作物的产量潜力	田块	土壤质地、土壤结构、地形和气候方面的 8 个基本指标及 12 项风险指标	评分曲线,总体得分	[49]
印度农业与农民福利部	土壤健康管理 (SHM)	2014 年	农场主	指导农民了解其生产土地土壤状况,提高作物生产力	田块	包括 12 项指标,即氮、磷、钾 (大量营养素) 含量,硫 (中量营养素) 含量,锌、铁、铜、锰、硼 (微量元素) 含量,以及 pH 值、电导率、有机质含量 (物理参数)	评分曲线,总体得分	[25]
泰国	Biofuntool 生物土壤功能评价工具	2019 年	农场主	评估碳转化、养分循环和结构稳定	田块	评价体系选取了 12 项可现场测量指标,以监测包括碳转化、养分循环和结构维持的土壤功能	评分曲线,总体得分	[50]
新西兰	SINDI (Soil Indicators) 方法	2020 年	农场主	在线评估工具,将采集的土壤样品与土壤数据库信息进行比较,得出土壤健康的信息,并根据不同土地利用方式和管理目标提出相应的管理措施	田块	包括有效磷含量、土壤 pH 值、可矿化氮含量、总碳含量、总氮含量、容重和大孔隙度 7 个指标	响应曲线,颜色编码	[48]
欧盟	Soil Navigator 决策支持模型	2020 年	农场主	对 5 项土壤功能进行等级评价,并根据用户期望的土壤功能水平提出改良方案	田块 (农田、草地)	以土壤管理,气象参数,土壤物理、化学、生物学特性作为模型输入	条形图,得分	[51]

3 土壤健康评估现状问题及研究展望

3.1 评估对象主要以耕地为主,建设用地、生态用地的评估方法尚未建立

当前土壤健康评估关注的对象主要为耕地土壤,且以较小空间尺度为主^[57],针对高强度利用场地(如城市建设用地、城市绿地、石油和矿山开采区等)和生态用地,尚未建立明确系统的评估框架。建设用地的土壤健康概念尚未明确,缺乏基于其特定生态系统服务功能(如环境承载力、人体健康风险、水质净化)的针对性评估指标和方法体系。

随着我国城市化建设和美丽中国建设的推进,建设用地、生态用地土壤健康评估技术体系和方法的研究紧迫性日益凸显。未来应开展土壤健康基线水平与驱动因素研究^[66],深化建设用地土壤健康

概念和建立标准体系,明确不同场地类型土壤健康的内涵、核心功能及其与生态系统服务功能的关联。构建适用于我国不同区域尺度和不同场地利用情景的评估方法学,建立以减污、固碳、安全、绿色等目标的土壤健康评估技术体系,并特别关注建设用地与耕地的评估方法学差异。强化土壤健康评估结果应用,将建设用地土壤健康评估结果有效应用于污染修复与风险管控效果评价、健康水平差距诊断与提升、演变趋势预测、生态系统服务功能评估及区域土地利用规划管理决策上。

3.2 土壤健康评估生物指标偏少,新兴技术应用不足

现有土壤健康评估指标体系过度依赖物理和化学指标,而生物指标(如微生物多样性、酶活性、土壤动物等)应用明显不足,尤其在大尺度的土壤

健康评价中,这与当前人们对土壤生物与功能关系的认知不足及生物指标测定成本高、耗时长、难度大、时空变异性强等有关。此外,常规分析方法周期长、局限性明显,而新兴技术如非扰动采样、便携式和高通量检测仪器、电化学传感、生物芯片、红外光声光谱、遥感、数字建模等在快速、准确、高通量获取土壤信息方面潜力巨大,新兴数据分析工具如机器学习、深度学习、人工神经网络等有助于优化指标体系和评估方法,但均尚未广泛应用。

未来研究应着重构建生物与环境核心指标体系,充分认识生物指标作为反映土壤健康最直接的指标的重要性,着力开发便捷、低成本、实时的生物指标监测工具,将关键环境质量要素纳入指标体系,并重点关注如何将定量的土壤健康评估结果与土壤生态系统服务功能发挥构建起因果关系,以指导土壤环境管理实践。同时,还应加强新兴技术融合应用,推动新兴技术在土壤健康指标监测、数据获取与分析、智慧化管理决策中的深度应用。

3.3 系统性评估方法缺失,数据平台建设不足

基于土壤生态系统多功能性发挥的综合健康评估体系在我国尚不完善,国内大尺度评价多侧重生产力功能而忽视多功能性协同,且评估方法多依赖专家经验和文献先验知识,缺乏系统建模和先进评价模型的应用。

土壤健康评估技术体系构建过程中应考虑数据集来源、指标筛选和权重确定方法、赋分和指数计算函数等尚不统一所造成的结果差异,后续研究应聚焦于研发多功能性协同评估工具,建立融合增产、提质、增效、减污、固碳等多目标以及适应不同空间尺度(田块至区域)和土地利用类型的综合评估方法体系,构建“土壤管理-过程-功能-健康”系统框架,开发智能化土壤健康指数。同时,应注重加强土壤健康大数据平台的建设,整合气候、地形、土壤理化生属性、作物、管理及社会经济等多源数据,结合新型快速检测技术与智能信息技术,构建不同尺度下静态评价和动态监测相结合的、可综合反映土壤功能的土壤健康评估框架及其指标体系。

随着全球土壤健康行动不断推进,土壤健康的内涵不断扩展,包括碳中和、营养健康、气候变化相关的内容将成为土壤健康未来研究重点,研究者应积极开展土壤碳汇属性与土壤健康的关系、土壤关键生物群落的多样性和组学功能演化、生物多级网络构建和时空演化特征、高通量土壤健康监测技术和评价方法等方面的研究,以期进一步丰富和拓展土壤健康的研究工作。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859–1869. [ZHU Yong-guan, LI Gang, ZHANG Gan-lin, *et al.* Soil Security: From Earth's Critical Zone to Ecosystem Services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859–1869.]
- [3] JOHNSON K, KIHARA J, FAN M S, *et al.* Understanding Soil Health[J]. *One Earth*, 2024, 7(12): 2088–2091.
- [4] 张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 124–134. [ZHANG Gan-lin, WU Hua-yong. From "Problems" to "Solutions": Soil Functions for Realization of Sustainable Development Goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 124–134.]
- [5] DORAN J W, ZEISS M R. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3–11.
- [6] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 783–796. [ZHANG Jun-ling, ZHANG Jiang-zhou, SHEN Jian-bo, *et al.* Soil Health and Agriculture Green Development: Opportunities and Challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783–796.]
- [7] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 879–891. [ZHANG Jiang-zhou, WANG Guang-zhou, LI Yi-zan, *et al.* Re-Thinking the Establishment of the Farmland Soil Health Assessment System[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 879–891.]
- [8] 李恒楦, 骆永明, 侯德义. 土壤健康评估指标、框架及程序研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 617–624. [LI Xuan-zhen, LUO Yong-ming, HOU De-yi. The Indicators, Framework and Procedures for Soil Health: A Critical Review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 617–624.]
- [9] BREVIK E C. A Brief History of the Soil Health Concept[EB/OL]. [2025-07-22]. <https://profile.soils.org/posts/field-and-historical-notes-a-brief-history-of-the-soil-health-concept>.
- [10] 任凤玲, 王谦. 我国土壤健康研究现状与展望[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(5): 1403–1411. [REN Feng-ling, WANG Qian. Current Status and Prospects of Soil Health Research in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1403–1411.]
- [11] FAO-ITPS. Towards a Definition of Soil Health[EB/OL]. [2023-09-26] (2025-06-21). <https://www.fao.org/3/cb1110en/cb1110en.pdf>
- [12] GUAN D X, SHI Z, ZHU L Z, *et al.* Health as a Unifying Concept to Promote Integrated Soil and Environmental Research[J]. *Soil & Environmental Health*, 2023, 1(1): 100001.
- [13] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29(3): 113–120. [ZHAO Qi-guo, SUN Bo, ZHANG Tao-lin. Soil Quality and Sustainable Envi-

- ronment I. Definition and Evaluation Method of Soil Quality[J]. Soils, 1997, 29(3): 113–120.]
- [14] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤, 2001, 33(6): 326–330, 333. [ZHANG Hua, ZHANG Gan-lin. Indexes and Estimate Methods for Soil Quality[J]. Soils, 2001, 33(6): 326–330, 333.]
- [15] 梁文举, 葛亭魁, 段玉玺. 土壤健康及土壤动物生物指示的研究与应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(1): 70–72. [LI-ANG Wen-ju, GE Ting-kui, DUAN Yu-xi. Bioindication of Soil Fauna to Soil Health[J]. Journal of Shenyang, 2001, 32(1): 70–72.]
- [16] 周启星. 2005. 健康土壤学[M]. 北京: 科学出版社. 19–26. [ZHOU Qi-xing. Healthy soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005: 19–26.]
- [17] KOPITKE P M, MINASNY B, PENDALL E, *et al.* Healthy Soil for Healthy Humans and a Healthy Planet[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2024, 54(3): 210–221.
- [18] SHEN R F, TENG Y. The Frontier of Soil Science: Soil Health[J]. Pedosphere, 2023, 33(1): 6–7.
- [19] FAN Y N, ZHANG C, HU W Y, *et al.* Development of Soil Quality Assessment Framework: A Comprehensive Review of Indicators, Functions, and Approaches[J]. Ecological Indicators, 2025, 172: 113272.
- [20] 张江周, 程金, 孙新展, 等. 基于文献计量分析的土壤健康研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(4): 192–205. [ZHANG Jiang-zhou, CHENG Jin, SUN Xin-zhan, *et al.* Advances in Soil Health Research Based on Bibliometric Analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(4): 192–205.]
- [21] 吴霞, 蔡进军, 雷金银, 等. 基于文献计量的土壤健康评价研究进展可视化分析[J]. 土壤, 2023, 55(3): 647–657. [WU Xia, CAI Jin-jun, LEI Jin-yin, *et al.* Visual Analysis of Research Progress in Soil Health Assessment Based on Bibliometric[J]. Soils, 2023, 55(3): 647–657.]
- [22] 侯意龙, 马睿岐, 李征, 等. 基于文献计量分析的土壤质量评价最小数据集(MDS)研究热点分析及展望[J]. 农学学报, 2025, 15(5): 48–61. [HOU Yi-long, MA Rui-qi, LI Zheng, *et al.* Hotspots and Prospect of Minimum Data Set(MDS) in Soil Quality Assessment Based on Bibliometric Analysis[J]. Journal of Agriculture, 2025, 15(5): 48–61.]
- [23] PAAGOS P, JONES A, LUGATO E, *et al.* A Soil Monitoring Law for Europe[J]. Global Challenges, 2025, 9(3): 2400336.
- [24] HONEYCUTT C W, MORGAN C L S, ELIAS P, *et al.* Soil Health: Model Programs in the USA[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(3): 356.
- [25] RAO A S, JAYARAMANS. Ninety Years of Research and Development on Soil Health Management in India (1929–2019) [J]. Indian Journal of Fertility, 2022, 18(12): 1240–1255.
- [26] 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.
- [27] WADE J, CULMAN S W, GASCH C K, *et al.* Rigorous, Empirical, and Quantitative: A Proposed Pipeline for Soil Health Assessments[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 170: 108710.
- [28] CHANG T T, FENG G, PAUL V, *et al.* Soil Health Assessment Methods: Progress, Applications and Comparison[J]. Advances in Agronomy, 2022, 172: 129–210.
- [29] ZHANG J Y, DYCK M, QUIDEAU S A, *et al.* Assessment of Soil Health and Identification of Key Soil Health Indicators for Five Long-term Crop Rotations with Varying Fertility Management[J]. Geoderma, 2024, 443: 116836.
- [30] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043–3056. [LI Xin, ZHANG Wen-ju, WU Lei, *et al.* Advance in Indicator Screening and Methodologies of Soil Quality Evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043–3056.]
- [31] 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. [ZHU Yong-guan, PENG Jing-jing, WEI Zhong, *et al.* Linking the Soil Microbiome to Soil Health[J]. Scientia Sinica (Vita), 2021, 51(1): 1–11.]
- [32] 焦硕, 戚杰军, 刘纪爱, 等. 旱区土壤微生物组与土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1350–1362. [JIAO Shuo, QI Jie-jun, LIU Ji-ai, *et al.* Soil Microbiome and Soil Health Assessment in Arid Regions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1350–1362.]
- [33] DELGADO-BAQUERIZO M, ELDRIDGE D J, LIU Y R, *et al.* Soil Biodiversity and Function under Global Change[J]. PLoS Biology, 2025, 23(3): e3003093.
- [34] WILHELM R C, VAN ES H M, BUCKLEY D H. Predicting Measures of Soil Health Using the Microbiome and Supervised Machine Learning[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 164: 108472.
- [35] ALKORTA I, AIZPURUA A, RIGA P, *et al.* Soil Enzyme Activities as Biological Indicators of Soil Health[J]. Reviews on Environmental Health, 2003, 18(1): 65–73.
- [36] HERMANS S M, BUCKLEY H L, CASE B S, *et al.* Using Soil Bacterial Communities to Predict Physico-Chemical Variables and Soil Quality[J]. Microbiome, 2020, 8(1): 79.
- [37] COYNE M S, PENA-YEWTUKHIW E M, GROVE J H, *et al.* Soil Health: It's Not all Biology[J]. Soil Security, 2022, 6: 100051.
- [38] WANG L, CHENG Y, MEFTAU I M, *et al.* Advancing Soil Health: Challenges and Opportunities in Integrating Digital Imaging, Spectroscopy, and Machine Learning for Bioindicator Analysis[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(20): 8109–8123.
- [39] QI M X, CHEN S C, WEI Y C, *et al.* Using Visible-near Infrared Spectroscopy to Estimate Whole-profile Soil Organic Carbon and Its Fractions[J]. Soil & Environmental Health, 2024, 2(3): 100100.
- [40] RUBIO V, AMSILI J, ROSSITER D G, *et al.* Digitally Mapping Soil Health at Regional Scale: Disentangling Drivers and Predicting Spatial Land Use Effects[J]. Geoderma, 2025, 460: 117401.
- [41] ZENG Y J, VERHOEF A, VERECKEN H, *et al.* Monitoring and Modeling the Soil-plant System Toward Understanding Soil Health[J]. Reviews of Geophysics, 2025, 63(1): e2024RG000836.
- [42] ROS G H, VERWEIJ S E, JANSSEN S J C, *et al.* An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(23): 17375–17384.

- [43] MORROW J G, HUGGINS D R, CARPENTER-BOGGS L A, *et al.* Evaluating Measures to Assess Soil Health in Long-term Agroecosystem Trials[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(2): 450–462.
- [44] WU Q Y, CONGREVES K A. A Soil Health Scoring Framework for Arable Cropping Systems in Saskatchewan, Canada[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2022, 102(2): 341–358.
- [45] ANDREWS S S, KARLEN D L, CAMBARDELLA C A. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1945–1962.
- [46] IDOWU O J, VAN ES H M, ABAWI G S, *et al.* Use of an Integrative Soil Health Test for Evaluation of Soil Management Impacts[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2009, 24(3): 214–224.
- [47] 周璞, 毛馨卉, 侯华丽, 等. 澳大利亚和欧盟土壤战略比较与借鉴[J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(1): 60–66. [ZHOU Pu, MAO Xin-hui, HOU Hua-li, *et al.* Comparing and Benchmarking on Australian and EU Soil Strategies[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2023, 36(1): 60–66.]
- [48] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, *et al.* Soil Quality: A Critical Review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105–125.
- [49] MUELLER L, SCHINDLER U, SHEPHERD T G, *et al.* A Framework for Assessing Agricultural Soil Quality on a Global Scale[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(Suppl. 1): S76–S82.
- [50] THOUMAZEAU A, BESSOU C, RENEVIER M S, *et al.* Biofunction[®]: A New Framework to Assess the Impact of Land Management on Soil Quality. Part A: Concept and Validation of the Set of Indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 100–110.
- [51] DEBELJAK M, TRAJANOV A, KUZMANOVSKI V, *et al.* A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 115.
- [52] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 603–616. [ZHANG Jiang-zhou, LI Yi-zan, LI Ying, *et al.* Advances in the Indicator System and Evaluation Approaches of Soil Health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603–616.]
- [53] SÉRÉ G, LE GUERN C, BISPO A, *et al.* Selection of Soil Health Indicators for Modelling Soil Functions to Promote Smart Urban Planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 924: 171347.
- [54] WILLIAMS R A M, OGOKE A, RODGERS K, *et al.* Estimating Soil Health in Urban Allotments: Integrated Two-way Soil Quality Index and Free-living Amoebae in Nitrogen Recycling[J]. *Soil & Environmental Health*, 2023, 1(4): 100046.
- [55] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1253–1261.
- [56] GB/T 33469—2016 耕地质量等级[S].
- [57] JIAN J S, DU X, STEWART R D. A Database for Global Soil Health Assessment[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 16.
- [58] 吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 537–544. [WU Ke-ning, YANG Qi-jun, ZHAO Rui. A Discussion on Soil Health Assessment of Arable Land in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 537–544.]
- [59] WANG E L, HE D, ZHAO Z G, *et al.* Using a Systems Modeling Approach to Improve Soil Management and Soil Quality[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 289.
- [60] 赵瑞, 吴克宁, 杨淇钧, 等. 基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价方法[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 333–343. [ZHAO Rui, WU Ke-ning, YANG Qi-jun, *et al.* Farmland Soil Health Evaluation Method Based on Soil Function and Soil Threat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 333–343.]
- [61] 杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 461–475. [YANG Ying, GUO Zhi-ying, PAN Kai, *et al.* Farmland Soil Health Assessment Based on Ecosystem Multi-Functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 461–475.]
- [62] LI Z, LUN F, LIU M, *et al.* Rapid Diagnosis of Agricultural Soil Health: A Novel Soil Health Index Based on Natural Soil Productivity and Human Management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111402.
- [63] HUANG F, TU J M, ZHANG F Y, *et al.* Soil Health Assessment of Urban Forests in Nanchang, China: Establishing a Minimum Data Set Model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 206: 109795.
- [64] HANNAM J A, HARRIS M, DEEKS L, *et al.* Developing a Multi-functional Indicator Framework for Soil Health[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 175: 113515.
- [65] SINGH S, JAGADAMMA S, YODER D, *et al.* Agroecosystem Management Responses to Haney Soil Health Test in the Southeastern United States[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(5): 1705–1721.
- [66] MAHARJAN B, DAS S, ACHARYA B S. Soil Health Gap: A Concept to Establish a Benchmark for Soil Health Management[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01116.

作者简介: 李明(1988—), 男, 山东滕州人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为土壤固碳与土壤健康管理、重金属污染土壤修复。E-mail: liming@nies.org

(责任编辑: 陈 昕)