

DOI: 10.11689/sc.2022072601

张丹丹, 盛浩, 肖华翠, 等. 土壤健康的评价方法及应用[J]. 土壤与作物, 2023, 12 (1) : 109 – 116.

ZHANG DD, SHENG H, XIAO HC, et al. Assessment methods of soil health and their applications[J]. Soils and Crops, 2023, 12 (1) : 109 – 116.

土壤健康的评价方法及应用

张丹丹¹, 盛浩¹, 肖华翠¹, 尹泽润¹, 何雨茹¹, 周萍²

(1. 湖南农业大学 资源学院, 湖南 长沙 410128;

2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125)

摘要: 健康的土壤是作物生长、绿色农业和文明永续发展的基础, 合理评价土壤健康也是精准农业和再生农业的必然要求。当前, 针对土壤健康评价及敏感指标的筛选, 已有大量研究; 但不同土壤健康评价方法的适用性及其优劣仍不明晰, 如何敏感而准确地评估土壤健康状况亟待解决。本文在厘清土壤质量和土壤健康内涵的基础上, 评述了国内外主流土壤健康评价方法的指标体系、优缺点、应用状况及局限性, 从重视高强度人为利用土壤(水稻土、城市绿地、矿山开采地和保护地土壤)健康状况评价, 加强开发和优化基于土壤生物学指标的土壤健康评价工具和开发适应不同空间尺度的土壤健康评价工具三个方面进行了展望。

关键词: 土壤健康评价; 土壤生物学指标; 指标体系; 土壤质量; 土壤资源利用

中图分类号: X144

文献标识码: A

Assessment methods of soil health and their applications

ZHANG Dandan¹, SHENG Hao¹, XIAO Huacui¹, YIN Zerun¹, HE Yuru¹, ZHOU Ping²

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Healthy soil is the foundation for crop growth, green agriculture, and sustainable development of civilization. Reasonable evaluation of soil health is an inevitable requirement for precision agriculture and regenerative agriculture. Soil health evaluation and screening of sensitive indicators have been conducted; however, the adaptability, pros and cons of different soil health evaluation methods remain unclear. How to assess soil health sensitively and accurately needs to be solved. Therefore, based on clarifying the connotation of soil quality and soil health, this paper reviews the index structure, pros and cons and application limitations of major soil health evaluation methods. Three priorities in soil health study field are proposed. The health status evaluation of high-intensity anthropogenic soil (rice paddy, urban green space, mining land, and greenhouse) shall be received much more attention. Soil health assessment based on soil biological indicators needs to be optimized. Novel soil health assessment method adapted to different spatial scales is also needed.

Key words: soil health assessment; soil biological indicators; index system; soil quality; soil resource utilization

0 引言

健康土壤是生长健康作物、保障动物和人类健康的基础, 也是维系土壤功能可持续性和保障粮食安全的关键。近 40 年来, 伴随着经济的快速发展, 高强度土地利用方式快速转换, 农林业集约度日益提高,

收稿日期: 2022-07-26; 修回日期: 2022-11-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571234); 科技基础资源调查专项课题(2021FY100504); 2021 年湖南省研究生科研创新项目(CX20210677).

第一作者简介: 张丹丹(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤健康与质量评价. E-mail: 1678070682@qq.com.

共同通信作者: 盛浩(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤资源利用与环境研究. E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn.

周萍(1982-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事水稻土固碳减排研究. E-mail: zhouping@isa.ac.cn.

一些土壤的功能和质量呈退化趋势。培育健康土壤,发展健康农林业,已成为政府、科学界和公众关注的焦点。在联合国制定的17项可持续发展目标中,有13项可持续发展目标直接/间接与土壤有关^[1]。因此,能否科学、准确地评估土壤健康状况,直接影响全球可持续发展目标的实现。

近年来,国内外研发的土壤健康评价方法日渐增多,但有关评价指标的筛选和应用范围各异。以往关于土壤健康评价方法的研究,多聚焦于特定空间尺度或土地利用方式,尤其是中小空间尺度^[2-3]。例如:CASH、HSHT等评价方法均是针对旱地土壤开发,且多应用于田块尺度上。然而,适用于不同空间尺度及服务于不同土壤功能的评价方法仍需进一步研究。目前,已有土壤质量和健康的专门综述,重点关注耕地土壤功能和胁迫^[3]、土壤生物组指标^[4]和评价体系^[5]。但由于土壤生态系统的组成、性质和功能复杂,环境因子又以不同方式与土壤成分相互作用,这导致准确评估土壤健康状况尤为困难。考虑到不同区域自然成土环境与人为管理措施迥异,综合分析不同土壤指标,筛选和开发应用性广、精度高的土壤健康评价方法,并检验其适应性及敏感性是当前亟待解决的问题。鉴于此,本文综述了当前主流土壤健康评价方法,以期创新土壤健康评价指标体系、开发新一代土壤健康评价方法提供参考。

1 土壤健康的内涵

土壤健康与土壤质量紧密联系,但有所区分。20世纪80年代末,美国土壤学会首先提出土壤质量的概念,认为土壤质量是土壤在生态界面内维持植物生产力,保障环境质量(保持和提高水质、空气质量),促进动物与人类健康行为的能力^[6-7]。土壤质量主要是依据土壤功能进行定义,即现在和将来土壤功能正常运行的能力。目前,土壤质量是指土壤维护和保障绿色植物生长、容纳和净化污染物质及满足人类其他合理需求的综合能力量度,通常包含肥力质量、环境质量与健康质量三方面的内涵^[8-9]。Doran和Zeiss指出,土壤健康是指在生态系统和土地利用的边界内,土壤作为关键的生命系统,为支撑动植物生产,维持或提高空气质量和水质,促进动植物健康而发挥功能的能力,在此意义上,土壤健康强调的是“可持续性”^[10]。2014年,美国农业部自然资源保育署(USDA-NRCS)下设专门的土壤健康部门,将土壤健康定义为:土壤健康是指土壤能够支撑植物、动物和人类生存,持续发挥生态系统功能的能力^[11]。最近,有学者进一步指出,土壤健康是将农学、土壤学与政策、涉众需求和供应链可持续管理联系起来的纽带^[12]。

根据土壤质量与土壤健康二者概念的演变,有学者认为二者是近义词,可互换使用^[13-14];但也有学者指出,土壤质量与土壤健康有所区别。在内涵上,土壤质量包括土壤内在质量和动态质量,内在质量是指土壤的自然组成和性质,这主要受成土过程中长期自然因素的控制,一般不会受人类的管理措施影响。动态质量即相当于土壤健康,是指在人类生存的时间尺度上,土壤资源利用和管理引起土壤性质的变化,强调土壤属性与动、植物及人类健康紧密相关^[15]。

基于科学引文索引(SCI)核心库和拓展库,应用Web of Science搜索引擎,以soil health作为查询关键词,统计显示,2006年以前发表的研究论文数量不到百篇,2007-2018年间发文量剧增至2万篇,随后增势有所减缓(图1)。近30年来,在国别上,美国在土壤健康领域发文量最多,我国紧跟其后,累计发文量均>1万篇;其次是印度、澳大利亚、英国和德国,累计发文量均>3千篇。

2 土壤健康评价方法

了解不同土壤健康评价方法及其优缺点,不仅可以完善现有土壤健康土壤评价系统,也可为土壤健康管理及生产实践提供更适用的理论依据。现有国内外主流土壤健康评价方法主要包括:康奈尔土壤健康评价方法、HSHT土壤健康评价方法、M-SQR评价方法和耕地质量评价方法。

2.1 康奈尔土壤健康评价

康奈尔土壤健康评价体系衍生出SMAF(Soil management assessment framework)、CASH(Comprehensive assessment of soil health)和SHAPE(Soil health assessment protocol and evaluation)3个版本的评

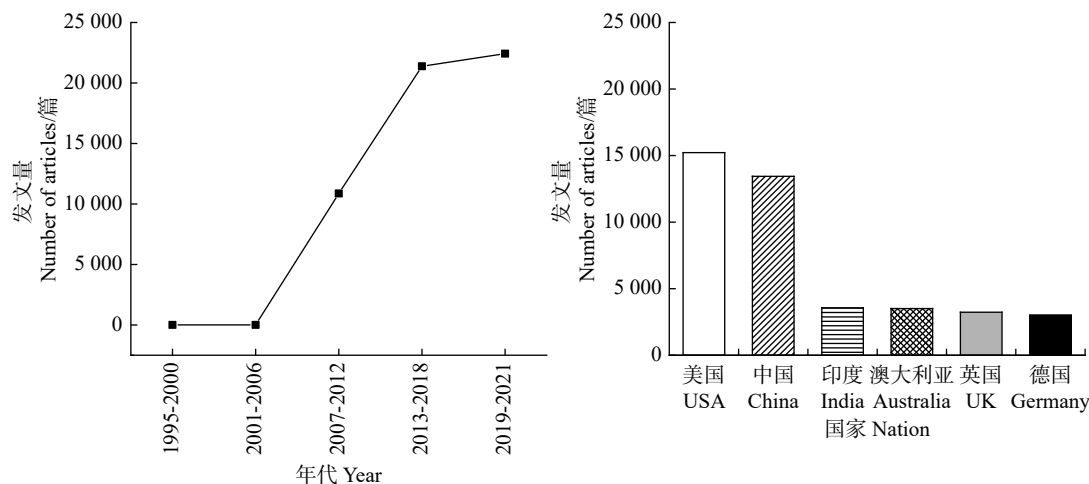


图 1 1995–2021 年间以“土壤健康”为关键词的发文章量与国别差异

Fig. 1 Numbers of publications including "soil health" as key words among nations between 1995–2021

价方法。SMAF 评估框架是早期版本,通过专家筛选结合主成分分析,构建土壤健康评价指标的最小数据集(MDS),应用指数法,建立不同评价指标的评分曲线,量化土壤健康^[16]。CASH 是 SMAF 评估框架的简化版,由 SMAF 衍生而来,应用累积正态分布法,改进了土壤物理、化学和生物学指标的评分曲线。CASH 近年仍在快速发展,不断纳入敏感的评价指标。然而,SMAF 和 CASH 评价指标体系相对较繁多(表 1),主要应用于美国东北部旱地土壤,在其他区域、不同土地利用方式(如水田)和不同管理措施下,CASH 的有效性与敏感性仍有待检验。为扩大 CASH 应用范围,Nunes 等^[17]进一步综合考虑气候和土壤类型,研发了大尺度土壤健康快速评价工具 SHAPE。SHAPE 测定指标相对较少、易于操作,但应用时间尚短,适用性也仍有待检验(表 2)。

2.2 HSHT 土壤健康评价

HSHT (Haney soil health test) 土壤健康评价方法主要针对美国东南部的旱地土壤开发,在不同地区也衍生出 2015、2018 和 SHS 的 3 个版本^[18]。HSHT 评价方法侧重于土壤生物活性指标,试图将土壤生物、土壤肥力和土壤健康联系起来评估土壤健康。HSHT 评价方法的指标较少(24 h 土壤呼吸、水溶性有机碳、氮),相对较容易测定,成本也不高,受到不少青睐^[19]。但是,HSHT 土壤健康评价方法的校准和验证也有限(表 2)^[20]。

2.3 M-SQR 土壤健康评价

M-SQR (Muencheberg soil quality rating) 土壤健康评价方法从植物生长环境和土壤健康条件出发,构建基础指标(作物生长发育有关的土壤性状)和胁迫指标(限制作物生长的环境指标),通过加权线性模型与最小限制因子法相结合,评估耕地生产潜力。M-SQR 土壤健康评价系统选取与生产力相关的指标进行评分,并考虑胁迫指标的作用,可为全球农田土壤健康的实用性评价、农田质量和作物产量潜力估测提供框架,但该框架需大量样本数据,仍不明确特定区域、特定功能评估时需多大样品数^[21]。

2.4 耕地质量评价

与北美、欧盟的发达国家地区相比,目前国内尚缺乏专门、统一的土壤健康评价工具,特别是突出土壤生物学、物理指标的土壤健康评价工具。2016 年,在《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)标准中^[22],以清洁程度和生物多样性指标表征土壤健康。该标准面向大区域尺度的耕地土壤,对指导区域作物生产和布局具有重要意义,但仍存在土壤生物指标少、量化程度低和实际应用操作困难的现实问题(表 2)^[23]。最近有学者提出,以表征耕地土壤功能与重金属胁迫为核心,构建耕地土壤健康全流程评价框架:从土壤功能与胁迫角度,将耕地土壤健康分为初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性、养分供给与循环的 5 类土壤功能;从应用角度划分出田块、县域、省域和国家的 4 级尺度^[3]。

表1 国内外主要土壤健康评价方法的指标
Table 1 Indicators of main soil health assessment methods

评价方法 Assessment method	指标 Indicators
CASH	<p>物理指标：质地、团聚体稳定性、有效含水量、表层硬度、表下层硬度。Physical indicators: soil texture, aggregate stability, available water capacity, surface hardness, subsurface hardness.</p> <p>化学指标：pH、可提取磷、可提取钾、微量元素（Fe、Mn、Mg、Zn）。Chemical indicators: soil pH, extractable P, extractable K, minor elements (Fe/Mn/Mg/Zn).</p> <p>生物指标：土壤有机质、活性碳、土壤呼吸、土壤蛋白含量。Biological indicators: soil organic matter, active carbon, soil respiration, soil protein index.</p>
SHAPE	气温、降水、土壤有机质、质地。Temperature, precipitation, soil organic matter, soil texture.
HSHT	生物指标：24 h土壤呼吸、水溶性有机碳、氮。Biological indicators: 24 h soil respiration, water-soluble organic carbon, water-soluble organic nitrogen.
M-SQR	<p>基础指标：坡度与地势、表层土壤结构、亚耕层结构、根系分布深度、剖面有效水、湿度和积水、基质、A层厚度。Basic indicators: slope and relief, topsoil structure, subsoil structure, rooting depth, profile available water, wetness and ponding, substrate, A-horizon depth.</p> <p>胁迫指标：污染、盐化、钠质化、酸化、低的全量养分状况、岩石上的土层浅薄、干旱、洪水和极端涝害、陡坡、地表岩石、高比例的粗质地碎块、不适宜的土壤热状态、其他胁迫（风或水的极端作用、河床侵蚀、土壤沉降等）。Hazard indicators: contamination, salinization, sodification, acidification, low total nutrient status, shallow soil depth above hardrock, drought, flooding and extreme waterlogging, steep slope, rock at the surface, high percentage of coarse texture fragments, unsuitable soil thermal regime, miscellaneous hazards (extreme exposure to wind or water, riverbank erosion, soil subsidence and others)</p>
耕地质量评价标准 Cultivated land quality evaluation	<p>气候条件：积温、降水量、全年日照时数、光能辐射总量、无霜期、干燥度。Climatic condition: accumulated temperature, precipitation, annual sunshine hours, total solar radiation, frost-free period, dryness.</p> <p>立地条件：经纬度、海拔、地形地貌、地形部位、坡度、坡向、成土母质、土壤侵蚀类型与程度、林地覆盖率、地面破碎度、地表岩石裸露情况、地表砾石度、田面坡度。Site characteristic: longitude and latitude, altitude, landform, terrain location, slope, slope aspect, parent material, soil erosion type and degree, forest coverage rate, ground fragmentation, surface rock exposure, surface gravel, field slope.</p> <p>剖面性状：剖面构型、质地构型、有效土层厚度、耕层厚度、腐殖层厚度、田间持水量、旱季地下水位、潜水埋深、水型。Profile property: profile configuration, texture profile, thickness of effective soil layer, thickness of plough layer, thickness of humus layer, field capacity, groundwater level in dry season, buried depth of water, water type.</p> <p>土壤理化性状：土壤质地、容重、pH、CEC。Soil physicochemical property: soil texture, bulk density, pH, CEC.</p> <p>土壤养分：土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾。Soil nutrient: soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium.</p> <p>障碍因素：障碍层类型、障碍层出现位置、障碍层厚度、耕层含盐量（盐渍化程度）、1 m土层含盐量、盐化类型、地下水矿化度。Constraining factor: type of barrier layer, location of barrier layer, thickness of barrier layer, salinity content of plough layer (salinization degree), salinity content of 1 m soil layer, salinization type, groundwater salinity.</p> <p>土壤管理：灌溉保证率（灌溉能力）、灌溉模数、抗旱能力、排涝能力、排涝模数、轮作制度、梯田化水平。Soil management: irrigation guarantee rate (irrigation capacity), irrigation modulus, drought resistance, drainage capacity, drainage modulus, crop rotation system, terraced level.</p>

3 主要土壤健康评价方法的应用

CASH 评价方法主要用于评估北美耕地土壤健康，其中，耕作制度、耕作强度和农艺管理措施是影响土壤健康的重要因子。例如：Fine 等^[24]应用 CASH 工具，成功评估了美国大西洋中部、中西部和东北部地区不同成土时间的土壤类型、不同空间范围（景观、田块）的土壤健康总体状况，认为土壤耕作制度是

表 2 国内外主要土壤健康评价方法的对比
Table 2 Comparison of main soil health assessment methods

评价工具 Assessment method	国家 Nation	优点 Pros	缺点 Cons	发展前景 Prospects
CASH	美国 USA	费用低, 田块尺度准确性和敏感性较高, 能较全面地反映土壤健康。Low cost, high field scale accuracy and sensitivity, comprehensive reflection of soil health.	未考虑土壤属性指标的权重, 区域尺度准确性相对较低。Uncalculated weight of soil attributes, relatively low accuracy at regional scale.	应用价值广泛, 有潜力成为构建国际土壤健康标准的基本方法。Widely applying and potentially serving as a basic method internationally.
SHAPE	美国 USA	区分气候和土壤类型, 灵活定量, 易操作。Differentiate between climate and soil types, flexible quantification and easy operation.	评分曲线相对少, 缺少实践检验。Relatively few scoring curves, lacking practical tests.	生成多个土壤健康指标的评分曲线, 满足全面需求。Generate scoring curves for multiple soil health indicators to meet comprehensive needs.
HSHT	美国 USA	指标少、侧重生物学指标。Few indicators and focusing on biological indicators.	主要针对农业生态系统开发的, 适用性可能受到指标和位点特异性的限制。Primarily for agro-ecosystems; limited applicability by indicators and site specificity.	需要对更多土壤类型和气候对比, 具有发展潜力。Great potential in applying to various soil types and climates.
M-SQR	德国 Germany	指标较全面, 区域适用性较好。Comprehensive indicators are better regional applicability.	需大量样本数据估算, 具体情况下需要多少才合理仍不明确。Large sample data are needed, unclear sample at specific circumstance.	可作为全球农田土壤健康评价的实用性参考框架。Practical reference frame for global farmland soil health assessment.
耕地质量评价标准 Cultivated land quality evaluation	中国 China	综合多种条件, 较全面反映土壤健康状况。Integrated various conditions and comprehensive reflection of soil health.	指标繁多, 实际可操作性不强, 指标体系内量化关系仍不完善。Numerous indicators, weak practical operability, and unclear quantitative relationship between indicators.	完善体系内量化关系, 需要继续实践研究。Improving the quantitative relationship between indicators and continuing practices.

导致土壤健康差异的主要因素。van Es 等^[25]报道不同耕作强度下, 土壤健康指数与作物产量显著相关, CASH 工具能够区分不同农艺管理措施导致的土壤健康状况总体差异。但 Roper 等应用 CASH 评价方法, 评估了美国南部北卡罗来纳州 3 种不同农艺管理措施下的土壤健康状况, 发现土壤健康指数与作物产量无相关性, CASH 工具难以识别不同农艺管理措施导致的土壤健康总体差异^[26]。原因可能是, 除不同农艺管理措施外, 土壤固有属性也是影响土壤健康敏感性的重要因素。为扩大 CASH 工具应用的区域范围, Nunes 等^[17]开发了北美耕地土壤的 SHAPE 工具, 应用已发表案例进行验证, 具有一定的应用效果。

HSHT 评价方法基于土壤微生物活性进行土壤健康评价, 其评价指数对土地利用方式和农艺管理措施响应敏感。Bavougian 等^[20]应用 HSHT 评价方法, 评估了美国中西部内布拉斯加州长期施肥和耕作试验下土壤健康, 发现耕作制度与施氮量显著影响作物产量。Chu 等^[19]应用 HSHT 工具, 评估了美国南部的农业土壤健康, 发现覆盖作物种植下, 土壤健康指数没有差异。此外, Singh 等^[18]也发现 HSHT 评价方法难以准确评估美国东南部不同农艺管理措施下的农田土壤健康状况差异。这些研究结果不一, 原因可能与不同耕作制度及强度、评价指标不同有关。例如 HSHT 方法中, 有效养分提取剂 (H3A) 在美国东南部的种植系统下, 适用性很有限^[18-19]。因此, 针对不同种植制度、人为管理和自然环境条件, 需进一步测试和改进土壤健康评价方法。

Mueller 等^[27]构建了基于土壤质量和作物产量潜力的土壤健康评价工具 M-SQR, 并通过评估德国和俄

罗斯等农用地土壤健康状况,发现其评价指数与作物产量显著相关。杨颖等^[28]将 M-SQR 工具与熵权系数法、灰色关联分析法相结合,有效地评估了黄淮海平原 3 个典型农田生态系统的土壤健康现状,发现其土壤健康状况总体处于较高水平,不同农田管理措施下的采样地,其土壤健康状况也有所差异。赵瑞等^[29]将 M-SQR 工具与 CASH 评估指标融合,应用“评价指标—土壤功能/胁迫—土壤健康”的评价路径,报道了河南省焦作市温县 5 种土壤功能的空间格局分布,而重金属污染胁迫和土壤生物活性是决定县域土壤健康的主要因素。

我国耕地质量评价在特定区域及地块上也取得了较好的应用效果。一些研究应用主成分分析结合最小数据集法,提出水稻土、红壤、潮土和黑土的土壤质量评价指标体系。黄得志等^[30]报道,与毗邻的长期双季稻—冬闲田相比,长期双季稻—油菜田的土壤肥力质量指数略有提升。李源钊等^[31]报道,连续 5 年施用石灰、有机肥后,土壤微生物指标分别表现为正、负面响应,某些特定的微生物类群(例如革兰氏阴性菌(G⁻))响应非常敏感,在土壤健康评价中极具应用潜力。何新莹等^[32]报道了一种基于指标权重确定法改进的灰靶模型,能客观反映耕地质量水平,方便测算单维度的耕地质量,应用效果较好。Liu 等^[33]提出一种新的中国耕地质量评价系统,包括生产能力质量和环境质量,应用了最小限制因子法和加权线性模型,耦合因子评分和分级,评价耕地质量。

4 展 望

开发科学土壤健康评价工具,准确评估土壤健康状况,有利于土壤管理者更方便、准确掌握土壤健康整体状况,针对性地开展农艺管理和土壤修复。因此,未来有必要加强土壤健康评价的方法学研究。

(1) 重视高强度利用土壤类型(水稻土、城市绿地、矿山开采地和保护地土壤)健康状况的评价。不同区域、气候条件下土壤类型众多,土壤理化性质、生物学性质各异。评价不同区域耕地土壤健康时,需筛选适宜的有效指标,建立相适应的评价工具。由于当前主流评价工具针对旱地土壤开发,而水耕人为土的成土过程独特,又关系国家粮食安全。水耕人为土健康评价指标体系还有待进一步研究。伴随着城市化快速进程,城市环境污染、土地资源高强度利用等一系列“城市病”,威胁城市土壤健康。当前主流土壤健康评价工具面向农业土壤研发,而城市土壤可能包含比农业土壤更多的污染物,当前仍缺乏专门针对城市土壤健康评价的指标体系。

(2) 加强研发和优化基于土壤生物学指标的土壤健康评价工具。生物学指标对于指示土壤健康状况变化的敏感性是不可替代的。目前,国内外针对土壤质量/健康的评价体系、指标与程序、评价方法与工具已有一定研究,但侧重于土壤化学指标,土壤物理和生物学指标的涉及相对较少。国内目前尚缺乏专门的、应用较广的土壤健康评价工具,特别是基于土壤生物指标的土壤健康评价工具。尽管国外有专门侧重土壤微生物土壤健康评价工具,但以土壤微生物“黑箱”指标为主,特定微生物类群和功能在土壤健康评价中的作用仍不明确。例如,细菌胞外聚合物是微生物分泌到胞外环境的高分子量天然聚合物,具有改善土壤功能的重要作用,是极具潜力的土壤健康评价指标。因此,仍很有必要优化筛选现有土壤健康评价指标。

(3) 重视研发适应不同空间尺度的土壤健康评价工具。目前,主流土壤健康评价工具以田块尺度应用较为广泛,但在更大空间尺度下,将涉及更多种的土壤类型和土地利用方式,使用的评价指标与评价标准也存在区别。因此,应建立不同空间尺度下的土壤健康评价体系,科学评价土壤健康。

参考文献 (References):

[1] 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 G L, WU H Y. From “problems” to “solutions”: soil functions for realization of sustainable development goals[J]. Bulletin of

- Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2) : 124–134.
- [2] 杨淇钧, 吴克宁, 冯喆, 等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (3) : 565–578.
YANG Q J, WU K N, FENG Z, et al. Soil quality assessment on large spatial scales: advancement and revelation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3) : 565–578.
- [3] 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 K N, YANG Q J, ZHAO R. A discussion on soil health assessment of arable land in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (3) : 537–544.
- [4] 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 Y G, PENG J J, WEI Z, et al. Linking the soil microbiome to soil health[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51 (1) : 1–11.
- [5] 王怀嵩, 张涛. 农业土壤健康评价体系研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38 (9) : 1093–1100.
WANG H S, ZHANG T. Research progress of agricultural soil health evaluation system[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38 (9) : 1093–1100.
- [6] DORON J W, COLEMAN D C, BEZDICEK D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment [M]. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994.
- [7] KARLEN D L, MAUSBACH M J, DORAN J W, et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (1) : 4–10.
- [8] 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 X, ZHANG W J, WU L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (14) : 3043–3056.
- [9] 蒋丛泽, 受娜, 高玮, 等. 青藏高原东北缘不同土地利用类型土壤质量综合评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3279–3286. .
JIANG C Z, SHOU N, GAO W, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different land use types on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12):3279-3286.
- [10] 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.
- [11] BREVIK E C. A brief history of the soil health concept [J]. Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 2018.
- [12] LEHMANN J, BOSSIO D A, KÖGEL-KNABNER I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1 (10) : 544–553.
- [13] 李焯楨, 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 X Z, LUO Y M, HOU D Y. The indicators, framework and procedures for soil health: a critical review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (3) : 617–624.
- [14] BUNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, et al. Soil quality-A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105–125.
- [15] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive assessment of soil health-the cornell framework [M]. 3.2 edn. Geneva, NY: Cornell University, 2016.
- [16] NUNES M R, KARLEN D L, VEUM K S, et al. A SMAF assessment of US tillage and crop management strategies[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2020, 8: 100072.
- [17] NUNES M R, VEUM K S, PARKER P A, et al. The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85 (4) : 1196–1213.
- [18] 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.
- [19] CHU M W, SINGH S, WALKER F R, et al. Soil health and soil fertility assessment by the haney soil health test in an agricultural soil in west Tennessee[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50 (9) : 1123–1131.
- [20] BAVOUGIAN C M, SHAPIRO C A, STEWART Z P, et al. Comparing biological and conventional chemical soil tests in long-term tillage, rotation, N rate field study[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 (2) : 419–428.
- [21] 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 (sup1) : S76–S82.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 质量等级: 20142249-T-326[S/OL]. 北京: 中国标准出

- 版社, 2016[2022-07-05]. <https://www.doc88.com/p-64159432458690.html>.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Cultivated land quality grade: 20142249-T-326[S/OL]. Beijing: Standards Press of China, 2016[2022-07-05]. <https://www.doc88.com/p-64159432458690.html>.
- [23] 张小丹, 吴克宁, 杨淇钧, 等. 耕地健康产能内涵及评价指标体系研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, 51 (1) : 245-252.
ZHANG X D, WU K N, YANG Q J, et al. Progress on connotation and evaluation index system of cultivated land healthy productivity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51 (1) : 245-252.
- [24] FINE A K, VAN ES H M, SCHINDELBECK R R. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (3) : 589-601.
- [25] VAN ES H M, KARLEN D L. Reanalysis validates soil health indicator sensitivity and correlation with long-term crop yields[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 (3) : 721-732.
- [26] ROPER W R, OSMOND D L, HEITMAN J L, et al. Soil health indicators do not differentiate among agronomic management systems in north Carolina soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (4) : 828-843.
- [27] MUELLER L, SAPAROV A, LISCHIED G. Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of central Asia [M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [28] 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 Y, GUO Z Y, PAN K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (2) : 461-475.
- [29] 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 R, WU K N, YANG Q J, 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.
- [30] 黄得志, 盛浩, 潘博, 等. 双季稻-冬闲/油菜田长期种植模式下的土壤肥力质量特征[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (4) : 913-919.
HUANG D Z, SHENG H, PAN B, et al. Characteristics of soil quality in a long-term double cropping rice system-winter fallow/rape fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (4) : 913-919.
- [31] 李源钊, 盛浩, 尹泽润, 等. 双季稻田土壤微生物群落对连续5年施有机肥和石灰的响应差异[J]. *土壤通报*, 2022, 53 (2) : 482-491.
LI Y Z, SHENG H, YIN Z R, et al. Response of microbial community in purple mud of double-cropped rice fields to 5-year continuous application of organic amendment and liming[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53 (2) : 482-491.
- [32] 何新莹, 聂艳, 王朴, 等. 基于改进灰靶模型的耕地质量评价方法与实证 [J/OL]. *土壤学报*, 2022[2022-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220423.1755.006.html>.
HE X Y, NIE Y, WANG P, et al. Cultivated land quality evaluation method and demonstration based on improved grey target model [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022[2022-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220423.1755.006.html>.
- [33] LIU L M, DE ZHOU, CHANG X, et al. A new grading system for evaluating China's cultivated land quality[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31 (12) : 1482-1501.