

DOI: 10.11766/trxb202105240270

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 Xuanzhen, LUO Yongming, HOU Deyi. The Indicators, Framework and Procedures for Soil Health: A Critical Review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 617–624.

土壤健康评估指标、框架及程序研究进展*

李焯楨¹, 骆永明², 侯德义^{3†}

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 土壤健康已经成为土壤学中的研究热点。对土壤健康进行科学的评估是进行土壤健康管理和实现可持续发展目标的基础。然而, 由于土壤具有多种属性和生态服务功能, 科学地进行土壤健康评估面临着巨大的挑战。本文回顾了土壤健康概念的发展历程, 总结了进行土壤健康评估的物理、化学和生物学指标及其表征意义; 介绍了目前常用的土壤健康评估框架及其适用性, 梳理了土壤健康评估的一般程序, 并指出我国未来的土壤健康评估应该关注碳汇指标、生物学指标和环境指标。本文旨在为建立符合我国国情的土壤健康评估方法提供借鉴。

关键词: 土壤健康; 评估方法; 指标; 最小数据集; 土壤健康指数

中图分类号: S159.2 文献标志码: A

The Indicators, Framework and Procedures for Soil Health: A Critical Review

LI Xuanzhen¹, LUO Yongming², HOU Deyi^{3†}

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Soil health has become a hot topic in soil science. Scientific assessment of soil health is fundamental to soil management and the achievement of sustainable development goals. Soil health assessment is challenging because of the multiple properties and ecosystem services. In this paper, the development of the concept and the traditional health assessment indicators, including physical, chemical and biological indicators, and their connotation were summarized. Also, the commonly used soil health assessment frameworks and their applicability were introduced while the general procedure of soil health assessment was summarized. This study also pointed out that the future soil health assessment in China should enhance the weight of carbon pool index, biological index and environmental index. Thus, the paper aims to lay a foundation for the establishment of a soil health assessment method that conforms to China's national conditions.

Key words: Soil health; Assessment approaches; Indicator; Minimum data set; Soil health index

* 国家重点研发计划项目(2020YFC1808000)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2020YFC1808000)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: houdeyi@tsinghua.edu.cn

作者简介: 李焯楨(1981—), 男, 河南平顶山人, 博士, 副教授, 主要从事土壤微生物和污染土壤修复研究。E-mail: xzli@henau.edu.cn

收稿日期: 2021-05-24; 收到修改稿日期: 2021-07-19; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-10-29

土壤是一个整体的、动态的生命系统^[1]。长期以来,作物产量是衡量土壤优劣的主要指标,而当前,人们越来越认识到土壤健康与水质调节、气候变化和人类健康均密不可分,因此日益受到重视^[2]。美国土壤学家 Doran 和 Zeiss^[3]较早明确提出了土壤健康的概念,他们认为土壤健康是土壤作为一个重要的生命系统,在生态系统和土地使用的界限内,维持动植物生产力,保障大气和水环境质量,促进动植物健康的能力。该定义受到联合国粮食和农业组织的肯定和沿用^[4]。我国《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)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^[5]。土壤健康是一个颇具生态文明色彩的词汇,因为它将土壤当作一个有独特生命力的客体对待,而不仅仅是服务于人类的工具,这是具有进步意义的。

2013年12月第68届联合国大会正式通过决议,将2015年定为“国际土壤年”,主题为“健康土壤带来健康生活”。在2020年9月召开的中国土壤学会第十四次全国会员代表大会上也将“守护土壤健康,助力高质发展”确定为大会主题。可见,土壤健康问题已经受到政府和学界的高度重视。

维持土壤健康对人类可持续性发展至关重要。因此,需要一种透明的、可重复的方法来评估土壤健康^[6]。虽然不少学者已经提出了土壤健康评估方法,但是仍需不断改进和完善,以满足土壤健康管理的需要^[7]。本文系统总结了进行土壤健康评估的物理、化学和生物学指标及其表征意义,介绍了目前常用的土壤健康评估框架及其适用性,梳理了土壤健康评估的一般程序,旨在为建立符合我国国情的土壤健康评估方法提供借鉴。

1 土壤健康评估的必要性和挑战

1.1 进行土壤健康评估的必要性

土壤的生态系统服务功能一般可分为可持续植物生产、水体质量调控、人类健康改善和气候变化调节等四类^[2],也有学者认为应分为支持服务、调节服务、供给服务和文化服务四类^[8]。目前全球所面临的问题,尤其是粮食安全、水安全、气候变化、生物多样性等问题的解决,均与土壤有关^[9]。2015年9月,联合国发布的《2030年可持续发展议程》所涵盖17项全球可持续发展目标(Sustainable Development

Goals, SDGs)中,涉及土壤16种服务功能,其中与土壤直接相关的有8项,间接相关的有5项^[8, 10-11]。因此,土壤健康程度将直接影响到可持续发展目标的实现。在过去几十年里,土壤健康评估在科学界和农业生产者中受到越来越多的关注^[12]。

1.2 进行土壤健康评估的挑战性

土壤健康评估的实质就是对其所能提供的生态系统服务功能的评价。土壤健康指标很多,但是在土壤健康评估中需要对这些指标整合,以建立统一的土壤健康指数(soil health index)^[2]。目前公布的土壤健康指数数量相对较少,并且需要对众多指标进行定量转换和加权,以便将其纳入最终的单一分值,因此构建土壤健康指数并非易事。指标值必须使用非线性关系进行转换,因为较高的值并不总对应着较好的土壤健康状况。例如,过高土壤pH不利于土壤健康。为了确定最终的土壤健康分值,通常将所有指标置于同等重要的地位^[13]。目前尚无单一的土壤健康指数可以表征所有的土壤属性,因而开展土壤健康评估常常会面临困难^[2]。

2 土壤健康评估的指标

2.1 土壤健康指标的遴选

土壤健康指标是指可以反映土壤某种健康属性的指标。Rinot 等^[6]认为理想的土壤健康指标应满足四个条件:(1)与土壤功能密切相关,可反映土壤物理、化学或生物属性;(2)对土壤管理、土地利用、气候变化等因素引起的土壤功能变化较为敏感;(3)具备操作性强、有效性高、准确性强、成本低廉等优势,并可在短时间内帮助决策;(4)可反映土壤功能与土壤健康管理目标之间的关系。但是,目前常用的指标中仅有少部分可同时满足以上四个标准。例如,土壤中总有机碳含量是一个重要的指标,但是对环境变化的响应不敏感,因此也只能满足上述的其中三个标准^[14]。习惯上,土壤健康指标可以分为物理指标、化学指标和生物学指标^[12]。由于土壤健康这一概念本身是由土壤质量发展而来的,因此一些土壤健康指标与土壤质量指标事实上是重叠的。

2.2 传统的土壤健康指标

2.2.1 物理指标 最常见的物理指标有:容重、含水量和质地^[15]。多数土壤健康评估框架包括了田间持水量和容重指标^[12]。容重可反映土壤紧实度和

孔隙度，易受到环境因素的影响，因此可作为土壤健康评估的主要物理指标^[16]。土壤水分不仅是养分运输的介质，而且直接影响着水解过程，对土壤微生物多样性的影响很大^[15]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元，影响着许多生物过程和农艺过程，是一个关键的土壤健康指标^[17]。

2.2.2 化学指标 化学指标在大多数土壤健康评估框架所涉及的指标中至少占了 40%，可见人们非常重视化学指标对土壤健康的指示作用^[2]。土壤 pH、有机质含量、碳含量、氮含量均是重要的化学指标。土壤 pH 决定了养分有效性，控制着土壤中微生物的多样性^[15]，并影响土壤缓冲能力^[18]。土壤有机质含量影响着土壤的聚集性和稳定性^[19]，并与土壤肥力紧密相关^[20]。土壤碳和氮含量，尤其是其中的活性组分含量，通常是影响土壤健康的关键变量，也是土壤中有机质含量的早期指标^[21]，对于土壤健康管理至关重要^[22]。

2.2.3 生物学指标 相对于传统的物理和化学指标，生物学指标能更好地指示土壤健康^[23]。土壤生物包括细菌、真菌、藻类、原生动物和线虫等，这些生命体相互作用，互相影响，在维持土壤健康方面发挥了重要作用。同时，土壤生物也剧烈地影响着土壤结构、养分循环、水分迁移、污染物降解等^[24]。在土壤生物中，土壤微生物的地位和作用最为关键，因此一直是土壤生物学的研究热点。据统计，每克土壤中有数以亿万计的微生物，但其中高达 99% 的物种及其功能尚属未知，因此被称为地球“微生物

暗物质”^[25]。微生物作为单细胞生物，繁殖周期短，对环境变化反应敏感，因此是诊断土壤健康的理想指示生物，较土壤物理或化学指标更具优越性^[23-26]。细菌普遍存在于环境中，是环境中生物地球化学循环的驱动因素^[27]。真菌可促进植物生长和养分循环，在维持生态系统的可持续发展中发挥着关键作用^[28-29]。因此，细菌和真菌数量和多样性可以作为土壤健康的理想生物学指标。除此之外，微生物生物量、病原菌种类和数量^[30-32]也常用来当作土壤健康的生物学指标。

酶学指标属于生物学指标范畴。土壤酶活性与土壤有机质状况及微生物活性密切相关，可视为土壤生产力和污染程度的量度^[33]。一些土壤酶，如淀粉酶、纤维素酶、几丁质酶、脱氢酶、磷酸酶均常用于土壤健康评估^[15]。Chae 等^[34]评价了 8 种土壤酶（酸性磷酸酶、芳基硫酸酯酶、过氧化氢酶、脱氢酶、荧光素二乙酸水解酶、蛋白酶、脲酶和 β -葡萄糖苷酶）在污染土壤修复效果评估中的指示作用，认为 β -葡萄糖苷酶是反映土壤健康的最佳酶学指标。

2.3 新兴分析技术

某些传统土壤健康指标分析方法耗时长、成本高，不能满足大规模、实时性的土壤健康管理需求^[35]。随着分析技术的快速发展，也给土壤健康评估的创新带来契机。近年来，土壤健康指标的新兴分析技术不断涌现，其基本特点是快速、准确、价廉和高通量（表 1）。

表 1 新兴分析技术

Table 1 The novel analytical techniques

技术名称	测试指标	指标属性	技术优势
Analysis techniques	Analysis indicators	Attributes of indicators	Advantages of analysis techniques
高频探地雷达技术 ^[36]	土壤含水量	物理指标	快速、连续、原位无损
低场核磁技术 ^[37]	土壤孔隙特征	物理指标	快速、无损、准确
同步辐射微 CT ^[38]	土壤团聚体微结构	物理指标	无损、高分辨率
二氧化碳脉冲技术 ^[39]	二氧化碳含量 (可用来表征土壤可溶性有机碳)	化学指标	设备简单、程序简便、获取信息高效
红外光声光谱技术 ^[40]	土壤有机质含量	化学指标	样品用量小、不受样品形态限制
分子生物学技术 ^[41]	微生物的丰度和组成	生物学指标	快速、廉价、高通量
高通量土壤酶活测定方法 ^[42]	β -葡萄糖苷酶、 β -氨基葡萄糖苷酶、酸性磷酸单酯酶和芳基硫酸酯酶活性	生物学指标	准确、快速

3 土壤健康评估的框架

3.1 土壤健康评估框架发展现状

土壤健康评估框架是指进行土壤健康评价的方法和程序。Morrow 等^[43]认为理想的土壤健康评估框架应满足七个标准,即:(1)有足够的事实依据,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,具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。

自从美国农业部科学家 Andrews 等^[44]提出土壤管理评价框架 (Soil Management Assessment Framework, SMAF) 后,土壤健康综合评价 (Comprehensive Assessment of Soil Health, CASH)、土壤健康评估工具 (Soil Health Tool, SHT) 等土壤健康评估方法应运而生。我国学者吴克宁等^[45]也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。此外,赵瑞等^[46]和杨颖等^[47]分别进行了县域尺度的耕地健康产能评价。由此可见,近年来国内外学者在土壤健康评估理论研究和实践应用两方面均取得了长足发展。

3.2 目前常用的土壤健康评估框架

3.2.1 土壤管理评价框架 SMAF 是美国研究人员最初为北美土壤质量评估开发的^[44],在美国已经被广泛用于农业和自然系统土壤的评估中^[48-49],其特点是可以定量、动态反映土壤对近期管理措施的影响^[44]。目前,SMAF 拥有 13 个指标的评分曲线或解释算法^[50]。Cherubin 等^[50]将 SMAF 用于巴西甘蔗田扩张对土壤健康影响的评估中,发现草地转为甘蔗田对土壤健康有轻微的改善作用,主要表现为土壤肥力的提高。

3.2.2 土壤健康综合评价 CASH 在早期被称为康奈尔土壤健康试验 (Cornell Soil Health Test, CSHT),是为直接满足农业土地管理者和研究者的需求而开发的。CASH 强调对农田特定限制因素的识别和确认,从而选择最佳的土地管理办法,以提

高土壤生产力并减少对环境的影响^[51]。van Es 和 Karlen^[52]采用该方法分析了美国北卡罗莱纳州三个长期试验田 15 个土壤健康指标的数据,认为该框架可以满足土壤健康评估需要。

3.2.3 土壤健康评估工具 SHT 是由美国农业部农业研究处 (USDA Agricultural Research Service, USDA-ARS) 为商业化的土壤测试而设计的,具有快速、价廉等优势^[53]。SHT 是将土壤视为一个有生命力的、高度一体化的、不断演变的系统来分析土壤养分的动态变化。与过去的土壤肥力评价相比,它采用了一种更为综合的方法。SHT 还可以帮助用户深入了解土壤化学和生物学之间复杂的相互作用,并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^[53]。

3.2.4 基于“需求-功能-维度-要素-指标”的耕地健康产能评价框架 为探寻适合我国新时代耕地健康产能评价的新理论与方法,赵瑞等^[46]从耕地产能评价与耕地健康诊断两个维度出发,选取了耕地气候条件、土壤特性、技术设施等 8 个要素,构建了基于“需求-功能-维度-要素-指标”的耕地健康产能评价框架。利用该框架,运用综合算法、“1 + X”累加模型法、图层叠加法定量评价了河南省温县耕地健康产能,收到了满意的效果。

3.3 其他土壤健康评估框架

3.3.1 土壤健康数据库 土壤健康数据库 (SoilHealthDB) 由 Jian 等^[54]首次提出,主要用于评价四种农业措施 (覆盖作物、免耕、农林间作和有机农业) 对土壤健康的影响。该框架包括 42 个土壤健康指标和 46 个背景指标,将气候、海拔和土壤类型等因素均考虑在内。该数据库具有在线、开源、实时更新等特点。SoilHealthDB 为农业生产者和科学家在农田规划、评估和管理中提供了有价值的信息。

3.3.2 基于自然土壤生产力与人类管理的土壤健康指数 基于自然土壤生产力与人类管理的土壤健康指数 (soil health index based on natural soil productivity and human management) 由 Li 等^[55]提出。该方法强调自然土壤生产力及其外部投入的协同作用。基于 10 天的归一化差值植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI), 该方法可快速量化农业生产对土壤健康的影响。Li 等^[55]发现果园系统的土壤较玉米单作和小麦/玉米轮作两种种植方式更为健康。

4 土壤健康评估程序

4.1 土壤健康评估的一般程序

在目前主流的土壤健康评估程序中，主要包括三个主要步骤：(1) 选择土壤属性。通过主成分分析、相关性分析和聚类分析等数学方法降低变量维度，以获得最小数据集 (Minimum Data Set, MDS)，从中选择最佳的土壤健康指标。(2) 定量化。在得到最小化数据集后，采用适当方法将其转化到具有可比性的同一维度上。常用的打分方法有标准化、差值法等，也可以根据评估目的设计其他适当的数学变换。(3) 整合。根据设定的权重将各指标整合，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^[6]。

然而，这种土壤健康评估仅重视了土壤供给服务功能，而忽略了调节和支持服务功能。因此，Rinot 等^[6]认为必须对现有的框架进行改进，以便于对土壤的供给服务、调节服务和支持服务进行定量化描述。

4.2 新兴土壤健康评估程序

多元复合评估方法 (Multivariate-complex soil health approach) 是 Rinot 等^[6]提出的一种采用不同视角评估土壤健康的新方法。与一般的土壤健康评估程序不同，该方法直接从土壤健康定义中的“土壤生态服务功能”入手，对各土壤指标进行逆向的筛选。这种“结果导向”的评估思路不仅有助于筛选出更具代表性的土壤指标，也利于农业、园林和生态工程中的实际应用。该方法主要分为三个步骤进行评估。第一步应尽可能广泛地从不同土壤类型、用地类型和气候条件下获取土壤样本，并进行物理、化学和生物学指标检测，通过主成分分析、相关性分析和聚类分析等数学方法建立最小数据集，从中选择最佳的土壤健康指标，以描述土壤所能提供的生态系统服务功能。通过相关性分析和主成分分析来最小化需要测量的指标数量，然后使用聚类分析来确定每组在统计上相似的指标中最具代表性的指标。第二步是将原始数据转换为标准化分值。常用的方法是将测量指标的绝对值转换为相对值 (0%~100%)。第三步是通过最小二乘模型实现数据整合。这些模型将为每个指标提供特定的系数，以表征其对每个土壤服务功能 (供给服务、调节服务和支持服务) 及整个模型的贡献，然后剔除贡献相对较低的指标。最后，结合所有相关土壤服务

功能构建一个整体模型。

5 研究展望

5.1 “碳中和”大背景下应重视土壤的碳汇属性

土壤有机质 (碳) 是土壤的关键属性，是维持土壤生产力的基本条件，也是农业可持续发展的基础。土壤是陆地生态系统最大的碳库，有机碳总量达到 1 115~2 220 Pg，约为大气碳库的 2 倍^[56]，在调节二氧化碳浓度和全球变化过程中具有举足轻重的地位。2015 年联合国气候变化框架公约宣布启动“千分之四全球土壤增碳计划”，即每年增加土壤 (2 m 深) 4% 的有机碳，将抵消当年矿物燃料的碳排放。2020 年 9 月 22 日，我国政府在第七十五届联合国大会上庄严提出：中国将采取更加有力的政策和措施努力争取 2060 年前实现碳中和。因此，在这种大背景下，积极探索土壤固碳技术，提高土壤有机质 (碳) 含量，研究土壤碳汇指标与土壤健康的关系，并把碳汇指标科学地列入土壤健康评估中去，对于实现“碳中和”宏伟目标具有重要的现实意义。

5.2 应进一步重视土壤生物评价指标

生物学指标是土壤健康最直接的反映，较物理和化学指标更能代表土壤健康状况^[2]。但与物理和化学指标相比，土壤生物学指标应用较少。其原因是目前对微生物与土壤功能之间的关系缺乏深入了解，尚有很多“未知”微生物种类和功能有待挖掘；此外生物学指标所采用的分析技术成本高、耗时长和难度大。而在目前的生物评价中，相对于微生物，对植物和小型动物指标的应用更少。植物尤其是农作物与人体健康紧密相关，因此作物产量和品质应作为土壤健康评估的指标。而动物也是土壤生态系统和食物网的重要组成部分，蚯蚓、线虫等小型动物对土壤健康具有明显的指示作用，在土壤健康评估中也应予以考虑。因此，今后应加强对生物学指标的研究，以全面评价土壤健康。

5.3 应考虑土壤环境质量要素

土壤污染问题已经成为一个全球性问题，且有日益加剧的趋势。土壤污染将影响土壤各个生态服务功能，并最终影响人体健康。土壤环境要素是土壤健康的重要组成部分，但目前的土壤健康评估中鲜有考虑

土壤环境要素。在我国,已经出台了《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018),详细规定了土壤污染风险等级,对于土壤健康评估具有重要的借鉴意义。但是该标准所涉及的土壤污染物种类非常有限,尤其未包括很多新兴污染物如微塑料、纳米材料等^[57-59]。此外,污染物在土壤中的迁移和转化特征因种类而异,不同污染物的毒效应又可相互影响,相互叠加,从而对土壤健康状况构成复杂的影响。目前,我们对这种影响的定量评价还很滞后,一定程度限制了其在土壤健康评估中的应用。因此需加大对污染与土壤健康之间关系的研究力度,建立污染物在土壤生态系统中的剂量-效应关系,为土壤健康评估提供依据。需要注意的是,化学污染物有时会表现为有利的一面,例如向土壤中添加微塑料可提高土壤中可溶性有机碳、有机氮和有机磷含量^[60],但不能简单认为微塑料污染对土壤健康是有益的。因此,如何将化学污染物纳入到土壤健康评估中来,是一个亟待解决的重要课题。

5.4 建立适合我国国情的土壤健康评估方法

我国土壤类型众多,不同地区的气候、水文条件差异较大,在建立土壤健康评估方法时,应注意“土壤健康”的相对性,不同的土壤类型应赋予不同的土壤健康标准。以有机质指标为例,我国东北黑土有机质本底值较高,但不能忽视近年来有机质不断下降的现实^[61],仍应重视其健康风险;而我国西南某些原本贫瘠的石漠化土壤,经过治理后,有机质含量逐步增加^[62],仍可视作健康土壤。因此,要建立符合我国国情的土壤健康评估方法,在指标的选择上,应根据不同地区土壤类型、地理因素和气候条件,因地制宜,进行“弹性化”评估,实现可持续发展的目标。

参考文献 (References)

- [1] Larkin R P. Soil health paradigms and implications for disease management[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2015, 53: 199—221.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] FAO. An international technical workshop Investing in sustainable crop intensification: The case for improving soil health; *Integrated Crop Management Vol. 6-2008* [R/OL]. Rome: FAO, 2008. [2008-07-22]. <http://www.fao.org/3/i0951e/i0951e00.pdf>.
- [5] 中华人民共和国国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会. 耕地质量等级[S]. GB/T 33469—2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China and Standardization Administration of China. Cultivated land quality grade[S]. GB/T 33469—2016.]
- [6] 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.
- [7] Lehman R, Cambardella C, Stott D, et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation[J]. *Sustainability*, 2015, 7(1): 988—1027.
- [8] 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. [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.]
- [9] Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859—1869. [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.]
- [10] United Nations Development Program. 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. [2012-06-22]. <https://www.cn.undp.org/content/china/zh/home/sustainable-development-goals.html>. [联合国开发计划署. 2030年可持续发展议程[EB/OL]. [2012-06-22]. <https://www.cn.undp.org/content/china/zh/home/sustainable-development-goals.html>.]
- [11] Keesstra S D, Bouma J, Wallinga J, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals[J]. *Soil*, 2016, 2(2): 111—128.
- [12] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality - A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [13] 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.
- [14] van Wesemael B, Chartin C, Wiesmeier M, et al. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 274: 62—75.
- [15] Maurya S, Abraham J S, Somasundaram S, et al. Indicators for assessment of soil quality: A mini-review[J].

- Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192 (9): 604.
- [16] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. Geoderma, 2011, 163 (1/2): 74—82.
- [17] Gyawali A J, Stewart R D. An improved method for quantifying soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83 (1): 27—36.
- [18] Usharani K V, Roopashree K M, Naik D. Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2019, 8 (5): 1256—1267.
- [19] Obalum S E, Chibuikwe G U, Peth S, et al. Soil organic matter as sole indicator of soil degradation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (4): 176.
- [20] Mohammadi K. Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10 (86): 19840—19849.
- [21] Bi C J, Chen Z L, Wang J, et al. Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types[J]. Pedosphere, 2013, 23 (2): 194—204.
- [22] Culman S W, Snapp S S, Green J M, et al. Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance[J]. Agronomy Journal, 2013, 105 (2): 493—502.
- [23] 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. [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.]
- [24] Njira K O W, Nabwami J. Soil management practices that improve soil health: Elucidating their implications on biological indicators[J]. Journal of Animal & Plant Sciences, 2013, 18 (2): 2750—2760.
- [25] Zhu Y G, Shen R F, He J Z, et al. China soil microbiome initiative: Progress and perspective[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(6): 554—565, 542. [朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32 (6): 554—565, 542.]
- [26] Fuhrman J A. Microbial community structure and its functional implications[J]. Nature, 2009, 459 (7244): 193—199.
- [27] Hayat R, Ali S, Amara U, et al. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review[J]. Annals of Microbiology, 2010, 60 (4): 579—598.
- [28] Frac M, Hannula S E, Belka M, et al. Fungal biodiversity and their role in soil health[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 707.
- [29] Hui N, Liu X X, Jumpponen A, et al. Over twenty years farmland reforestation decreases fungal diversity of soils, but stimulates the return of ectomycorrhizal fungal communities[J]. Plant and Soil, 2018, 427(1/2): 231—244.
- [30] de Vries F T, Wallenstein M D. Below-ground connections underlying above-ground food production: A framework for optimising ecological connections in the rhizosphere[J]. Journal of Ecology, 2017, 105 (4): 913—920.
- [31] Ritz K, Black H I J, Campbell C D, et al. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development[J]. Ecological Indicators, 2009, 9 (6): 1212—1221.
- [32] 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): 1—13.
- [33] 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.
- [34] Chae Y, Cui R X, Woong Kim S, et al. Exoenzyme activity in contaminated soils before and after soil washing: β -glucosidase activity as a biological indicator of soil health[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 135: 368—374.
- [35] Sanderman J, Savage K, Dungal S R S. Mid-infrared spectroscopy for prediction of soil health indicators in the United States[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84 (1): 251—261.
- [36] Wijewardana Y G N S, Galagedara L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2): 24—33.
- [37] Kong C, Wang M Y, Shi X Z, et al. Study on water holding capacity and pore characteristics of soils based on LF-NMR[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1130—1137. [孔超, 王美艳, 史学正, 等. 基于低场核磁共振技术研究土壤持水性能与孔隙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1130—1137.]
- [38] Zhou H, Peng X H, Zhang Z B, et al. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (12): 343—347. [周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微 CT 研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (12): 343—347.]
- [39] Laffely A, Erich M S, Mallory E B. Evaluation of the CO₂ flush as a soil health indicator[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 154: 103594.
- [40] Zeng Y, Lu Y Z, Du C W, et al. Applying infrared photoacoustic spectroscopy and support vector machine model to quantify soil organic matter content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (6): 1262—1269. [曾胤,

- 陆宇振, 杜昌文, 等. 应用红外光声光谱技术及支持向量机模型测定土壤有机质含量[J]. 土壤学报, 2014, 47(6): 1262—1269.]
- [41] Bouchez T, Bliex A L, Dequiedt S, et al. Molecular microbiology methods for environmental diagnosis[J]. Environmental Chemistry Letters, 2016, 14(4): 423—441.
- [42] Acosta-Martinez V, Cano A, Johnson J. Simultaneous determination of multiple soil enzyme activities for soil health-biogeochemical indices[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 126: 121—128.
- [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] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1945—1962.
- [45] 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. [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.]
- [46] Zhao R, Wu K N, Zhang X D, et al. Evaluation on farmland health productivity in main grain production areas: A case study in Wen County of Henan Province[J]. China Land Science, 2019, 33(2): 67—75. [赵瑞, 吴克宁, 张小丹, 等. 粮食主产区耕地健康产能评价——以河南省温县为例[J]. 中国土地科学, 2019, 33(2): 67—75.]
- [47] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. Acta Pedologica Sinica, DOI: 10.11766/trxb202006160306. [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, DOI: 10.11766/trxb202006160306.]
- [48] Stott D E, Karlen D L, Cambardella C A, et al. A soil quality and metabolic activity assessment after fifty-seven years of agricultural management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(3): 903—913.
- [49] Veum K S, Sudduth K A, Kremer R J, et al. Estimating a soil quality index with VNIR reflectance spectroscopy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(2): 637—649.
- [50] Cherubin M R, Karlen D L, Franco A L C, et al. A soil management assessment framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(1): 215—226.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Haney R L, Haney E B, Smith D R, et al. The soil health tool—Theory and initial broad-scale application[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 125: 162—168.
- [54] Jian J S, Du X, Stewart R D. A database for global soil health assessment[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 16.
- [55] 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.
- [56] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151—163.
- [57] Li P F, Hou D Y, Wang L W, et al. (Micro) plastics pollution in agricultural soils: Sources, transportation, ecological effects and preventive strategies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 314—330. [李鹏飞, 侯德义, 王刘炜, 等. 农田中的(微)塑料污染: 来源、迁移、环境生态效应及防治措施[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 314—330.]
- [58] Cao J L, Feng Y Z, Lin X G. Review of researches on influences of engineered nanomaterials on plantmicroorganisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 1—11. [曹际玲, 冯有智, 林先贵. 人工纳米材料对植物-微生物影响的研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 1—11.]
- [59] Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(10): 1021—1030. [骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(10): 1021—1030.]
- [60] Liu H F, Yang X M, Liu G B, et al. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. Chemosphere, 2017, 185: 907—917.
- [61] Yan X Y, Cai Z C, Wang S W, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. Global Change Biology, 2011, 17(3): 1487—1496.
- [62] Long J, Deng Q Q, Jiang X R, et al. Effects of landuse types on restoration of soil quality on Karst rocky desertification region in Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3188—3195. [龙健, 邓启琼, 江新荣, 等. 贵州喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤质量恢复能力的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3188—3195.]

(责任编辑: 卢萍)