

DOI: 10.11766/trxb202310020406

张江周, 王光州, 李奕赞, 张文菊, 张俊伶, 张福锁. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. 土壤学报, 2024, ZHANG Jiangzhou, WANG Guangzhou, LI Yizan, ZHANG Wenju, ZHANG Junling, ZHANG Fusuo. Re-thinking the Establishment of the Farmland Soil Health Assessment System[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,

农田土壤健康评价体系构建的若干思考*

张江周^{1,2}, 王光州², 李奕赞², 张文菊³, 张俊伶^{2†}, 张福锁^{2,1}

(1. 福建农林大学资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福州 350002; 2. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 健康土壤是保障粮食安全、耕地产能提升和农业高质量发展的基础。目前土壤健康评价已成为全球土壤学领域研究的焦点和热点, 国内外学者对于土壤健康评价方法及指标的选择进行了系统总结, 然而缺乏具体评价过程中的实操性建议。本文重点剖析了土壤健康的特点与多功能性、评价的通用原则、指标选择的 n+X 模式及评价方法的选择与落地实现, 提出了土壤健康差与基准值、基础指标和约束性指标的选择及指标选择的制宜性, 明确了土壤健康指标体系建立需要考虑土壤质地、作物类型、土地利用方式、气候条件等因素, 建议土壤健康技术和模式落地实现需要与相关政策结合。未来需要继续开展土壤健康驱动机制和健康土壤培育机理研究; 基于长期定位试验和耕地质量长期监测网点, 构建基于土壤质地、作物类型、土地利用、管理目标和评价尺度的指标体系和阈值、数据库和决策支持系统; 结合相关政策和区域环境的约束性, 形成跨区域、跨国家的共识、公约和行动, 推动全球土壤健康行动落地和农业可持续发展。

关键词: 土壤健康差; 基础性指标; 制约性指标; 制宜性; 政策

中图分类号: S154.4 文献标志码: A

Re-thinking the Establishment of the Farmland Soil Health Assessment System

ZHANG Jiangzhou^{1,2}, WANG Guangzhou², LI Yizan², ZHANG Wenju³, ZHANG Junling^{2†}, ZHANG Fusuo^{2,1}

(1. College of Resources and Environment/International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences/National Academy of Agriculture Green Development/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China)

Abstract: Healthy soil is the foundation for food security, farmland productivity, and high-quality agricultural development. Currently, soil health assessment has globally become the focus and hotspot of the soil science discipline. The selection of soil health assessment methods and indicators has been systematically summarized. However, there is still a lack of practical

* 国家重点研发计划项目(2022YFD1901300)和四川省科技计划项目(2021YFN0026)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFD1901301), the Science and Technology Planning project of Sichuan, China (No. 2021YFN0026)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: junlingz@cau.edu.cn

作者简介: 张江周(1987—), 男, 河北曲周人, 博士, 主要从事土壤健康研究。E-mail: jzhang@fafu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-02; 收到修改稿日期: 2024-01-30; 网络首发日期(www.cnki.net):

suggestions for specific evaluation processes. This paper focuses on analyzing the characteristics of soil health and multifunctionality, the general principles of soil health evaluation, the n+X model for selecting indicators, and the selection and implementation of evaluation methods. We propose the soil health gap and benchmark, the selection of basic and restrictive indicators, as well as the adaptability of indicator selection. In addition, the establishment of a soil health indicator system needs to take into account factors such as soil texture, crop type, land use, and climate conditions. The implementation of soil health technology and paradigm needs to be integrated with relevant policies. In the future, it is necessary to further research the driving mechanisms of soil health and the cultivation of healthy soils. Based on long-term experiments and monitoring networks for farmland quality, the soil health indicator system, threshold, database, and decision support system were established depending on soil texture, crop type, land use, management objectives, and evaluation scales. Combined with relevant policies and regional environmental constraints, a consensus, convention, and action across regions and countries should be formed to promote the implementation of global soil health action and sustainable agricultural development.

Key words: Soil health gap; Basic indicators; Restrictive indicators; Adaptability; Policy

土壤作为宝贵的有限资源，除了提供人们广泛关注的作物生产力外，还包括养分供应和循环、水分供应和净化、纤维和药材供应、建筑材料供应、气候调节、文化服务、人类健康与环境安全、生物多样性等生态系统服务^[1]，维持山水林田湖草沙生命共同体的协调统一。健康土壤是保障耕地产能、粮食安全、生态环境及人类健康的基础，为“碳中和、碳达峰”、“藏粮于地、藏粮于技”和农业高质量发展等国家战略的落地实现提供重要支撑^[2-3]。土壤健康是指在生态系统和土地利用的范围内，土壤能持续作为有生命的系统维持生物生产力，保持空气和水环境质量，促进植物、动物和人类健康的能力^[4]。联合国粮农组织政府间土壤技术小组（Intergovernmental Technical Panel on Soils, ITPS）认为土壤健康是指土壤维持陆地生态系统生产力、多样性和环境服务的能力^[5]。我国《耕地质量等级》（GB/T 33469—2016）中规定耕地健康是指土壤作为一个动态生命系统具有维持其功能的持续能力^[6]。因此，健康土壤具有较强的弹性和恢复力，在受到人类活动干扰、极端气候影响下仍能保持或快速恢复土壤功能^[7]。最新研究发现，与亚健康土壤相比，健康土壤平均提高粮食作物产量 10%，同时可以降低作物产量对气候变化的敏感性，作物产量的年际变异降低 16%^[8]。当前我国现有耕地中，中低产田约占耕地总面积的 70%。随着气候变化和极端天气的不断加剧，且在“双碳”和农业高质量发展及环境健康等相关政策的约束下，如何通过实施可持续土壤管理，实现健康土壤培育及耕地数量、质量和生态“三位一体”的多赢，是我国和全球土壤工作者面临的巨大挑战。

最近国内外陆续发布了土壤健康行动和相关的法律法规。例如，2021 年欧盟发布了《2030 年土壤战略》、澳大利亚发布了《国家土壤战略》与《联邦政府国家土壤战略临时行动计划》，明确规定了土壤健康实施计划^[9]。欧盟启动的 BENCHMARKS 土壤健康项目结合 24 个欧洲案例研究，与不同利益相关者合作，共同建立一个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。该框架以科学知识为基础，根据评价的目的、土地利用方式以及可行性选用适宜的指标，旨在量化特定环境下的土壤健康潜力和状态，并提供土壤管理优化建议。美国土壤健康路线图明确指出在 2025 年美国 50% 的农田要采用土壤健康管理措施^[10]。我国在 2016 年、2018 年和 2022 年分别发布了《土壤污染防治行动计划》（又称“土十条”）、《中华人民共和国土壤污染防治法》和《中华人民共和国黑土地保护法》，这些政策和法律法规为防治土壤污染和退化提供了政策支持和保障^[11-12]。但在土壤健康方面，我国相关研究和立法工作仍需进一步完善。其中，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,而指标的筛选是评价体系构建的一个基础和核心,显著影响评价结果和决策^[13]。近年来土壤健康评价相关工作不断开展,对相关问题的多方位探讨,有助于未来形成科学系统的土壤健康诊断和检测体系。

国内外学者针对评价指标和评价方法进行了系统的综述^[1, 14-19]。然而我国不同生态区自然条件差异性较大,作物种类、土地利用方式、土壤类型和质地多样,土壤和作物管理差别很大。因此,在构建土壤健康评价体系时需要因地制宜,因作物而异,依据区域作物-土壤-管理构建适宜当地生产条件的土壤健康评价体系。本文以土壤健康评价实际操作为出发点,依据笔者近年来在华北平原粮食作物和南方经济作物开展相关工作的经验,结合康奈尔土壤健康评价体系和欧盟 Landmark 土壤健康工作的进展,从土壤健康评价方法落地角度,重点厘清指标选择的原则与制宜性,以期为土壤健康评价的落地实施提供更多的参考。

1 土壤健康特点与多功能性

尽管目前在土壤健康的定义和研究范畴方面还在不断完善,但健康土壤的培育成为全球土壤学领域研究的焦点和热点^[20]。在 Web of Science 核心数据库和中国知网数据库中,以土壤健康 (Soil health)、土壤质量 (Soil quality) 为关键词进行检索,发现 2005 年之后土壤健康方面相关研究工作呈几何增加的趋势,主要研究点包括土壤健康评价、土壤养分/酶活性、环境/粮食安全、土壤功能与耕地健康等 (图 1)。可以看出,随着人们对土壤威胁和退化带来的粮食安全、环境问题等的持续关注,作为同一健康 (One Health) 的一个重要组成部分,健康土壤培育成为农业可持续发展的重要议题。

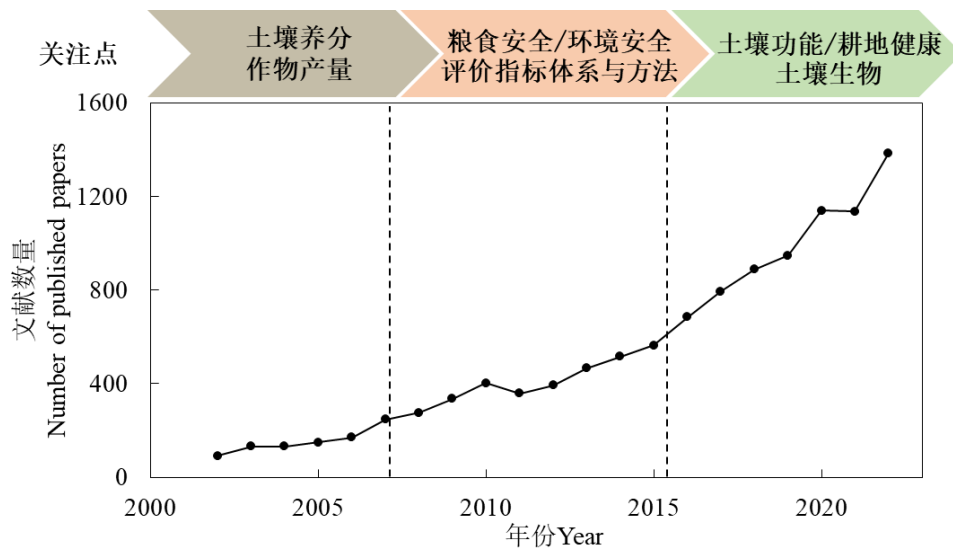


图 1 2002—2022 年土壤健康相关研究工作文献数量

Fig. 1 Number of published articles in the field of soil health from 2002 to 2022

土壤是多组分的非均一介质,土壤健康不仅与土壤化学、物理和生物学要素相关,同时与各要素之间互作的复杂性和异质性相关,在不同界面和不同研究尺度上各要素间的互作显著影响土壤过程和功能,具有生态属性。土壤健康状况还具有动态性,对管理过程的响应具有一定的滞后性和隐蔽性,因此有些土壤健康状况的变化难以监测和实时捕捉。此外,土壤是否可持续保持健康状态,

涉及到土壤的恢复力和弹力,即土壤应对胁迫和抗干扰的能力。最后,土壤是否健康具有相对性,例如,沙质土壤适合种植红薯,尽管不是高产农田,但属于优质薯类的种植土壤;黏质土壤适合水稻种植,但不适合种植猕猴桃等肉质根类作物^[21]。此外,土壤健康状况不仅与土地管理者和评价人密切相关,而且与土壤行使的功能是否能满足农学和环境等相关政策需求有很大的关系^[22],表明其具有实用性和社会属性(图2)。由于土壤具有这些特性,因此在土壤健康评价时需要从多个维度、多角度进行系统衡量,而筛选土壤健康基准值,并明确土壤的种植管理目标是一个重要的环节。

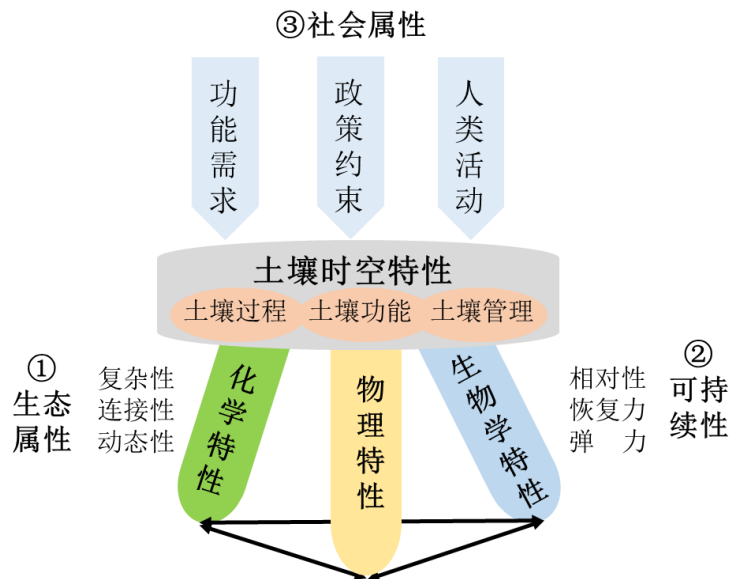


图2 土壤时空特性及其特点

Fig. 2 Soil temporal-spatial traits and characteristics

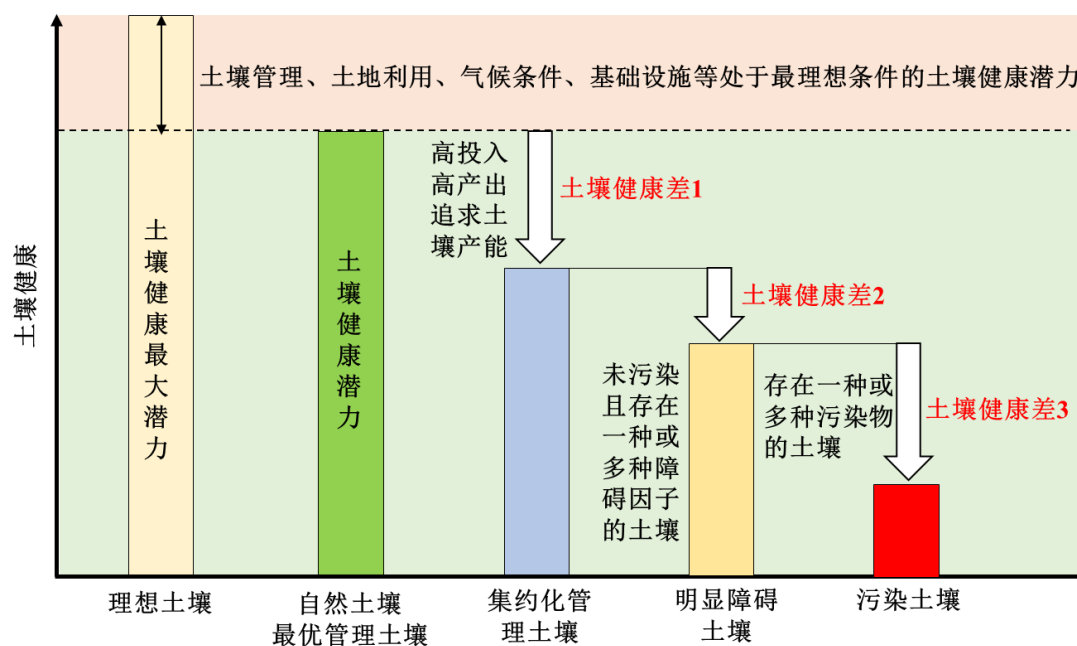
健康土壤能够提供多种功能,目前关注较多的包括初级生产力、水分调节与净化、气候调节与碳固持、土壤生物多样性的维持、养分的供给与循环等5个功能^[23]。目前人们对土壤的单一功能认识较多,但在当前农业绿色发展的需求下,土壤如何协同多功能,即土壤各功能间协同和权衡成为研究者和管理者关注的焦点,且在不同区域和环境下的影响不同。总体上,自然生态系统具有较强的水净化与调节、气候调节、碳固持和生物多样性维持的功能,而提供初级生产力和养分循环的功能较差。农田生态系统主要关注作物产量,而忽视土壤固碳、气候调节、生物多样性等功能。相对而言,草地生态系统功能间协调性较高^[24]。其中,集约化农田生态系统由于受到管理措施等的影响,扰动较多且较频繁,因此能否在农田生态系统实现生产和其他土壤功能的协同,成为人们重点关注的问题。最近的研究发现,欧洲38%的农田土壤可以提供初级生产力、养分循环和生物多样性三个功能,且这三个功能处于中到高水平,总体上有有机管理土壤可以维持较高的生物多样性、中等水平的初级生产力和养分循环功能^[24]。由此可见,农田土壤同时满足5个功能存在一定的挑战,需要根据区域和特定管理目标需求权衡各个功能之间的关系^[25],考虑各个功能的优先级别。在当前气候变化和粮食安全严峻的情况下,同时满足环境和产量目标可能存在巨大挑战。

值得注意的是,土壤多功能的实现需要权衡不同功能间的关系,可以是对单个功能的强化,也可以是对系统功能的整体强化。在有些情况下,对单个功能的强化,可能会增强或者减弱其他的功能^[23]。例如,在集约化农业生产中,种植者往往开展单作,且过量投入生产资料,尽管实现了增产,但削弱了土壤气候调节和生物多样性的功能,造成地下水过度开采利用(尤其是华北地区),也可能造成地下水硝酸盐超标等^[26-27]。与此同时,土壤多功能的实现不仅与土壤自身特性有关,也与土地管理者的决策、环境条件有关。例如,不同质地土壤固碳潜力存在差异,黏土固碳潜力高于砂质土

壤,但由于受地形地貌、气候、施肥管理等因素影响,要同时协同实现增产和固碳在一些区域和土壤类型上存在极大的挑战^[28]。此外,在实际工作中,除了需要结合土壤自身的特性,还需要结合资源禀赋和相关环境政策约束,通过功能权衡,发挥土壤多功能的整体潜力。例如,在化肥零增长行动和世界卫生组织安全用水(硝酸盐氮浓度不能超过 $11.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的双重约束下,通过最优氮素管理措施的实施可以使我国玉米生产体系氮素使用量减少 25%,产量增加 6.1%,硝酸盐含量较地下水安全水平低 31%,实现了生产力、水净化和养分循环功能的协调^[26]。

2 土壤健康的基准值与健康差

不同土壤实现各种功能的潜力不同。与产量差类似,土壤也存在健康差。在土壤健康最大潜力的范围内,土壤可实现的潜力有多大?土壤健康的最大潜力是指所有的条件(如土壤管理、土地利用、气候条件、基础设施等)处于最理想状态下的土壤健康潜力,这是土壤健康管理的最高目标(图 3)。农田土壤受干扰较大,因此在开展土壤健康工作时,通常选择自然的未受认为干扰的土壤或最优管理的土壤作为某一特定区域土壤健康的基准值,代表在当前情境下土壤健康可能实现的潜力^[29]。土壤健康差(Soil health gap, SHG)为土壤健康潜力与基础土壤健康的差值,后者可以是集约化管理的土壤、存在明显障碍的土壤或污染的土壤。通过采取这种相对的方法,找出土壤的障碍因子,采用土壤健康综合调控措施逐级消除或降低土壤健康差,从而实现土壤的可持续利用。



注:土壤健康差 1 表示自然土壤或最优管理土壤健康与集约化管理土壤健康的差值,土壤健康差 2 指集约化管理土壤健康与存在明显障碍土壤健康的差值,土壤健康差 3 指存在明显障碍土壤健康与污染土壤健康的差值。Note: Soil health gap 1 indicates soil health difference between natural soil / optimal management soil and intensive management soil. Soil health gap 2 represents the soil health difference between intensive management soil and constraining soil. Soil health gap 3 shows the soil health difference between constraining soil and contaminated soil.

图 3 土壤健康基准值与土壤健康差

Fig. 3 Soil health benchmark value and soil health gap

3 土壤健康评价的通用流程

土壤健康状况是土壤功能的反应。由于指标和土壤功能不是单一对应的关系，存在复杂的互作关联，导致土壤健康评价也存在复杂性。通常，评价可以分为三个关键步骤：选择土壤健康评价指标、量化指标和整合指标^[15]，其中土壤健康指标的选择是最关键的一步，指标的选择直接影响评价结果和健康土壤培育决策。评价指标选择一般要遵循以下 4 个原则（图 4）：（1）代表性：所选择的指标代表土壤系统中发生的关键过程；（2）敏感性：指标对于田间管理、气候变化和人类活动引起的土壤功能变化具有较强的敏感性，同时需要具有相对稳定性和可比性；（3）可解释性：指标能反应土壤过程、土壤功能和管理目标的时空变化，并为土壤管理提供重要决策参考；（4）可操作性：指标具有较强的适用性，测定成本较低^[1, 14-15]。

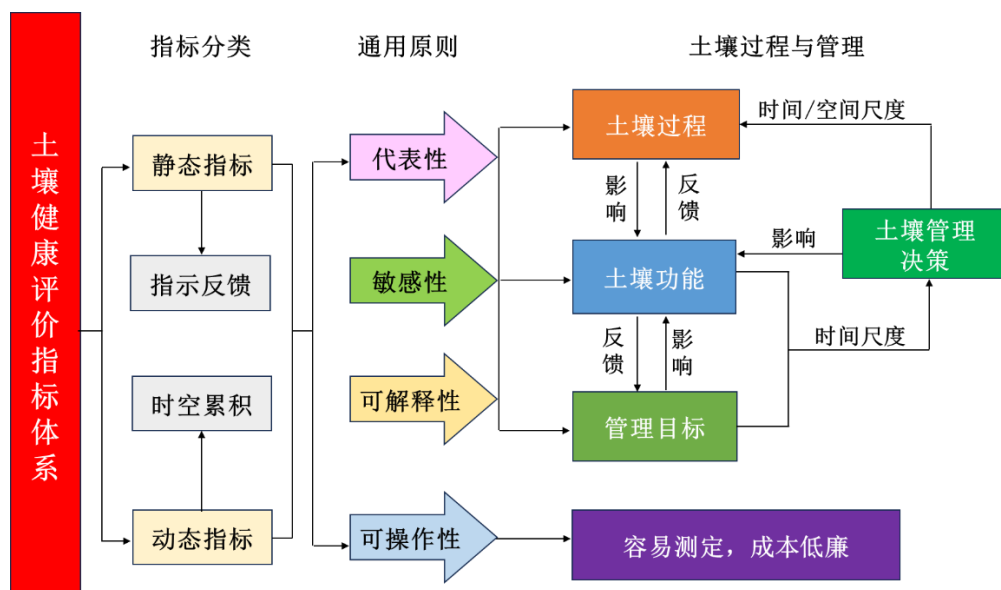


图 4 土壤健康指标的选择原则

Fig. 4 Principles for the selection of soil health indicators

确定了土壤健康评价指标后，多数研究通过线性/非线性评分函数或对数响应比（Log response ratio, lnRR）进行标准化，转化为 0~1 之间无量纲数字^[15, 30]。指标的标准化需要借助阈值（最大值、最小值和最适范围）和评分函数来实现，指标阈值通过专家建议、文献、正态分布函数或研究对象建立的数据库等方法获得^[31-32]。常用的评分函数一般分为三种：“越大越好”型、“越小越好”型和“中间最优”型^[15]。不同的指标利用相应的评分函数实现标准化，标准化后的每个指标按照相应的权重进行整合。计算权重常见有两种方法：一种是通过专家打分、主成分分析、偏最小二乘法等计算获得^[33-35]，另一种采用等权重^[36]。目前在进行土壤健康评价时，选择第一种方法计算权重的报道较多，但每个指标的权重相差并不大^[36-38]，且采用不等权重和等权重计算的土壤健康指数具有显著的相关性^[35]。在集约化农田管理中，过量化肥投入造成农田土壤养分含量处于盈余^[39-40]，而土壤物理和生物学指标往往处于不适宜或不高的水平。如在黄淮海北部农田调查发现，76%的耕地土壤出现明显犁底层，平均土壤容重为 $1.54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[41]。鉴于此，在进行农田土壤健康评价时，满足上述指标选取准则的基础上，可以选择等权重或者按照土壤物理、化学和生物学指标进行分类，土壤物理和生物学指标占有更大的权重，而化学指标占有相对较小的权重，这样在土壤养分充足的条件下，突出物理和生物学指标的重要性，使评价结果更加科学合理。

4 土壤健康评价指标选择的 n+X 模式

4.1 指标的普适性和专性

土壤指标包括定性和定量指标,也可以分为物理、化学和生物学指标,或者动态指标(敏感性)和静态指标(渐变性)。笔者更倾向于按照动/静态指标进行选择,因其可以与管理的时空响应相适配,也可以根据管理目标进行高频度或者低频度监测。由于静态指标大多数和成土过程有关,动态指标则对管理敏感。因此,一些敏感指标,如土壤呼吸、功能基因表达等能快速对土壤管理做出响应^[42-43],有利于及时调整管理措施,但也存在指标稳定性和解释性的问题。而静态指标如有机质等,则需要较长时间才发生改变。土壤健康评价常见的问题是指标筛选。笔者认为应建立“层级”指标体系,将动态指标和静态指标分开,前者具有一定的指示作用,与当下的农田管理措施密切相关,便于及时调整管理方案;后者是一个累积效应,反映长时间的管理措施是否有效。因此在进行土壤健康评价时要将动态指标和静态指标相结合,动态指标监测频率要适当提高,而静态指标监测间隔时间可以增长。两者结合不仅能及时反馈土壤具体变化过程,也能反映土壤的时空变化,有利于农田土壤可持续管理和健康土壤培育技术的实施。

具体在操作层面上,建议采用基础指标和约束性指标相结合的方法,在考虑主因素的基础上,确定最适宜的 n+X 模式土壤健康评价指标体系,其中 n 为基础指标, X 为约束性指标,包括自上而下的政策相关指标,或经营者自主选择的指标。联合国粮农组织政府间土壤技术小组可持续土壤管理建议采用 4+X 的模式,4 个基础指标和 10 个约束性指标,4 个必测指标包括土壤生产力(产量/干物质)、土壤有机碳、土壤容重和土壤呼吸速率,10 个选择测定指标包括土壤养分含量、侵蚀、盐分(电导率)、生物活性、生物多样性、pH、有效水分容量、入渗率、穿透阻力和污染物^[44]。约束性指标测定要根据土壤具体情况来定,比如土壤出现盐渍化时,电导率是重要的约束性指标。对于存在明确障碍因子的土壤,如土壤酸化、土壤盐渍化、水土流失等,需要选择反映障碍因子的指标作为基础指标,用于开展土壤健康评价。但对于出现污染的土壤,如果污染物没有超过环境阈值,则需要选择污染物作为必测的约束性指标;若污染物一旦超过环境阈值时,采用“一票否决”制,即为不健康的土壤,不需再进行土壤健康评价;对于没有环境阈值标准的土壤污染物或者新型污染物,一般以相应区域自然生态系统的土壤作为参考,选择污染物作为必测的约束指标用于土壤健康评价。因此,在选择评价指标时,建议采取三种方式:(1)对于没有明显障碍且管理目标无具体要求的农田土壤,可以选择多个指标,建立土壤健康数据库,从时间尺度上动态观察土壤健康变化;(2)对于土壤障碍不明显但有明确管理指标的土壤,需要选择针对性指标。例如,以减碳为管理目标的土壤,需要将土壤 CO₂ 排放通量或者土壤呼吸作为重要的检测指标;(3)对于存在明显胁迫或障碍的农田土壤,需要根据胁迫或障碍的种类选择特定的关键指标。此外,还需要根据评价尺度来确定合适的指标。对于不同的评价尺度,指标的选择也是多维度的。田块尺度选择的指标数量一般会偏多,对土壤健康提升的措施也会更加具体;在区域尺度要根据土壤质地、土地利用方式等因素确定土壤健康评价指标,指标的数量比田块尺度要少;对于国家或者全球尺度,更多是要统筹山水林田湖草沙生命共同体的系统优化和治理,实现国家和全球战略目标,因此选择的指标会较少,但更具有目标性^[19]。同时,在评价过程中可以将快速原位监测的指标(如土壤呼吸)纳入到评价指标体系,提高评价效率。以上指标为土壤健康评价提供了重要参考,但在实际操作中不能完全照搬,需要根据土壤质地、土地利用方式、气候条件等实际情况选择合适的评价指标体系。

4.2 土壤健康指标的制宜性

土壤健康指标受土壤质地、作物类型、气候条件、人为活动等诸多因素的影响,很难建立一套完全满足不同尺度、土壤类型、作物体系等的指标体系。因此土壤健康评价指标体系的建立具有因地因作物体系的制宜性(图 5)。

4.2.1 土壤质地 现行的土壤质地分类标准主要包括国际制、美国制、卡庆斯基制和中国制四种。国际制和美国制根据砂粒、粉粒和黏粒 3 种粒级的含量比例划分为 12 个质地名称；卡庆斯基制和中国制土壤质地分类包括砂土、壤土和黏土。然而目前，我国出台的国家标准或行业标准并没有采用统一的土壤质地分类系统，但近些年出台的耕地质量评价或高标准农田建设多采用卡庆斯基制或中国制^[45]。因此，本部分主要以砂土、壤土和黏土进行讨论。砂土质地疏松，通气性较好，保肥保水能力差，阳离子交换性相对较低，土壤有机质含量较低。而黏土特性与砂土相反，土壤黏结性强，通气性差，保水保肥能力强，土壤有机质含量高^[36]。在撒哈拉以南非洲的一项研究选择砂土、砂壤土、黏壤土和黏土 4 种质地土壤，对有机碳和阳离子交换性测定结果显示：砂土和砂壤土有机碳分别为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，黏壤土和黏土有机碳含量为 $22.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $19.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；四者阳离子交换量(CEC)分别为 $0.71 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.95 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.32 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.03 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[46]。果园土壤中表现为相同的趋势，壤土有机碳、全氮和有效钾含量高于砂土^[47]。由此可见，土壤健康指标与土壤质地间关系复杂，在进行土壤健康评价时可以将其作为分类筛选的一个标准，在同种质地上比较不同管理措施对土壤健康的影响。

4.2.2 作物类型与土地利用 对于不同作物类型和土地利用方式而言，由于种植制度、种植模式、田间管理等方面存在较大差别，这对土壤健康指标带来巨大的影响。作物类型和土地利用方式是驱动土壤肥力、养分循环和微生物多样性的重要因子^[48-49]。作物类型重点应考虑种植制度，如单作与套作、连作与轮作等。在华北平原，小麦/玉米-西瓜间作体系、蔬菜、葡萄和棉花种植体系年平均养分总投入量分别为 $1\ 450$ 、 $1\ 396$ 、 $1\ 381$ 和 $495 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[50-51]。棉花种植体系土壤有机碳、微生物量碳/氮/磷和酶活性要显著低于小麦/玉米轮作体系^[35]。同时，土地利用方式的转变也会影响土壤健康指标。例如，由粮食作物转变为经济作物后显著提高土壤养分含量，但增加了养分的淋洗风险^[52]。由此可见，不同的土地利用方式显著影响了土壤特性。在开展土壤健康评价时，需要根据不同种植体系和土地利用方式选择指标，尤其是粮食作物、经济作物、草地和林地经营管理模式存在较大的差别，需要建立适宜相应种植体系和土地利用方式的土壤健康评价指标体系。

不同作物的生长特性影响了土壤样品的采集深度。比如小麦、玉米等粮食作物和蔬菜根系主要分布在 20 cm 土层，但如果土壤条件比较好甚至可以生长到 1 m 以下^[53]。而果树根系，如苹果主要分布在 60 cm 以内的土层^[54]。因此，在进行粮食作物和蔬菜土壤健康评价时建议采集 0~20 cm 和 20~40 cm 两个土层，而经济作物建议至少采集 0~40 cm 深度或者采集 0~20 cm、20~40 cm，也可以到 40~60 cm 土层。对不同作物的土壤采集方法和测定方法参考《第三次全国土壤普查技术规程规范》^[55]。同时不同作物类型采样时间间隔也很重要，如果采样频率太高，工作量和成本较高；若采样频率太低又不能及时动态观察土壤健康的变化过程。鉴于此，对于受人为活动影响较大的耕地和园地，建议间隔 3~5 年采集一次土壤样品；对于受人为活动影响较小的林地和草地等，建议间隔 5~10 年采集一次土壤样品，进行土壤健康评价。

4.2.3 气候条件与区域分布 气候（包括温度、降雨等）是五大成土因素之一，其决定植被的分布，参与母质的风化，直接影响成土过程的物理、化学和生物学强度和方向，使得土壤性质在空间上存在较大区域差异。比如，我国耕地土壤 pH 整体呈现南酸北碱的趋势^[56]，东北地区土壤有机质含量高于华南地区，华南地区高于西北地区^[57]。农业农村部发布的《2019 年全国耕地质量等级情况公报》中，充分考虑了农业区划、生产条件等诸多因素，将我国耕地划分为东北、内蒙古及长城沿线、黄淮海、黄土高原、长江中下游、西南、华南、甘新、青藏等九个区，每个区域建立了不同耕地质量评价指标体系^[58]。在进行土壤健康评价时也要参考《耕地质量监测技术规程》(NY/T 1119—2019)和《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)国家标准，构建包含气候因素、立地条件、土壤管理、土壤物理/化学/生物学特性等指标体系，突出土壤外在和内在因素的双重性，为耕地质量提升提供更加科学的参考^[6, 59]。

4.3 生物指标选择

近几年随着土壤健康研究的深入,越来越多的生物学指标用于土壤健康评价中,发展新型生物指标也成为未来土壤健康的一个重要方向,但生物指标也存在一些活体生物的特有问题,包括采样时期、采样点的代表性等,而且由于土壤生物指标和功能之间定量关系还不明确,因此生物指标及其对土壤健康的指示作用还需要更多的研究,包括在研究技术和手段上的突破。常见的生物学指标包括微生物量、土壤酶、土壤呼吸、土壤蛋白含量、微生物群落结构或多样性、土壤动物如蚯蚓、线虫等^[36, 42, 60-62]。已有学者对土壤微生物和土壤动物作为土壤健康评价指标进行了详细阐述^[17-18],本文不再做过多的介绍。近年来,微生物介导的土壤功能如土壤蛋白含量、潜在碳矿化和丛枝菌根真菌分泌的球囊霉素等,由于其直接与功能相关,也可以作为重要的生物学指标开展土壤健康评价^[63-64]。土壤生物多样性也被建议应用于土壤健康诊断,但由于土壤生物种类较多,数量巨大,且存在功能冗余,生物网络的关联决定了土壤过程的复杂性,因此还未纳入生物多样性检测。通常集约化农田生物多样性远低于森林和草地。在森林和草地生态系统,地上生物多样性某种程度可以反映土壤生物多样性;而在农田生态系统,由于干扰因素较多,生物多样性会显著下降。在农田生态系统,多样化种植体系会增加生物多样性^[65],而在常规管理体系,笔者认为要重点关注土壤生物功能,例如有益微生物(丛枝菌根真菌和固氮等)的多样性和功能。

在荷兰和欧洲,研究者采用数字制图的方法,通过土壤五类生物(蚯蚓、线虫、微型节肢动物、线虫和微生物)与环境因子(土壤化学属性)的回归分析来预测土壤生物多样性,但也存在很多不确定性^[66]。eDNA也可以用来评估土壤生物多样性,但需要进行校准,建立统一的规范标准^[67]。在选择土壤生物指标时,需要综合考虑作物类型、土地利用方式和土壤类型等。例如,对于存在连作障碍的经济作物(如蔬菜和果树等),可以将病原菌、根结线虫或微生物群落结构指标作为检测指标。和自然生态系统相比,农田生态系统生物多样性下降,病原生物数量较多,可以将生物多样性、病原菌、线虫或蚯蚓等生物指标作为重要检测指标。在比较不同土壤类型如南方的红壤和北方的潮土时,由于成土过程、自然条件等存在较大差异,可以考虑将微生物量、土壤呼吸或生物多样性作为土壤健康评价的生物指标,但具体选择哪个指标更能反映土壤健康状况需要结合作物类型来确定。此外,在进行土壤健康评价时,对生物指标的检测尤其要考虑和自然生态系统的对比,从而形成基于生物多样性提升的解决方案。

4.4 土壤健康指标的关联性

土壤是一个复杂的系统,其物理、化学和生物学指标之间存在一定的关联性,三者之间彼此相互影响,驱动土壤生物地球化学的循环。常见的有土壤 pH 与有效磷、交换性钙镁及微量元素之间存在关联性。课题组在猕猴桃的研究上也发现,土壤空气孔隙与容重呈显著负相关关系,即土壤通气孔隙越大,土壤容重越小。同时,土壤物理指标(如土壤容重)也会影响土壤有机碳和全氮含量。在威尔士的研究结果显示,随着土壤容重的增加,有机碳和全氮呈现指数下降的趋势^[68]。有机碳是土壤健康评价中使用频率最高的指标之一^[14],其与生物指标存在关联性。例如,土壤颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)和矿物结合有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)是反映有机碳质量的重要指标,有机碳与 POC、MAOC 呈显著的正相关关系^[69],同时有机碳还与微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、磷脂脂肪酸(Phospholipid fatty acid, PLFA)含量等生物指标呈正相关关系^[69-70]。此外,土壤环境条件如 pH、养分含量、矿物组成、团聚体含量、水分条件等均会影响土壤微生物数量和群落结构;而土壤的生物活动反之又会影响土壤养分循环、碳固持等^[71]。比如丛枝菌根真菌可以通过菌丝分泌物稳定土壤团聚体,增加了土壤碳的固持^[72],同时也可以活化土壤中的难溶性的无机磷,提高磷的有效性^[73]。对于存在关联性的指标,在进行土壤健康评价时不需要测定每个指标,结合前人研究结果选择某一相对贡献较大的指标作为替代指标,这既可以节约测试成本也可以提高工作效率。在理想条件下,有机质含量高的土壤健康状况较好,测定指标可以减少,但有机质质量和数量的变化与土壤化学、生物指标的关联性还需要深入的研究。

5 土壤健康评价方法的选择与落地实现

土壤健康的评价方法有很多,主要有我国耕地质量评价方法、美国康奈尔土壤健康评价方法、新西兰 SINDI 方法、基于土壤功能的土壤健康评价方法、基于土壤管理的土壤健康评价方法等,这些方法的评价过程及优缺点已经进行了阐述^[19]。土壤健康评价的最终目的是为了能够更好地指导生产,目前美国康奈尔土壤健康评价方法构建“土壤健康评价-障碍解析-系统调控”的技术模式,显著提高了美国农田土壤健康水平^[36]。而其他土壤健康评价方法较侧重理论层面,还需加强与管理措施的连接性。

欧盟 LANDMARK 项目构建的 Soil Navigator 决策支持模型,也是一种基于土壤功能(初级生产力、水的净化与调节、气候调节与碳固持、土壤生物多样性的维持、养分的供给与循环等)的多标准决策系统^[74]。该系统输入的参数包含土壤管理、气象资料和土壤特性,充分考虑了土壤管理和气候条件对土壤功能的影响及各功能之间的协同与权衡,根据评估结果可以为用户提出针对性的土壤健康调控方案。最终根据评估结果和用户需求可以提出针对性的土壤健康调控方案。这种方法不仅能够评价土壤健康,也可以指导生产实践,具有较大的推广应用潜力。

土壤健康技术的落地实现与政策密切相关^[75],通过政策约束建立“供需”关系,采用相应的生产、技术、气候框架决策,有助于土壤健康技术的实施应用(图 5)。爱尔兰农业部门为了实现欧盟 2020 战略提出到 2020 年温室气体排放比 1990 年减少 20%的需求,通过提供碳固持措施来保障政策的落地实施^[23]。之后欧盟又提出到 2030 年欧盟温室气体排放量降低到 1990 年的 55%,将会继续推动减排和固碳相关技术的实施和应用。我国在“碳达峰、碳中和”目标的约束下,农业农村部、国家发展改革委联合印发的《农业农村减排固碳实施方案》中明确规定,采用保护性耕作、秸秆还田、有机肥施用、绿肥种植等技术措施以达到提升土壤有机质含量的目的^[76]。最近的研究已经证明免耕、秸秆还田、种植绿肥在固碳减排方面的具有较大潜力^[77]。在国家“十四五”节能减排综合工作方案的指导下,通过土壤氮肥管理技术(氮肥减量、肥料深施、含脲酶抑制剂的新型肥料)和多主体参与,可以在实现作物高产的同时降低氨排放^[78]。由此可见,土壤健康行动的落地实现和政策支持双管齐下的效果可能更显著。因此,在政策约束下的大区域和国家尺度的土壤健康评价指标体系构建显得非常重要。一些土壤功能如碳固持以及氨减排等存在跨区域性,因此需要充分结合区域和国家战略需求,制定符合现阶段最有效的土壤健康培育技术体系。例如,在当前“双碳”背景下,需要将有机碳作为重要监测指标,将碳提升的相关技术作为可实施的土壤健康培育技术。

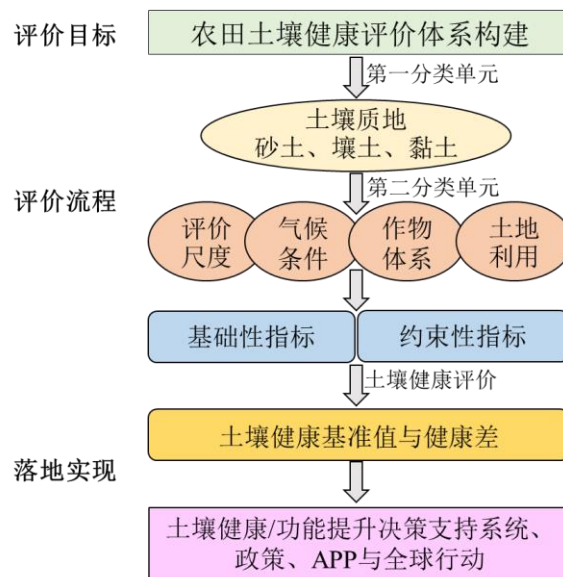


图 5 土壤健康评价体系构建与落地实现

Fig. 5 The establishment and implementation of soil health assessment system

6 展望

土壤健康指标体系的构建作为土壤健康评价的核心，涉及的因素较多，很难建立一套符合所有土壤质地、作物类型、不同尺度、不同管理目标和生态特征的指标体系，因此需要分门别类、有针对性地开展系统性研究，实现高产优质、生态好、环境优等多目标的协同。结合当前我国耕地现状，未来在土壤健康提升方面，还需在以下几方面加强研究工作：

1) 继续深入土壤科学的理论研究，构建一个囊括土壤管理-土壤性质-土壤过程-土壤功能-土壤健康的系统性知识框架，明确土壤功能的权衡和协同，提出基于土壤多功能的耕地土壤健康评价与提升理论框架模型。重点明确土壤生物网络驱动土壤功能与土壤健康的机理；深刻理解土壤管理、土壤过程等驱动土壤健康变化的机制与协同变化的理论。

2) 土壤健康评价指标基准值的构建需要依托长期定位试验和相对应的自然生态系统（或受人为干扰少的系统），建立指标体系的阈值。通过采用长期监测和重点监测相结合的方式，充分利用国家级和省级耕地质量长期监测网点，建立土壤健康评价动态和静态指标的大数据库，依据土壤健康状况的变化形成预警与干预，达到节省成本和提高效率的目标。

3) 建立基于土壤质地、土地利用/作物类型、管理方式和目标以及评价尺度的土壤健康评价层级指标体系。在不同尺度范围内管理目标也不尽相同，可以根据管理目标划分为更小的评价单元，随着评价尺度范围的增加逐层减少评价指标数量，使评价更具可操作性。同时，在评价过程中需结合当地的条件，对于容易出现土壤退化或障碍明显的地区，可以将障碍因子作为区域土壤健康评价的重要指标，并针对性地提出适宜当地的土壤健康培育策略。

4) 土壤健康的落地实现要结合当前耕地存在的主要问题，建立适宜当地的评价方法、数据库和决策支持系统。我国不同区域耕地的现状和障碍因子存在较大差异，土壤健康评价需建立包含土壤管理、气象资料、地形地貌、基础设施、土壤特性等大数据，实现评价方法和评价模型的本地化。研发适合多主体的土壤健康智能 APP，更好地指导农业生产。

5) 土壤健康行动需要跨区域乃至跨国联动形成全球共识。土壤管理、土地利用、政策等均会

影响土壤健康。在极端气候频发和全球可持续发展的大背景下,亟需进一步加强或完善碳固持、温室气体排放、生物多样性、土地退化等全球公约,分享土壤健康提升方案,并制定相关政策,实施联动机制,实现全球“大健康”和可持续发展目标。

参考文献 (References)

- [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: 544-553.
- [2] Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, et al. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783-796. [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.]
- [3] Zhang T L. Protecting soil health of cultivated land to promote high-quality development of agriculture in China[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 1-4. [张桃林. 守护耕地土壤健康 支撑农业高质量发展[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 1-4.]
- [4] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 3-11.
- [5] FAO-ITPS. Towards a definition of soil health[EB/OL]. 2020 [2023-09-26]. <https://www.fao.org/3/cb1110en/cb1110en.pdf>.
- [6] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Cultivated land quality grade: GB/T 33469-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. [国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 耕地质量等级: GB/T 33469-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.]
- [7] Zhang J L, van Der Heijden M G A, Zhang F S, et al. Soil biodiversity and crop diversification are vital components of healthy soils and agricultural sustainability[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 236-242.
- [8] Qiao L, Wang X, Smith P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 574-580.
- [9] Zhou P, Mao X H, Hou H L, et al. Comparing and benchmarking on Australian and EU soil strategies[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2023, 36(1): 60-66. [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.]
- [10] The Nature Conservancy. Rethink soil: A roadmap to U.S. soil health [EB/OL]. 2016 [2023-09-25]. <https://www.nature.org/ourinitiatives/regions/northamerica/rethink-soilexternal-paper-103116.pdf>.
- [11] Li X Z, Jiang R, Wang G Q, et al. A comparative study of soil environmental standards for agricultural land among different countries and its implication for China[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 577-585. [李勣之, 姜璐, 王国庆, 等. 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 577-585.]
- [12] Liu R, Fang Y W. Study on institutional construction of cultivated land development right[J]. *China Land Science*, 2023, 37(4): 23-31. [刘锐, 房昀玮. 耕地发展权制度构建研究[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(4): 23-31.]
- [13] Chang T, Feng G, Paul V, et al. Soil health assessment methods: Progress, applications and comparison[J]. *Advances in Agronomy*, 2022, 172: 129-210.
- [14] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality—A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.
- [15] 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.
- [16] 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. [李鑫, 张文菊, 郭磊, 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.]
- [17] 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.]
- [18] Sun X, Li Q, Yao H F, et al. Soil fauna and soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1073-1083. [孙新, 李琪, 姚海凤, 等. 土壤动物与土壤健康[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1073-1083.]
- [19] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603-616. [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.]
- [20] Shen R F, Teng Y. The frontier of soil science: Soil health[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 6-7.

- [21] Schaffer B, Andersen P C. Handbook of environmental physiology of fruit crops, Volume I, Temperate crops[M]. Florida, USA: CRC Press, 1994: 135-164.
- [22] Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils[J]. *Nature*, 2015, 528: 32-33.
- [23] Schulte R P O, Creamer R E, Donnellan T, et al. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 38: 45-58.
- [24] Vazquez C, de Goede R G M, Rutgers M, et al. Assessing multifunctionality of agricultural soils: Reducing the biodiversity trade-off[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(4): 1624-1639.
- [25] Zwetsloot M J, van Leeuwen J, Hemerik L, et al. Soil multifunctionality: Synergies and trade-offs across European climatic zones and land uses[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(4): 1640-1654.
- [26] Ying H, Xue Y, Yan K, et al. Safeguarding food supply and groundwater safety for maize production in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(16): 9939-9948.
- [27] Li X, Zhang Y, Ma N, et al. Increased grain crop production intensifies the water crisis in Northern China[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(9): e2023EF003608.
- [28] Yang Y, Zhang S, Xia F, et al. A comprehensive perspective for exploring the trade-offs and synergies between carbon sequestration and grain supply in China based on the production possibility frontier[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 354: 131725.
- [29] 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.
- [30] Nakagawa S, Noble D W A, Lagisz M, et al. A robust and readily implementable method for the meta-analysis of response ratios with and without missing standard deviations[J]. *Ecology Letters*, 2023, 26(2): 232-244.
- [31] Marion L F, Schneider R, Cherubin M R, et al. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105293.
- [32] Zhang J, Li Y, Jia J, et al. Applicability of soil health assessment for wheat-maize cropping systems in smallholders' farmlands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 353: 108558.
- [33] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90: 25-45.
- [34] Li P, Shi K, Wang Y, et al. Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 190: 31-40.
- [35] Li K, Wang C, Zhang H, et al. Evaluating the effects of agricultural inputs on the soil quality of smallholdings using improved indices[J]. *CATENA*, 2022, 209: 105838.
- [36] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugin B K, et al. Comprehensive assessment of soil health—The Cornell framework [M]. Edition 3.2. Geneva, NY, USA: Cornell University, 2016.
- [37] Qi Y, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149: 325-334.
- [38] Zhou Y, Ma H, Xie Y, et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106743.
- [39] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [40] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [41] Zhai Z, Li Y Y, Pang H C, et al. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang Huai Hai Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2322-2332. [翟振, 李玉义, 逢焕成, 等. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2322-2332.]
- [42] Sharma S K, Ramesh A, Sharma M P, et al. Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality // Lichtfouse E. Biodiversity, biofuels, agroforestry and conservation agriculture[M]. *Sustainable Agriculture Reviews*, vol 5. Dordrecht, Netherlands: Springer,

- 2010: 317-358.
- [43] Paz-Ferreiro J, Fu S. Biological indices for soil quality evaluation: Perspectives and limitations[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(1): 14-25.
- [44] FAO-ITPS. Protocol for the assessment of sustainable soil management[EB/OL]. 2020 [2023-09-26]. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/SSM/SSM_Protocol_EN_006.pdf 2020.
- [45] Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227-241. [吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1):227-241.]
- [46] Gentile R M, Vanlauwe B, Six J. Integrated soil fertility management: Aggregate carbon and nitrogen stabilization in differently textured tropical soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 67: 124-132.
- [47] Villa Y B, Khalsa S D S, Ryals R, et al. Organic matter amendments improve soil fertility in almond orchards of contrasting soil texture[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, 120(3): 343-361.
- [48] De Valença A W, Vanek S J, Meza K, et al. Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes[J]. *Ecological Applications*, 2017, 27(4): 1138-1154.
- [49] Rolando J L, Dubeux Jr J C B, Ramirez D A, et al. Land use effects on soil fertility and nutrient cycling in the Peruvian High-Andean Puna grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(2): 463-474.
- [50] Huang C D, Liu Q Q, Heerink N, et al. Economic performance and sustainability of a novel intercropping system on the North China Plain[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0135518.
- [51] Zhang J Z, Li T T, Jia J Y, et al. Bacterial taxa and fungal diversity are the key factors determining soil multifunctionality in different cropping systems[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(17): 5012-5022.
- [52] Gao J, Lu Y, Chen Z, et al. Land-use change from cropland to orchard leads to high nitrate accumulation in the soils of a small catchment[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(17): 2150-2161.
- [53] Huang C D. Comprehensive analysis and optimization of the wheat-maize/watermelon intercropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. [黄成东. 小麦/西瓜/玉米间作体系综合分析及其优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.]
- [54] Sun W T, Ma M, Dong T, et al. Response of distribution pattern and physiological characteristics of apple roots grown in the dry area of eastern Gansu to ground mulching[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3153-3163. [孙文泰, 马明, 董铁, 等. 陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3153-3163.]
- [55] The Leading Group for Third National Soil Census of the State Council. Technical specifications for the third national soil census[EB/OL]. 2023 [2023-07-20]. https://www.moa.gov.cn/ztlz/dscqgrtpc/zywj/202307/t20230720_6432535.htm. [国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室. 第三次全国土壤普查技术规范[EB/OL]. 2023 [2023-07-20]. https://www.moa.gov.cn/ztlz/dscqgrtpc/zywj/202307/t20230720_6432535.htm.]
- [56] Yang F, Jia W, Yang N, et al. Spatio-temporal variation of surface soil pH of farmland in different regions of China in the past 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1213-1227. [杨帆, 贾伟, 杨宁, 等. 近30年我国不同地区农田耕层土壤的pH变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1213-1227.]
- [57] Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047-1056. [杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047-1056.]
- [58] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China cultivated land quality grade bulletin (2019) [EB/OL]. 2020 [2020-05-06]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm. [中华人民共和国农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[EB/OL]. 2020 [2020-05-06]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm.]
- [59] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Rules for cultivated land quality monitoring: NY/T 1119-2019[S]. China Standards Press, 2019. [中华人民共和国农业农村部. 耕地质量监测技术规程: NY/T 1119-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.]
- [60] 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.
- [61] Onet A, Dincă L C, Grenni P, et al. Biological indicators for evaluating soil quality improvement in a soil degraded by erosion processes[J].

- Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 2393-2404.
- [62] Gao D, Wang F, Li J, et al. Soil nematode communities as indicators of soil health in different land use types in tropical area[J]. Nematology, 2020, 22(6): 595-610.
- [63] Mahdi J E, Abbott L K, Pauli N, et al. Biological indicators for soil health: Potential for development and use of on-farm tests//Varma A, Sharma A. Modern tools and techniques to understand microbes[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 123-134.
- [64] Liptzin D, Norris C E, Cappellazzi S B, et al. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 172: 108708.
- [65] Chateil C, Goldringer I, Tarallo L, et al. Crop genetic diversity benefits farmland biodiversity in cultivated fields[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 171: 25-32.
- [66] Rutgers M, van Leeuwen J P, Vrebos D, et al. Mapping soil biodiversity in Europe and the Netherlands[J]. Soil Systems, 2019, 3(2): 39.
- [67] Fedajevaite J, Priestley V, Arnold R, et al. Meta-analysis shows that environmental DNA outperforms traditional surveys, but warrants better reporting standards[J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(9): 4803-4815.
- [68] 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, 2021, 72: 2414-2429.
- [69] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 532: 635-644.
- [70] Zhang J, Li B, Gao W, et al. Bacteria not fungi drive soil chemical quality index in banana plantations with increasing years of organic fertilizer application[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(2): 560-568.
- [71] Philippot L, Chenu C, Kappler A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>.
- [72] Wu S, Fu W, Rillig M C, et al. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi - An updated conceptual framework[J]. New Phytologist, 2023, <https://doi.org/10.1111/nph.19178>.
- [73] Bünemann E K, Oberson A, Liebisch F, et al. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 51: 84-95.
- [74] 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.
- [75] O'Sullivan L, Creamer R E, Fealy R, et al. Functional Land Management for managing soil functions: A case-study of the trade-off between primary productivity and carbon storage in response to the intervention of drainage systems in Ireland[J]. Land Use Policy, 2015, 47: 42-54.
- [76] Huo L L, Yao Z L, Zhao L X, et al. Current status and construction of a standard system for greenhouse gas emission mitigation and carbon sequestration in agricultural and rural areas of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(2): 242-252. [霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 我国农业农村减排固碳标准现状与体系构建[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 242-252.]
- [77] Zheng H, Guo L, He B, et al. The great climate mitigation potential of cropland ecosystem management in China[J]. Earth's Future, 2023, 11(9): e2023EF003586.
- [78] Kang J, Wang J, Heal M R, et al. Ammonia mitigation campaign with smallholder farmers improves air quality while ensuring high cereal production[J]. Nature Food, 2023, 4: 751-761.

(责任编辑: 卢 萍)