

DOI: 10.11766/trxb202102150097

张江周, 李奕赞, 李颖, 张俊伶, 张福锁. 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 Jiangzhou, LI Yizan, LI Ying, ZHANG Junling, ZHANG Fusuo. Advances in the Indicator System and Evaluation Approaches of Soil Health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 603–616.

土壤健康指标体系与评价方法研究进展*

张江周¹, 李奕赞¹, 李颖², 张俊伶^{1†}, 张福锁¹

(1. 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; 2. 大自然保护协会北京代表处, 北京 100600)

摘要: 健康土壤能够保障健康食物生产, 维持土壤生态系统多功能性, 是农业绿色发展的基础。明确土壤健康现状, 系统开展土壤健康诊断是培育健康土壤和提高土壤生产力的基础。然而, 以往人们基于单一土壤功能即土壤生产力开展了大量的指标选择和评价工作, 忽视了其他土壤功能, 评价指标中土壤生物学特性未引起足够重视, 对土壤过程的动态监测少。随着对可持续发展的关注以及农业绿色发展的需求, 土壤健康指标体系和评价方法正在不断完善。针对不同空间尺度和不同作物体系, 建立多目标协同的土壤健康评价体系成为土壤可持续利用的热点和前沿。本文总结了土壤健康指标体系的选择原则, 分析了生物学指标在土壤健康评价中的重要性, 重点阐述了我国、美国、新西兰等国家土壤健康评价方法以及基于土壤功能和土壤管理等评价方法的进展、优缺点和应用区域, 提出了完善土壤健康评价系统的途径。未来需要构建基于区域自然禀赋环境特征的土壤-作物管理大数据平台, 发展生物学指标, 建立长期和全程动态监测体系, 并与快速无损测试技术、智能化信息技术相结合, 形成多目标协同、适用于不同区域和作物体系的土壤健康评价方法, 通过多主体参与, 为农业绿色发展提供重要支撑。

关键词: 土壤健康评价; 生物学指标; 多目标协调; 大数据平台

中图分类号: S154.4 文献标志码: A

Advances in the Indicator System and Evaluation Approaches of Soil Health

ZHANG Jiangzhou¹, LI Yizan¹, LI Ying², ZHANG Junling^{1†}, ZHANG Fusuo¹

(1. 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; 2. The Nature Conservancy Beijing Representative Office, Beijing 100600, China)

Abstract: Healthy soil is the key to healthy food production and maintenance of the multifunctionality of the soil ecosystem. It is also the cornerstone of agriculture green development. Identifying the status of soil health and systematically carrying out soil health diagnosis are the basis of cultivating healthy soil and improving soil productivity. However, in the past, a large number of indicators and evaluations have been developed based on an

* 国家自然科学基金项目(32002133)和中国工程院重点咨询项目(2019-XZ-25, 2019-XZ-69)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32002133) and the Key Consulting Project of the Chinese Academy of Engineering (Nos. 2019-XZ-25, 2019-XZ-69)

† 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: jzzhang@cau.edu.cn

收稿日期: 2021-02-15; 收到修改稿日期: 2021-05-14; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-06-07

individual soil function (e.g., soil productivity), while other soil functions were largely ignored. Soil biological indicators are still underrepresented in soil health assessment, and the dynamic monitoring of soil processes is not sufficiently conducted. In pursuit of sustainable development goals and with the requirement of agriculture green development, the indicator system and evaluation approaches of soil health have been greatly improved. Thus, the establishment of multi-objective coordinated soil health assessment has become the hotspot and the frontier. This paper summarizes the selection principle in the indicator system of soil health. The importance of soil biological indicators in soil health evaluation is analyzed. The advances, advantages, disadvantages and application areas of the Chinese soil health assessment method, Cornell Comprehensive Assessment of Soil Health, New Zealand SINDI, the framework of Soil Navigator, Soil Management Assessment Framework are expounded. Finally, the pathways to improve the soil health evaluation system are put forward. It is necessary to build a big data platform for integrated soil-crop management based on the regional ecological conditions. A multi-objective coordinated soil health assessment for different regions and crop systems should be established through the participation of multi-actors with the development of soil biological indicators. A long-term and whole-process dynamic monitoring system should be established in combination with rapid testing and intelligent information technologies. This will provide important support for agriculture green development.

Key words: Soil health evaluation; Biological indicators; Synergies of multi-objective; Big data platform

土壤是人类赖以生存和农业绿色发展的基础, 人类 95% 以上的食物来自土壤。联合国制定的 17 项可持续发展目标中 13 项目标直接或间接与土壤有关^[1], 土壤健康成为全球可持续发展的重要内容。据联合国粮农组织 (FAO) 统计显示, 全球三分之一的耕地发生了退化, 对作物减产影响高达 50%; 全球 20 亿人患有微量元素缺乏症, 这与土壤中缺乏微量元素密切相关。我国作为农业大国, 在保障粮食持续增长的同时, 对耕地不合理的使用造成了土壤酸化、盐渍化、耕层变浅、土壤污染、生物多样性下降、土传病害频发等问题, 严重影响了健康食物的生产, 给人类健康带来巨大威胁^[2-5]。因此, 培育健康土壤对农业绿色发展具有重要意义。

明确土壤健康现状, 开展系统诊断并形成预警体系是健康土壤培育的基础, 也是土壤可持续管理的重要内容^[6]。以往人们基于单一土壤功能开展了大量的指标和评价工作, 但忽视了其他土壤功能; 评价指标大多聚焦于化学和物理要素, 生物学特性被忽视; 评价多基于静态监测, 对过程监测较少。然而, 土壤是一个复杂有活力的生态系统, 其物理、化学和生物学属性在时空上发生互作, 这种多组分的动态过程直接影响土壤功能的发挥。同时, 土壤受外界气候条件和人类活动显著影响。随着人们对可持续发展目标的关注, 以及农业绿色发展的需求, 土壤健康指标体系和评价方法正在不断完善, 建立多目标协同的指标体系

和评价方法成为土壤健康的热点和前沿。本文系统总结了土壤健康评价指标与方法的进展, 在农业绿色发展新时期, 需要发展基于多目标协同、多过程监测、多主体参与的土壤健康系统评价体系。

1 土壤健康的内涵

随着人们对土壤的认识越来越深刻, 土壤肥力、耕地地力、耕地质量、土壤质量、耕地健康、土壤健康、土壤安全等术语不断出现。FAO 对土壤肥力的定义为: 在没有可能抑制植物生长的有毒物质存在的前提下, 土壤能持续为植物生长供应水分和养分的能力。土壤肥力更侧重于对土壤化学和部分物理特性的描述^[7]。土壤质量的研究始于 20 世纪 70 年代, 它是指土壤作为重要的生命系统行使各种功能的能力, 以及在生态系统水平和土地利用的边界范围内, 维持生产植物性和动物性产品的能力, 维持或改善水和大气质量的能力, 促进植物和动物健康的能力^[8]。“土壤健康”一词最早是由植物保护学界针对影响植物健康的土壤状况而提出的。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^[9]。从定义可以看出, 两者基本同义。土壤健康强调了土壤的生命力、生态属性、社会属性等, 以及其对

生态环境安全、食物健康、人体健康的能力，是全球 One health 的一个重要内容。

《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)^[10]和《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NYT 1634—2008)^[11]对耕地、耕地地力、耕地质量和耕地健康等术语具有明确的定义^[10-11]。耕地是指用于种植粮食作物、蔬菜和其他经济作物的土地；耕地地力是指在当前管理水平下，由土壤立地条件、自然属性等相关要素构成的耕地生产能力；耕地质量是指耕地满足作物生长和清洁生产的程度，包括耕地地力和耕地环境质量（土壤重金属污染、农药残留与灌溉水质量等）；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，用清洁程度、生物多样性表示。由此可见，耕地地力侧重于强调土壤的生产力，即作物的产量或生物量。耕地质量和耕地健康更关注耕地土壤的清洁程度，但范围相对比较窄。而土壤健康侧重于土壤发挥土壤功能和提供生态系统服务功能的能力，涉及范围更广。在整个生态系统中，耕地健康是土壤健康的子集，而耕地健康的核心内容是土壤健康。土壤安全是在 2012 年提出的，它涉及的范围更加广泛，包括土壤健康，其经常在政策范围内使用，涵盖了土壤管理的人类文化、资本和法律方面^[12]。

由此可见，与土壤健康相关的几个概念既有区别也有联系，土壤肥力/耕地地力是土壤健康的核心，耕地质量/耕地健康是土壤健康的重要组成部分，土壤质量与土壤健康两者侧重点有所不同但目标类似，土壤安全是土壤健康的外延。从研究尺度看，土壤肥力/耕地地力侧重于田块尺度，耕地质量/土壤质量/土壤健康侧重于区域（县、省、国家）尺度，而土壤安全侧重于全球尺度^[12]。目前，公众、研究者、决策者、使用者等广泛接受土壤健康的概念，土壤健康一词将会越来越多的应用到研究、宣传和政策文件中。

2 土壤健康评价指标的选择

与人体健康类似，土壤健康状况备受人们的关注，然而与人体健康相比，对土壤健康的诊断在近年才逐渐得到人们的认可，目前仍处在发展阶段。土壤的基本属性涉及物理、化学和生物学三个方面，因此土壤健康指标的研究也侧重各个属性指标的筛选。通常土壤评价指标的筛选应遵循以下原则：所选取的指标能代表复杂的土壤系统中发生的物理、

化学和生物学过程；指标对土壤管理、土地利用方式、气候变化等引起的土壤功能变化具有较强的敏感性；所选指标应比较容易测定，易于操作，方便使用；测定指标能反映土壤功能与管理目标之间的关系，可以在相关的时间尺度进行决策，为土壤管理提供重要信息；指标具有可解释性，能将管理和功能结合^[13-14]；测定成本尽量低，可以被用户接受。目前能同时满足以上 4 个标准的指标仅占 20%^[12]。

在 1970 年以前，对于土壤健康状况的评价选用的土壤属性指标较少，一般基于土壤颜色、结构或大型动物的数量（如蚯蚓）等来判别土壤的健康程度。1970 年以后，随着测试手段的不断更新，对土壤质量（健康）的评价可以采用的指标越来越多，专家尝试采用最小数据集法（Minimum Data Set, MDS）评价土壤状况。2010 年之后随着生物信息技术的快速发展，人们认识到土壤生物多样性的重要性，土壤生物被当作重要的评价指标，用于监测土壤健康状况^[7, 15]。

2.1 土壤健康评价的物理和化学指标

当前国内外在进行土壤健康评价时常选择土壤物理和化学指标，尤以化学指标应用最为广泛，而生物学指标较少^[7, 16-17]。在我国使用频率超过 50% 的土壤属性指标主要包括有机质、速效钾、有效磷、pH、全氮、质地和土层厚度^[16]。例如，在柑橘园采用 MDS 进行土壤健康评价时，选择的土壤属性指标包括有机质、粉粒、有效硼和速效钾^[18]。在新疆克里雅河流进行不同土地利用方式的评价时，选择的评价指标为总含盐量、全氮、pH 和土壤含水量^[19]。国际上对土壤健康进行评价时，土壤有机质、pH 和有效磷使用频率超过 60%；土壤蓄水能力、容重和土壤质地使用频率超过 30%；而对土壤呼吸、微生物生物量、氮矿化能力、蚯蚓等生物学指标使用频率在 30% 以下^[7]。Armenise 等^[20]针对地中海地区不同管理方式对土壤健康影响的研究中，选择了 18 个物理和化学指标，主要包括黏粒、砂粒、含水量、土壤有效水、S 指数（反映土壤物理特性的综合指数）、土粒密度、有机质、全氮、水可提取氮、水可提取有机碳、pH、电导率、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁等。Askari 和 Holden^[21]采用 MDS 对土壤健康进行评价时，筛选的土壤属性指标包括有机碳、C/N 和土壤容重；Raiesi^[22]评价了土地利用方式转变对土壤健康的影响，选择的指标为土壤有

机碳、电导率和芳基硫酸酯酶活性。近期联合国粮农组织召集全球科学家讨论,提出在评价土壤可持续管理(Sustainable Soil Management, SMM)时选用的基本指标为土壤生产力(产量/干物重)、土壤有机碳含量、土壤容重和土壤呼吸速率^[23],各个国家可以根据区域特点增加其他的指标。

2.2 土壤健康评价的生物学指标

在评价土壤健康时,生物学指标使用频率相对较低,其未被广泛采用的可能原因:一方面土壤生物与土壤功能、土壤管理直接关联的研究还比较缺乏;另一方面,土壤微生物呈现时空动态变化,难以形成稳定的关系图^[12]。近年来,国内外学者对生物学指标的选择开展了大量的研究工作,其中一些指标,包括土壤微生物、微食物网、蚯蚓数量、微生物生物量碳氮、土壤呼吸、活性碳、 β -葡萄糖苷酶活性和土壤蛋白含量,可用作评价土壤健康状况^[24-26]。土壤微生物生物量碳、可浸提有机碳、基础呼吸、诱导呼吸等指标可以反映土壤的生物活性,但在评价时采用衍生熵值指标,如微生物熵更能反映土壤过程或土壤健康的变化^[27]。同时,根据评估对象选择不同的生物学指标,农田土壤健康评价时可采用蚯蚓丰度和有机碳氮组分等;对非农用地开展评价时,应增加土壤病原菌、寄生虫、生物多样性、有毒化合物等与人体健康密切相关的指标^[12]。

土壤微生物在维持土壤功能方面起着重要作用。随着生物技术的快速发展,需要充分挖掘土壤微生物多样性和群落结构等指标在评价土壤健康方面的潜力^[28-30]。尽管土壤微生物的潜力很大,但微生物群落结构被广泛采用需要满足以下标准:(1)微生物测定费用低、检测速度快、测定质量高;(2)微生物群落在时间上的变幅不能过大;(3)微生物群落结构的变化能较好反映土壤环境的变化^[6]。除了微生物群落结构外,一些特定的微生物种类及其代谢产物,如丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)和球囊霉素、菌根共生体特定关键基因及土壤病原菌的定量均可作为衡量土壤健康的生物学指标^[29, 31]。土壤动物在土壤食物网中扮演重要的角色。Bongiorno^[32]认为土壤线虫指数是区分土壤管理措施的重要指标。线虫作为土壤健康的指示生物在农田、森林、草原及其他生态系统中被广泛应用^[33-34]。当前宏基因组、宏转录组、宏蛋白组、宏代谢组等多组学手段正在快速发展,其在土壤健康评价上存在极大的潜力。

2.3 不同尺度土壤健康指标的选择

基于不同尺度解决不同问题的土地评价一般性原则^[35],对于不同空间尺度的土壤健康评价,其评价目标与对象均有差异,大空间尺度的土壤健康评价多服务于空间范围内整体的资源利用与保护,而田块尺度则更加侧重土壤的生产功能^[36]。当前应用较为广泛的土壤健康评价体系以田块尺度更为常见。多数区域尺度的土壤健康评价指标选取与田块尺度较为相似,基于评价区域内大量分布的土壤数据调查点将评价结果以区域大空间尺度呈现,如中国、加拿大、法国、新西兰等国开展的国家尺度土壤质量监测工作,虽然因其涉及多种土壤类型与土地利用方式,会导致评价区域内数据范围与评价阈值标准不同,但监测指标较为类同^[36-39]。整体而言,基于区域尺度土壤健康的评价指标与田块尺度类似,主要以土壤有机质(碳)、容重、质地、土层厚度、全氮等指标为主^[36]。在对我国湖北和浙江水稻田土壤健康评价时,研究人员选用了全氮、有效磷、有效硅、微生物生物量碳和AMF^[40];对南方红壤区则选用了耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH和有效磷等指标^[41];欧洲土壤健康评价采用了有机碳、容重、田间持水量、入渗率、地下水和灌溉水的深度与含盐量^[42]。近年来一些生物学指标如土壤呼吸、微生物量、线虫、蚯蚓、微生物功能基因等^[43-45]被应用于区域土壤健康评价。未来需要基于田块尺度的研究,采用代表性指标并结合大数据平台和数学模型,在多个尺度上为土壤健康评价和健康土壤培育提供参考(图1)。

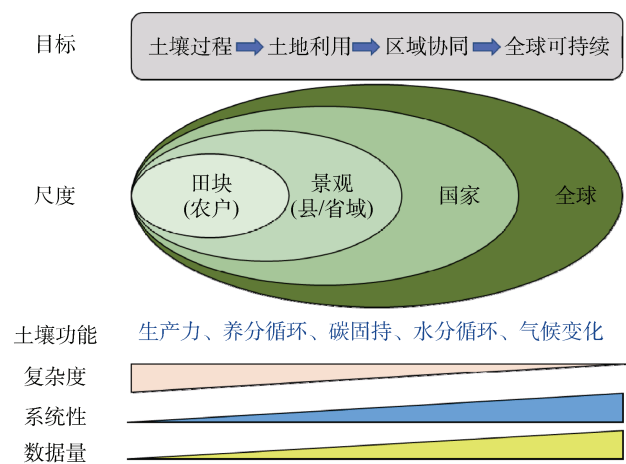


图1 不同尺度土壤健康指标和管理目标

Fig. 1 Soil health indicators and management objectives at different scales

3 土壤健康评价过程

通常土壤健康评价过程分为三个步骤：选择用于评价土壤健康的属性指标；量化所选择的土壤属性指标；将所选的土壤属性指标进行整合，得到土壤健康综合结果^[14]。对于土壤属性指标的筛选，主成分分析法（Principal Component Analysis, PCA）是最常见的一种方法，用于选择不同作物体系或土壤条件下土壤属性^[46]，然而 PCA 法选择的土壤属性有可能排除一些与土壤功能相关的指标^[7]，因此在使用 PCA 选择土壤属性指标时，需结合土壤功能和评价目标进行筛选，确保结果能准确反映土壤健康状况。除 PCA 外，一些评价方法如康奈尔评价^[47]和新西兰“SINDI”^[48]等采用与土壤功能和性状相联系的指标评价土壤健康状况。

对于所选择土壤属性指标的定量，可以通过相应的评分函数转换成一个无单位的数值。这些评分函数需要定义阈值（最大值、最小值、最优值），从而将不同的土壤属性指标转化成相应的分值。对于特定土壤属性阈值可以通过专家评分、文献获取、正态分布模型、测定值等方法获得^[14, 49-50]。评分函数主要包括三种类型：递增型（More is better）、递减型（Less is better）和中间最优型（Optimum）。不同土壤属性指标符合不同的评分函数，根据评分函数特征得到不同土壤属性指标的得分（数值），用于计算土壤健康指数（Soil Health Index, SHI）。

利用加权综合法计算土壤健康指数时，需要计算每个土壤属性指标的得分（数值）与相对应的权重乘积之和^[46]。对于权重的确定，常见的方法主要有主成分分析法^[51]、层次分析法^[52]、偏相关分析法和专家打分法等。但有些评价方法不考虑加权部分，认为每个土壤属性指标应分配相等的权重。等权重和加权权重各有利弊，在具体评价时还需进行综合考量。

4 常见的土壤健康评价方法与应用

土壤健康评价对于明确现阶段土壤健康状况，指导土壤管理具有重要的意义。国内外在土壤健康评价方面开展了大量的研究工作，评价方法也在不断发展和变化（图 2）。本部分主要阐述常见的几种

土壤健康评价方法，主要包括我国、美国和新西兰的土壤健康评价方法以及基于土壤功能和土壤管理的土壤健康评价方法等。

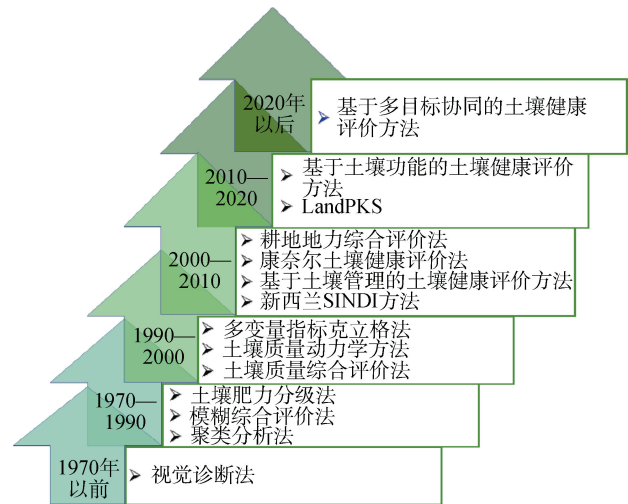


图 2 土壤健康评价主要工具与方法

Fig. 2 Development of tools and approaches for soil health assessment

4.1 我国耕地质量（土壤健康）评价方法

我国主要区域耕地质量的评估采用耕地地力综合指数^[53-57]。在评价耕地质量时，建立了包括气候条件、立地条件、剖面性状、土壤理化性状、土壤养分、障碍因素和土壤管理等 7 个类别的 63 个评价指标（表 1）。在不同区域，针对主要作物对耕地质量的要求，采用系统聚类方法、DELPHI 等方法，并组织相关区域专家召开专题研讨会，通过定量与定性相结合的方法，确定该区域耕地质量评价指标。对于确定的评价指标，采用 DELPHI 法与层次分析法（Analytical Hierarchical Process, AHP）相结合确定各个评价指标的权重。在具体评价时，首先采用 DELPHI 法由专家对评价指标进行赋值，然后再利用 AHP 计算各指标的权重。在指标权重确定后，明确定性指标的隶属度和定量指标的隶属函数是评价过程最关键的环节。对于定性指标，通过 DELPHI 法直接确定隶属度；对于定量指标，需要在正直线型、负直线型、戒上型、戒下型、峰型五种函数类型中确定对应的函数类型，依据测定值和专家打分进行函数拟合，得到隶属函数。如土壤 pH 隶属函数为峰型，有机质和耕层含盐量分别为戒上型和戒下型。确定了各评价指标的隶属度或隶属函数后，

计算各评价单元分值，得出耕地质量综合指数。最后不同区域把耕地质量综合指数划分为 6~10 个等级，一般情况下耕地质量越高则作物产量越高。

我国耕地质量（土壤健康）评价充分综合了自然条件、土壤条件、土壤管理等多因素，涵盖了多

种评价指标，比较全面地反映了土壤健康状况。该方法常用于评价区域（省或国家）土壤健康状况，对指导区域作物生产具有重要意义。但该评价指标没有考虑土壤生物学指标，重点关注耕地质量等级与作物产量关系。

表 1 我国耕地质量指标体系^[53-57]

Table 1 The indicator system for the assessment of cultivated land quality in China^[53-57]

类别	指标
Category	Indicators
气候条件	≥0℃积温、≥10℃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	
立地条件	经度、纬度、高程（海拔）、地貌类型、地形部位、坡度、坡向、成土母质、土壤侵蚀类型、
Site characteristic	土壤侵蚀程度、林地覆盖率、地面破碎情况、地表岩石露头情况、地表砾石度、田面坡度
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、
Profile property	水型
土壤理化性状	质地、容重、土壤 pH、CEC
Soil property	
土壤养分	有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾、交换性钙、交换性镁、有效锌、水溶态硼、有效铜、
Soil nutrient	有效硅、有效锰、有效铁
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、
Constraining factor	盐化类型、地下水矿化度
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	

4.2 康奈尔土壤健康评价方法

康奈尔土壤健康评价方法（Comprehensive Assessment of Soil Health, CASH）由美国康奈尔大学土壤健康团队于 2006 年建立，该方法在优化农田管理、提升土壤健康方面发挥着重要的作用^[47]。随着研究的不断深入，康奈尔土壤健康评价方法的指标体系也在发生改变。2017 年出版的《康奈尔土壤健康综合评价框架（第三版）》调整了评价指标，调整前备选的指标共 39 个，其中物理指标、化学指标和生物学指标分别为 16、12 和 11 个。目前增加到 43 个，其中物理指标 17 个，化学指标 15 个，生物学指标 11 个。最终选定物理指标、化学指标和生物学指标各 4 个用于土壤健康评价。之后，在综合考虑评价指标与土壤关键过程的相关性、对管理的响应、测试时间与费用等因素后，调整了土壤生物学指标，用土壤蛋白含量、土壤呼吸代替潜在可矿化氮和根系健康等级（表 2）。评价时需要对确定

好的土壤健康指标通过相应的累积正态分布函数转化成对应的指标分值。CASH 方法采用递增型、递减性和最优型三种评分函数。根据评价指标的分值计算出土壤健康指数，用百分数表示。根据百分数的大小依次分为很低（0~20）、低（20~40）、中等（40~60）、高（60~80）、很高（80~100）五个等级，并分别采用红色、橙色、黄色、浅绿和深绿进行表示。该评价方法认为土壤质地是影响评价结果的关键因子，因此在评价过程中按照砂土、粉土和黏土三种类型开展相应的评价工作。采用该方法时，需要对健康土壤和不健康土壤进行成对对比测定，依据结果进行综合评价。

CASH 方法选用了土壤物理、化学和生物学指标，能比较全面地反映土壤健康状况。但是在进行评价过程中，没有考虑土壤属性指标的权重。同时，该方法在田块尺度准确性较高，在区域尺度准确性相对较低，还有待进一步优化^[58]。

表 2 康奈尔土壤健康评价方法指标体系^[13, 47]Table 2 The indicator system of a comprehensive assessment of soil health^[13, 47]

指标类型 Indicator category	指标 (调整前) Indicators (before the adjustment)	指标 (调整后) Indicators (after the adjustment)
物理指标 Physical indicator	团聚体稳定性 有效含水量 土壤表层硬度 土壤亚表层硬度	团聚体稳定性 有效含水量 土壤表层硬度 土壤亚表层硬度
化学指标 Chemical indicator	pH 可提取磷 可提取钾 微量元素	pH 可提取磷 可提取钾 微量元素 (镁/铁/锰/锌)
生物学指标 Biological indicator	有机质含量 活性炭含量 潜在可矿化氮 根系健康等级	有机质含量 活性炭含量 土壤蛋白含量 土壤呼吸

4.3 新西兰 SINDI 方法

新西兰 SINDI (Soil Indicators) 方法是一种网络在线评价工具, 通过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^[48]。SINDI 综合了土壤物理结构、土壤肥力、养分储存、有机资源和土壤中生物等土壤属性指标, 主要包括有效磷、土壤 pH、可矿化氮、总碳、总氮、容重和大孔隙度等 7 个指标。其中, 土壤有效磷代表土壤肥力状况, 土壤 pH 代表土壤的酸碱度, 其直接影响土壤养分的有效性。可矿化氮、总碳和总氮代表土壤的有机资源, 在一定程度上能反映土壤的生物活性。土壤容重和大孔隙度代表土壤的物理特性, 反映土壤的压实和渗透特性, 影响作物根系的下扎深度。

根据新西兰土地利用方式、土壤类型等信息, 土壤专家绘制了土壤响应曲线, 并对土壤指标进行颜色编码。颜色编码类似于“红绿灯”, 其中红色代表不利于作物生长, 橙色表示潜在影响, 绿色代表最佳生长条件。SINDI 方法主要适用于新西兰地区, 较好地指导了当地的作物生产, 但具有区域局限性, 此外, 评价过程主要以单个指标为评价单元, 没有充分整合其他指标形成一个综合指数。

4.4 基于土壤功能的土壤健康评价方法

在农业绿色发展的新时期, 人们对土壤功能的关注不再仅仅是支撑粮食生产, 还重视土壤的生态系统服务功能。农业及林业主要的土壤功能包括初

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 5 个部分^[59]。基于土壤功能的土壤健康评价区别于对各项指标的单独评估, 它以各项土壤功能为评价单元, 即使是单个功能, 也是多个土壤物理、化学及生物学共同决定的^[7], 因此需要建立土壤属性指标和土壤功能的模型进行系统评价。

该方法的代表是欧盟 LANDMARK 项目构建的 Soil Navigator 决策支持模型^[60], 该系统基于层次分析法与决策专家 (Decision Expert, DEX) 集成方法构建, 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, 对上述 5 项土壤功能分别进行等级评价, 结果呈现为各项土壤功能的高、中、低三个水平 (图 3)。目前该评价方法已在 5 个欧洲国家 (奥地利、德国、丹麦、法国、爱尔兰) 投入使用^[61]。评价规则的制定则基于对项目现有数据库的机器学习与数据挖掘 (随机森林分析) 及专家的评判, 呈现为表格形式的从较低层级的属性 (模型输入) 到较高层级的属性 (土壤功能水平) 的集成映射。除土壤健康评价之外, 该系统能够根据用户期望的土壤功能水平及对各项土壤管理的可接受程度对替代方案进行评估, 因此有针对性地提出田间土壤健康改良方案。

类似于基于土壤功能的土壤健康评价方法, 其他研究者也从土壤功能的开展土壤健康评价工作。Thoumazeau 等^[62]提出了一个综合的概念框架 Biofunctool[®], 即“生物土壤功能评价工具”, 该评

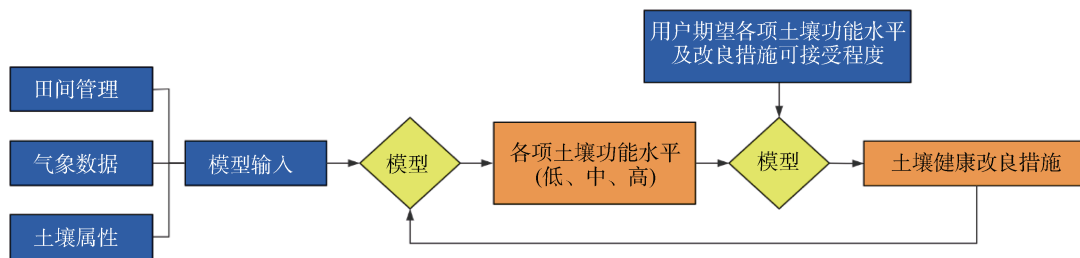


图3 Soil Navigator 模型概念框架 (修改自 Debeljak 等^[61])

Fig. 3 The conceptual framework of Soil Navigator model (Modified from Debeljak et al.^[61])

价体系选取了 12 项可直接现场测量的时间短、成本低、效率高的功能指标,以监测包括碳转化、养分循环和结构维持的土壤功能。Biofunctool[®]的特点在于其“自上而下”的指标选取方式^[63],即在开展田间试验前,综合各项土壤功能的先验概念,根据专家的判断与固定的指标筛选规则来定义一组指标。通过 PCA 得出各项指标的权重,计算土壤质量指数 (Soil Quality Index, SQI)^[64]。该评价方法已运用于泰国橡胶种植园的土壤质量调查。Calzolari 等^[65]通过数学公式量化了支持生态系统服务功能的 8 项土壤功能。基于意大利东北部艾米利亚—罗马涅平原地区土壤调查数据,在区域尺度评估土壤功能对潜在生态系统服务的贡献,评价结果以地图形式呈现。Rinot 等^[14]参考前人研究结果提出的多变量复合土壤健康指数计算概念方法,以量化土壤属性与土壤生态系统服务的关系。通过 PCA 筛选最具代表性的土壤属性,建立最小数据集。各项土壤属性将被转化为 0%~100% 的标准化得分函数,并通过最小二乘模型赋予一定的系数,以表示其对各项土壤生态系统服务的贡献权重。目前,该评价方法仍停留在理论阶段,尚未得到广泛应用。

基于土壤功能的土壤健康评价方法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^[35]。田块和县域尺度的评价更多反映土壤动态的变化,受管理影响较大,应选择对管理敏感性的指标,而省域或国家尺度的评价更偏向静态或固有的状态,需要依赖历史数据和大数据平台的构建。

4.5 基于土壤管理的土壤健康评价方法

土壤管理评估框架 (Soil Management Assessment Framework, SMAF) 是在 20 世纪 90 年代开发的。该方法是基于系统工程和生态经验的评分功能,对

相关的土壤物理、化学和生物学指标进行标准化,从而得到土壤健康指数。主要评价过程包括:筛选指标形成最小数据集、解释指标以及整合评价指标,最终形成土壤健康指数^[66-67]。基于土壤管理评价框架的土壤健康评价方法与“3 土壤健康评价过程”介绍的类似,在评价过程中由于受研究对象的影响,最小数据集的土壤属性指标会发生变化。

国内外学者广泛采用基于土壤管理的土壤健康评价方法。我国学者采用土壤管理评估框架评价了云南坡耕地耕层土壤质量,最小数据集中包含了 pH、全氮、总孔隙度、抗剪强度、田面坡度等 5 个土壤属性指标,对比了不同地区和不同耕作方式土壤质量^[68]。Cherubin 等^[69]对比了原生植被、牧草和甘蔗地 0~10、10~20 和 20~30 cm 土壤健康状况,0~10 cm 土层选择的土壤属性指标为 pH、有效磷、速效钾、土壤容重、大团聚体稳定性、有机碳、微生物生物量碳和 β-葡萄糖苷酶活性;10~20 和 20~30 cm 土层选择的土壤属性指标为 pH、有效磷、速效钾、土壤容重、大团聚体稳定性和有机碳,最终得到不同土地利用方式土壤健康指数。Amorim 等^[70]选择了 9 个土壤属性指标,分别为微生物生物量碳、有机碳、土壤容重、大团聚体稳定性、有效水含量、pH、EC、可提取磷和钾,对比不同长期放牧管理措施对土壤健康的影响。其他研究者也对长期耕作和轮作^[71]、不同管理措施^[72]、不同种植体系^[73]等开展土壤健康评价工作,评价指标体系各有不同。对于两次评估间隔时间需要根据评价目的确定,如果关注土壤管理措施对土壤肥力的影响,需要间隔 1~2 年测定一次;如果关注土壤管理措施的长期效应,则需要间隔 4~8 年的时间。

基于土壤管理评估框架可以比较全面地反映土壤健康状况。但评价指标的选择不固定,不同种植体系或管理方式选择的指标体系不同,同一种植体

系不同土层筛选的指标也不同。这种评价方法具有一定的局限性，在田块尺度的准确性较高，区域尺度的准确性相对较低^[58]。

4.6 其他土壤健康评价方法

国内外学者不断探索了其他评价方法。德国莱布尼茨农业景观研究中心开发的 Muencheberg Soil Quality Rating (M-SQR) 方法涵盖了土壤质地、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,利用综合评分分数的高低来表征作物的产量潜力^[74]。该评价方法已被我国研究者采用,用于评价农田生态系统土壤健康状况^[75]。美国制定的土壤健康路线图指出,通过克服科学研究差距以支持土壤健康管理,完善市场制度降低测试的经济成本,利用政策的优势推动土壤健康的发展^[76]。这种土壤健康路线图适用于指导区域(县、省、国家)土壤健康的发展。我国研究者针对不同作物体系,提出采用土壤自然生产力、外部投入(肥料、农药、灌水等)等指标,结合中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)卫星图像获得植被指数(NDVI)的时间序列数据,建立土壤健康指数可以反映区域土壤健康水平^[77]。研究人员结合气候、土壤、技术水平、生产环境、作物安全性、生产弹性等构

建了耕地健康产能评价体系,用于指示土壤健康状况^[78-79]。基于耕地健康产能的评价体系类似于我国耕地质量评价系统,可以用于指导区域土壤健康评价。

5 展 望

健康土壤是提高生态系统服务功能的基础,能为健康食物的生产提供支撑,直接影响人类健康^[80]。近年来随着科技的进步和人们对土壤多功能性认识的深入,土壤健康的研究已经成为国内外研究的前沿和热点。对于土壤健康评价指标和方法的研究是理解土壤健康的基础,可为健康土壤定向培育理论和技术研发提供重要支撑。未来在农业绿色发展的引导下,积极倡导土壤健康理念,促进人与自然和谐发展。构建多目标协同、多主体参与、适用于不同尺度/作物体系的农田土壤健康评价,建议从以下几个方面开展研究工作(图 4):

1) 构建土壤健康大数据平台。土壤是一个动态变化的系统,除了土壤固有的特性外,还受气候、人为活动(种植作物类型、种植制度、管理策略)等影响^[81-82]。土壤健康大数据应包含气候因素、地形条件、土壤物理、化学和生物学特性、作物类型、

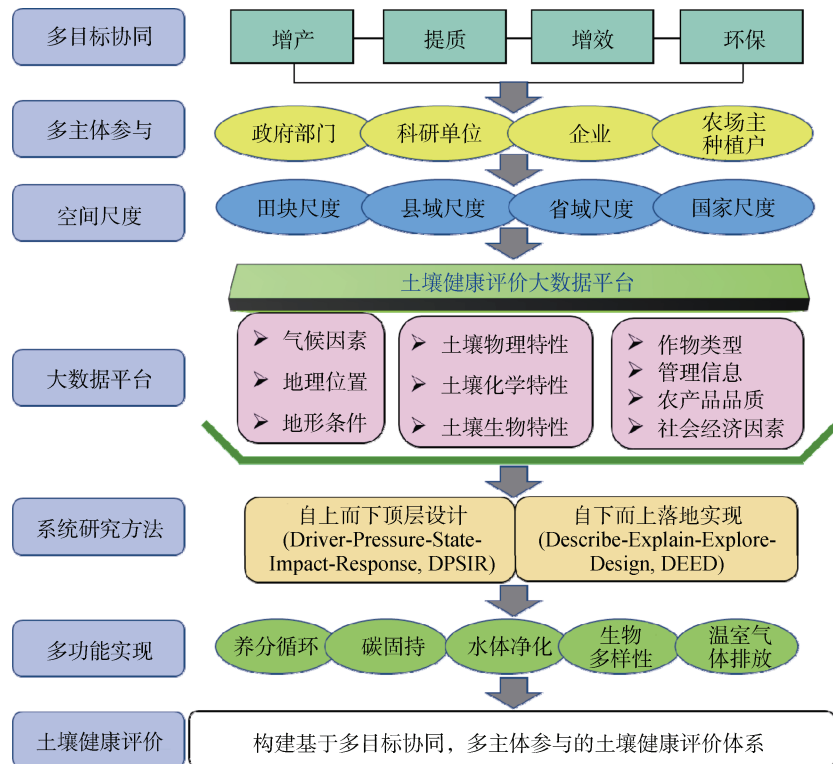


图 4 基于多目标协同多主体参与的土壤健康评价体系框架

Fig. 4 The framework of multi-objective coordinated soil health assessment with the involvement of multi-actors

管理、农产品品质和社会经济因素等信息。随着生物信息学的快速发展,建立相应的土壤微生物学大数据库非常重要。此外,大数据库可以以不同区域主要作物体系和土壤类型为分类单元,利用函数、模型等筛选出对土壤时空变化反映较为敏感的指标,为区域土壤健康评价新型指标的选择奠定基础。

土壤健康需发展长期和全过程动态检测,大数据平台的构建需要与新型分析手段和快速测试技术、智能化信息技术相结合。一些无损测试仪器如近红外光谱分析仪、傅里叶中红外光谱仪、X射线荧光光谱仪等,可实现土壤健康属性的快速测试,提高工作效率。此外,新兴数据分析工具如机器学习、深度学习、人工神经网络等^[7, 83],有利于更加客观的选择土壤健康评价指标,进一步优化土壤健康评价体系。同时,土壤健康评价需要与人工智能信息技术相结合,开发土壤健康智能应用程序,以期在更大尺度上评价土壤健康状况,为政府、科研人员、企业、种植户等提供更加全面的信息,为土壤健康定向培育技术的研发与技术落地提供重要支撑。

2)建立不同尺度和作物体系的土壤健康评价方法。土壤健康的研究尺度不同,评价标准不同,选择的评价指标也有区别。对于田块(农户)尺度而言,更多关注土壤物理/化学/生物学特性、管理信息和农产品品质,构建最小数据集,结合隶属函数法、层次分析法等方法,明确田块(农户)尺度土壤健康状况。县域尺度土壤健康评价要在田块尺度的基础上开展,结合不同作物类型、土地利用方式等信息,借助地理信息系统获得土壤健康评价分布图,依据不同土地利用方式,协同实现景观尺度土壤多功能的耦合。在更大尺度上如区域和国家尺度进行土壤健康评价,需要增加气候、地理、地形、社会经济发展、区域发展优势等多种因素,选择合适的评价指标,结合遥感、土壤普查数据库、数学评价模型和土地资源管理学科的相关知识,在土壤健康管理区域和全国目标的框架下,结合土壤管理政策,形成土壤可持续管理的模式。

3)建立多目标协同的土壤健康评价方法。土壤健康评价指标的选择要涵盖多种土壤功能,而不能仅仅以生产力为依据^[12]。以追求高产为导向的传统方法忽视了土壤健康多功能的发挥,造成了严重的资源环境问题,影响了土壤的可持续利用。然而目前我国土壤健康问题严峻,土壤酸化、盐渍化、重

金属污染等问题严重,而土壤健康与人体健康密切相关,涉及环境保护的相关评价参数需进一步完善。因此,未来亟须建立以协同增产、提质、增效和环保多目标的农田土壤健康评价体系,实现多种土壤功能协调发展。

4)土壤健康评价与系统研究方法相结合。土壤健康评价是了解土壤状况的基础,其目的是更好地指导生产,保障健康食物生产的同时,维持土壤生态系统服务功能的发挥。土壤健康评价与“自上而下(Top-down)”“自下而上(Bottom-up)”两种系统研究方法相结合,可以在区域尺度上指导土壤健康研究与应用,其中DPSIR(Driver-Pressure-State-Impact-Response)和DEED(Describe-Explain-Explore-Design)是两者的代表性研究方法。DPSIR以一种简化的方式阐述了人类行为对环境的影响,它可以作为环境管理和决策的一种有价值工具^[84]。研究人员借助此工作理念,利用该方法可评价人类管理活动对土壤健康的影响,同时结合各种环境和社会经济因素系统提出政策建议。DEED方法从发现土壤障碍因子出发,通过科学研究、设计、再设计的思路开展工作。将这些系统方法应用于土壤健康评价工作中,将有利于全面提升区域土壤健康水平。

5)土壤健康评价需要多主体参与。土壤健康与食物健康、环境健康、人体健康等相互关联,需要多学科交叉,多主体参与。多主体包括科研单位、政府部门、企业、农场主、种植户等。科研单位对土壤健康评价指标和方法进行探究和优化,确定最佳评价指标和评价方法。政府部门联合科研单位通过政策、文件等形式,制定土壤健康评价指南,扩大宣传、普及与应用。企业、农场主和种植户作为土壤健康评价的主要使用主体,根据不同种植体系、管理目标等对现有土壤健康评价方法进行反馈。科研单位和政府部分会根据使用者反馈信息再进一步完善土壤健康评价指标和方法,以期土壤健康评价方法更加精准有效。

致谢 感谢 Craig and Susan McCaw Foundation、大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)和国家留学基金委(留金美[2019]13043)的支持。

参考文献(References)

- [1] 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.]
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [3] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health[J]. *Nature*, 2015, 528 (7580): 69—76.
- [4] Huang X Q, Cai Z C. Soil microbes and control of soil-borne diseases[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (6): 593—600. [黄新琦, 蔡祖聪. 土壤微生物与作物土传病害控制[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32 (6): 593—600.]
- [5] Zhao F J, Xie W Y, Wang P. Soil and human health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 1—11. [赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (1): 1—11.]
- [6] Fierer N, Wood S A, Bueno de Mesquita C P. How microbes can, and cannot, be used to assess soil health[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 153: 108111.
- [7] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality—A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105125.
- [8] 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.
- [9] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M A. Soil health and sustainability[J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 56: 1—54.
- [10] 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: GB/T 33469-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. [中华人民共和国国家市场监督管理总局, 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.]
- [11] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Rules for soil quality survey and assessment. NY/T 1634—2008[S]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2008. [中华人民共和国农业农村部. 耕地地力调查与质量评价技术规范 NY/T 1634—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.]
- [12] 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.
- [13] Sheng F. Introduction and application of Cornell soil health assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (6): 1289—1296. [盛丰. 康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J]. *土壤通报*, 2014, 45 (6): 1289—1296.]
- [14] 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.
- [15] 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.]
- [16] Liu S L, Fu B J, Liu G H, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (1): 137—143. [刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37 (1): 137—143.]
- [17] Lin K, Li D C, Zhang G L. Literature analysis on soil quality assessment in China based on CNKI database[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (3): 736—744. [林卡, 李德成, 张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. *土壤通报*, 2017, 48 (3): 736—744.]
- [18] Cheng J J, Ding C F, Li X G, et al. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 225—232.
- [19] Gong L, Ran Q Y, He G X, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 223—229.
- [20] Armenise E, Redmile-Gordon M A, Stellacci A M, et al. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 91—98.
- [21] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 131—142.
- [22] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307—320.
- [23] FAO-ITPS. Protocol for the assessment of sustainable soil management[EB/OL]. (2020) [2021-2-10]. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload//GSP/SSM/SSM_Protocol_EN_006.pdf 2020.
- [24] Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (2): 162—171. [周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15 (2): 162—171.]
- [25] Nunes M R, Karlen D L, Veum K S, et al. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2020, 369: 114335.
- [26] Liang W J, Dong Y H, Li Y B, et al. Biological characterization and regulation of soil health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (2): 719—728. [梁文举, 董元华, 李英滨, 等. 土壤健康的生物学表征与调控[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (2): 719—728.]

- [27] Hofman J, Bezchlebová J, Dušek L, et al. Novel approach to monitoring of the soil biological quality[J]. *Environment International*, 2003, 28 (8): 771—778.
- [28] Fraç M, Hannula S E, Belka M, et al. Fungal biodiversity and their role in soil health[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 707.
- [29] Schloter M, Nannipieri P, Sørensen S J, et al. Microbial indicators for soil quality[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54: 1—10.
- [30] 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: 79.
- [31] Vasconcellos R L F, Bonfim J A, Baretta D, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27 (2): 325—334.
- [32] Bongiorno G. Novel soil quality indicators for the evaluation of agricultural management practices : A biological perspective[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7 (3): 257—274.
- [33] Li Y J, Wu J H, Chen H L, et al. Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (8): 1541—1546. [李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (8): 1541—1546.]
- [34] Lu Q F, Liu T T, Wang N Q, et al. A review of soil nematodes as biological indicators for the assessment of soil health[J]. *Frontiers Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7 (3): 275—281.
- [35] 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.]
- [36] 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. [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.]
- [37] Wang C, Walker B D, Rees H W. Chapter 15 Establishing a benchmark system for monitoring soil quality in Canada[M]//Gregorich E G, Carter M R. *Developments in Soil Science*. Elsevier, 1997: 323—337.
- [38] Antoni V, Saby N, Jolivet C, et al. The French information system on soils: A decision support system for soil inventory, monitoring and management[C]//Hryniewicz O, Studzinski J, Romaniuk M. *Environmental Informatics and Systems Research*. Aachen: Shaker Verlag, 2007: 225—261.
- [39] Lilburne L, Sparling G, Schipper L. Soil quality monitoring in New Zealand : Development of an interpretative framework[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104 (3): 535—544.
- [40] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50 (3): 537—548.
- [41] Jin H F, Shi D M, Chen Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (7): 155—164. [金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (7): 155—164.]
- [42] Kibblewhite M G. Definition of priority areas for soil protection at a continental scale[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28 (1): 128—133.
- [43] Gao W S, Chen Y Q, Shi Y Q, et al. Constructing an index system for ecological health evaluation of cropping system in China main food production areas[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23 (10): 131—137. [高旺盛, 陈源泉, 石彦琴, 等. 中国集约高产农田生态健康评价方法及指标体系初探[J]. *中国农学通报*, 2007, 23 (10): 131—137.]
- [44] Stone D, Costa D, Daniell T J, et al. Using nematode communities to test a European scale soil biological monitoring programme for policy development[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 97: 78—85.
- [45] Griffiths B S, Römbke J, Schmelz R M, et al. Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 213—223.
- [46] 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 & Environment*, 2002, 90 (1): 25—45.
- [47] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. *Comprehensive assessment of soil health—the Cornell framework*[M]. Geneva, NY: Cornell University, 2017.
- [48] Landcare. SINDI: Soil quality indicators[EB/OL]. (2020) [2020-12-19]. <https://sindi.landcareresearch.co.nz/>.
- [49] Sharma K L, Sharma S C, Bawa S S, et al. Combined effect of tillage and organic fertilization on soil quality key indicators and indices in alluvial soils of Indo-Gangetic Plains under rainfed maize-wheat system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61 (3): 313—327.
- [50] 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.
- [51] Guo S J, Han X H, Li H, et al. Evaluation of soil quality along two revegetation chronosequences on the Loess Hilly Region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 137—147.

- Environment, 2018, 633: 808—815.
- [52] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149 (3/4): 325—334.
- [53] National Agricultural Technical Extension and Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, Shenyang Agricultural University. Evaluation of cultivated land quality of the black soil region of Northeast China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量检测保护中心, 沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [54] National Agricultural Technical Extension and Service Center. Evaluation of cultivated land quality of the wheat-maize rotation regions of North China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [全国农业技术推广服务中心. 华北小麦玉米轮作区耕地地力[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [55] Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Evaluation of cultivated land quality of Northwest China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018. [农业农村部耕地质量监测保护中心. 西北区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.]
- [56] Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Evaluation of cultivated land quality of Yangtze River Delta region[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. [农业农村部耕地质量监测保护中心. 长三角区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.]
- [57] National Agricultural Technical Extension and Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, Huazhong Agricultural University. Evaluation of cultivated land quality of the middle reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017. [全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 华中农业大学. 长江中游区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.]
- [58] Fang Q X. Advances in agricultural soil quality assessment tools and applications[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (2): 496—504. [房全孝. 土壤质量评价工具及其应用研究进展[J]. *土壤通报*, 2013, 44 (2): 496—504.]
- [59] 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.
- [60] Landmark. The soil navigator - Pillar1[EB/OL]. (2020) [2020-12-25]. <http://landmark2020.eu/pillars/soil-navigator-pillar1/>.
- [61] 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.
- [62] Thoumazeau A, Bessou C, Renevier M S, et al. Biofunctool®: 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.
- [63] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363: 685—701.
- [64] Thoumazeau A, Bessou C, Renevier M S, et al. Biofunctool®: A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: Investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 429—437.
- [65] Calzolari C, Ungaro F, Filippi N, et al. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 190—203.
- [66] 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.
- [67] Wienhold B J, Karlen D L, Andrews S S, et al. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF) [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2009, 24 (4): 260—266.
- [68] Chen Z F, Shi D M, Jin H F, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (3): 256—267. [陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (3): 256—267.]
- [69] 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.
- [70] Amorim H C S, Ashworth A J, Moore P A Jr, et al. Soil quality indices following long-term conservation pasture management practices[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 107060.
- [71] Karlen D L, Cambardella C A, Kovar J L, et al. Soil quality response to long-term tillage and crop rotation practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 133: 54—64.
- [72] da Luz F B, da Silva V R, Kochem Mallmann F J, et al. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural

- cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 281: 100—110.
- [73] Veum K S, Kremer R J, Sudduth K A, et al. Conservation effects on soil quality indicators in the Missouri Salt River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70 (4): 232—246.
- [74] 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.
- [75] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 9 (2): 461—475. [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, 9 (2): 461—475.]
- [76] The Nature Conservancy. Rethink soil: A roadmap to U.S. soil health[EB/OL]. (2016) [2021-2-10]. <https://www.nature.org/ourinitiatives/regions/northamerica/rethink-soil/external-paper-103116.pdf>.
- [77] 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.
- [78] 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. [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.]
- [79] 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.]
- [80] 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.]
- [81] 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.
- [82] Yang T, Siddique K H M, Liu K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01118.
- [83] Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science[J]. *Nature*, 2019, 566 (7743): 195—204.
- [84] Niemeijer D, de Groot R S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8 (1): 14—25.

(责任编辑: 卢 萍)