

任凤玲,王谦.我国土壤健康研究现状与展望[J].环境工程技术学报,2024,14(5):1403-1411.

REN F L,WANG Q.Current status and prospects of soil health research in China[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(5): 1403-1411.

我国土壤健康研究现状与展望

任凤玲,王谦*

生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心

摘要 土壤健康是陆地生态系统稳定与健康的基础,合理评价土壤健康状况直接关系到农业生产的可持续性、生态环境的稳定以及人类健康。近年来,关于土壤健康的科学研究越来越成为国内土壤科学研究领域的核心热点,但由于生态系统类型的多样性、空间尺度的广泛性、土地利用方式及农业结构的差异性以及土壤生态系统功能的复杂性,科学、精准地评价土壤健康状况面临诸多挑战。在总结土壤健康的内涵与发展的基础上,重点阐述了目前国内外主流土壤健康评价方法,包括基于土壤健康评价基准的方法、康奈尔方法、基于土壤功能的方法、我国耕地质量(土壤健康)评价方法、机器学习和分析诊断的土壤健康评价方法;在此基础上,初步构建了适合我国国情的土壤健康评价框架和通用流程,系统阐述了土壤健康评价结果的应用并深入解析我国土壤健康评价当前存在的问题,提出了未来土壤健康的研究展望,特别强调了多目标协同评价体系的构建、跨生态系统与空间尺度的适应性评价方法的创新以及健康土壤培育技术的研发与应用,以期高质量推进土壤健康研究,从而保护和改善土壤资源,支持农业生产,维护生态环境健康。

关键词 土壤健康;评价指标;评价方法;评价流程;土壤功能

中图分类号:X53 文章编号:1674-991X(2024)05-1403-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20240456

Current status and prospects of soil health research in China

REN Fengling, WANG Qian*

Technical Center for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment

Abstract Soil health is the foundation of the stability and health of terrestrial ecosystems, and a reasonable evaluation of soil health is directly related to the sustainability of agricultural production, the stability of ecological environment, and human health. In recent years, soil health research has increasingly become a core hotspot in the field of soil science research both at home and abroad. However, due to the diversity of ecosystem types, the extensiveness of spatial scales, the differences in land use patterns and agricultural structures, as well as the complexity of soil ecosystem functions, it poses great challenges to scientifically and accurately evaluate soil health. On the basis of summarizing the concept and development of soil health, this paper focuses on the mainstream soil health evaluation methods both at home and abroad, including methods based on soil health evaluation benchmarks, the Cornell method, soil functions-based methods, China's arable land quality (soil health) evaluation methods, and methods using machine learning and analytical diagnosis. On this basis, we preliminarily construct a soil health evaluation framework and general process suitable for China's national conditions, systematically elaborate on the application of soil health evaluation results, and the current soil health evaluation problems in China. Finally, we propose future research prospects for soil health, especially emphasizing the construction of a multi-objective collaborative evaluation system, innovation in adaptive evaluation methods across ecosystems and spatial scales, and the research and application of healthy soil cultivation technologies. These efforts aim to promote high-quality soil health research, thereby protecting and improving soil resources, supporting agricultural production, and maintaining environmental health.

Key words soil health; evaluation indicators; evaluation methods; evaluation process; soil functions

土壤是地球陆地表面能生长植物的疏松表层,由矿物质、有机质、水分、空气和生物等组成。土壤系统具有初级生产力、水的净化与调节、气候变化

与碳固定、生物多样性维持、养分供给与循环5类功能。土壤是人类赖以生存、保障粮食安全与维护生态环境质量的重要物质基础,是陆地上所有生命

收稿日期:2024-07-04

作者简介:任凤玲(1992—),女,博士,主要从事土壤培肥与肥力演变及土壤改良研究,flren0302@163.com

* 责任作者:王谦(1975—),女,调研员,博士,主要从事土壤健康培育与土壤碳汇开发研究,wangqian@tcare-mee.cn

的基础^[1]。土壤健康不仅与粮食、食品安全和人类健康或福祉直接相关,而且有助于维持生态系统功能和服务,从而确保地球健康。因此,迫切需要开展面向我国的土壤健康评价^[2]。

土壤健康对于生态系统的可持续性、环境的恢复力以及农业生产具有至关重要的作用^[3]。只有通过定量评价土壤健康状况,才能有针对性实施可持续措施,以培育具有多功能性、高生物多样性和强韧性的健康土壤环境。同时,我国与土壤健康相关研究(如土壤健康标准、评价方法与指标体系及健康土壤构建技术等)尚处于起步阶段。目前有关土壤健康评价的指标大都集中在物理和化学指标,对微生物的指标考虑较少;而且有关土壤健康的评价大多基于单一的土壤功能,不注重多目标协调。然而,土壤是一个复杂的生态系统,其物理、化学和生物特性在时间与空间上相互作用,这种多因素的动态过程直接决定了土壤功能的实现。目前的有关评价大多为小区域的静态评价,在不同尺度和多生态系统中构建空地一体化土壤健康监测较为缺乏^[4-5]。气候变化和极端天气事件日益频繁发生,加之“双碳”目标和对农业高质量发展及环境健康政策的响应,对我国土壤健康管理提出了新的挑战^[6]。实现健康土壤的培育,同时确保土地的数量、质量和生态效益的协调发展,已成为中国乃至全球土壤科学界亟待解决的重大问题。在这种前提下,如何确保土壤健康,并对处于非健康状况的土壤进行维护和修复,提高土壤整体的健康状况,构建具有中国特色的土壤健康评价和培育体系,是土壤学研究者所面对的紧迫且重要的任务。笔者针对土壤健康概念提出其内涵发展,总结了当前国内外主要的土壤健康评价体系进展,初步提出了适合我国国情的土壤健康评价体系框架和通用流程,以期能为土壤健康评价工作提供参考。

1 土壤健康概念提出及内涵

人类社会的发展与土壤资源紧密相连,土壤健康的概念随着历史文明的进步而逐渐受到重视。早在 1910 年,学术界就提出了土壤健康的概念,当时只关注与土壤肥力相关的物理和化学特征^[7]。随着研究的深入,土壤健康的内容不断丰富、内涵不断提升,逐渐与食物健康和人类健康紧密联系起来。由于研究视角不同,对土壤健康概念的界定难以形成统一认识。20 世纪 70 年代之后,随着全球人口数量增加对粮食等食物需求量不断增多以及人类生活质量提升对食物需求结构等的变化,食物的生产

地——土壤面临日益严峻的压力。然而,人类过度开发土壤资源,不断加速土壤的退化过程,对土壤资源的可持续性构成了严重挑战,并对农业可持续发展及生态环境造成了严重威胁。20 世纪 80 年代末期,美国土壤科学协会首次引入了土壤质量这一概念,强调了土壤在生态系统中支持植物生长、维护环境质量以及促进动植物和人类健康的能力。随后, Doran 等^[8]在 1994 年将土壤质量定义为土壤在生态系统中发挥的功能,特别是其保持生物生产力、维护环境质量以及保障动植物健康的能力,强调了土壤对生态系统内水质、植物和动物健康的多重影响。Doran 等^[9]在 2000 年提出土壤健康是指在生态系统和土地利用边界内,土壤作为关键的生命系统所具有的支撑动植物生产、维持或改善水体和大气环境、促进动植物和人类健康的能力。2002 年 Carter^[10]认为土壤健康需要结合物理、化学和生物方法,形成一个综合性的土壤评价和管理策略,旨在最小化农业生产对环境造成的不利影响,同时确保作物生长能够长期、稳定且可持续地发展。目前比较认可的土壤健康的定义是由美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)自然资源保护局(Natural Resource Conservation Service, NRCS)给出的,在生态系统与土地利用的范围内,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^[11]。

我国土壤科学工作者在 1999 年国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)“土壤质量演变规律与持续利用”的支持下,对土壤质量进行了深入且系统的研究,出版了《中国土壤质量》《土壤质量指标与评价》和《健康土壤学》等多部专著。在《中国土壤质量》中,土壤质量被定义为涵盖土壤肥力质量、土壤环境质量以及土壤健康质量等多维度的综合量度^[12]。2008 年土壤健康的概念被纳入 GB/T 33469—2016《耕地质量等级》^[13]和 NY/T 1634—2008《耕地地力调查与质量评价技术规程》^[14]标准中,其被定义为土壤作为一个动态生命系统具有的维持其功能的持续能力。吴克宁等^[15]提出一种以土地功能和重金属污染的响应为关键指标的土壤健康评价方法;赵瑞等^[16]从土壤的多方面功能出发,选择与不同土壤功能相关的指标构建评价体系,用以评估农田土壤的健康状况。2013 年 12 月,联合国大会第 68 届会议通过了决议,宣布 2015 年为“国际土壤年”,并选定了“健康土壤带来健康生活”作为当年的主题;2020 年 9 月,中国土壤学会在第十四次全国会员代表大会上,也将关注点放在了土壤健康上,并将“保

护土壤健康,促进高质量发展”作为会议的核心议题。这些举措表明,土壤健康已经成为政府和学术界共同关注的焦点。李奕赞等^[6]提出了超越单一追求粮食高产的农田土壤目标,倡导发展一种以土壤多功能性为基础、综合调控的农田土壤健康评价方法;张江周等^[17]提出了农田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(SHG)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。可见,近年来国内外学者在土壤健康评价的理论研究和实际应用方面都取得了显著的进步。

2 土壤健康评价体系

2.1 基于土壤健康评价基准的土壤健康评价方法

类似土壤的生产功能,不同的土壤功能的实现存在差异,土壤的健康也存在较大的差距。最佳条件下(如优化的土壤管理、合理的土地利用、适宜的气候条件以及完善的基础设施等)土壤所能展现的最佳健康状态为土壤健康的最大潜力。鉴于土壤往往受到较大的人为干扰,当进行土壤健康评价时,研究者们倾向于选择那些自然且未被开垦/未受人为干扰的土壤,或是管理得极好的土壤,作为特定区域内土壤健康的基准值^[17];或者依托长期定位试验、监测网点和国家标准,结合预先设定的标准或指标获取土壤健康特征,进而衡量土壤健康当前的状态与健康基准之间的差距,评估土壤管理措施应用的效果,为未来的土壤管理提供指导。这些基准值代表了在当前环境条件下土壤健康可能达到的最高水平。SHG这一概念,指的是土壤健康潜力与基础土壤健康状态之间的差值^[18]。基础土壤健康状态可以包括受到集约化管理的土壤、存在显著障碍的土壤或是受到污染的土壤。通过这一相对的评价方法识别出影响土壤健康的障碍因素,进而采取综合的土壤健康调控措施,逐步消除或降低这些障碍,从而确保土壤的可持续利用。SHG与作物产量及生态系统服务的关联性体现在多个方面,如土壤层中养分的释放、温室气体的排放以及生物种群在不同时间和空间的多样性变化,将有助于更好地了解不同的土壤健康指标及其对土壤健康的定量影响。但是某些情况下,土壤健康评价基准的缺乏限制了该土壤健康评价方法的应用。

2.2 康奈尔土壤健康评价方法

康奈尔大学在2006年建立的康奈尔土壤健康评价方法(CASH)在优化农田管理、提升土壤健康水

平方面发挥着重要的作用。CASH从备选土壤健康指标中通过主成分分析和相关性分析选取作为描述土壤健康特征的量化指标^[19]。经过多年的修订,基于敏感性、主导性、独立性和实用性原则对潜在物理指标、生物指标和化学指标通过主成分分析和相关性分析,构成最小数据集,定量开展土壤健康评价(表1)。

表1 康奈尔土壤健康评价方法指标体系

Table 1 The Cornell indicator system of a comprehensive assessment of soil health

指标类型	调整前土壤健康指标	调整后土壤健康指标
物理指标	土壤质地	土壤质地
	团聚体稳定性 (团聚体0.25~2.00 mm)	团聚体稳定性 (团聚体0.25~2.00 mm)
	有效含水量	有效含水量
	土壤表层硬度	土壤表层硬度
	土壤次表层硬度	土壤次表层硬度
生物指标	有机质含量	有机质含量
	活性炭含量	活性炭含量
	潜在可矿化氮	土壤蛋白含量
	根系健康等级	土壤呼吸
化学指标	pH	pH
	可提取磷	可提取磷
	可提取钾	可提取钾
	微量元素	微量元素(镁、铁、锰、锌)

CASH利用土壤健康评分函数,对于每一个测得的土壤健康指标值,通过相应的转换函数将其转化为对应指标的分值,并在此基础上累加得到土壤健康总分,以此定量衡量农田土壤的整体健康状况。CASH评分过程如下:1)使用3种形式的评分函数,即“越多越好型”“越少越好型”或“中间最优型”,采用累积概率分布函数(cumulative normal distribution, CND)将测得的指标值转换为对应指标的分值。累积概率分布函数根据每个指标全部测定数据的分布参数(平均值和标准差)确定。2)计算各指标(土壤健康指数)得分均值,各分值代表各项土壤健康指标的状态;根据各指标得分(算术平均值)计算出土壤健康总分(以百分制表示)。3)根据健康总分对土壤综合健康状况给予定性评级,等级从低到高分别为很低、低、中等、高、很高(表2),由此定量评价农田土壤综合健康状况。CASH通过分析测定土壤健康指标来评价农田土壤的健康状况,并据此给农民未来的农田管理方式提出指导和建议;通过改进农田管理方式(耕作方式和种植结构等),恢

表 2 土壤健康总分与土壤健康等级转换

Table 2 Soil health index and soil health grade transformation

土壤健康总分	土壤健康等级
0~20	很低
20~40	低
40~60	中等
60~80	高
80~100	很高

复和提高农田土壤的功能和性状,以实现农业生产过程中的低投入、高产出。CASH 存在一些缺点和局限性:未充分考虑土壤环境质量要素,如污染物的影响,这在评价受到污染影响的土壤时尤为重要;此外,与物理和化学指标相比,土壤生物学指标的应用相对较少,这限制了对土壤健康状况的全面评估。

2.3 基于土壤功能的土壤健康评价方法

基于土壤功能的土壤健康评价方法通过建立土壤属性指标和土壤功能的层级关系或模型对土壤单

项功能和多重功能进行系统评价。该方法适用于以各项土壤功能为评价单元的土壤健康评价,每一项土壤功能均由多个土壤物理、化学及生物学指标共同决定(表 3),是区别于对各项指标单独评价的一种评价方法。欧盟 LANDMARK 项目开发的 Soil Navigator 农田管理决策系统^[20]是目前国际上主流的土壤功能评价方法之一,具体包括以下流程:1)基于层次分析法与决策专家(decision expert, DEX)方法,以土壤管理、气象参数以及土壤物理、化学、生物学特性作为模型输入,对 5 项土壤功能(初级生产力、水的净化与调节、气候调节与碳固持、生物多样性维持、养分供给与循环)依次作出等级判断,并由此表现出各种主要土壤功能的高、中、低 3 种层次。2)利用机器学习技术(如随机森林分析)和专家评估,对项目现有的数据库进行深入分析,构建从基础属性(模型输入参数)到高级属性(土壤功能水平)的综合性映射关系,并据此制定土壤功能等级的评价标准。

表 3 基于土壤功能的土壤健康评价指标体系——欧盟 LANDMARK 项目 Soil Navigator 农田管理决策系统

Table 3 A soil health evaluation index system based on soil function: EU LANDMARK Project "Soil Navigator" Farmland Management Decision System

土壤功能	指标
初级生产力	降水量、温度、海拔、坡度、土壤容重、有机质含量、土壤碳氮比、土壤黏粒占比、土壤 pH、土壤 CEC、土壤盐度、矿物组成、钾含量、磷含量、镁含量、根系深度、地下水埋深、作物轮作种类、灌溉量、有机氮肥量、载畜量、豆科作物占比
水的净化与调节	年降水量、雨季降水量、作物季降水量、土壤质地、有机质含量、土壤容重、有效磷含量、土壤结皮、地下水埋深、土壤排水或导水率、人工排水量、根系深度、灌溉量、灌溉类型、灌溉频率、无机氮肥量、有机氮肥量、作物吸氮量、无机磷肥量、有机磷肥量、碳输入、覆盖作物、间作作物类型和方式、作物类型、秸秆管理、载畜量
生物多样性维持	年平均温度、年降水量、土壤 pH、有机质含量、土壤有机层厚度、土壤容重、土壤碳氮比、土壤氮磷比、土壤质地、细菌生物量、真菌生物量、线虫丰度、土壤微节肢动物丰度、蚯蚓丰度、线蚓丰度、作物轮作种类、间作作物、灌溉量、无机氮肥量、有机肥类别、耕作方式、施石灰量、化学杀虫管理、地下水埋深、人工排水量
养分供给与循环	年降水量、生长季首月降水量、生长季首月均温、日均温>5℃天数、土壤 pH、有机质含量、土壤容重、有效磷含量、土壤质地、地下水埋深、无机氮肥量、有机肥施用、覆盖作物、豆科作物占比、秸秆管理、灌溉量、土壤排水量、人工排水量、农作物歉收风险
气候调节与碳固持	年降水量、年平均温度、土壤类型、草地占比、泥炭地排水、有机质含量、土壤质地、碳输入、有机氮肥量、无机氮肥量、间作作物类型和方式、覆盖作物、秸秆管理、净初级生产力、灌溉量、土壤排水量、人工排水量、耕作方式、硝化抑制剂施用量

目前,该评估工具主要在奥地利、德国、丹麦、法国和爱尔兰等欧洲国家得到应用^[21]。评估准则的制定过程涉及对现有数据库的详尽分析,结合了机器学习与数据挖掘技术(例如随机森林分析)以及专家的深入评审,从而创建了从基础属性(模型输入变量)到高级属性(土壤功能等级)的集成映射表。Soil Navigator 农田管理决策系统不仅能评估土壤健康,还能根据用户期望的土壤功能水平和对土壤管理措施的接受度,评估不同方案,并提出具有针对性的土壤改良建议。但是,土壤健康涉及多个方面和层次的功能,如初级生产力、水的净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等。这些功能的量化需要借助复杂的指标体系和模型,且不

同功能的量化难度和精度存在差异,使得整体评价过程复杂且耗时。

2.4 我国耕地质量(土壤健康)评价方法

在评估我国主要区域的耕地质量时,耕地地力综合指数被广泛采用作为关键衡量标准^[13]。为了全面、系统地评价耕地质量,构建了一个涵盖多个方面的评价体系,其中包含气候条件、立地条件、剖面性状、土壤理化性状、土壤养分、潜在障碍因素以及土壤管理策略这七大类别,并细化为 50 个具体的评价指标(表 4)。这一评价体系旨在提供更为全面和准确的耕地质量评估结果。

在各个地区,针对主要农作物对农田土壤质量的具体需求,采用系统聚类分析、DELPHI 等多种技

表4 我国耕地质量评价指标体系^[13]

Table 4 The indicator system for the assessment of cultivated land quality in China

类别	指标
气候条件	积温、降水量、全年日照时数、光能辐射总量、无霜期、干燥度
立地条件	经纬度、海拔、地形地貌、地形部位、坡度、坡向、成土母质、土壤侵蚀类型与程度、林地覆盖率、地面破碎度、地表岩石裸露情况、地表砾石度、田面坡度
剖面性状	剖面构型、质地构型、有效土层厚度、耕层厚度、腐殖层厚度、田间持水量、旱季地下水位、潜水埋深、水型
土壤理化性状	土壤质地、土壤容重、土壤pH、土壤CEC
土壤养分	有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量
潜在障碍因素	障碍层类型、障碍层出现位置、障碍层厚度、耕层含盐量(盐渍化程度)、1 m土层含盐量、盐化类型、地下水矿化度
土壤管理策略	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

术手段,并召集相关领域的专家进行专题讨论。通过结合定量分析与专家的定性判断,确定影响农田土壤质量的关键评价指标,并对这些指标进行量化分析。随后,利用 DELPHI 法和层次分析法(AHP)来确定评价指标及其相应的权重。在对耕地质量进行具体评价的过程中,首先通过 DELPHI 法由专家对各评价指标进行打分,随后利用 AHP 方法计算出这些指标的权重。一旦指标权重被确定,接下来的关键步骤是处理定性指标的隶属度和定量指标的隶属函数。对于定性指标,使用 DELPHI 法来确定其隶属度。基于特性选择适当的函数类型(例如正直线型、负直线型、戒上型、戒下型或峰型),并结合实际测量数据与专家评估进行模型拟合,确保获得精确的隶属函数。以土壤 pH 的评估为例,使用峰型函数来表征其对耕地质量的影响,对于有机质和耕作层盐分含量的评价,则分别采用戒上型和戒下型函数来体现它们对耕地质量的贡献。确定各评价指标的隶属度或隶属函数后,计算每个评价单元的分值,并综合这些分值得出耕地质量的综合指数。最后,根据不同区域的具体情况,将耕地质量综合指数划分为 6~10 个等级,以便于更直观地反映耕地质量的高低。通常情况下,耕地质量等级越高,其潜在的作物产量也越高。

2.5 基于机器学习的土壤健康评价方法

机器学习评价方法利用先进的数据分析技术和多元化算法模型,对大规模土壤数据集进行高效处理与深入解析,实现对土壤健康状况的精确预测与评估。该评价方法的核心在于精准的指标选择,涵盖土壤物理属性(如土壤结构和含水量)、化学属性

(如 pH 和营养盐含量)以及生物属性(如微生物群落的多样性和活性)。在完成土壤数据的收集工作之后,要进行一系列关键的预处理步骤,以保证分析结果的准确性和可靠性,包括数据清洗、标准化处理和缺失值处理,确保数据的质量和一致性。模型构建阶段,根据预测目标的不同,选取适宜的机器学习算法,如决策树、支持向量机、随机森林或深度学习模型,并通过交叉验证等技术优化模型参数,以增强模型的泛化能力和预测精度。根据不同指标对土壤健康影响的重要程度,进行合理的权重分配。经过充分训练的模型能够支持土壤健康的即时监控和动态评价,为农业生产和土壤管理提供科学的决策支持,显著提高土壤健康评价的效率和准确性。

2.6 基于分子诊断的土壤健康评价方法

从指标选择、权重、数据来源合理性方面提取土壤 DNA,进行宏基因组测序,分析土壤微生物群落组成。对用于评价土壤健康的土壤典型物理、化学和生物学属性进行测定,获得土壤健康指数。将土壤微生物群落组成和土壤健康指数这 2 个数据子集合并,构建总数据集。采用机器学习的方法构建微生物对土壤健康指数的预测模型,将微生物预测的土壤健康指数与测定的土壤健康指数进行比较,然后评价模型预测的准确度。通过构建最优模型,筛选出指示土壤健康的关键微生物指标,用于土壤健康评价的快速诊断,为土壤健康的高效和科学评价提供分子诊断评价方法。

3 我国土壤健康评价框架和通用流程

我国地域辽阔,不同生态区的自然条件差异显著,包括作物种类、土地利用方式、土壤类型和质地的多样性,这些因素都导致了土壤和作物管理策略的巨大差异^[17]。因此,在构建土壤健康评价体系时,必须充分考虑到这些地域性差异,因地制宜,因作物而异,确保所建立的评价体系能够紧密贴合当地的生产条件和实际需求。本文基于土壤健康评价的实际操作需求,参考了 CASH 土壤健康评价体系^[19]和欧盟 Landmark 土壤健康工作的最新进展^[20],从土壤健康评价方法的具体实施角度出发,重点探讨了指标选择的原则和因地制宜的考量,旨在为我国不同地区土壤健康评价的落地实施提供更为具体和实用的参考。

土壤健康评价体系框架结构(图 1)包括土壤健康评价术语、土壤健康评价指标体系、土壤健康评价方法。通常土壤健康评价的一般程序(图 2)包括:1)确定土壤健康评价应用场景;2)确定用于评价土

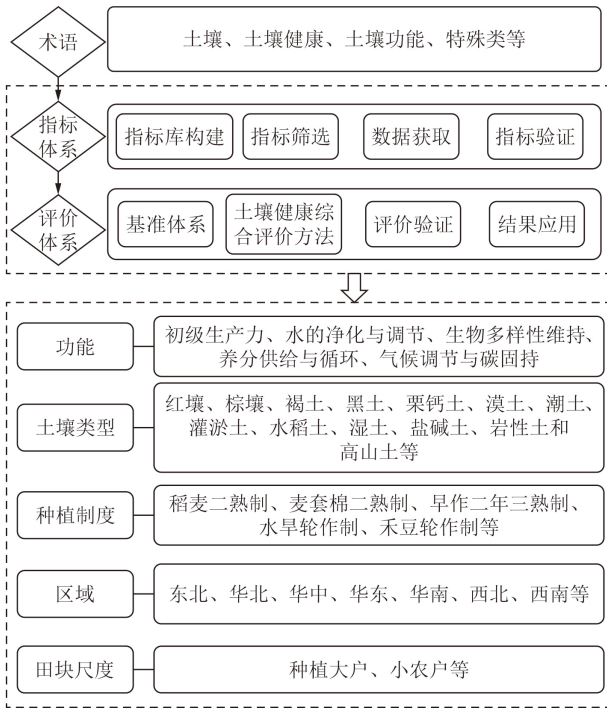


图 1 土壤健康评价体系框架

Fig.1 General framework of farmland soil health evaluation

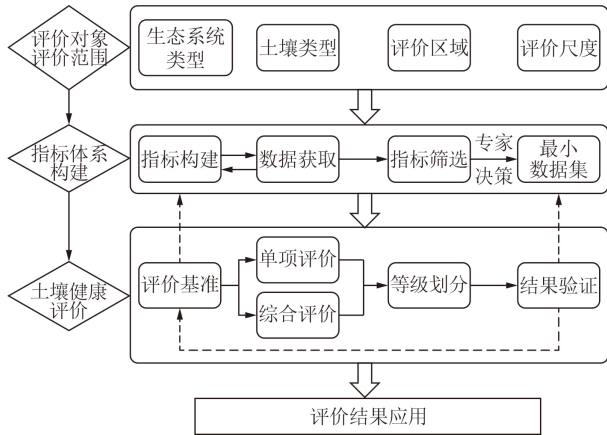


图 2 土壤健康评价流程

Fig.2 Soil health assessment process

壤健康的关键指标; 3) 对选定的土壤健康指标进行量化处理; 4) 进行土壤健康评价; 4) 对土壤健康评价结果进行验证; 5) 对土壤健康评价结果进行应用。土壤健康评价指标的选择是最关键的一步, 指标选择的时候要首先考虑土壤健康评价的对象, 如针对不同生态系统类型、土地利用类型、土壤类型、种植制度等情景及其组合。评价范围包括不同空间尺度的土壤健康评价, 如田块、区域(行政区、气候区等)、国家尺度等。需要根据对象和范围目标需求权衡不同功能之间的关系, 考虑各个功能的优先级别。基于土壤功能对土壤健康进行评价时, 土壤质量评价涉及物理、化学及生物学指标, 通过专家决策等建立包含代表性指标的最小数据集(minimum data

set, MDS)^[17]。在进行农田土壤健康评价时, 首先基于土壤健康基准值, 如果没有土壤健康基准值则选择单项评价和综合评价两大类。单项评价方法从单一土壤功能的角度衡量土壤健康状况; 综合评价方法通过融合多个不同的土壤功能, 构建全面的指标体系, 从而对土壤的健康状况进行全面评估。

4 土壤健康评价结果应用

4.1 改良/修复的效果评价

在修复或改良前, 土壤健康评价会揭示土壤的原始状态, 为修复或改良措施的选择提供重要依据。在实施修复或改良措施后, 再次进行土壤健康评价, 可以对比修复或改良前后的变化, 评估修复或改良措施结果, 以便优化和完善修复或改良方案。

4.2 土壤健康水平提升

土壤健康评价结果可以揭示土壤中有害物质的含量和分布情况, 为预防和控制土壤污染提供科学依据。对于有害物质含量超标的土壤, 可以采取相应的修复措施, 如添加改良剂、种植修复植物等, 降低土壤污染的风险。通过土壤健康评价, 确定土壤健康的主控因素和障碍因子, 从而制定更有效的耕作、施肥和灌溉策略。土壤健康水平提升主要体现为土壤各项功能表现的提升以及障碍因子的改良, 是评估农田管理措施可持续性的依据。

4.3 土壤健康演变趋势预测

通过定期的土壤采样和分析, 可以获取土壤健康指标的变化数据, 评估土壤健康的变化趋势, 以及不同管理措施对土壤健康的影响。对比不同时间点的土壤健康评价结果, 识别出土壤健康下降的原因和趋势, 评估修复或改良措施的有效性, 有针对性地制定修复或改良方案。土壤健康评价在预测土壤健康演变趋势中的应用, 还需要结合地理信息系统(GIS)和遥感技术等现代科技手段。这些技术的应用, 为大范围的土壤健康监测和评估提供了支持, 确保了预测结果的精确度和可信度。

4.4 生态系统服务评估

区域尺度土壤健康评价有助于评估土壤对生态系统服务的贡献, 如初级生产力、水的净化与调节、气候调节与碳固持、生物多样性维持、养分的供给与循环。通过土壤健康评价, 可以量化评估土壤各项功能在生态系统服务供给中的贡献程度, 揭示生态系统服务供给的瓶颈和限制因素, 为制定针对性的自然资源管理策略提供决策支持。此外, 通过长期监测和评估土壤健康状态的变化趋势, 可以预测生态系统服务供给的未来动态, 为生态系统的长期

保护和管理提供预警和参考。

5 土壤健康评价存在问题及展望

5.1 构建符合我国国情的土壤健康评价标准体系

由于我国土壤类型的多样性和不同地区气候、水文条件的显著差异,因此,在构建适合中国国情的土壤健康评价体系时,评价指标的选取需要综合考虑各地区土壤类型的独特性,地理位置、气候条件等因素的相对性和特殊性。应采取灵活的评价策略,实施差异化的评价标准,以适应不同地区的特定条件,进而达成促进可持续发展的目标。此外,快速的城市化带来了一系列环境挑战,包括城市污染和土地的过度开发,这些问题统称为“城市病”,它们对城市土壤的健康构成了严重威胁^[22]。在矿区土地复垦与生态重建、植被自然恢复演替、盐碱地和荒漠化土地治理等情景下,对植被和土壤进行系统性、动态化的综合评估,揭示土壤健康状况的变化显得极为重要和迫切。目前,大多数土壤健康评价工具主要针对农业土壤而设计,而其他生态系统类型或者土地利用情景下,需要专门针对其特性的评价体系,这一体系目前尚不完善。针对土壤健康问题,应强化土壤健康评价体系和区域土壤健康评价的差异性,形成不同区域或立地条件下的健康土壤构建技术和模式。

5.2 土壤健康评价标准体系推广应用

在推进土壤健康评价标准体系的推广应用中,综合性的策略与措施显得尤为关键。

(1)政策引导与制度保障。为有效推广土壤健康评价标准体系,政府应发挥主导作用,通过制定并出台一系列具有前瞻性和可操作性的政策文件,为土壤健康评价工作提供坚实的制度保障。具体而言,包括以下几个方面:明确法规框架,在现有环保法律法规的基础上,进一步细化土壤健康保护的相关条款;明确土壤健康评价的法律地位、评价主体、评价对象及评价标准等,为土壤健康评价工作提供明确的法律依据。制定激励政策,通过财政补贴、税收优惠、项目资助等方式,对积极参与土壤健康评价、实施土壤改良与修复措施的企业和个人给予实质性的激励,以激发其内在动力,促进土壤健康评价工作的广泛开展。强化监管与考核,建立健全土壤健康监管体系,将土壤健康评价纳入地方政府绩效考核体系,明确各级政府在土壤健康保护中的责任与义务,确保相关政策措施得到有效执行。

(2)建立第三方评价机制。为确保土壤健康评价结果的客观性与公正性,建立独立的第三方评价

机制显得尤为重要。这不仅能够提升评价工作的专业性和权威性,还能有效避免利益冲突,保障评价结果的公信力。培育专业机构,鼓励和支持科研机构、高校、行业协会等组建专业的土壤健康评价机构,通过资质认证、人员培训等方式,提升其评价能力和水平,确保评价工作的科学性和规范性。制定统一的土壤健康评价标准和规范,明确评价流程、方法、指标及数据处理要求等,为第三方评价机构提供明确的操作指南,确保评价结果的准确性和可比性。实施动态监测,建立土壤健康动态监测网络,由第三方评价机构定期对重点区域和农田进行土壤健康监测与评价,及时发现并解决土壤污染与退化问题,为土壤健康保护提供科学依据。

5.3 进一步重视土壤生物评价指标

在土壤健康评价中,生物学指标的重要性日益凸显,尤其是土壤微生物指标,对于土壤健康变化的反应非常敏感,是评估土壤健康的关键因素。当前关于土壤健康的指标大多数研究侧重于土壤化学指标,对土壤物理和生物学指标的关注相对较少。国内在土壤健康评价工具的研发上尤其缺乏专门的、应用广泛的工具,特别是基于土壤生物学指标的评价工具。尽管国际上有多种土壤健康评估工具侧重于土壤微生物,但这些工具通常依赖于不透明的“黑箱”指标,并没有明确指出特定微生物群体和功能在土壤健康评价中的具体作用。为了更准确地评价土壤的健康状况,需要进一步优化和筛选现有土壤健康评价指标,特别是那些与生物学特性密切相关的指标。

5.4 加强监管,建立土壤健康监测预警机制

为了确保土壤生态系统的长期可持续性和农业生产力,必须对土壤健康进行有效的监管。这需要构建一个综合性的土壤健康监测体系,该体系能够实时收集土壤物理、化学和生物学特性的数据,并通过先进的分析方法对这些数据进行评估。生态环境部、农业农村部等部门也在全国各地建设了一批监测基地,形成了较完善的监测网络体系。在此基础上,增加土壤质量属性、健康水平等状况的监测。强化土壤健康相关指标实时、快速诊断技术和方法研究,特别是强化在线检测仪器设备开发,促进相关指标实现实时监控,保持对健康动态变化相关指标的常年有效监控,通过与遥感技术、5G通信和大数据等现代信息技术有效结合,建立空天地一体的监测与应用体系,构建土壤健康大数据平台,开展自上而下的土壤健康监测数据更新评价,做到“早知道、早预防、早防控”,及时分析了解对土壤健康产生影响

的障碍因子并尽快予以纠正。同时,开发多功能的土壤健康智能应用程序(APP),旨在为不同用户群体(包括农业从业者、科研人员和政策制定者)提供定制化指导,优化农业生产过程。这些应用程序将集成先进的数据分析工具和用户友好的界面,以促进土壤健康管理的科学决策和实践。

5.5 我国健康土壤培育策略

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健康土壤培育策略。参考原农业部 2015 年印发的《耕地质量保护与提升行动方案》^[23],初步提出了我国土壤健康培育的技术路径和重要举措。

我国健康土壤培育的 4 条技术路径: 1) 土壤改良。针对耕地土壤存在的障碍因子,采取有效措施进行治理,包括对水土流失严重的区域实施水土保持工程,以减少侵蚀和沉积;对酸化土壤施用石灰质材料进行中和,以及对盐渍化土壤采用淋洗和改良剂施用等方法,以降低盐分含量。同时,通过改善土壤的物理结构和化学性质,如增加有机质含量和调节 pH,优化土壤的理化性状,为作物生长创造良好的土壤环境。2) 地力培肥。通过施用有机肥料,如堆肥、绿肥和畜禽粪便以及实施秸秆还田等措施,增加土壤中的有机质含量。此外,推行测土配方施肥技术,根据土壤养分状况和作物需求,合理配比和施用化肥,以实现养分的平衡供应。通过粮豆轮作、固氮作物种植和绿肥作物的合理布局,提高土壤的自然肥力,实现土壤的可持续利用。3) 保水保肥能力提升。通过深松耕作、打破犁底层等措施,增加耕作层的深度,改善土壤的孔隙结构,提高土壤的通气性和水分保持能力。推广保护性耕作技术,如少耕、免耕和覆盖耕作,减少土壤扰动,保护土壤表层结构,增强土壤的抗侵蚀能力和保水保肥性能。4) 污染控制与生态修复。实施化肥和农药的减量施用策略,优化施用方法和时间,减少农业投入品对土壤和环境的负面影响。对于已经受到重金属和有机污染物影响的土壤,采取植物修复、微生物修复和物理化学修复等技术,进行土壤污染的治理和生态修复。同时,加强农膜等农业废物的管理,减少农田残留,防止土壤和环境污染。

健康土壤培育行动五项重点举措: 1) 退化耕地综合治理,着重于东北地区黑土地退化问题、南方土壤酸化(潜育化)及北方土壤盐碱化的综合防治措施; 2) 土地污染防治与修复,集中于土壤重金属污染

的治理、减少化肥和农药的使用以控制污染以及白色污染(如残膜)的预防和控制; 3) 土壤肥力保护提升,重点是秸秆还田、增加有机肥料投入、种植绿肥作物以及实施深松土地整理; 4) 耕作层土壤的剥离与再利用,耕作层土壤是耕地中最富饶且不可再生的部分,需要进行剥离并合理利用; 5) 土壤健康监测与评估,构建土壤健康调查监测网络和大数据库平台,开展土壤健康状况的调查、监测和评估工作。

参考文献

- [1] 魏潇淑, 柏杨巍, 王晓伟, 等. 国内外土壤污染防治法律法规与技术规范概述及思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1643-1651.
WEI X S, BAI Y W, WANG X W, et al. Overview and consideration of laws and regulations and technical specifications for soil pollution prevention and control at home and abroad[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1643-1651.
- [2] GUAN D X, SHI Z, ZHU L Z, et al. Health as a unifying concept to promote integrated soil and environmental research[J]. Soil & Environmental Health, 2023, 1(1): 100001.
- [3] 王亲, 董炜华, 李晓强, 等. 土壤健康评价的研究进展[J]. 现代农业研究, 2022, 28(7): 10-12.
WANG Q, DONG W H, LI X Q, et al. Advances in soil health assessment[J]. Modern Agriculture Research, 2022, 28(7): 10-12.
- [4] 杨淇钧, 吴克宁, 冯喆, 等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 565-578.
YANG Q J, WU K N, FENG Z, et al. Soil quality assessment on large spatial scales: advancement and revelation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 565-578.
- [5] 吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 537-544.
WU K N, YANG Q J, ZHAO R. A discussion on soil health assessment of arable land in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 537-544.
- [6] 李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1177-1189.
LI Y Z, ZHANG J Z, JIA J Y, et al. Research progresses on farmland soil ecosystem multifunctionality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1177-1189.
- [7] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1253-1261.
XU M G, DUAN Y H, BAI S S, et al. Research and prospects for soil health based on long-term experiments in arable land of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1253-1261.
- [8] DORAN J W, COLEMAN D C, BEZDICEK D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison: Soil Science Society of America, 1994.
- [9] 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.
- [10] CARTER M R. Soil quality for sustainable land management[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 38-47.
- [11] BREVIK E. A brief history of the soil health concept[R/OL]. Madison: Soil Science Society of America, 2018. <https://profile.soils.org/posts/field-and-historical-notes/a-brief-history-of-the-soil-health-concept>.
- [12] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 耕地质量等级: GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 农业部. 耕地地力调查与质量评价技术规程: NY/T 1634—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [15] 吴克宁, 梁思源, 鞠兵, 等. 土壤功能及其分类与评价研究进展 [J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 980-985.
- WU K N, LIANG S Y, JU B, et al. Research review on classification and evaluation of soil functions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 980-985.
- [16] 赵瑞, 吴克宁, 刘亚男, 等. 基于生态系统服务功能视角的县域尺度土壤健康评价 [J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 269-279.
- ZHAO R, WU K N, LIU Y N, et al. Soil health evaluation at a county level based on soil ecosystem service function[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2): 269-279.
- [17] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 879-891.
- ZHANG J Z, WANG G Z, LI Y Z, et al. Re-thinking the establishment of the farmland soil health assessment system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 879-891.
- [18] 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: e011116.
- [19] 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.
- [20] LANDMARK. The Soil Navigator: Pillar1[EB/OL]. (2020-12-25)[2024-08-05]. http://landmark2020.eu/pillars/soil_navigator-pillar1/.
- [21] 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.
- [22] 张丹丹, 盛浩, 肖华翠, 等. 土壤健康的评价方法及应用 [J]. *土壤与作物*, 2023, 12(1): 109-116.
- ZHANG D D, SHENG H, XIAO H C, et al. Assessment methods of soil health and their applications[J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(1): 109-116.
- [23] 农业部. 农业部关于印发《耕地质量保护与提升行动方案》的通知: 农农发〔2015〕5号 [A/OL]. [2024-07-20]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/shiyiqi/201712/t20171219_6103894.htm. ◇