

## 耕地土壤健康评价指标与方法的发展与展望<sup>①</sup>

戴玉<sup>1,2,3,4</sup>, 葛国龙<sup>1,2,3</sup>, 师晶晶<sup>1,2,3,4</sup>, 张向前<sup>2,4</sup>, 赵小庆<sup>2,4</sup>, 迟文峰<sup>5</sup>, 高娃<sup>2,4,6\*</sup>,  
路战远<sup>1,2,4\*</sup>, 王建国<sup>2,4</sup>

(1 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031; 3 内蒙古自治区牧草与特色作物生物技术重点实验室, 呼和浩特 010021; 4 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010031; 5 内蒙古财经大学资源与环境经济学院, 呼和浩特 010051; 6 内蒙古自治区农牧业技术推广中心, 呼和浩特 010010)

**摘要:** 耕地土壤健康评价是摸清耕地健康状况、提出相应保护利用对策与建议的有效途径。本文系统总结了国内外土壤健康相关概念的发展历程, 对我国近 10 年耕地土壤健康评价研究中评价指标利用情况进行了汇总, 并按照土壤物理指标、化学指标、生物指标、生产管理指标、立地条件、气象条件和限制项指标进行了分类和利用频度分析, 深入探讨了指标关联性和土壤生物指标的重要性, 进而梳理了耕地土壤健康评价中的指标筛选及赋值和评价方法, 并在此基础上, 展望了未来我国基于不同评价尺度和评价对象的耕地土壤健康评价发展趋势。

**关键词:** 耕地; 土壤健康评价; 指标体系; 评价方法; 土壤生物指标

**中图分类号:** S154.1 **文献标志码:** A

## Development and Prospects of Indicators and Methods for Assessing Soil Health of Cultivated Lands

DAI Yu<sup>1,2,3,4</sup>, GE Guolong<sup>1,2,3</sup>, SHI Jingjing<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Xiangqian<sup>2,4</sup>, ZHAO Xiaoqing<sup>2,4</sup>, CHI Wenfeng<sup>5</sup>, GAO Wa<sup>2,4,6\*</sup>,  
LU Zhanyuan<sup>1,2,4\*</sup>, WANG Jianguo<sup>2,4</sup>

(1 School of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2 Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3 Inner Mongolia Key Laboratory of Herbage & Endemic Crop Biotechnology 010021, China; 4 Key Laboratory of Black Soil Protection and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot 010031, China; 5 College of Resources and Environmental Economics, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010051, China; 6 Inner Mongolia Autonomous Region Agricultural and Animal Husbandry Technology Promotion Center, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** The evaluation of cultivated soil health serves as an effective approach to ascertain the condition of arable land and formulate corresponding conservation and utilisation strategies and recommendations. This paper systematically summarises the developmental trajectory of soil health-related concepts both domestically and internationally. It compiles the utilisation of evaluation indicators in China's cultivated soil health assessment research over the past decade, categorising them according to soil physical indicators, chemical indicators, biological indicators, production management indicators, site conditions, climatic conditions, and limiting factors. It thoroughly examines indicator interrelationships and the significance of soil biological indicators, subsequently outlining indicator selection, weighting, and evaluation methodologies within soil health assessments. Building upon this foundation, the paper projects future trends in China's soil health evaluation practices, considering varying assessment scales and evaluation subjects.

**Key words:** Cultivated land; Soil health assessing; Indicator system; Evaluation methods; Biological indicator

①基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2021YFD1500203-6)和内蒙古科技领军人才项目(2022LJRC0010)资助。

\* 通信作者(lzyh281@163.com; gaowabu@126.com)

作者简介: 戴玉(1999—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士研究生, 主要从事耕地土壤健康评价和微生物分布特征研究。E-mail: 32208160@mail.imu.edu.cn

土壤不仅是作物的生长介质,还支持着生态系统其他基本功能与服务,例如,固碳、水净化、养分循环、人类健康与环境安全和生物多样性等,对维持地方、区域和全球环境质量起着关键作用,是不可再生资源。早期人们经常使用“土壤肥力”概念来描述土壤对于作物生产的支撑作用。20 世纪 70 年代,“土壤质量”开始在土壤学科相关文献中出现,表明学界对土壤的关注开始从数量层面过渡到质量层面。“土壤健康”是对土壤质量的进一步提升与拓展,是实现农业绿色发展、提升农产品生态质量安全和实现人与自然和谐共生的关键所在<sup>[1-4]</sup>。近年来,在定义和量化土壤健康以及土壤健康评价方面的研究呈指数增长,其定义和内涵随着时代发展仍在不断深化,如何保护和恢复土壤健康越来越受到重视,土壤健康已然成为全球土壤学和土壤相关学科的研究热点。“土壤健康”表示土壤是有生命力的、动态的生态系统,具有持续保证所有生命形式健康生长、维持生产力和提升环境质量的能力,强调了土壤自然资源、环境和生态属性与气候变化、动植物和人类健康等方面的重要性<sup>[5-7]</sup>。耕地健康是土壤健康的子集,两者之间彼此重叠又各有侧重,耕地健康的核心内容是土壤健康<sup>[8]</sup>,保护耕地的实质也是对土壤的保护。健康耕地是指肥力丰富、无污染、结构合理、利用变化小和资源丰富的土壤,表现为耕地生产力和耕地环境健康安全<sup>[9]</sup>。但由于自然灾害、工业化与城镇化发展、利用方式不当、制度不健全等问题,导致我国耕地健康面临有机质流失、土壤固碳能力下降、生物多样性降低等严峻现状<sup>[10-11]</sup>。通过耕地土壤健康评价,为耕地“体检”,明确耕地土壤健康影响因素,摸清健康底数,实现耕地健康和生态安全并重的管理目标,促进农业绿色可持续发展,对筑牢国家耕地数量、质量安全和粮食安全具有重要的战略意义。

从 2005 年开始,随着国内外对土壤健康和土壤健康评价方面的研究越来越多,许多国家也逐渐开始关注相关法律法规的建设问题<sup>[12]</sup>。彼时我国土地评价主要还是依据地力水平进行耕地质量评价,耕地土壤环境安全和污染防治等问题刚刚开始得到关注,耕地退化和受污染的重点地区及占补不平衡的耕地逐步被重视<sup>[13]</sup>。之后,国家有关部门相继发布《农用地质量分等规程》<sup>[14]</sup>、《耕地质量调查监测与评价办法》<sup>[15]</sup>、《全国土壤污染状况调查公报》<sup>[16]</sup>和《耕地质量监测技术规程》<sup>[17]</sup>等,并更新了土壤环境质量标准。2016 年,我国更是将可以表征土壤健康状况的指标纳入《耕地质量等级》<sup>[18]</sup>,包括清洁程度和

生物多样性指标,并定义了耕地健康的内涵<sup>[19]</sup>。2018 年,我国成立土壤健康工作组,加强对健康土壤培育及相关行动的关注度<sup>[5]</sup>。可见,土壤健康、人类健康等生物大循环的发展过程逐渐得到重视。与此同时,有关土壤健康和土壤健康评价的研究在全国大面积开展。例如,Shan 等<sup>[9]</sup>、孟庆香等<sup>[20]</sup>、赵瑞等<sup>[21]</sup>与张馨瑶和张凤<sup>[22]</sup>利用不同评价方法与指标体系对不同尺度不同区域的耕地健康进行了评价,进一步丰富了土壤健康评价的内容,同时又说明评价过程中评价方法和指标体系构建的复杂性与多样性。Lu 等<sup>[23]</sup>、Xue 等<sup>[24]</sup>与 Luo 等<sup>[25]</sup>进一步研究开发了评价土壤健康的新方法,并在土壤健康评价中应用了新指标,包括微塑料和  $\beta$ -葡萄糖苷酶等,明确了新指标在土壤健康评价中的积极作用。但全国不同地区地球化学背景差异大,导致自然条件区别大、特点鲜明,造成了不同地区作物种类、土壤理化性状、土壤类型和质地以及生产管理等方面的差别也很大<sup>[11-12,26-27]</sup>,因此,土壤中许多指标的空间分布在不同区域内存在着巨大差异,难以实现全国统一的管理标准。如何在不同评价尺度、土壤类型和耕作方式等因素的影响下,选择合适的指标并进行土壤健康评价,并获得合理的综合土壤健康指数,这仍然是一个难解的问题。

由此,本文系统总结了国内外关于土壤健康的定义与内涵,重点分析了我国近 10 年耕地土壤健康评价中评价指标的利用情况,深入探讨了指标关联性和土壤生物指标的重要性,并进一步梳理了耕地土壤健康评价中指标筛选、赋值和评价方法,展望了未来我国基于不同评价尺度和评价对象的耕地土壤健康评价发展趋势,以期为全面认识和合理利用耕地资源,应对自然条件复杂性、高标准农田建设以及基于多源数据的耕地土壤健康评价体系构建提供理论依据和科学支撑。

## 1 土壤健康的发展历史

“土壤健康”一词最早由美国土壤学家 Doran 等<sup>[28]</sup>界定。随着对土壤健康和土壤健康评价的研究,国内外土壤健康的定义与内涵仍在不断发展和深化(表 1)<sup>[3,18,29-41]</sup>。“土壤健康”现已获得全球认可,它将土壤描述成一个有生命的、动态的生态系统<sup>[42]</sup>,表示特定土壤资源中的生物、化学和物理条件,其功能由生产管理和生物多样性调节。有研究者认为,土壤质量不及土壤健康的意义广泛,土壤健康是可持续性的同义词<sup>[34]</sup>。迄今为止,在众多研究中,关于土壤健康的定义存在着明显差异,这主要是因为其被审

视的角度不同。但可以确定的是,一个被认可和接受的健康土壤概念至少包括以下几个方面:首先,它应该具有良好的物理结构;其次,具备一定程度的生物多样性;然后,还应具备足够的抗蚀性和缓冲能力,以抵

御自然灾害和人为活动带来的压力。这些核心要素也构成了一个综合评价体系,用以衡量和改善土壤健康状况。虽然具体指标体系的构建会受地域特征的影响,但这些共性却被所有土壤健康研究者所共同关注。

表 1 土壤健康定义与内涵  
Table 1 Soil health definitions and connotations

发展时期	土壤健康的定义与内涵	国家或作者及发表时间
20 世纪 80—90 年代	土壤支撑作物生长而不损害环境的能力	加拿大(1980) <sup>[29]</sup>
	土壤作为重要的生命系统行使各种功能的能力,以及维持生产植物性和动物性产品的能力	Trutmann 等(1992) <sup>[30]</sup>
	土壤在生态系统和土地利用边界内作为重要生命系统发挥作用的能力,以维持植物和动物的生产力,维持或提高水和空气质量,并促进植物和动物健康	Doran 等(1996) <sup>[31]</sup>
	土壤维持土地自身正常的新陈代谢,保证土地自身的恢复能力	陈美球和赵小敏(1998) <sup>[32]</sup>
21 世纪初期	土地健康是具有自我调节与更新能力	Aldo Leopold (1999) <sup>[33]</sup>
	土壤最大限度减少土传植物疾病生物的数量及有关疾病的发生,最大限度地减少、控制土传昆虫或者其他害虫的数量和活动范围	Doran 和 Zeiss(2000) <sup>[34]</sup>
	土壤在一个生态系统中保持或提高生物多样性和水体质量、提高生物生产力的能力	Abrahams(2002) <sup>[35]</sup>
	土壤处于一种良好或正常的结构和功能状态及其动态过程,能够提供持续而稳定的生物生产力,维护生态平衡,保持环境质量,能够促进植物、动物和人类的健康,不会出现退化,且不对环境造成危害的动态过程	章家恩(2004) <sup>[36]</sup>
	土壤可以生产出具有健康效益的动植物产品,可以改善水和空气的质量,可以抵抗污染物,还可以促进生物体的健康	周启星(2005) <sup>[37]</sup>
21 世纪近期	土壤健康被呈现为一种综合性属性,它反映了土壤对农业活动、农业产出的响应能力以及提供其他生态系统服务的能力	Kibblewhite 等(2008) <sup>[38]</sup>
	土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要有生命生态系统,持续发挥其功能的能力	美国农业部(2014) <sup>[39]</sup>
	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	中国《耕地质量等级》(2016) <sup>[18]</sup>
	土壤对所有形式的生命持续提供生态服务功能的能力	欧盟土壤健康和食物行动委员会(2020) <sup>[40]</sup>
	土壤持续保持陆地生态系统生产力、生物多样性和环境服务的能力	联合国粮农组织土壤跨政府技术小组(2020) <sup>[41]</sup>
	土壤微生态系统在维持自身生命活力的前提下,为动植物提供丰富的营养,维持较高的产能水平,通过系统韧性、功能发挥抵御外界扰动,实现低碳目标的能力	于法稳和代明慧(2024) <sup>[3]</sup>

土壤健康定义与内涵的发展提高了人们对土壤在粮食安全、环境服务能力、绿色农业实现和可持续发展中重要作用的认识。只有对土壤健康进行全面了解,才能以最有效的经济、环境和社会可接受的方式去指导土地利用和土壤管理。现今我国土壤退化问题日益严重,主要包括水土流失、土壤沙化、土壤盐碱化、土壤贫瘠化、土地污染等。耕地土壤退化会导致土壤健康程度下降,对农业可持续发展构成巨大威胁<sup>[43]</sup>。在退化耕地土壤治理时,首先要开展耕地土壤健康评价,了解研究区域的耕地健康状况,才能制定合理的治理办法。在耕地土壤健康评价过程

中,最重要的是构建评价指标体系和选取评价方法。因此,研究和开发因地制宜的耕地土壤健康评价技术是亟待解决的问题。

## 2 耕地土壤健康评价指标

### 2.1 评价指标的选取原则

耕地土壤健康作为一个复杂的功能实体,不能够直接测定<sup>[44]</sup>,而是通过选取土壤理化指标、生产管理指标、环境特征指标和生物指标以及其他指标,来构建评价指标体系,对耕地土壤健康状况进行定性或定量的推测。但是,选择一种或几种与土壤相关的指



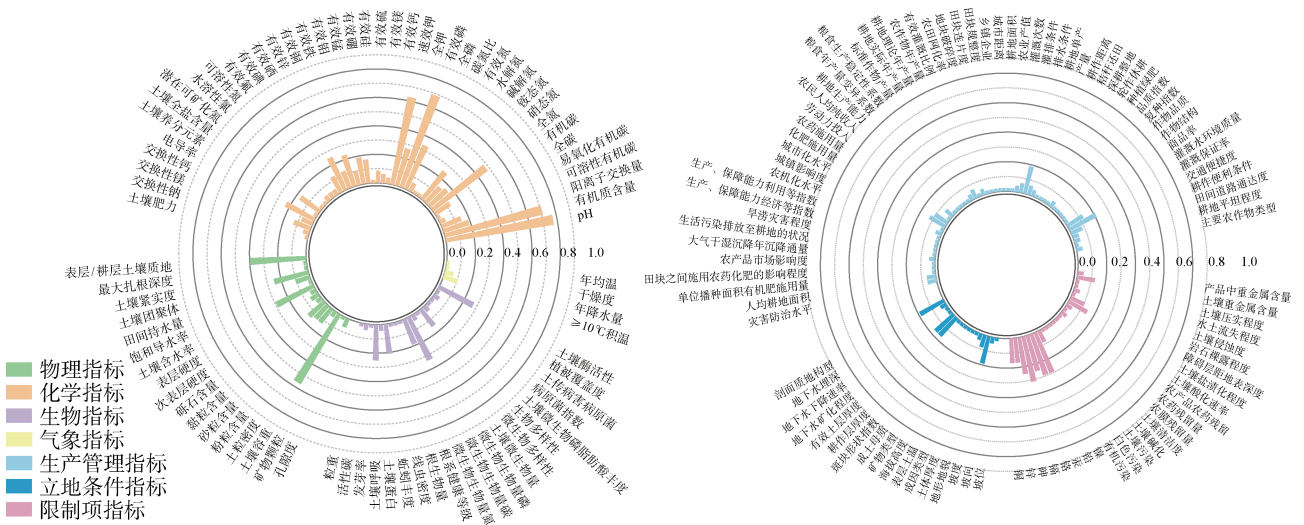


图 3 耕地土壤健康评价中不同类型指标使用率

Fig. 3 Utilization rates of different types of indicators in assessment of cultivated land soil health

化学指标有土壤碱解氮、全磷、全钾、电导率、有效锌、有效铁,物理指标有表层/耕层土壤质地、团聚体、含水率,生物指标有土壤呼吸、蚯蚓丰度、微生物生物量碳、微生物生物量氮,土壤重金属有镉、铬、汞、砷、铅;其余指标使用频率均小于 20%。

从指标分类看,48 篇文献中指标体系构建时选取 >2 个化学指标的文献数量约占 88%,>2 个物理指标的文献数量约占 42%,>2 个限制项指标的文献数量约占 40%,>2 个生产管理指标的文献数量约占 33%,>2 个生物指标的文献数量仅占 27%。可见,耕地土壤健康量化指标更多考虑的是土壤化学和物理指标。虽然一些生物指标、生产管理指标的使用频率越来越高,但总体来说相关研究依然较少,这可能与生物指标和生产管理指标本身获取难、成本高有关。

随着社会的发展,人们对土壤健康和食品安全的需求日益增加,而土壤微生物和农田生产管理与土壤健康和食品安全有着密切关系。因此,完善土壤生物指标和生产管理指标的获取方法,使其达到易获取显得尤为重要。对于生产管理指标,由于管理对象和实现目标的差异,指标内容逐渐多元化,在田块属性、耕作措施、种植结构、农田管理、生产效益等方面均有涉及。因此,对土壤健康有直接影响的生产管理指标的选取、精准获取方法和赋值方法等仍需进一步研究;对土壤生物指标,需进一步聚焦于土壤生物指标的挖掘与利用,明晰不同尺度下土壤生物指标的选取和获取途径。这对我国耕地土壤健康评价指标体系的构建具有重要意义。

### 2.3 耕地土壤健康评价指标关联性

从指标分类来看,土壤理化、生物和生产管理等指标密切相关。有研究发现,通过深耕、秸秆还田等

耕作管理方式可增加土壤黏粒成分,进而提高土壤阳离子交换量(CEC),能使土壤质地变细和耕层厚度增加,更好地吸附和保持养分,且 CEC 与 pH、有机质均存在显著相关性<sup>[45-46]</sup>。覆盖作物可以减少土壤侵蚀,增加土壤通气性和水分渗透性,进一步促进养分迁移和转化,为微生物和土壤动物的发展和活动提供更有利的生存条件<sup>[47]</sup>。土壤孔隙度影响土壤水分保持能力,进而影响微生物呼吸和代谢活动,最终对土壤碳循环与稳定,以及反硝化等生态系统过程产生影响<sup>[48]</sup>。土壤微生物不但参与土壤养分循环、温室气体排放以及土壤污染物降解<sup>[49]</sup>,还通过改变土壤性质或构建矿物结构来改变土壤 pH、矿物成分、团聚特征和土壤水文等环境因子<sup>[50]</sup>。同时,土壤 pH、有机碳影响土壤微生物多样性与生态系统功能,是土壤细菌群落组成和多样性驱动因素之一,但土壤真菌多样性与 pH 的相关性较弱<sup>[51-52]</sup>。此外,不同土地利用方式也会通过改变土壤 pH、土壤养分含量、植被类型、土壤类型等,进而影响土壤微生物群落结构<sup>[53-54]</sup>。可见,土壤理化、生物和生产管理等指标存在复杂的相关关系,这也表明土壤生物指标是反映土壤健康状况的敏感指标。

根据 48 篇文献的指标关联性网络分析发现,土壤健康评价指标选取时,除了常规理化指标,土壤生物指标和重金属指标也是指标选取热点(图 4、图 5)。其中,涉及生物指标的文献共 36 篇,常见的生物指标包括土壤呼吸、蚯蚓丰度、微生物多样性、微生物生物量碳氮磷等,说明土壤生物指标是土壤健康指标评价体系的重要组成部分,对于表征土壤健康状况起着关键作用。涉及土壤重金属的文献共 26 篇,一方

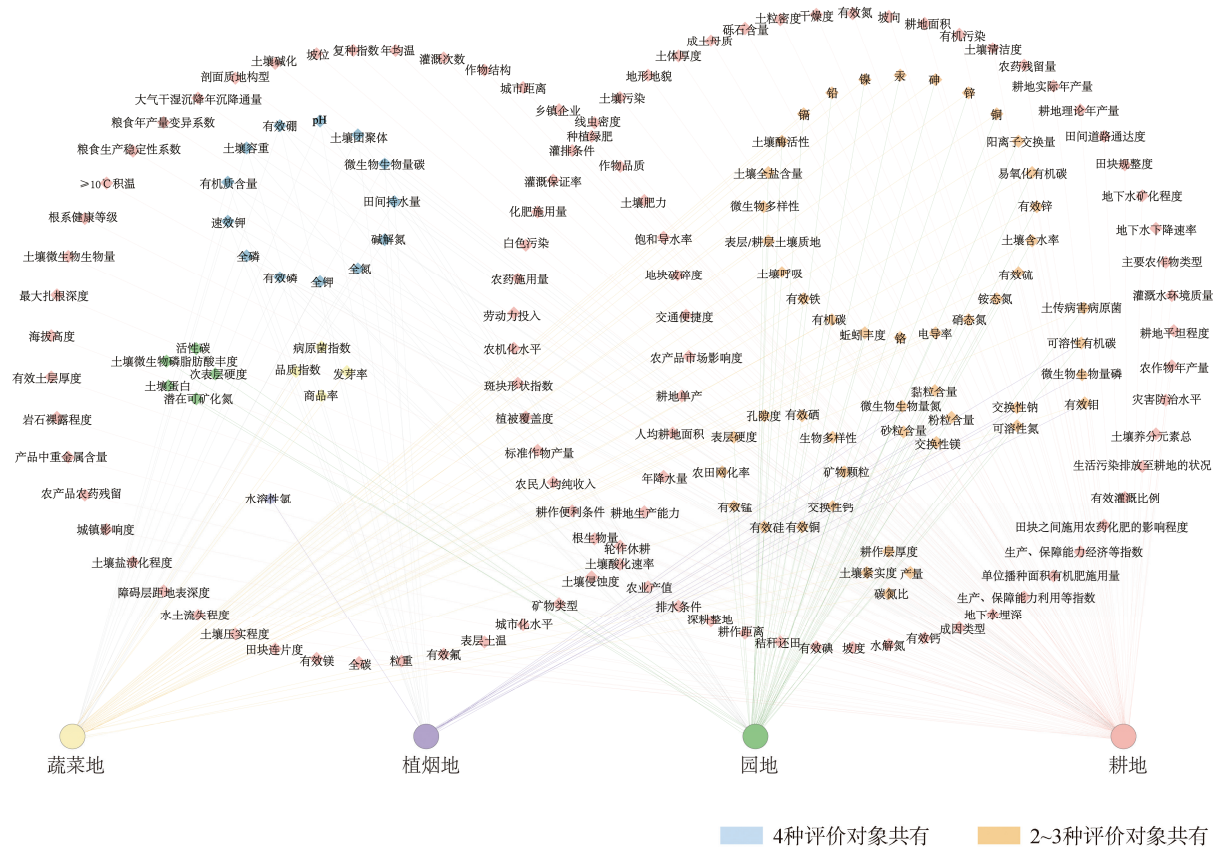


图 4 不同评价对象指标选取关联性网络图

Fig. 4 Correlation network diagram of indicator selections for different evaluation objects

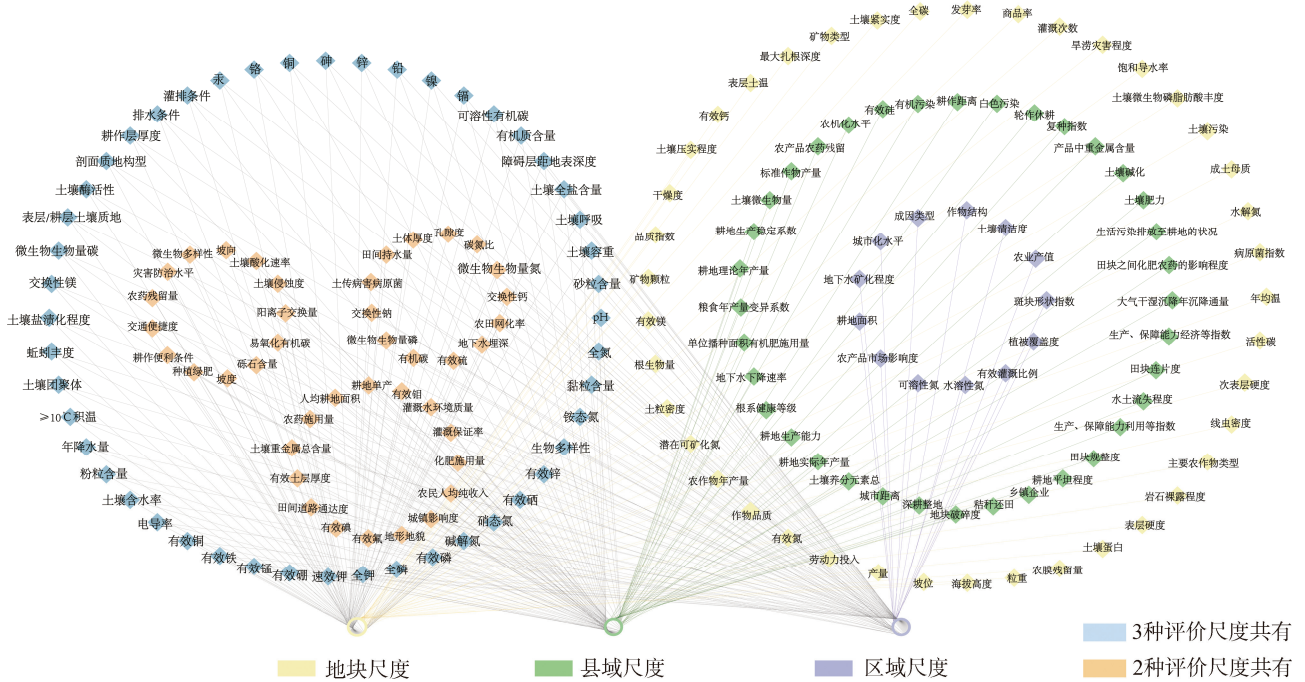


图 5 不同评价尺度指标选取关联性网络图

Fig. 5 Correlation network diagram of indicator selections for different evaluation scales

面因为重金属积累会影响土壤养分、结构和功能，导致作物减产和生态失衡；另一方面土壤重金属通过农

作物(如水稻、小麦、蔬菜)以及环境暴露等途径，造成人类健康风险<sup>[55-56]</sup>。

将 48 篇文献按照评价尺度和评价对象对指标进行分类分析发现,针对不同评价尺度和对象,在常规指标的基础上增选的指标具有明显差异(图 4)。此处,不同评价对象中的耕地指种植大田作物的地块或县域尺度的耕地,蔬菜地指设施蔬菜种植地,植烟地指种植烟草的耕地,园地指种植柑橘、青梅等果树的园地。从不同评价对象的土壤健康评价指标体系构建来看,共有指标数量明显低于不同尺度健康评价,说明不同评价对象的指标选取工作较为复杂,考虑因素较多,与不同土地利用类型及其耕作制度下土壤理化性质、施肥施药等生产管理措施以及地质背景等有关。对耕地和蔬菜地、园地、植烟地以及茶叶地等非粮化耕地进行土壤健康评价时,需考虑种植作物种类对中微量元素及其他元素的敏感性。例如,油菜是对硼元素比较敏感的作物<sup>[57]</sup>,有效硼可以促进油菜的根系生长和抗逆性,对油菜地进行土壤健康评价时会重点考虑土壤有效硼指标;烟叶是忌氯作物,氯含量高低对其品质和产量有重要影响<sup>[58]</sup>,因此植烟地的土壤健康评价除选择常规理化指标外,还会选择水溶性氯离子指标。

本文中县域尺度的地理范围是以县为基本单位,而区域尺度是包含多个县级行政区或更大面积的地理范围。对不同尺度(包括地块、县域和区域尺度)耕地土壤健康评价指标分析发现,在选择常规指标的基础上,不同尺度分析增选指标也具有明显的差异(图 5)。地块尺度选取指标更多关注的是具体生产管理措施对土壤健康的影响,如种植面积、产量、灌溉次数、农膜残留等较详细的管理指标。在县域尺度上,更多关注水土流失程度、白色污染、农机化水平、城镇影响程度、道路通达度等定性指标和耕地年理论产量、田块平整度、人均耕地等定量指标。在区域尺度上,个性化指标相对较少,选择土壤清洁度、有效灌溉比例、耕地面积、作物结构等指标较多。因为广域空间数据获取困难<sup>[19]</sup>,一定程度上制约了区域尺度的指标选取范围,甚至影响大空间尺度上耕地土壤健康评价研究的发展。本研究同时发现,评价尺度中的县域尺度和评价对象中的耕地,其土壤健康评价指标选取范围均是最宽泛和复杂的。

综上所述,耕地土壤健康评价指标之间存在着复杂的关联性,未来研究需进一步结合先进监测技术和数据分析方法深入探讨指标之间的定性与定量关系,建立更加完善的耕地土壤健康评价模型,为准确评估耕地健康状况和制定合理的耕地管理策略提供科学基础。

## 2.4 生物指标

土壤生物之间以及与所处生态环境之间,均存在

复杂相关关系<sup>[59]</sup>。土壤生物在粮食生产、气候调节和病虫害防治等生态系统服务方面发挥着重要作用。并且,土壤有机质、碳储量和土壤养分等都随着土壤微生物群落组成及相关功能的变化而发生相应变化<sup>[34,60]</sup>。我国学者段莉丽<sup>[61]</sup>认为土壤生物群在维护土壤健康、保障耕地土壤可持续利用和调控生态环境安全等方面发挥着重要作用;在表征土壤健康程度的指标选取中,通过选择特定微生物指标,较早对耕地健康状况进行预测,与大量理化指标相比,更加简便和有效。邢益钊<sup>[62]</sup>与李玉娟等<sup>[63]</sup>认为蚯蚓、线虫作为土壤健康的优势指示生物,对土壤的理化性质和微生物活性有重要影响。因此,土壤生物多样性对于调节生态系统服务和维持土壤健康具有重要意义<sup>[64]</sup>。

国内外相关学者对土壤健康评价中生物指标的筛选展开了积极的研究。最早于 20 世纪 50 年代 Hofmann<sup>[65]</sup>提出用土壤酶活性作为生物指标来衡量土壤生产力。随后,周礼恺等<sup>[66]</sup>用聚类分析法论证了用土壤酶活性来总体表征土壤肥力的可行性。赵吉<sup>[67]</sup>通过筛选标志土壤生物学质量的土壤微生物生物量碳、基础呼吸量碳、潜在呼吸量碳、可浸提有机碳 4 个量化指标和基础呼吸商、潜在呼吸商、矿化商、呼吸活化商及腐殖化效率 5 个商值参数,提出了新的生物学指标体系。Krüger 等<sup>[68]</sup>构建了土壤呼吸潜力、微生物生物量碳、微生物生物量碳氮比、净氮矿化、细菌代谢潜力、蚯蚓丰度、微生物商和代谢商等组成的生物学指标体系。禹朴家等<sup>[69]</sup>基于土壤微生物生物量碳含量以及过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性变化等生物指标对土壤进行了健康评价。李炎龙等<sup>[70]</sup>研究表明,土壤微生物生物量库是体现土壤肥力和质量的重要生物指标。乔宇颖<sup>[71]</sup>分析研究区土壤微生物生物量、细菌  $\alpha$  多样性、真菌  $\alpha$  多样性、细菌群落和真菌群落组成,确定了预测和表征土壤健康的最优微生物评价指标。

综上所述,越来越多以土壤生物为基础来评估土壤健康状况的指标被广泛采用。但在耕地土壤健康评价中,土壤生物指标的选取和赋值还面临以下问题:土壤生物指标与耕地生态系统功能之间的联系不清晰,明确能够决定耕地土壤健康的核心生物成分、功能和过程,才能进一步选择适合的生物指标;在耕地土壤健康评价的生物指标监测过程中,土壤生物指标的阈值不明确,且缺乏评估土壤生物多样性与土壤功能之间关系的方法<sup>[72-74]</sup>;而且,土壤健康评价中的土壤微生物指标大多反映的是作物生产,对生态系统服务功能的影响和调控机制还不清晰<sup>[51]</sup>;同时,研究人员在不同地区进行评

价时会采用不同的生物指标,生物指标选取标准并不统一。加强生物指标研究,合理利用土壤生物资源,实时监测耕地土壤动态变化,改善耕地土壤健康状况,对实现农业绿色可持续发展具有重要意义。

### 3 土壤健康评价过程和方法

随着国内外对土壤健康评价的研究不断深入,评价对象和尺度等评价目标越来越多,其中不仅土壤健康评价指标体系在不断发生改变,评价过程中的评价方法和框架也在更新和发展。因此,评价时需要综合考虑指标选取、权重确定等评价过程中采用的数学模型和方法<sup>[8]</sup>。本文整理了国内外常见指标选取和赋值

的方法,并总结了土壤健康评价方法或框架的基本特点(表 2、表 3),发现国内外对于土壤健康的研

表 2 评价指标选取及权重确定方法

Table 2 Methods of selecting evaluation indicators and determining weights

评价过程	数学模型与方法
筛选评价指标	主成分分析、逐步回归分析、线性回归分析、层次分析、相关系数检验、灰色关联度分析、决策专家法等
确定指标权重	主成分分析、层次分析、偏相关分析、线性回归分析、逐步回归分析、灰色关联度分析、德尔菲法、隶属函数法、内梅罗指数法、熵权法、因素法、修正法、模糊数学法、累积正态分布函数等

表 3 土壤健康评价方法<sup>[75-79]</sup>

Table 3 Soil health evaluation methods

方法提出时间	方法名称	方法特点
20 世纪 70 年代以前	视觉土壤评估方法	较容易获得、实用便宜、可现场操作,但缺乏科学性
20 世纪 70—90 年代	土壤肥力分级法	将土壤理化属性综合成为一个或较少的几个指标来代表全部土壤理化性状
	模糊综合评价法	能较好解决模糊和难以量化的问题,结果清晰,适合各种非确定性问题的解决
	聚类分析法	将多个指标看成一个整体,研究其对分类的综合影响
20 世纪末期	土壤质量综合评价法	建立各个元素的评价标准,每个元素的权重由地理、社会和经济因素决定,利用乘法运算计算出土壤质量
	土壤质量动力学方法	采用动态评价方法,利用系统动态学特征测量其土壤质量的可持续性
21 世纪初期	多变量指标克里格法(Multiple variable indicator Kriging, MVIK)	将单个土壤质量指标综合成土壤质量指数,再通过引入管理措施、经济和环境限制因子,评价范围达到从农场到地区水平
	新西兰土壤指标(Soil indicators, SINDI)法	易于操作,但存在区域局限性,没有充分考虑其他属性来制定综合指标
	土壤管理评估框架(Soil management assessment framework, SMAF)法	全面反映土壤健康状态,但评价指标选择并不固定,与其他尺度相比,区域尺度的准确性较低
	康奈尔土壤健康评价(Comprehensive assessment of soil health, CASH)法	可全面反映土壤健康状况,但指标权重没有考虑到将属性整合到最终土壤健康指数中
	耕地地力综合评价法	指标繁多,没有形成统一的评价指标体系,使得各县域之间的评价结果可比性不强
	M-SQR(Muencheberg soil quality rating)法	需大量样本数据,尤其是特定区域、特定功能评估时
	HSHT(Haney soil health test)法	适用性有限,需针对不同种植制度、人为管理和自然环境条件,进一步改进
21 世纪近期	全球土地潜力知识系统(Global land-potential knowledge system, LandPKS)	允许了解土地并在世界上任何特定位置生成特定地点的数据
	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,但整体评价过程复杂且耗时
	耕地质量评价方法	较全面反映土壤健康状况,但缺乏土壤生物指标,且实际应用操作困难,指标体系量化关系仍不完善
	土壤健康评估协议与评价(Soil health assessment protocol and evaluation, SHAPE)法	测定指标相对较少、易于操作,但适用性有待检验
	基于多目标协同的土壤健康评价方法	基于区域土壤-作物管理数据和生物学指标,结合快速无损测试技术、智能化信息技术手段,形成的多目标协同、适用于不同区域和作物体系的土壤健康评价方法

究多种多样,但总体来说,土壤健康评价是随着土壤质量评价而不断发展的。目前,我国最常用的土壤健康评价方法是基于多目标协同的土壤健康评价方法,涵盖新指标、新方法和新技术的结合,适用于不同评价尺度和评价对象。

目前,我国开展了大量利用新技术与数学模型等结合的方法综合进行耕地土壤健康评价的研究。例如,陈志凡等<sup>[80]</sup>运用熵值理论和模糊物元建模相结合的方法,建立了土壤健康评价模糊物元模型进行土壤健康综合评价。李沉澍等<sup>[81]</sup>采用主成分分析法来确定各指标的权重分配,应用 SPSS 13.0 软件分析并评价了长沙市土地健康状况。杨希越等<sup>[82]</sup>在包含质量、产能和环境的耕地健康评估框架的基础上,利用模糊物元法对各层次的各项要素进行权衡,实现了对研究区耕地健康的综合评价。单美<sup>[83]</sup>分析了中国南方粮食主产区耕地健康影响的构成要素及其相互关系,确定了当前利用水平下耕地健康状况,最终获得最佳耕地土地利用的最大效益。王考等<sup>[84]</sup>以内蒙古农牧交错区为研究区域,以遥感与地理信息系统为基础,采用层次分析法(Alytic hierarchy process, AHP)、Logistic 回归(又称逻辑回归)等理论与方法,对耕地健康状况及其制约因子进行了研究。孟庆香等<sup>[20]</sup>以质量、产能和环境为准则层,构建了耕地土壤健康评价指标体系,运用图层叠加法和层次分析法等,对研究区进行了耕地土壤健康评价。陈文广等<sup>[85]</sup>基于耕地系统内部的要素-过程-功能分析和耕地健康评估框架理论,构建了相应的指标体系,运用综合指数法、“1+X”累加模型和最小因子法等测算了研究区耕地健康状况。杨颖等<sup>[86]</sup>选取有机质、pH 和阳离子交换量等基础项指标,并纳入土壤侵蚀和土壤污染等限制项指标,运用灰色关联度方法,对研究区土壤健康现状进行了评价。张馨瑶等<sup>[22]</sup>以洞庭湖区域为研究对象,采用基于熵权法的 TOPSIS 模型测算分析了耕地健康状况。综上所述,新时期耕地土壤健康评价的研究逐渐变得基于多源数据、多元化、多目标协同和多学科交叉融合,这对我国不同地区耕地健康保护与利用具有重要意义。

#### 4 总结与展望

耕地土壤健康评价系统性强,因评价目的、尺度和评价对象的不同,评价指标和评价方法的选择有很大差别,国内外对土壤健康评价并没有建立统一标准。对于地块尺度的土壤健康评价,在共有指

标的基础上,评价体系中逐渐增加了劳动力投入、作物品质与产量、发芽率和商品率以及农膜残留量等详细的生产管理指标,土壤硬度和压实程度、土粒密度以及最大扎根深度等物理指标,根生物量、线虫密度和病原菌指数等生物指标。这说明更多研究开始关注作物生长状况、农产品品质和农田管理措施方面的问题,可根据地块利用和治理目标,构建相应的指标体系。并且在评价指标的获取方面,可通过对土壤和植株进行测试以精准获取和赋值。对于县域及更大尺度的土壤健康评价,评价体系中逐渐增加了化肥农药施用量、灌溉保证率等地块尺度的生产管理指标,以及水环境质量、地形地貌、有效土层厚度等立地条件指标,更注重区域环境变化和土壤健康管理的结合,为区域耕地保护利用宏观决策和治理提供了支撑。而在评价指标获取和赋值方面,以地块尺度的农户调查、历史资料数据获取和多源数据提取为主,在评价指标的精准获取和赋值方法方面仍需做大量的研究和探索,为全面认识和利用耕地资源,应对自然条件的复杂性,以及多源数据、多目标协同、多学科结合的耕地土壤健康评价体系构建提供理论依据。除此之外,大多数土壤健康评价在指标体系构建时考虑了土壤生物指标和土壤重金属指标,说明人们越来越重视土壤生物多样性和土壤重金属污染监测与处理对土壤健康的重要性。这对持续加强健康土壤建设行动的全球联动,以及在可持续发展背景下分享土壤健康提升方案,实现全球“大健康”和“土壤-作物-人类社会”的生态健康大循环奠定了基础。

对于耕地土壤健康评价研究未来还需从以下几方面深入探讨(图 6):①根据不同尺度和对象,缩小并集中耕地健康指标选择范围,构建不同“地块→县域→区域”生态区的最小耕地健康评价数据集,为评价多元化对象提供数据支撑;②明确生产管理指标、土壤生物指标对土壤健康的响应机制以及与其他指标的相互关系,为评价指标精确快速获取、指标分级赋值提供理论支撑;③结合区域特点,构建评价指标体系,因地制宜开展耕地土壤健康评价,制定不同生态区指标阈值和耕地健康红线,为实现区域土壤监测和预警提供参考;④通过定位监测,开展针对不同评价尺度和对象的多目标协同耕地健康评价研究,采用多样化和智能化的技术手段,制定一体化的监测和预警体系,为农业绿色和高质量发展的相关政策制定提供依据。

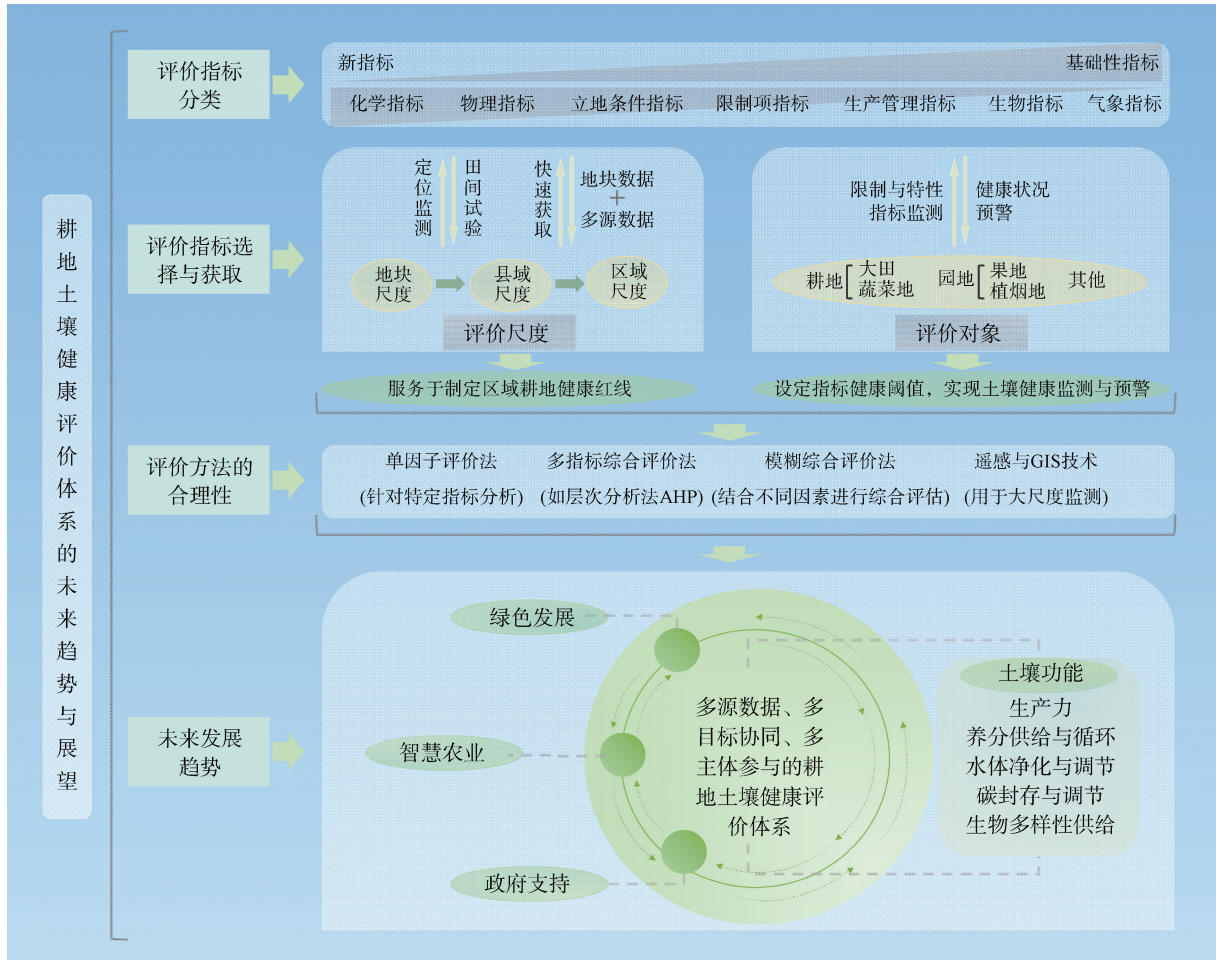


图 6 耕地土壤健康评价体系未来趋势与展望框架图

Fig. 6 Future trends and outlook frameworks of cultivated land soil health evaluation system

参考文献：

[1] 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.

[2] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(10): 544–553.

[3] 于法稳, 代明慧. 土壤健康: 提升生态农产品供给能力的根本[J]. 社会科学辑刊, 2024(3): 203–211.

[4] Powlson D S. Soil health—useful terminology for communication or meaningless concept? or both?[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(3): 246.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Karlen D L, Veum K S, Sudduth K A, et al. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104365.

[8] 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.

[9] Shan M, Wang X. Trade-off analysis between the indexes of cultivated land health evaluation[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 227: 03001.

[10] 张佳宝, 孙波, 骆永明, 等. 开展健康耕地建设行动 夯实粮食安全基础[J]. 中国农村科技, 2023(1): 21–22.

[11] 郎文聚, 吴克宁, 张小丹. 中国耕地健康问题及防治对策[J]. 中国发展, 2019, 19(4): 34–37.

[12] 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.

[13] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094–1109.

[14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用地质量分等规程: GB/T 28407—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

[15] 农业部: 《耕地质量调查监测与评价办法》发布[J]. 农业科技与信息, 2016(19): 92.

[16] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689–1692.

[17] 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: 中国农业出版社, 2019.

- [18] 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.
- [19] 杨洪钧, 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.
- [20] 孟庆香, 张莉坤, 郟文聚, 等. 黄土丘陵区典型县域耕地健康评价: 以河南宜阳县为例[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(1): 11–19.
- [21] 赵瑞, 吴克宁, 杨洪钧, 等. 基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 333–343.
- [22] 张馨瑶, 张凤. 洞庭湖区域耕地健康评价研究[J]. 乡村科技, 2023, 14(4): 154–157.
- [23] Lu H Y, Chen X Y, Ma K, et al. Soil health assessment under different soil and irrigation types in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Catena*, 2024, 235: 107655.
- [24] Xue R, Wang C, Liu M L, et al. A new method for soil health assessment based on Analytic Hierarchy Process and meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2771–2777.
- [25] Luo Z X, Li A Z, Wang H M, et al. The frontier of microplastics and nanoplastics: Soil health and carbon neutrality[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 11–13.
- [26] 杨峥, 彭敏, 赵传冬, 等. 中国土壤 54 项指标的地球化学背景与基准研究[J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 380–402.
- [27] 王芳, 李炳元, 田思雨, 等. 中国生态地理区划更新和优化[J]. 地理学报, 2024, 79(1): 3–16.
- [28] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M A. Soil health and sustainability[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 1996: 1–54.
- [29] Gregorich L J, Acton D F. The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada[M]. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1995.
- [30] Trutmann P, Paul K B, Cishabayo D. Seed treatments increase yield of farmer varietal field bean mixtures in the central African Highlands through multiple disease and beanfly control[J]. *Crop Protection*, 1992, 11(5): 458–464.
- [31] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M. Soil health and sustainability[M]//Sparks D L. *Advances in Agronomy*. Vol. 56. San Diego: Academic Press, 1996: 1–54.
- [32] 陈美球, 赵小敏. 土地健康与土地保护[J]. 中国土地科学, 1998, 12(4): 19–21, 33.
- [33] Callicott I B, Freyfogle E T. Aldo Leopold for the health of the land (previously unpublished essays and other writings)[M]. Washington: Island Press, 1999.
- [34] 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.
- [35] Abrahams P. Soils: their implications to human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 291(1/2/3): 1–32.
- [36] 章家恩. 土壤生态健康与食品安全[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(4): 1–4.
- [37] 周启星. 健康土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 19–26.
- [38] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 685–701.
- [39] Brevik E C. A Brief History of the Soil Health Concept [EB/OL]. [2025-07-22]. <https://profile.soils.org/posts/field-and-historical-notes-a-brief-history-of-the-soil-health-concept>.
- [40] Mission Board Soil Health and Food. Caring for soil is caring for life[OL]. 2020. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4ebd2586-fc85-11ea-b44f-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-183355619>.
- [41] FAO ITPS. Towards a definition of soil health[OL]. 2020. <http://www.fao.org/3/cb1110en/cb1110en.pdf>
- [42] Congreves K A, Wu Q. Using soil classification to improve interpretation of biological soil health indicators[J]. *Geoderma*, 2024, 451: 117085.
- [43] 赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 618–625.
- [44] 赵瑞. 县域耕地健康评价理论与实证研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [45] 杨树俊, 韩张雄, 王思远, 等. 土壤阳离子交换量与有机质、机械组成的关系[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2799–2805.
- [46] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 9–18.
- [47] Haruna S I, Nkongolo N V. Cover crop management effects on soil physical and biological properties[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 29: 13–14.
- [48] Li Z, Kravchenko A N, Cupples A, et al. Composition and metabolism of microbial communities in soil pores[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 3578.
- [49] 孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331–347.
- [50] Philippot L, Chenu C, Kappler A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22(4): 226–239.
- [51] Rousk J, Bååth E, Brookes P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(10): 1340–1351.
- [52] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2858.
- [53] 胡天龙, 刘红涛, 张燕辉, 等. 不同土地利用方式对土壤细菌群落结构和构建过程的影响[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1262–1273.
- [54] 赵治东, 孙龙辉, 赵明松, 等. 土地利用变化对土壤类型的影响——以太仓和昆山两市为例[J]. 土壤, 2024, 56(4): 897–905.
- [55] Wang C C, Zhang Q C, Yan C G, et al. Heavy metal(loid)s in agriculture soils, rice, and wheat across China: Status assessment and spatiotemporal analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163361.
- [56] 黄国锋, 王中伟, 谢志宜, 等. 基于 Meta 分析的广东省农用地土壤重金属污染现状[J]. 中国环境科学, 2025, 45(3): 1431–1443.

- [57] 邹娟, 鲁剑巍, 廖志文, 等. 湖北省油菜施硼效果及土壤有效硼临界值研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 752-759.
- [58] 黄跃, 谢晏芬, 朱宣全, 等. 植烟区烟叶氯含量风险评估及影响因素分析[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6): 206-213.
- [59] 朱永官, 陈保冬, 付伟. 土壤生态学研究前沿[J]. 科技导报, 2022, 40(3): 25-31.
- [60] Labouyrie M, Ballabio C, Romero F, et al. Patterns in soil microbial diversity across Europe[J]. Nature Communications, 2023, 14: 3311.
- [61] 段莉丽. 土壤健康微生物多样性评价指标体系的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2009.
- [62] 邢益钊. 浅谈蚯蚓对土壤环境的指示作用及其功能的影响[J]. 热带农业科学, 2020, 40(12): 87-90.
- [63] 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.
- [64] Djemiel C, Dequiedt S, Karimi B, et al. Potential of metagenomics to provide modern microbial indicators for monitoring soil quality and securing food production[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 889788.
- [65] Hofmann E. Enzymreaktionen und ihre Bedeutung für die Bestimmung der Bodenfruchtbarkeit[J]. Zeitschrift Für Pflanzenernährung, Düngung Bodenkunde, 1952, 56(1/2/3): 68-72.
- [66] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 413-418.
- [67] 赵吉. 典型草原土壤健康的生物学优化监测与量化评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2005.
- [68] Krüger I, Chartin C, van Wesemael B, et al. Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 568-578.
- [69] 禹朴家, 范高华, 韩可欣, 等. 基于土壤微生物生物量碳和酶活性指标的土壤肥力质量评价初探[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(1): 163-169.
- [70] 李炎龙, 刘梓雅, 严景, 等. 华北平原典型农田土壤微生物生物量碳氮磷库的县域分布特征——以河北省曲周县为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 235-245.
- [71] 乔宇颖. 浙江麦区土壤健康评价微生物指标筛选研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [72] 徐丽慧. 生机勃勃的土壤微生物[J]. 科技视界, 2022(23): 1-3.
- [73] Ezeokoli O T, Bezuidenhout C C, Maboeta M S, et al. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa: Bioindicators of soil ecosystem restoration[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1759.
- [74] 焦硕, 戚杰军, 刘纪爱, 等. 旱区土壤微生物组与土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1350-1362.
- [75] Franco H H S, Guimarães R M L, Tormena C A, et al. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 190: 61-69.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 王倩倩. AHP 法与模糊综合评价在土壤质量评价中的应用[J]. 环境与发展, 2016, 28(4): 27-31.
- [79] 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.
- [80] 陈志凡, 李勤奋, 赵焯. 基于熵权的模糊物元模型在农用地土壤健康评价中的应用[J]. 中国土地科学, 2008, 22(11): 31-37.
- [81] 李沅澍, 朱红梅, 刘庆, 等. 基于主成分分析的长沙市土地健康评价研究[J]. 农业科技管理, 2012, 31(5): 12-16.
- [82] 杨希越, 张明, 刘友兆, 等. 基于模糊物元分析法的耕地健康评价[J]. 经济研究导刊, 2015(17): 40-43.
- [83] 单美. 耕地健康评价及其应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [84] 王考, 姚云峰, 包玉海, 等. 内蒙古农牧交错带县域耕地健康评价及障碍因素分区研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2020, 52(1): 153-164.
- [85] 陈文广, 孔祥斌, 温良友, 等. 基于需求-功能-维度的耕地健康评价指标体系构建与应用[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(5): 106-117.
- [86] 杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461-475.

(责任编辑: 于 飞)