

DOI: 10.11766/trxb202104090063

司绍诚, 吴宇澄, 李远, 涂晨, 付传城, 骆永明. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 625–642.

SI Shaocheng, WU Yucheng, LI Yuan, TU Chen, FU Chuancheng, LUO Yongming. The Current Research Progress and Prospects of Cultivated and Grassland Soil Health—A Review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 625–642.

耕地和草地土壤健康研究进展与展望*

司绍诚^{1, 3}, 吴宇澄², 李远¹, 涂晨¹, 付传城², 骆永明^{1, 2, 3†}

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东烟台 264003; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤是地球关键带的重要组成部分, 为维持和保障农业生产、植物生长、动物栖息、生物多样性和环境质量提供了基本服务, 是链接整个自然生态系统的核心要素之一。增强土壤健康对实现可持续发展目标至关重要, 近年来在全世界范围内皆受到更多的重视和更广泛的研究。耕地和草地是当前地球上最大的土地利用类型, 分别约占地球上无冰土地 12% 和 26%。同时, “田” 和 “草” 是 “山水林田湖草生命共同体” 中的重要组成部分, 维护耕地和草地两种农牧地类型土壤健康对于维持整个自然生态系统健康和实现可持续发展具有重要意义。近二十年来, 围绕这两种土地利用类型土壤健康的相关研究呈现兴起态势。中国在此研究领域虽比较活跃, 但研究成果的影响力还有待加强, 且还未从国家层面建立一个统一的土壤健康评估体系。本文首先厘清了土壤健康内涵的演变, 并聚焦于以上两个典型的农牧地类型, 归纳了当前国内外相关研究的热点内容; 其次, 梳理了当前国内外土壤健康评估研究工作现状, 同时总结了中国在土壤健康维护方面已有的工作基础; 最后, 对我国未来土壤健康评估研究提出了建议和展望, 以期改善耕地和草地土壤功能、维护我国土壤健康提供依据和方法。

关键词: 土壤健康; 耕地; 草地; 可持续发展; 生态系统功能

中图分类号: S154.1 文献标志码: A

The Current Research Progress and Prospects of Cultivated and Grassland Soil Health—A Review

SI Shaocheng^{1, 3}, WU Yucheng², LI Yuan¹, TU Chen¹, FU Chuancheng², LUO Yongming^{1, 2, 3†}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil is an essential component of the Earth's critical zone, offering series of essential ecosystem services (i.e., agricultural production, plant growth, animal habitat, biodiversity, carbon sequestration, and environmental quality). Soil stands for a nexus of the whole natural ecosystem. Enhancing soil health is vital to achieving sustainable development goals; therefore, scientific researchers have paid much attention to that over the world. Cultivated land and grassland are currently the most extensive land-use

* 国家自然科学基金重大项目(41991330)资助 Supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 41991330)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ymluo@issas.ac.cn

作者简介: 司绍诚(1992—), 女, 青海西宁人, 博士研究生, 主要从事农用地土壤健康评估研究。E-mail: scsi@yic.ac.cn

收稿日期: 2021-04-09; 收到修改稿日期: 2021-06-17; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-08-11

types on the Earth, accounting for 12% and 26% of the ice-free land, respectively. Also, these two crucial components consist of the Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grass System theory. Therefore, keeping up the soil health status of these two land-use patterns has significant meaning for holding the whole natural ecosystem healthy and achieving sustainable development goals. In recent decades, the research focusing on the soil health of these two land-uses types is progressive worldwide. China is also relatively vibrant in this research field; however, the achievements have not made a difference. Additionally, a unified soil health assessment system has not yet been established at the national level. In this paper, firstly, the connotation and evolution of “soil health” was sorted out comprehensively. Then, focusing on the cultivated land and grassland, we highlighted the recent hotspots and advances in soil health globally. Secondly, we outlined several soil health assessment systems in different countries and sketched out series of fundamental works on soil health maintenance in China. Finally, we pointed out the new insights in the future to improve soil ecosystem functions and maintain the soil health of cultivated and grassland soils in China.

Key words: Soil health; Cultivated land; Grassland; Sustainable development; Ecosystem function

人类文明的发展离不开对土壤的依附。土壤健康 (Soil health) 概念的兴起和发展,很大程度上体现了人类在不同历史发展时期对土壤资源的认知水平,也体现了人类对可持续性发展意识的觉醒与深化。当前全球面临资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化及气候变化等重大挑战,在应对这些自然和经济社会的严峻考验时,土壤都承担着重要角色^[1]。联合国粮农组织 (FAO) 在 2015 国际土壤年提出了“健康土壤带来健康生活”的理念和行动,指出只有健康的土壤才能生产健康的食物,进而孕育健康的人类与社会。在此推动下,人们意识到土壤健康对实现和促进人类可持续发展的重要作用,其已逐渐成为被广泛关注的研究主题。近二十年来,“土壤健康”研究的紧迫性促使相关研究领域呈现兴起态势,并累积了较多的研究成果 (图 1a),研究方向丰富且多元。目前研究热点方向主要集中于:土壤生态系统服务与土壤有机碳储存、土壤生物区系与生物多样性、污染物 (尤其是重金属) 环境行为、植物生长、田间耕作措施与肥力提升等方面 (图 1c)。农牧用地是当前地球上最大的土地利用类型,占地球上无冰土地的 38%,其中耕地和草地分别约占 12%和 26%^[2],也是目前土壤健康研究着重关注的土地利用类型。聚焦于这两种用地类型,相关研究的发文量逐年提升,但围绕耕地的研究总体多于草地 (图 1b)。

中国耕地资源总量仅为 1.35 亿 hm^2 , 人均耕地仅 0.30 hm^2 (世界人均约 0.37 hm^2)^[3], 耕地土壤资源严重不足;与之相对的是,我国草地面积约 2.8~3.93 亿 hm^2 , 占国土面积的 40%^[4], 草地资源虽较为丰富,但其生产力较低^[4], 且过度放牧、乱开滥垦等问题,导致了草地退化、沙化、盐碱化面积的

日益扩大,严重损坏了草地生态系统^[5]。同时随着工业化、信息化、城镇化、农业现代化的同步发展,我国农牧地退化、资源利用率低和环境恶化等严重问题也日趋凸显^[6-7]。但与大部分发达国家所面临的处境不同,受制于紧张的农牧地资源 (尤其是耕地),我国需要在已经被“污染”的土壤上维持生产活动,并保证安全的农产品产出^[8]。在此背景下,保障土壤健康是维护我国农牧业可持续发展和资源生态环境安全面临的重大挑战。

目前,我国在该领域的研究虽比较活跃,但研究成果还缺少国际影响力 (图 1a)。本文对土壤健康的内涵进行梳理,并重点聚焦于耕地和草地两个典型的农牧地类型,综述了当前这两种用地类型土壤健康研究的热点内容,同时对农牧地土壤健康评估体系进行了梳理。结合该领域的发展现状,提出了对未来研究的展望,以期为我国建立健全的农牧地土壤健康评估体系、支持绿色可持续发展提供科学依据和方法学基础。

1 “土壤健康”的内涵及其发展

与“土壤健康”相关的术语有“土壤肥力”、“土壤质量”等。最初,人们用土壤肥力 (Soil fertility) 指土壤在作物生产中的作用,并注重土壤种植提供人类使用的粮食、燃料和纤维的能力,所以土壤肥力常被用来衡量土壤对于农业生产的适用性^[9-10]。随着研究人员对人类、动(植)物及环境健康之间相互联系认识的逐渐深入,仅侧重于以土壤肥力及农业生产为目的的土壤评估,已不再完全合适。20

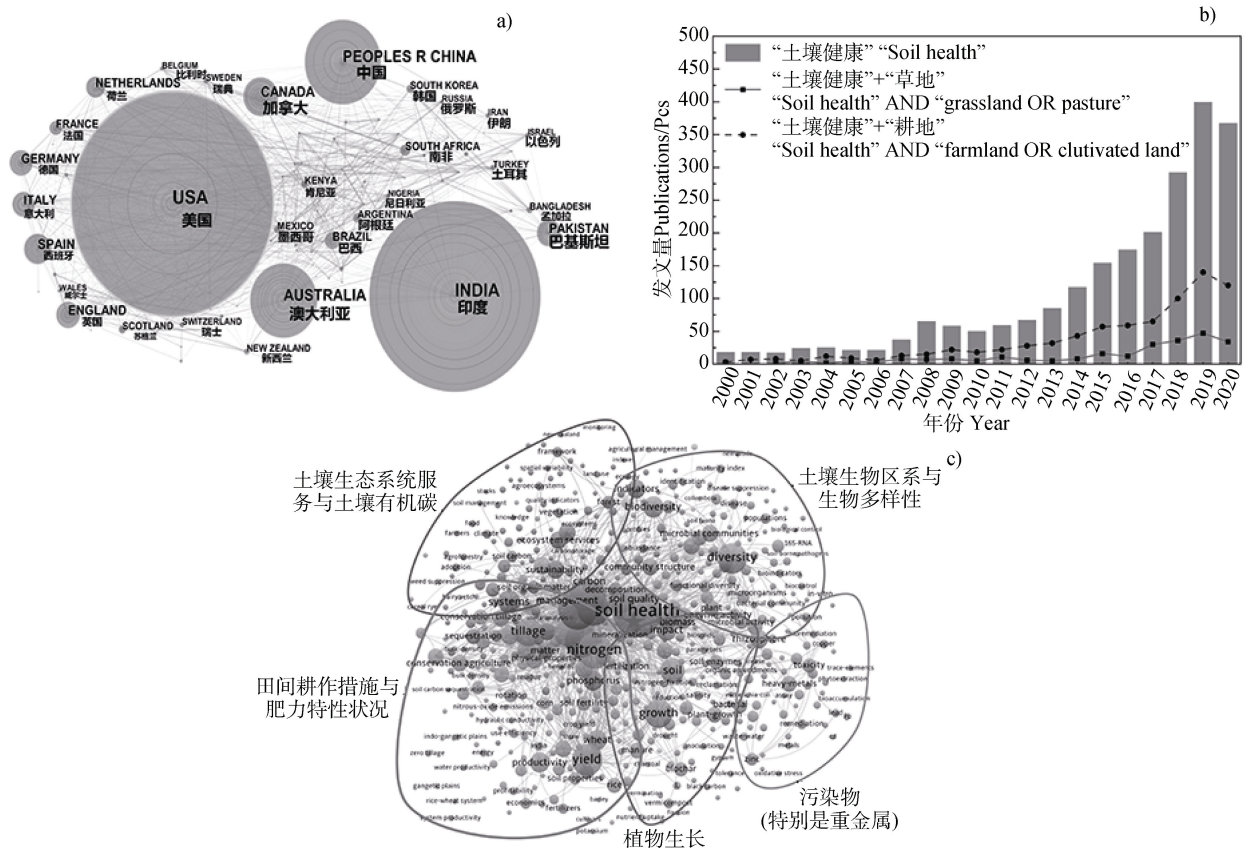


图 1 外文文献发文国家合作网络 (a); 基于 Web of Science™ 核心数据库以“土壤健康”为主题词的文献的发文章数 (2000—2020) (b); 土壤健康主题文献关键词关系共现网络 (c)

Fig. 1 Country collaborative networks of the research theme of soil health (a); Numbers of research publications with the theme of ‘Soil health’ based on Web of Science™ core database (WoS) during 2000-2020 (b); Key-word co-occurrence graph based on the theme of soil health (c)

世纪 70 年代初，提出了土壤质量 (Soil quality) 的概念^[11]，成为土壤健康 (Soil health) 一词的历史来源。Karlen 等^[12]于 1997 年将土壤质量定义为“土壤在生态系统范围内发挥作用以维持生物生产力，维持环境质量并促进动植物健康的能力”，它描述了土壤为农业生产发挥作用的背景状况。

随着人们对土壤资源认知的不断拓展和深化，产生了“土壤健康”的概念^[13]。虽目前还未有完全统一的定义，但一般认为土壤健康是指“土壤在生态系统和土地利用边界内，发挥重要生命系统的能力，以维持植物和动物的生产力，维持或改善水和空气质量，并促进植物生长和动物健康”^[13]。有学者认为“土壤健康”与“土壤质量”在内涵上属同义，两者之间可相互转换，但也有学者认为两者涉及的范围不同、各有侧重：“土壤质量”包括土壤对整个生态系统内水质和植物、动物健康的影响，通常强调与人类有关的生态系统服务或功能^[12-14]；

而“土壤健康”则更侧重生态属性，这些属性具有超出其生产特定作物的质量或能力的影响^[14]。我国学者董元华等^[15]认为土壤健康状态应更多从土壤生态系统的角度来考虑，具有生物活力及良好功能的土壤才是健康的土壤，所以土壤健康可定义为“在特定环境与目标用途下土壤功能可正常运转的能力或状态，其内容应包含土壤物理健康或形态健康、土壤化学健康/营养健康、土壤生物健康、土壤环境健康及土壤生态系统健康五个层级”。可见，土壤健康涉及和应用的范围和尺度更广。Lehmann 等^[16]进一步指出土壤健康应超出人类健康的范围，以实现更可持续性目标，即应包括整个星球健康。为了达到土壤健康的高阶目标——应对全球环境可持续性挑战^[17]，国际上提出了“土壤安全 (Soil security)”的概念，其通常用于政策背景下，涵盖了土壤管理相关的人类文化、金融资本、法律政策、社会福祉等多个方面^[16]，提供了一种解决人类面临

的环境问题的理论框架，并将土壤放在这种理论框架的核心位置^[18]。

图 2 示意了上述几个概念之间的关系。从中可见，在区分不同的空间应用尺度、生态系统服务功能以及利益相关者的前提下，几个概念之间既相互递进，又相互包含。就本文聚焦的耕地和草地两种农用地类型而言，相关土壤健康研究都会交叉论述

土壤质量的内容。其原因主要有两方面：一是由于目前土壤健康相关研究多数聚焦于较小尺度的景观/农场、田块等^[19]类别的土地利用类型；二是与耕地和草地密切相关的土壤功能包括提供初级生产力、水体调节与涵养、碳封存与调节、生物多样性和栖息地供给、养分供给与循环等^[20-21]，主要侧重于与人类有关的生态系统服务或功能。

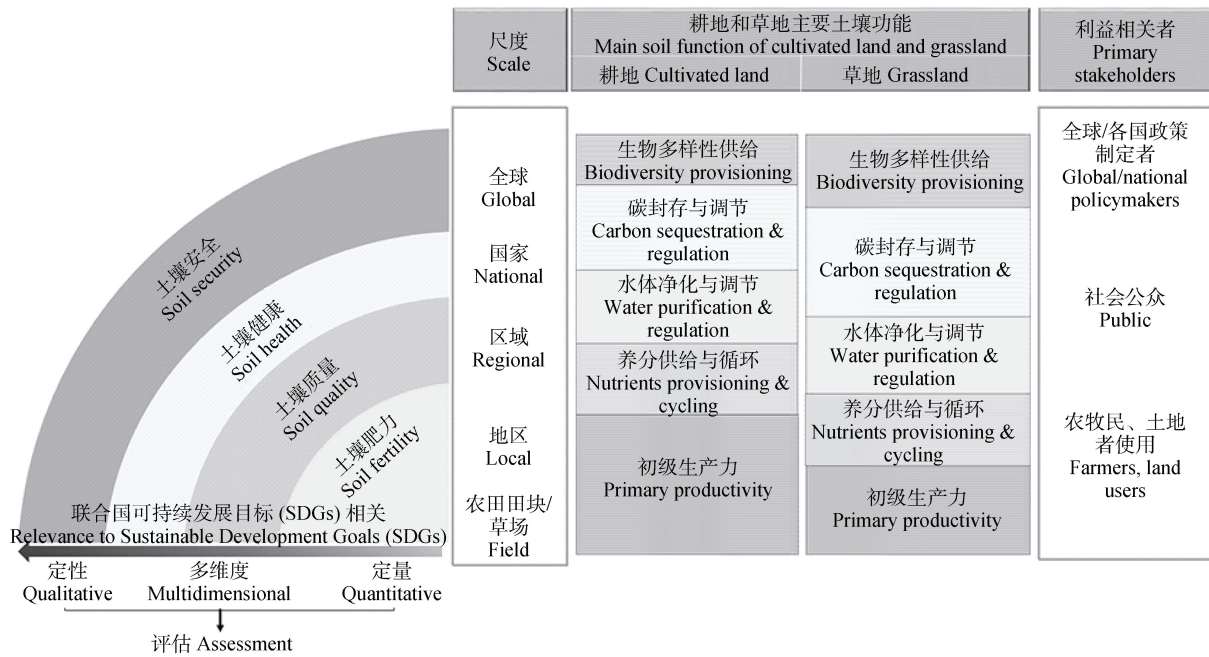


图 2 “土壤健康” 相关概念内涵之间关系图 (据 Lehmann 等^[16]修改)

Fig. 2 The relationship of the connotations of the concepts related to "soil health" (modified after Lehmann et al.^[16])

2 耕地及草地土壤健康的研究热点主题

根据 Web of Science™ 核心数据库，围绕“耕地土壤健康”为主题发文量最多的前三位国家为印度、美国和中国，恰好位列全球耕地面积的前三位^[22]，且人口数量也位居全世界的前三位^[23]，说明人口压力推动了国家对粮食产量及安全的重视，从而形成了对耕地土壤健康问题的高度关注。围绕“草地土壤健康”为主题发文量最多的前三位国家依次为美国、澳大利亚与中国，草地在此三个国家中占据了较大比例的国土面积。

2.1 耕地及草地土壤生态系统服务与土壤健康

随着人们对土壤的认识不再拘泥于单一的生产功能，土壤生态系统服务的多样化开始获得关注。杨颖等^[24]基于土壤多重功能性，对我国黄淮海平原的典型农田生态系统开展了耕地土壤健康评价研

究。吴克宁等^[21]利用“木桶结构”形象地阐释了基于功能与胁迫的农牧地土壤健康观，其中将土壤质量类比为木桶容积，将土壤功能类比为组成各个木桶的木板，将土壤健康看作在环境胁迫条件下木桶发挥正常作用的状态。土壤健康包括广泛的生态系统服务功能和角色，通过构建“生态系统服务—功能—特性—质量维度—指标—健康”的理论框架，从而量化与生态系统服务功能相关的土壤固有属性来评估土壤健康^[25-26]。

判断土壤健康状况时应区分不同的土壤利用目标和管理活动，并紧密结合其所侧重的生态系统服务、管理目标及政策向导。根据人为管理目标和自然条件等基础信息，Zwetsloot 等^[27]针对跨越五个气候区的 13 个国家在内的耕地、草地两种利用类型，开展了五种土壤功能（初级生产力、水调节和净化、气候调节、土壤生物多样性和养分循环）

的评估。其结果证实，考虑到政策和管理措施的差异，对不同土壤功能之间的协同作用进行权衡判别，最终可实现对多种土壤功能的科学性评估和管理。此外，在胁迫条件下能否正常发挥其生态系统服务功能是土壤健康状况的重要表现。赵瑞等^[28]探讨了重金属污染状态下土壤功能供需能力和土壤胁迫程度，通过半定量化的方法构建了耕地土壤健康评价矩阵。通过识别限制耕地土壤功能的主要因素，有利于实现耕地土壤健康资源的精细化风险管理，有助于耕地土壤资源管护及可持续性利用。

2.2 耕地及草地可持续田间管理与土壤健康

人类生产活动离不开农牧业土壤的支撑，科学合理可持续的田间管理是维系人类命运与土壤健康的核心目标之一。其中，土壤肥力管理是影响耕地及牧场草地生产力和可持续性的重要手段，也是长久以来耕地和草地土壤健康研究的重要议题之一。大量的研究已表明，有机肥可从增加土壤有机质及养分含量^[29-30]、改良土壤结构、提高土壤生物多样性等^[31]多个维度综合提升土壤健康水平。然而，外源肥料过量输入却会带来增产效果削弱、环境污染加重等诸多负面效应^[32-33]。将农牧业生产活动中产生的物质进行循环利用，对于提升土壤健康也颇有裨益。其中，秸秆还田是最常见的方式之一，通过秸秆还田，改善了土壤性质（如有机质、土壤酶活性等指标），并提高了作物产量^[34-35]。此外，在牧业生产活动中产生的废弃物再利用也开始受到关注。譬如，将牧场养殖活动中产生的废羊毛进行收集后，再用作养殖饲料及牧草生长有机肥的来源，补充动物营养同时促进土壤养分，从而改善草地土壤健康^[36]。

合理调节田间耕种强度可以保水保肥，也是保持土壤健康和促进耕地土壤可持续发展至关重要的田间管理手段之一。正如从奥地利的三个 25 年长期定位试验中发现，适度降低耕种强度可以显著降低区域内地表径流、阻控土壤侵蚀，同时还提高了表层 0~10 cm 土壤有机碳含量^[37]。此外，结合更广泛的综合性管理手段，是高集约化条件下保持农牧地可持续性生产的有效手段。例如，可将保护性耕作与合理施入有机肥料的手段有效结合起来。Hao 等^[38]发现在长期小麦-玉米轮作的高集约化生产模式下，采用深层土壤耕作与全量秸秆还田相结合的方式可以有效地调节农田土壤微生物群落，同时提高了土壤碳固存能力。从大量研究可以看出，人类的农业生产活动与保

护土壤健康状态的目标并不冲突，采取适宜得当的田间管理模式有利于加速营养元素循环，增强土壤生态系统活力，从而达到提高农牧业生产力，扭转土壤退化态势，提升土壤健康的目标，最终可有效缓解当前全球粮食安全面临的巨大挑战。

2.3 耕地及草地土壤生物区系及其多样性与土壤健康

土壤健康研究最重要的进步之一是在土壤管理中增加了生物学观点，以应对作物生产的长期可持续性挑战^[16]。土壤生物区系包括细菌、真菌、原生生物和无脊椎动物等，为了维持土壤的多功能性，不同类群的土壤生物承担着不同的作用，通过相互之间的作用，确保了陆地生态系统功能的良好运转^[39-40]。土壤无脊椎动物（如环节动物、节肢动物、节肢动物和扁虫）能处理大量的植物和动物碎屑^[41]，并最终决定新鲜物质资源在土壤食物网中转化的潜在速率^[39]。土壤微型生物（包括原生生物、细菌、真菌等）通过自身代谢参与元素循环和污染物降解等过程，同时在增强根际免疫，提高土壤肥力和作物产量方面扮演关键的角色，对土壤健康乃至人类健康具有重要意义^[42]，但仍依赖于大型土壤生物群的活动^[43]。此外，土壤病毒也正逐渐走入人们的视野，Kuz'yakov 和 Mason-Jones^[44]提出土壤病毒在调控微生物群落结构组成、影响土壤元素循环利用、促进生物进化、以及影响动植物病害乃至人类健康等方面可能起着重要的作用。

土壤生物多样性体现了土壤作为一个生命体的活力状态。更加多样化的土壤生物群落有利于增加高产优质作物所需的养分，保护农作物免受害虫、病原体、杂草的侵害，并缓解作物生产过程中面临的生境胁迫因素（如干旱）^[45-46]。Fan 等^[47]发现在长期有机肥和化肥合理配施的情况下，土壤关键类群的群落多样性增强。一方面可以正向积极调节多种参与碳、氮、磷、硫等与植物生长和营养物循环相关的功能基因的变化，从而提高作物生产力。另一方面，土壤微生物群落多样性增加抑制了病原体并激活更多有益和耐受的微生物，降低病虫害的侵袭。与之相反的，土壤生物区系多样性降低或丧失，会造成土壤生态系统平衡状况受损，并带来其他的环境负面效应。例如，Wagg 等^[48]通过草地土壤模型研究发现，土壤生物群落多样性的降低使草地中植物及土壤生物多样性（微生物和动物群）降低，

同时还使磷的浸出增加,温室气体的排放量上升,增加了生态风险。然而,要量化和管理土壤生物区系及其多样性,并将其作为土壤健康管理目标的一部分还存在很大的挑战,这可能是由于:1)多数生物指标的测定耗时较长,技术要求和成本较高,不易推广使用^[49];2)土壤生物种类多、数量大、变化快,且在一定程度上存在功能冗余性,为定量化生物指标带来了困难^[50];3)生物区系与土壤功能之间的关系还难以量化^[16];4)土壤健康和生物学指标变化的因果关系尚不明晰^[42]。

2.4 耕地及草地土壤污染与土壤健康

土壤污染影响食品安全、生物安全、人体健康等多个方面。快速的工业化发展、高强度的人为活动以及不合理的人为管理措施导致并加重了农牧地土壤污染问题,对土壤健康造成了严重的威胁。据2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[51]数据显示,我国耕地土壤污染物的点位超标率高达19.4%,草地土壤的点位超标率为10.4%,危及耕地草地环境安全和生态系统健康^[52]。常见土壤污染物包括重金属、除草剂、杀虫剂、抗生素及抗性基因、微塑料、多环芳烃等。此外,有些土壤还面临病原菌、病毒等生物性污染的威胁^[52]。土壤污染会影响到土壤功能,如过量施用的化肥随地表径流导致重要水体的富营养化,影响土壤参与水质调节的功能^[53]。有机肥的大量施用造成农牧地土壤中重金属、抗生素及其抗性基因等污染物的复合污染问题,使土壤污染趋于多样化和复杂化,导致土壤微生物群落结构发生改变^[54],微生物呼吸、酶活性等活性指标显著降低,土壤微生物活力受到显著抑制^[55]。

农牧地土壤污染物,如重金属,通过植物根系吸收,在耕地农作物及草地牧草中富集,再通过食物链影响农牧产品品质,最终影响人体健康^[56]。对于土壤中的生物污染物如病原体、致病真菌,其产生的真菌毒素可能污染植物产品,最终可引发动物和人类的急性和慢性疾病^[57]。此外,土壤中生存着的寄生虫,如血吸虫和蠕虫可在人体肠道中传播,造成慢性疼痛、腹泻和营养不良等症状^[58]。联合国提出的全球可持续发展目标(SDGs)中有13项与土壤直接或间接有关,消除土壤污染是达到其中SDG2“零饥饿”、SDG3“良好健康与福祉”等几项目标的重要途径和手段。可见,加强土壤污染防治对维持农牧地可持续生产,维护土壤健康,以及保

障人类健康具有重大意义。

3 耕地及草地土壤健康评估体系

3.1 耕地及草地土壤健康评估目标

对已发表文献的关键词进行聚类分析可以发现(图3),耕地土壤健康评估主要聚焦于:田间耕作方式及田间管理措施对土壤健康的影响、对土壤肥力及其对植物生产力的影响、土壤有机质(碳)与土壤健康间的联系、土壤生物区系与多样性、土壤微量元素及其有效性等五个方面;而对于草地土壤健康评估,主要聚焦于物质循环(碳元素为主)和生物区系与多样性两大主题;另有部分研究聚焦于牧场草地管理及其与气候变化关系上。由此,对不同土地利用类型土壤进行健康评估时,评估目标的制定会存在差异。就耕地土壤而言,主要是从土壤维持作物可持续性生产力的支持功能,保证作物安全产出的角度,设定土壤健康评估目标;而对于草地土壤而言,更多的是从土壤参与地球化学循环及气候变化和控制土壤退化的角度,制定评估目标。

3.2 耕地及草地土壤健康评估方法

对土壤健康的评估需要一个综合评价体系,以表征土壤生态系统中各项健康指标。然而,基于土壤类型和管理方式的多样性,且各个评估指标的度量方式也不同,应将各种评估指标进行系统整合,从而计算出土壤健康(质量)的综合指标。目前应用最广泛的评估方法是借鉴土壤质量评估研究的思路,首先通过确定重点关注的土壤功能,以构建最小数据集(minimum data set, MDS)的方法建立土壤健康指数(soil health index, SHI)来评估耕地或草地土壤健康状况。随着大数据分析的发展,通过层次分析与大数据相结合的方法开展土壤健康评估^[59],可进一步完善早期SHI构建的方法。由于人类活动对土壤属性(例如土壤有机碳含量)造成影响并使之发生变化,Maharjan等^[60]将未经人类活动干扰的天然农牧地的土壤属性作为基准,通过观测不同程度人类活动下,土壤属性指标的变化与基准土壤相差的程度,判断土壤健康变化及土壤退化的程度,并称之为“土壤健康差距(soil health gap)”方法。Kuzakov等^[61]提出“土壤质量指数面积(soil quality index area, SQI-Area)”方法,利用

雷达图上的面积变化直观地反映土壤健康的退化强度。在这些研究中，通过将评估结果以更加直观、

简洁的形式进行表征，可有利于指导耕地及草地开展可持续性生产和管理活动。

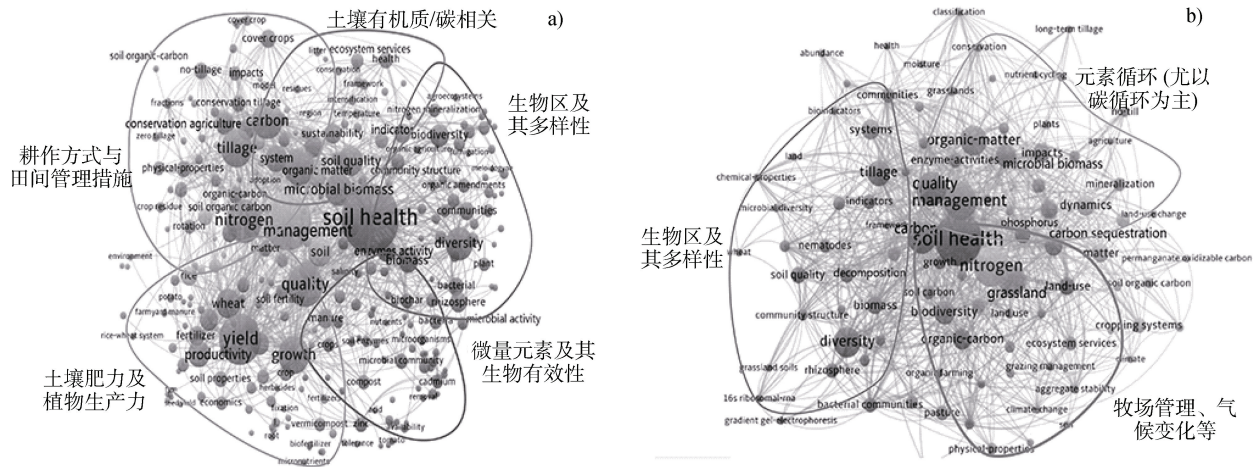


图3 土壤健康主题文献关键词关系共现网络 a) 耕地土壤健康、b) 草地土壤健康

Fig. 3 Key-word co-occurrence graph based on the theme of a) “soil health” and “farmland OR cultivated land”; b) “soil health” and “grassland OR pasture”

土壤发挥其功能的潜力是土壤健康状况的重要反映。van Leeuwen 等^[62]以土壤提供生物多样性和栖息地的功能为出发点，通过构建决策专家模型 (Decision expert model, DEX) 对耕地和草地土壤进行了健康状况评估。通过建立基于农牧地土壤健康评价的熵权模糊元模型，可克服农牧地土壤健康概念的模糊性和单项指标评价结果的不相容性，避免主观判断农用地土壤健康标准的不确定性^[63]。借助近红外光谱结合多传感器的手段，提供了一种时空分辨率高、成本低的综合性土壤健康评估思路方法^[64]。

总体而言，尽管对于耕地和草地土壤健康评估的构建方法种类繁多，但评估方法的程序和步骤是相似的。Rinot 等^[25]将其归纳为三个主要步骤 (图 4)：1) 指标选取。测量并形成土壤相关属性的最小数据集；2) 指标赋分。通过直接测量并分配适当的分数来量化所选土壤的属性；3) 体系整合。通过提供用于定义每个属性或一组属性的权重标准，在评分属性之间进行整合以构建最终指标体系。简言之，构建土壤健康评估方法的核心思想是通过汇集丰富的信息开展定性、定量或可视化评估，从而更加系统、直观地表征土壤健康状况。

3.3 耕地及草地土壤健康评估指标

Rinot 等^[25]提出用作土壤健康评估的指标参数应满足多个标准，包括：1) 科学和真实。与土壤健康

相关的数据代表了复杂土壤系统中真实发生的化学、生物和物理过程，这些过程支持了土壤的生态系统服务功能；2) 敏感性高。可通过检测手段快速明确土壤管理、土地利用、气候变化等引起的土壤功能变化；3) 可管理、可使用、准确且成本较低。可以在相对较短时间范围内支撑决策；4) 能够反映土壤功能和管理目标之间的联系。综合而言，评估土壤健康通常需要考虑土壤物理、化学和生物学指标三方面。Bünemann 等^[9]通过分析总结得出，目前所用到的评估指标主要集中于物理和化学指标，生物指标涉及较少。图 5 列举了部分耕地和草地土壤健康评估研究中涉及的评估指标使用频率分析。

3.3.1 常规性指标 针对耕地土壤健康评估指标选取时，主要是重点围绕土壤提供并维持作物生产功能的角度开展。Jian 等^[76]通过整合耕地土壤健康评估指标建立了 *SoilHealthDB* 数据库，其中包含了全球 354 个点位的 500 多项研究数据，汇集了 42 个土壤健康评估指标和 46 个对土壤健康有影响的背景指标 (如气候、土壤类型等)，是目前公开发布的、数据量较大的耕地土壤健康指标数据库。叶思菁等^[77]应用地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况和生物特性五类指标整合影响耕地健康的关键因子，对我国 65 个县 (市) 的耕地健康状况进行了评估，通过分析不同类型区域耕地保护的重点方向，识别出我国耕地“不健康/亚健康-高产能”的区域。

对草地土壤健康评估时，主要从控制草地土壤退化的角度进行评估指标的选取。Ghimire 等^[78]通过选定土壤有机碳、总氮、可矿化碳、可矿化氮、微生物群落（大小、活性）等指标，评估半干旱地区草地在恢复过程中的土壤健康状况。王丽^[75]对我国宁夏不同放牧程度的荒漠草原土壤进行了土壤健康评估，认为选用容重、孔隙度、细菌、脱氢酶、速效钾等指标更适用于指导草地生产。对草地土壤健康指标的研究总体还较为薄弱，新型评估指标的筛选研究也较为少见。应充分结合草地土壤健康保护的不同目标，发展更加广泛的评估指标体系。

3.3.2 敏感性指标 在进行土壤健康评估时，涵盖更多的评估指标会提供更加综合全面的信息，但会带来耗时长、成本高、结果分析复杂等诸多问题。同时，有些土壤指标短期内变化缓慢，无法及时反映土壤健康变化的趋势。因而，识别出对环境变化响应敏感的指标，对快速了解土壤健康状况变化十分必要。以土壤有机碳为例，其影响着土壤中许多化学、物理和生物学特性及过程，是耕地和草地土

壤健康最重要的评估指标之一，然而其在短期内的变化缓慢^[79]。微生物有机碳、溶解性有机碳、易氧化有机碳、轻组有机碳等活性有机碳组分对环境变化敏感^[79]，是更理想的土壤健康评估指标。Plaza-Bonilla 等^[80]提出高锰酸盐可氧化碳可能是判别耕地农业生态系统土壤健康管理措施更加灵敏的指标。van Wesemael 等^[81]指出可溶性碳、氮是评价农业管理方式对土壤健康影响的敏感指标。

土壤生物直接参与土壤过程，影响土壤生态系统服务功能，被认为是对管理更为敏感的指标^[82-86]。土壤微生物参与元素循环与调控，与土壤健康和作物生产关系极为密切。最近，朱永官等^[43]指出，土壤微生物组可作为土壤健康的关键性评价指标。原生动物作为土壤健康状况的敏感指标近年来也得到重视。Lu 等^[87]和 Bongiorno^[67]的研究皆指出土壤线虫群落是指示土壤健康的重要生物指标；Duran-Bautista 等^[88]利用亚马逊河流域秘鲁、哥伦比亚两国不同土地利用方式下白蚁种群及群落变化，以表征耕地土壤健康（质量）变化的趋势。

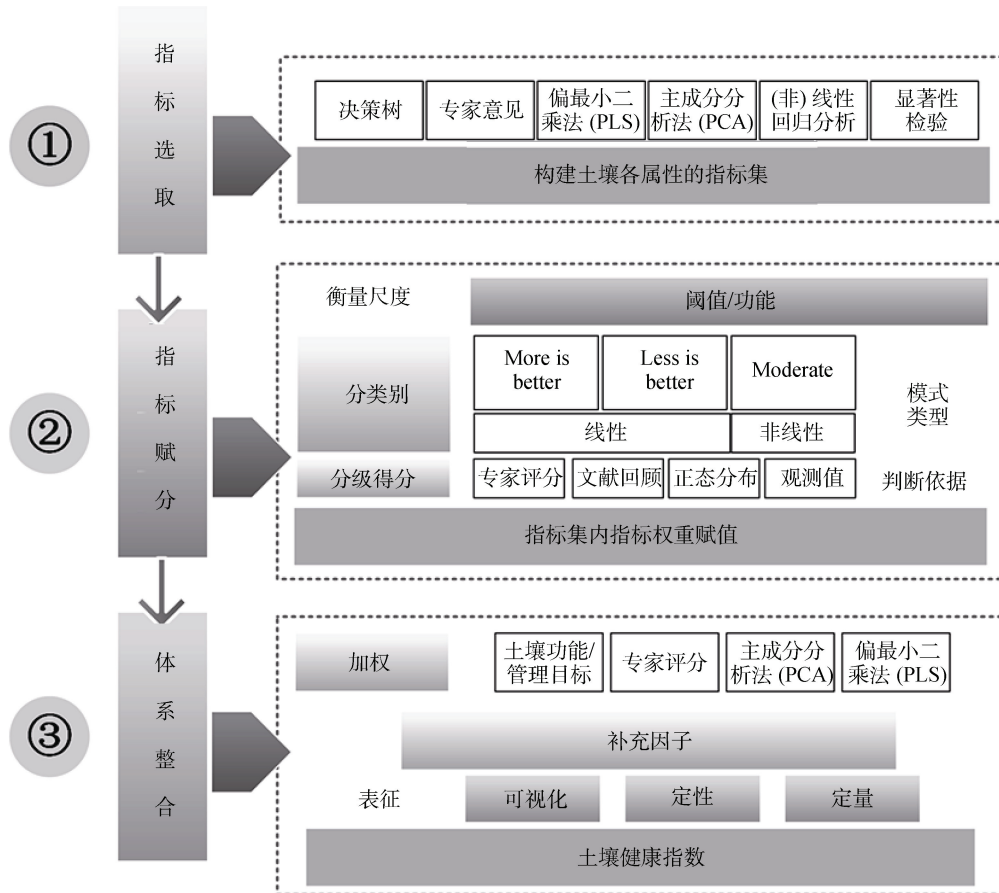


图 4 目前用于土壤健康指数评估的主流步骤和方法（据 Rinot 等^[25]修改）

Fig. 4 Mainstream procedures and methods of soil health assessment applied currently (modified after Rinot et al.^[25])

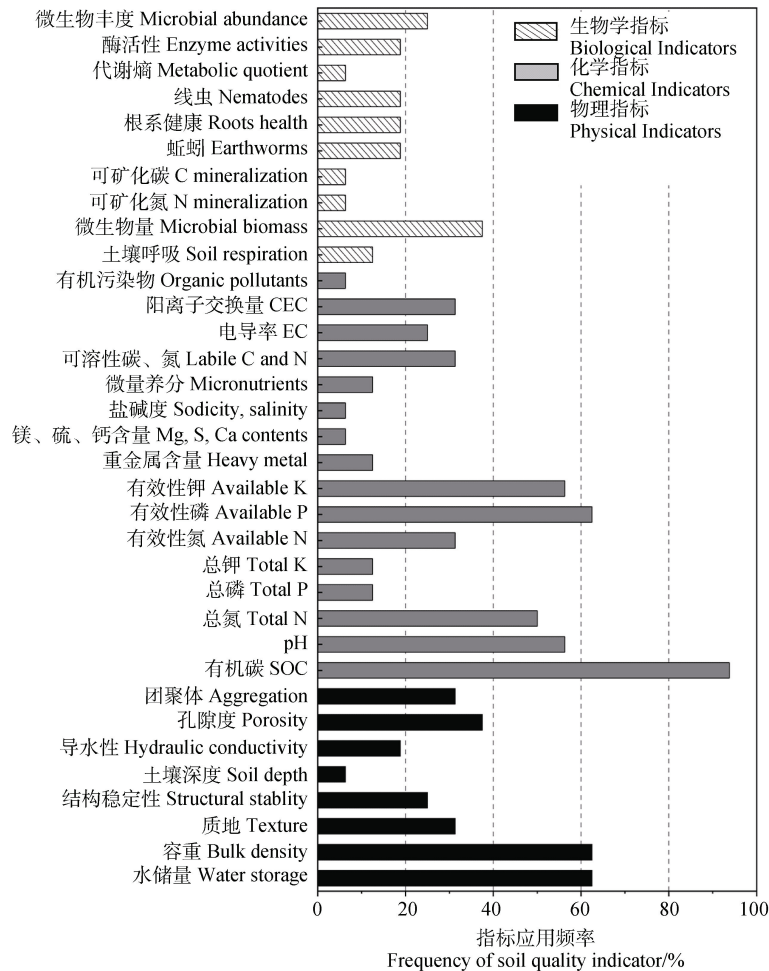


图 5 部分耕地和草地^[24, 65-75]土壤健康评估研究中常用指标及其使用频率

Fig. 5 Indicators commonly used in some of the cultivated land and grassland^[24, 65-75] soil health assessment studies and the frequencies

3.4 耕地及草地土壤健康评估体系

3.4.1 部分国家/地区耕地及草地土壤健康评估体系

目前已有部分国家/地区建立了土壤健康（质量）评估体系框架，其大多可以适用于耕地和草地土壤健康评估。最早由加拿大在上世纪 90 年代提出了评估和监测土壤（健康）计划^[89]。美国在土壤健康评估体系构建方面的研究已累积了较多的成果，其中具有代表性的包括：美国农业部于 1995 年开发的土壤管理评估框架（Soil Management Assessment Framework, SMAF）^[90-92]和康奈尔大学土壤健康团队于 2007 年建立的康奈尔土壤健康评价系统（Comprehensive Assessment of Soil Health, CASH）^[93-94]。SMAF 和 CASH 两个土壤健康评估体系在经过了多次更新后已相对完善，并已在美国和国际多个地区的耕地和草地土壤健康评估中得到应用^[95-97]。印度农业部借鉴了美国的经验，

建立了土壤健康卡^[98-99]来评估耕地土壤健康状况，指导农民进行合理的农业生产活动。新西兰、法国、英国、澳大利亚等国也建立了国家（地区）的土壤健康（质量）评估方法体系^[100-103]。这些国家所建立的评估体系均明确了针对性的相关利益者目标群、评估目标、应用尺度、评估指标等信息（表 1）。

3.4.2 中国耕地和草地土壤健康评估体系

目前而言，虽然我国还未从国家层面上建立统一的土壤健康评估体系，但我国一直致力于提高和保护农牧地土壤质量，并形成一定的基础理论框架，可以为今后的工作打下了良好的基础。张桃林^[104]将我国土壤健康管控成效总结为三个主要方面，即：基于粮食安全的土壤健康管护、基于净土保卫战的土壤健康管护及基于土壤健康状态的监测评价。

首先，为平衡我国粮食生产的供需矛盾，以提高农用地可持续生产力为目标，2012 年开展的全国性系

表 1 国外部分国家/地区可应用于耕地/草地土壤健康评估体系方法

国家/地区 Country/Region	方法/项目名称 Method/ Project	目标群体 Targeting groups	评估目标 Assessment goals	评估范围/尺度 Assessment scale	指标 Indicators	诠释方式 Interpretation	参考资料 References
加拿大 Canada	国家土壤质量监测计划	未明确	评估土壤健康状况和趋势(尤其是土壤健康状况和变化趋势,特别是土壤侵蚀、压实、有机质减少、酸化和盐渍化等土壤退化情况)	全加拿大23个基准站点(每个站点 5~10 hm ²)	pH、有效磷、有效钾、有机碳、全氮、容重、 ¹³ Cs 分布、可交换性铁、可交换性铝、阳离子交换量、碳酸盐、田间持水量、颗粒大小分布、黏土矿物、总表面积、金属元素(铝、钙、钴、铬、铜、铁、钾、锂、锰、铅、镍、锌等)、导水率、毛孔及根系量、蚯蚓数量和作物产量	主要为趋势分析	[89]
美国 The United States	土壤管理评估框架(SMAF) 康奈尔土壤健康综合评估方法(CASH)	土地管理者、一般公众 农场主	评估管理实践,普及土壤质量 解决土壤退化造成的土壤健康下降,提高土壤生产力和农民收益	田块 田块	pH、团聚体稳定性、田间持水量、容重、总有机碳、电导率、可矿化氮、钠吸收比、有效磷、有效钾、微生物生物量、β-葡萄糖苷酶活性 pH、团聚体稳定性、持水量、土壤表层硬度、土壤次表层硬度、磷、钾、镁、铁、锰、锌、活性有机碳、土壤呼吸、土壤蛋白质、根系健康	得分曲线,总体得分,累加指数 得分曲线,总体得分	[90-92] [93-94]
印度 India	土壤健康卡	农场主	指导农民了解其生产土地土壤的状况,提高作物生产力	田块	pH、电导率、总有机碳、活性有机碳、有效氮、磷、钾、铁、锰、锌、铜、容重、最大持水量、团聚体稳定性、微生物生物量碳、脱氢酶活性、可矿化氮等	得分曲线,总体得分	[98-99]

续表

国家/地区 Country/Region	方法/项目名称 Method/ Project	目标群体 Targeting groups	评估目标 Assessment goals	评估范围/尺度 Assessment scale	指标 Indicators	诠释方式 Interpretation	参考资料 References
新西兰 New Zealand	500 土壤计划	政府、地区工作者 人员, 土地所有者 地区委员会 工作人员, 土地所有者	评价全国土壤质量, 进而建立全国 所有主要土壤类型和土地利用方 式的土壤质量基准	在国家监测计划 的范围涵盖全国 11 个土系、10 个 土地利用类型的 511 个站点	pH、总有机碳、全氮、矿化氮、有效磷、容重、 孔隙度等	与数据库或 根据目标范围 进行综合比较	[100]
法国 France	国家土壤质量监测 试点工作	未明确	指导环境保护、可持续发展措施和 保障粮食安全	覆盖全国的土壤 质量与监测系统	pH、总有机碳、微量元素含量 (镉、钴、铬、铜、 镍、铅、锌等)、生物多样性等	触发值	[101]
英国 The United Kingdom	国家土壤质量监测 项目	政策制定方	与环境相互影响的土壤功能	整个国家内	pH、总有机碳、全氮、有效磷、全量和有效态的 金属元素 (铜、镍、锌等)、容重等	触发值	[102]
澳大利亚 (维多利亚州) Australia (Victoria State)	土壤健康管理计划 -土壤结构评估包	农场主	为土壤环境管理决策提供支持, 增 加农民及其顾问对土壤管理的知 识和技能	维多利亚北部和 新南威尔士州南 部的灌溉区广泛 分布的粘土	表层土壤深度、表层覆盖、孔隙率、土壤质地、 蚯蚓、土壤结皮、根系深度、土壤团聚体稳定性、 裂隙度、盐分、地下水位、灌溉布局等	遥感影像	[103]

统的“多用途区域地球化学调查”^[105]，为我国耕地质量的系统评价、支持与评估土地资源、保护地表环境和提高农业效率提供了科学决策依据^[106]。2016年实施的《耕地质量等级(GB/T 33469—2016)》^[107]将耕地由高到低依次划分为一至十等，其中纳入了土壤清洁程度和土壤生物多样性指标来表征土壤健康状况。《2019年全国耕地质量等级情况公报》^[108]公布了全国不同区域耕地质量现状，针对性地指出了耕地土壤障碍因素，并对加强区域性耕地质量建设提出对策建议。其次，由于我国农牧地土壤污染问题突出^[104]，保证农产品质量安全是评估土壤健康的另一个重要目标。2018年我国发布了新版《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[109]，在原《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的基础上提出了污染风险筛选值和污染风险管制值两个新概念，并且新增了关注污染物项目，总体上坚持推行土壤环境监管“保护优先”及“反退化”的原则，最大限度保护农用地土壤的生态功能，进而保障农产品质量安全。此外，

我国开始着力构建数量、质量、生态“三位一体”的耕地保护新格局^[110]。以上这些工作基础综合反映出了我国在农牧地土壤健康维护的范围及内容方面正在逐渐完善。

未来在建立我国统一的土壤健康评估体系中，建议考虑以下两点：1)充分利用前期积累的工作基础，对相关成果进行统一梳理与整合；2)在制定我国耕地和草地土壤健康评估指标时，除了对土壤生产力和污染净化相关的功能关注之外，还应进一步关注农牧地土壤其他功能(如碳循环、生物多样性维持等)，根据不同用地类型在土壤功能需求程度上的差异，从而进行指标权重分配和最终的评估，从而建立张江周等^[111]提出的建立以协同增产、提质、增效和环保多目标的土壤健康评价体系；3)充分考虑到限制土壤健康状况的主要限制因子(如土壤污染程度、土壤盐渍化程度等)，从而对土壤健康状况进行更全面的评估与表征。图6中，笔者简要描述了构建我国耕地和草地土壤健康评估体系并列举了部分可供参考选取的指标。

评估指标 Assessment indicators	耕地和草地主要土壤功能 Main soil function of cultivated land and grassland					土壤功能需求差异区分 Differentiation of soil function requirement discrepancy	耕地 Cultivated land	草地 Grassland
	初级 生产力	水体净化 与调节	碳封存与 调节	养分供应 与循环	生物多样 性供给			
物理指标 Physical indicators	容重	√	√	√	√			初级 生产力
	孔隙度	√	√					
	田间持水量	√	√					
	团聚体稳定性	√		√	√		√	
化学指标 Chemical indicators	有机碳(质)	√		√	√			
	全氮	√			√			
	全磷	√			√			
	全钾	√			√			
	有效	√			√			
	速效磷	√			√			
	速效钾	√			√			
	阳离子交换量	√			√			
生物学指标 Biological indicators	pH	√	√	√	√			
	可溶性碳、氮	√		√				
	微生物生物量碳、氮	√		√				
	表层土壤生物多样性	√				√		
	土壤呼吸	√		√				
	蚯蚓丰度	√		√	√			
	土壤酶活性	√		√	√			
主要关注限制因子 Main focusing limiting factors								
	土壤污染程度	√	√	√	√		√	√
耕地	√	√	√	√		√		√
草地	√	√						√

图6 我国耕地和草地土壤健康评估指标体系参考

Fig. 6 Reference soil health assessment index for Chinese cultivated land and grassland

4 展 望

近年来,土壤健康研究的范围不断拓宽,评估土壤健康体系的方法和指标也在不断发展。未来对土壤健康评估体系与指标的研究应在以下三方面予以加强:

1) 将土壤健康和土壤生态系统服务紧密联系。土壤健康状态决定土壤发挥其生态服务(土壤功能)的能力,然而不同农地类型对各种土壤功能的需求存在差异。科学选取土壤功能指标,量化土壤健康状况与土壤功能的供需状况还是需要攻克的难点^[21]。耕地和草地发挥的土壤生态系统服务权重各不相同,所以在开展土壤健康评估时应将其重要的生态系统服务紧密联系起来。通过土壤生态系统服务功能分析,筛选影响土壤健康的关键因子,克服由于土壤自然属性在尺度和空间上的较大异质性,这对土壤健康的可持续管理模式的选取与构建具有重要意义。在评估指标设计与选取方面,在借鉴国内外土壤健康评估研究对土壤物理、化学和生物学性质的强调之外,还应充分考虑到我国耕地破碎化严重、耕作技术水平相对不足等国情问题^[77]。

2) 重视生物学指标在土壤健康评估中的重要性。土壤健康评估的研究应从土壤的物理健康、化学健康和生物学健康三个维度进行综合性评估。回顾在过去十年中的相关研究,生物学指标在土壤健康评估研究中还相对薄弱,是下一步需深入研究的前沿。土壤生物在参与土壤元素循环、维持土壤生态系统平衡、转化土壤污染物等诸多重要过程中发挥着重要作用。拓展关于土壤生物学的新知识,将深化人们对土壤健康的认识,从而提高农业生产的可持续性及其生产水平,以扭转全球土壤退化的趋势^[45]。发展便捷、快速、成本低的工具或技术来观测土壤中的生物健康的特性变化,可成为实现土壤生物健康管护的重要途径。借助电化学、生物传感器、芯片等技术,可有效地快速反映土壤生物健康的实时变化^[16]。采用被动采样器(如薄膜扩散技术、道南膜技术等)并将其应用于快速定量检测毒素的生物有效性组分,而非依靠对环境变化不够敏感的总含量进行评估,既可以有效地降低成本,且可间接反映生物学指标与土壤健康之间耦合关系。

3) 深化学科合作与交融。土壤具有深刻的生态、社会、经济、文化和精神层面价值。正是由于土壤

的多重功能,限于土壤科学本身范畴的传统研究已不能全面反映土壤健康的整体功能和状态。近年来,随着信息技术、生物技术、人工智能、5G 通讯、大数据、机器学习技术等迅猛发展,通过应用这些高新技术可获取丰富信息,提供更多土壤属性信息以及变化预测信息,从而全面深入地地表征土壤物质的多态性、土壤过程的多尺度性和土壤功能的多元性^[112-113]等方面,以期进一步丰富和拓展土壤健康的内涵。此外,有关土壤对社会经济系统影响的研究还较少见。跨学科研究将会促进并形成创新性的耕地和草地土壤可持续利用和管理策略,从而优化土壤健康评估方法,为最终实现农业和牧业可持续发展目标而助力。

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] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478 (7369): 337—342.
- [3] Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment: I. The definition and evaluation method of Soil quality[J]. *Soils*, 1997, 29 (3): 113—120. [赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29 (3): 113—120.]
- [4] Shen H H, Zhu Y K, Zhao X, et al. Analysis of current grassland resources in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61 (2): 139—154. [沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析[J]. *科学通报*, 2016, 61 (2): 139—154.]
- [5] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (6): 1101—1110. [赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. *生态学报*, 2004, 24 (6): 1101—1110.]
- [6] Luo Y M, Teng Y. Status of soil pollution degradation and countermeasures in China[J]. *Soils*, 2006, 38 (5): 505—508. [骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. *土壤*, 2006, 38 (5): 505—508.]
- [7] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 452—458. [赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30 (4): 452—458.]
- [8] Sun Y M, Li H, Guo G L, et al. Soil contamination in

- China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109512.
- [9] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality - A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [10] Patzel N, Sticher H, Karlen D L. Soil fertility—Phenomenon and concept[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163 (2): 129—142.
- [11] Mausel P W. Soil quality in Illinois—An example of a soils geography resource analysis[J]. *The Professional Geographer*, 1971, 23 (2): 127—136.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V. V. S. R. Biological indicators of soil health: Synthesis[M]//Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V V S R. Biological indicators of soil health. New York and Oxon: CAB International, 1997: 419—435.
- [15] Dong Y H, Chen N C, Li J G, et al. Soil mineral elements and health effects[M]//Chen H M, Zhu Y G, Dong Y H, et al. Environmental soil science. Beijing: Science press, 2018: 392—398. [董元华, 陈能场, 李建刚, 等. 土壤矿质元素与健康效应[M]//陈怀满, 朱永官, 董元华, 等. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2018: 392—398.]
- [16] 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.
- [17] McBratney A, Field D J, Koch A. The dimensions of soil security[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 203—213.
- [18] Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (12): 1859—1869. [朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70 (12): 1859—1869.]
- [19] 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.]
- [20] Hatfield J L, Sauer T J, Cruse R M. Chapter one-soil: The forgotten piece of the water, food, energy nexus[J]. *Advances in agronomy*, 2017 (143): 1—46.
- [21] 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.]
- [22] Hu Q, Wu W B, Xiang M T, et al. Spatio-temporal changes in global cultivated land over 2000-2010[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (6): 1091—1105. [胡琼, 吴文斌, 项铭涛, 等. 全球耕地利用格局时空变化分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (6): 1091—1105.]
- [23] United Nations. World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423) [EB/OL]. (2019) [2021-07-19]. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf.
- [24] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210112.1619.006.html>. [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*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210112.1619.006.html>.]
- [25] 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.
- [26] 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. [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.]
- [27] 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.
- [28] Zhao R, Wu K N, Yang Q J, et al. Farmland soil health evaluation method based on soil function and soil threat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52 (6): 333—343. [赵瑞, 吴克宁, 杨淇钧, 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.]
- [29] Chen W, Teng Y, Li Z G, et al. Mechanisms by which organic fertilizer and effective microbes mitigate peanut continuous cropping yield constraints in a red soil of South China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 23—34.
- [30] Song Z Z, Li X H, Li J, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (3): 525—533. [宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (3): 525—533.]
- [31] Guo Z, Han J C, Li J, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon mineralization and microbial community structure[J]. *PLoS One*, 2019, 14 (1): e0211163.
- [32] Grant C A, Sheppard S C. Fertilizer impacts on cadmium availability in agricultural soils and crops[J]. *Human and*

- Ecological Risk Assessment, 2008, 14 (2): 210—228.
- [33] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [34] Wu L P, Ma H, Zhao Q L, et al. Changes in soil bacterial community and enzyme activity under five years straw returning in paddy soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 100: 103215.
- [35] Zhao S C, Li K J, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 216: 82—88.
- [36] Lal B, Sharma S C, Meena R L, et al. Utilization of byproducts of sheep farming as organic fertilizer for improving soil health and productivity of barley forage[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110765.
- [37] Klik A, Rosner J. Long-term experience with conservation tillage practices in Austria: Impacts on soil erosion processes[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 203: 104669.
- [38] Hao M M, Hu H Y, Liu Z, et al. Shifts in microbial community and carbon sequestration in farmland soil under long-term conservation tillage and straw returning[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 136: 43—54.
- [39] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, et al. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes[J]. Nature Ecology & Evolution, 2020, 4 (2): 210—220.
- [40] Guerra C A, Bardgett R D, Caon L, et al. Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity[J]. Science, 2021, 371 (6526): 239—241.
- [41] Hättenschwiler S, Gasser P. Soil animals alter plant litter diversity effects on decomposition[J]. PNAS, 2005, 102 (5): 1519—1524.
- [42] 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.
- [43] 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.]
- [44] Kuzyakov Y, Mason-Jones K. Viruses in soil: Nano-scale undead drivers of microbial life, biogeochemical turnover and ecosystem functions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 127: 305—317.
- [45] Lehman R, Cambardella C, Stott D, et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7 (1): 988—1027.
- [46] Sanford G R, Jackson R D, Booth E G, et al. Perenniality and diversity drive output stability and resilience in a 26-year cropping systems experiment[J]. Field Crops Research, 2021, 263: 108071.
- [47] Fan K K, Delgado-Baquerizo M, Guo X S, et al. Biodiversity of key-stone phylotypes determines crop production in a 4-decade fertilization experiment[J]. The ISME Journal, 2021, 15 (2): 550—561.
- [48] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. PNAS, 2014, 111 (14): 5266—5270.
- [49] Stone D, Ritz K, Griffiths B G, et al. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 97: 12—22.
- [50] 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.]
- [51] Ministry of Ecology and Environmental of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Bulletin of the national survey on soil pollution status[R/OL]. (2014-04-17) [2021-07-19]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>. [生态环境部, 自然资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17) [2021-07-19]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>.]
- [52] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1137—1142. [骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1137—1142.]
- [53] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, 8 (3): 559—568.
- [54] Wang X Q, Lu X, Yi X Y, et al. Changes in soil available cadmium and bacterial communities after fallowing depend on contamination levels[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21 (3): 1408—1419.
- [55] Chen X Y, Xiao Z F, Zhu Y H, et al. Impacts of combined pollution of copper and doxycycline on activities of soil microbes and enzymes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 957—967. [陈欣瑶, 肖祖飞, 祝妍华, 等. 铜和强力霉素复合污染对土壤微生物与酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 957—967.]
- [56] Oliver M A, Gregory P J. Soil, food security and human health: A review[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66 (2): 257—276.
- [57] Hussein H S, Brasel J M. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals[J]. Toxicology, 2001, 167 (2): 101—134.
- [58] Savioli L, Stansfield S, Bundy D A P, et al. Schistosomiasis and soil-transmitted helminth infections: Forging control efforts[J]. Transactions of the Royal Society of Tropical

- Medicine and Hygiene, 2002, 96 (6): 577—579.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Kuzyakov Y, Gunina A, Zamanian K, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7 (3): 282—288.
- [62] van Leeuwen J P, Creamer R E, Cluzeau D, et al. Modeling of soil functions for assessing soil quality: Soil biodiversity and habitat provisioning[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 113.
- [63] Chen Z F, Li Q F, Zhao Y. Application of the fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy to evaluation of agricultural land soil health[J]. China Land Science, 2008, 22 (11): 31—37. [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.]
- [64] Veum K S, Sudduth K A, Kremer R J, et al. Sensor data fusion for soil health assessment[J]. Geoderma, 2017, 305: 53—61.
- [65] 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.
- [66] Askari M S, Holden N M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 57—67.
- [67] 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.
- [68] Cotching W E, Kidd D B. Soil quality evaluation and the interaction with land use and soil order in Tasmania, Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 137 (3/4): 358—366.
- [69] D'Hose T, Cougnon M, De Vliegher A, et al. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 75: 189—198.
- [70] Li L J. Effects of long-term compost application on soil health in Quzhou station[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [李丽君. 长期施用堆肥对曲周农田土壤健康影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]
- [71] Lima A C R, Brussaard L, Totola M R, et al. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 64: 194—200.
- [72] Oberholzer H R, Freiermuth Knuchel R, Weisskopf P, et al. A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32 (3): 639—649.
- [73] Pulido Moncada M, Gabriels D, Cornelis W M. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data[J]. Geoderma, 2014, 235/236: 271—278.
- [74] Salomé C, Coll P, Lardo E, et al. The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards[J]. Ecological Indicators, 2016, 61: 456—465.
- [75] Wang L. The change of soil biology character and the evaluation of the soil health in Ningxia desert steppe under the different rotational grazing[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015. [王丽. 不同轮牧方式下宁夏荒漠草原土壤生物学性状变化及土壤健康评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.]
- [76] Jian J S, Du X, Stewart R D. A database for global soil health assessment[J]. Scientific Data, 2020, 7 (1): 16.
- [77] Ye S J, Song C Q, Cheng F, et al. Cultivated land health-productivity comprehensive evaluation and its pilot evaluation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (22): 66—78. [叶思菁, 宋长青, 程锋, 等. 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (22): 66—78.]
- [78] Ghimire R, Thapa V R, Cano A, et al. Soil organic matter and microbial community responses to semi-arid croplands and grasslands management[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 141: 30—37.
- [79] Lal R. Soil health and carbon management[J]. Food and Energy Security, 2016, 5 (4): 212—222.
- [80] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 139: 19—22.
- [81] van Wesemael B, Chartin C, Wiesmeier M, et al. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 274: 62—75.
- [82] Barrios E. Soil biota, ecosystem services and land productivity[J]. Ecological Economics, 2007, 64 (2): 269—285.
- [83] 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 (1492): 685—701.
- [84] 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.
- [85] Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators

- of soil quality: Soil microorganisms[J]. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1992, 7 (1/2): 33—37.
- [86] Zhang J L, Van der Heijden M, 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.
- [87] Lu Q, Liu T, Wang N, et al. A review of soil nematodes as biological indicators for the assessment of soil health[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7 (3): 275—281.
- [88] Duran-Bautista E H, Armbrecht I, Serrão Acioli A N, et al. Termites as indicators of soil ecosystem services in transformed Amazon landscapes[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106550.
- [89] Wang C, Walker B D, Rees H W. Chapter 15 Establishing a benchmark system for monitoring soil quality in Canada[J]. *Developments in Soil Science*, 1997, 25: 323—337.
- [90] Andrews S S, Carroll C R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11 (6): 1573—1585.
- [91] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (6): 1945—1962.
- [92] 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.
- [93] Idowu O J, Es H M, Abawi G S, et al. Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307 (1/2): 243—253.
- [94] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health- The cornell framework manual. Edition 3.1.[R/OL].(2016—09) [2021—07—19]. <http://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/front-matter.pdf>.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] Bhaduri D, Purakayastha T J. Long-term tillage, water and nutrient management in rice-wheat cropping system: Assessment and response of soil quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144: 83—95.
- [99] Purakayastha T J, Pathak H, Kumari S, et al. Soil health card development for efficient soil management in haryana, India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 294—305.
- [100] Sparling G P, Schipper L A. Soil quality at a national scale in New Zealand[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31 (6): 1848—1857.
- [101] Antoni V, Saby N, Jolivet C, et al. The French information system on soils: A decision support system for soil inventory, monitoring and management[J]. *Environmental Informatics and Systems Research*, 2007: 255—262.
- [102] Merrington G, Fishwick S, Barraclough D, et al. The development and use of soil quality indicators for assessing the role of soil in environmental interactions [R/OL]. (2006—03) [2021—07—19]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290729/scho0306bkiq-e-e.pdf.
- [103] MacEwan R J. Soil health for Victoria's agriculture context, terminology and concepts (MIS 07898 final report) [R/OL] (2007—03) [2021—07—19]. [http://vro.agriculture.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/0d08cd6930912d1e4a2567d2002579cb/71de891c76430335ca2576cb00031fdd/\\$FILE/Soil%20Health%20Final%20Report%20March%2007%20\(07898\).pdf](http://vro.agriculture.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/0d08cd6930912d1e4a2567d2002579cb/71de891c76430335ca2576cb00031fdd/$FILE/Soil%20Health%20Final%20Report%20March%2007%20(07898).pdf).
- [104] 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.]
- [105] Ministry of Land and Resources of People's Republic of China. Regulations for classification on agriculture land: GBT28407-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. [自然资源部. 农用地质量分等规程: GBT28407-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.]
- [106] Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical evaluation of land quality in China and its applications[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 122—135.
- [107] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Cultivated land quality grade: GB/T 33469-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. [农业农村部. 耕地质量等级: GB/T 33469-2016[S]. 北京: 中国标准出版, 2016.]
- [108] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. [R/OL]. Bulletin of the national cultivated land quality status in 2019. (2020—05—06) [2021—07—19]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.html. [农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[R/OL]. (2020—05—06).

- [2021-07-19]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202004/202005/t20200506_6343095.html.]
- [109] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618-2018[S]. Beijing : China Environmental Science Press, 2018. [生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行): GB 15618-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.]
- [110] Gao L L, Zhang C, Lü Y W, et al. Construction and application of multi-factor cultivated land health productivity evaluation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (5): 215—222. [高璐璐, 张超, 吕雅慧, 等. 耕地健康产能多要素评价体系构建与应用. 农业机械学报, 2020, 51 (5): 215—222.]
- [111] 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.]
- [112] Wolfert S, Ge L, Verdouw C, et al. Big data in smart farming - A review[J]. Agricultural Systems, 2017, 153: 69—80.
- [113] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1051—1059. [沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1051—1059.]

(责任编辑: 卢 萍)