

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.023

吴霞, 蔡进军, 雷金银, 等. 基于文献计量的土壤健康评价研究进展可视化分析. 土壤, 2023, 55(3): 647–657.

基于文献计量的土壤健康评价研究进展可视化分析^①

吴霞^{1,2}, 蔡进军^{1,2*}, 雷金银^{1,2}, 王长军¹, 李维倩¹, 陈刚^{1,2}, 白阳阳¹

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 国家农业环境银川观测实验站, 银川 750002)

摘要: 本文以 Web of Science 核心数据库中收录的土壤健康评价相关文献为基础数据, 采用 CiteSpace 工具, 对文献数量、题目、关键词、作者等信息进行可视化计量分析。结果表明: ①土壤健康评价是一项环境科学、土壤科学、农学等多学科交叉的研究领域, 目前正处于快速发展时期; 美国在这一领域的研究实力和国际影响力最大, 我国虽然起步较晚但发展迅速, 发展潜力巨大。②土壤健康概念从狭义到广义, 评价指标从理化属性到物理、化学、生物综合指标, 评价体系从单一粮食生产到多种生态系统服务功能, 方法模型从专家经验到系统建模, 技术手段从常规检测到微生物组学、地信遥感等正在逐步改进和完善。③生物学指标、土壤多功能定量评价、客观准确的评价模型等是目前土壤健康评价研究的前沿和热点。我国土壤健康评价研究尚处于发展阶段, 本文梳理总结了国际土壤健康评价研究进展和发展前沿, 以期为我国土壤健康评价研究工作提供参考与借鉴。

关键词: 土壤健康评价; 指标体系; 方法模型; 文献计量; CiteSpace

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A

Visual Analysis of Research Progress in Soil Health Assessment Based on Bibliometric

WU Xia^{1,2}, CAI Jinjun^{1,2*}, LEI Jinyin^{1,2}, WANG Zhangjun¹, LI Weiqian¹, CHEN Gang^{1,2}, BAI Yangyang¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China; 2 Station of Observation and Experiment National Agricultural Environment in Yinchuan, Yinchuan 750002, China)

Abstract: This paper summarizes the research progress and development frontier of international soil health assessment, with a view to providing reference for the research on soil health assessment in China. Based on the literatures related to soil health assessment included in the core database of Web of Science, this paper used the CiteSpace tool to carry out a visual quantitative analysis on the literature quantity, titles, keywords, authors and other information. The results show that: 1) Soil health assessment is an interdisciplinary research field such as environmental science, soil science and agronomy, and is currently in a period of rapid development. The United States have the greatest research strength and international influence in this field. Although China started late, it has developed rapidly and has huge potential for development. 2) The concept of soil health ranges from narrow to broad. Evaluation indicators from physical and chemical attributes to physical, chemical and biological comprehensive indicators. Evaluation systems from single food production to multiple ecosystem service functions. Method models from expert experience to system modeling. The technical means are gradually improved and perfected from routine detection to microbiology, GIS and remote sensing. 3) Biological indicators, multifunctional quantitative assessment of soil, objective and accurate evaluation models are the frontiers and hot spots of soil health assessment. The research on soil health assessment in China is still in the development stage.

Key words: Soil health assessment; Index system; Method model; Bibliometrics; CiteSpace

土壤是陆地生态系统的重要组成部分, 是联系地球大气圈、生物圈、水圈、岩石圈的纽带, 它不仅是粮食生产和农业可持续发展的关键, 也是生态环境安

全和人类健康的重要基础^[1]。土壤健康是农业绿色生产的必要条件, 只有健康的土壤才可以生产出健康的粮食, 从而保障食品安全和人类健康。然而, 城市化、

①基金项目: 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-11-01)、国家农业基础性长期性科技工作观测监测项目(NAES091AE18)和宁夏自然科学基金项目(2022AAC03458)资助。

* 通讯作者(nxyccai@163.com)

作者简介: 吴霞(1984—), 女, 宁夏吴忠人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤健康评价研究。E-mail: wuxia-xia@163.com

工业化以及不合理土地利用导致的土壤污染和退化问题正在日益加剧,严重威胁着全球粮食生产以及人类健康和生态环境安全^[2]。因此,防治土壤污染、保护土壤健康刻不容缓。开展土壤健康评价、摸清土壤健康现状是健康土壤培育和保护的必要条件,也是农业长期可持续发展的基础。

土壤健康被定义为土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要生态系统持续发挥作用的能力^[3],传统以化学和物理性质为主的土壤肥力和质量评价忽略了土壤的生物属性、生态功能以及生命力^[4]。量化土壤健康需要整合土壤物理、化学、生物、环境、生态等属性进行综合诊断评价,不少学者和科研机构已经提出了土壤健康综合评估框架和指标体系^[5-7],但还需要进行深入研究,在实践中不断改进和完善。Karlen 等^[8]、吴克宁等^[9]、张江周等^[10]对国内外土壤健康评价相关概念、指标体系、评价模型等研究进展情况和发展趋势进行了概括和总结,但这些综述性文章鲜有对土壤健康评价研究进展的可视化分析。

文献计量学是以文献为研究对象,采用数学和统计学方法研究文献数量关系和规律的一门学科,借助文献计量方法可探讨某一研究领域的发展特征^[11]。本文采用文献计量方法,以 Web of Science 核心数据库收录的土壤健康评价相关的文献为数据样本,借助 CiteSpace 可视化文献计量分析软件,梳理了土壤健康评价研究现状、发展脉络、热点及趋势等,以期为我国土壤健康评价研究工作提供借鉴和启示。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文以 Web of Science(WoS)核心集的科学引文扩展数据库(Science Citation Index-Expanded, SCI-Expanded)为数据源进行土壤健康评价研究文献检索。检索条件为(TS="soil health" AND TS=(assess* OR evaluat*)),检索日期为 2022 年 4 月 20 日,共检

索到 1 691 篇相关文献,排除会议摘要、书籍简介、信息资讯等无关文献,最终得到 1 679 篇文献。

1.2 研究方法

基于上述检索到的文献,首先利用 WoS 数据库的基础统计功能结合 Excel 对发文数量进行统计分析,再借助 CiteSpace 5.8.R3 软件的学科共现分析、期刊共被引分析、合作网络分析功能定量化分析文献的学科领域和期刊分布、作者、研究机构、国家或地区等研究力量情况,最后通过对文献的参考文献、关键词等进行聚类分析和突现性探测来捕捉国内外土壤健康评价研究领域相关知识结构、研究进展、研究热点和研究前沿等。

CiteSpace 分析中相关指标解释^[12-13]:中介中心性(Betweenness centrality),测度节点在网络中重要性的一个指标,可用来衡量文献(或作者、期刊以及机构等)的重要性,中介中心性超过 0.1 的节点称为关键节点;聚类模块值(Modularity, Q 值),Q>0.3 表示聚类结构显著;聚类平均轮廓值(Silhouette, S 值),S>0.5 表示聚类结果合理,S>0.7 表示聚类结果足以令人信服。

2 结果与讨论

2.1 文献产出时间趋势

文献的年产出量及时间趋势可揭示土壤健康评价相关研究领域的客观发展规律。根据检索结果,土壤健康一词最早于 1996 年由 Doran 等^[14]提出,2000 年以前土壤健康评价研究年发文量不足 5 篇,处于发展的萌芽阶段。2000 年,Doran 和 Zeiss^[7]在前期基础上明确定义了土壤健康的概念,土壤健康评价研究逐步受到科研人员的关注,年发文量呈波动式逐年上升趋势。随着 2015 年^[15]以“健康土壤带来健康生活”为主题的“国际土壤年”活动的开展,土壤健康评价研究年发文量呈指数增长趋势,2021 年发文量达到了近 400 篇(图 1)。通过对比发文总量前 5 位国家的

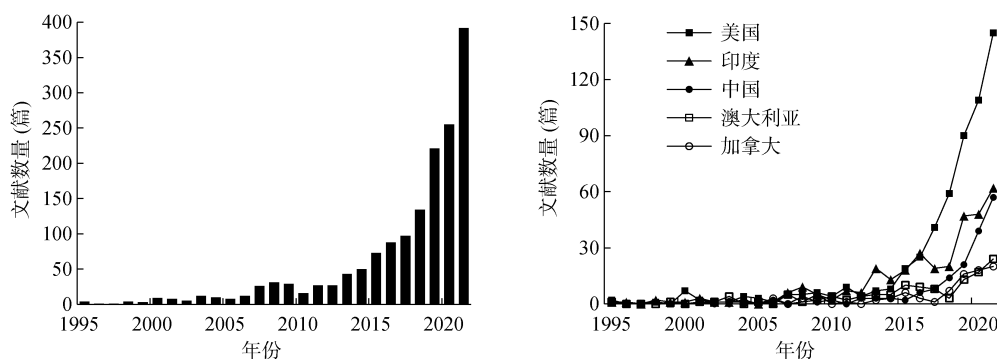


图 1 土壤健康评价领域文献产出趋势图

Fig. 1 Trend of literature output in the field of soil health assessment

年发文趋势可知,美国在土壤健康评价研究方面起步较早且呈快速稳步发展趋势,占到全部发文量的近40%,远远高于其他国家。印度和澳大利亚在土壤健康评价研究领域发展趋势与美国较为一致,但是发文量远低于美国。中国土壤健康评价研究起步较晚,数据集中第一篇相关文献发表于2001年^[16],研究初期发展缓慢,2015年开始发文量迅速增加^[17-19],年平均增长近80%,增速远超美国、印度、澳大利亚、加拿大等国家,随着我国对生态环境和土壤健康的重视程度不断加强,未来我国在土壤健康评价领域发文量将持续上升。

2.2 学科领域及期刊分布

根据 WoS 学科分类统计(图 2)可知,土壤健康评价研究主要集中在 Environmental Sciences(环境科学)和 Soil Sciences(土壤科学),两个学科发文量占总发文量的近 70%。此外还包括 Agronomy(农学)、Plant Sciences(植物学)、Ecology(生态学)等基础学科以及 Agriculture Multidisciplinary(农业多学科)、Multidisciplinary Sciences(多学科科学)等交叉学科领域,说明土壤健康评价是一项以环境科学和土壤科学为基础,涉及农学、生态学、植物学等多学科交叉的综合性研究。同时,土壤健康评价研究还涉及到 Green Sustainable Sciences Technology(绿色可持续科学技术)和 Water Resources(水资源)等近些年的热点研究领域。

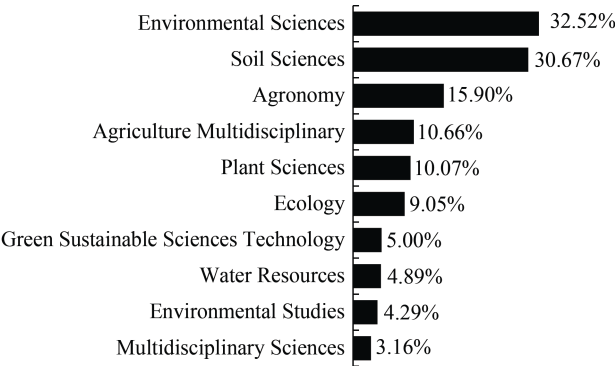


图 2 土壤健康评价研究前十位学科领域发文量占比
Fig. 2 The proportion of publications in top ten disciplines

根据 WoS 的期刊统计,此数据集中共有 391 本期刊刊登了土壤健康评价研究相关的文献,其中刊文 10 篇以上的有 40 本,刊文量合计 940 篇,占总发文量的 55.99%。从表 1 可以看出,刊文较多的期刊有 *Applied Soil Ecology*、*Sustainability*、*Science of the Total Environment*、*Soil Tillage Research* 等,进一步说明土壤健康评价是一个综合了环境科学、土壤科学、农学、生态学等多学科交叉的研究方向。

表 1 发文量前十位的期刊发文情况
Table 1 The Publication status of top ten journals

排序	期刊名称	发文量(篇)	占比(%)
1	<i>Applied Soil Ecology</i>	73	4.35
2	<i>Sustainability</i>	58	3.45
3	<i>Science of the Total Environment</i>	57	3.40
4	<i>Soil Tillage Research</i>	53	3.16
5	<i>Soil Science Society of America Journal</i>	49	2.92
6	<i>Agriculture Ecosystems Environment</i>	44	2.62
7	<i>Indian Journal of Agriculture Sciences</i>	40	2.38
8	<i>Geoderma</i>	38	2.26
9	<i>Agronomy Basel</i>	37	2.20
10	<i>Soil Biology and Biochemistry</i>	34	2.03

2.3 主要研究力量分析

2.3.1 发文国家/地区分布 图 3 显示了土壤健康评价研究领域发文量较多的国家/地区之间的合作关系,节点越大表明发文数量越多,节点之间的连线越密集表明相互之间的合作越紧密,紫色外圈表明节点的中介中心性大于 0.1,属于关键节点^[20]。结合表 2 分析可知,美国的发文量、总被引次数和中介中心性均排名第一,表明美国在土壤健康评价研究领域处于世界领先地位,不仅科研实力和国际影响力较高,且与其他国家之间的合作研究较为密切。印度环境污染严重,较早开展土壤健康研究,发文量仅次于美国,但文献被引次数较低,主要与其他国家开展合作研究为主。德国、西班牙、荷兰、英国等欧盟国家虽然发文量相对较少,但平均被引次数较高,且中心性均大于 0.1,说明欧盟国家之间的合作关系较为紧密,研究成果的影响力较高。我国虽然发文量排名第三,但总被引次数、平均被引次数和中介中心性远低于美国、德国、澳大利亚、西班牙等国家,说明我国在土壤健康评价研究领域国际影响力并不高,相关研究的质量有待提升。通过对比发现中国、印度、巴西等国

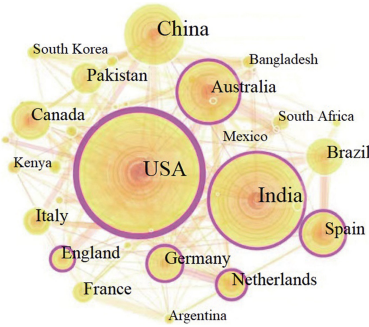


图 3 土壤健康评价研究的国家/地区合作网络图
Fig. 3 Countries/regions cooperation network of soil health assessment research

表 2 发文量排名前十位的国家/地区分布情况
Table 2 The Publication status of top ten countries/regions

排名	国家或地区	发文量(篇)	总被引次数	平均被引次数	中心性
1	美国	591	11 490	19.44	0.36
2	印度	340	4 451	13.09	0.19
3	中国	178	3 307	18.58	0.07
4	澳大利亚	124	4 246	34.24	0.10
5	加拿大	94	1 917	20.38	0.06
6	西班牙	78	2 390	30.64	0.16
7	巴西	76	1 381	18.17	0.04
8	巴基斯坦	72	1 126	15.64	0.03
9	意大利	69	2 127	30.83	0.05
10	德国	65	1 791	27.55	0.20

家在土壤健康评价领域的研究实力和国际影响力远不及美国、德国、法国等，应加强与这些国家的合作研究，注重科研创新性。

2.3.2 全球主要研究机构分布 发文量排名前十位的研究机构中，美国独占一半，印度、中国、巴基斯坦、荷兰和加拿大各 1 家(表 3)。其中，美国农业部虽然发文量低于印度，但总被引次数和中心性均排名第一，由其组织开发的土壤管理评价框架(Soil Health Management Assessment Framework, SMAF)^[6]自 2004 年发布以来在世界范围内得到了广泛应用，尤其是美国、加拿大、巴西等国家和地区。康奈尔大学、加州大学戴维斯分校、瓦赫宁根大学等是农业科学领域中世界顶尖的大学，在土壤健康评价方面具有较多创新型研究成果。康奈尔大学提出的康奈尔土壤健康评价体系(Cornell Comprehensive Assessment of Soil Health, CASH)^[5]可准确评价田块尺度土壤健康状况，是传统土壤质量评价的重要发展。中国科学院

发文量排名第五，中心性排名第二，其下属的中国科学院大学(13 篇)、南京土壤研究所(9 篇)等科研院所所在土壤健康评价领域具有较强的研究实力。

表 3 发文量排名前十位的研究机构分布情况
Table 3 The Publication status of top ten research institutions

排名	研究机构	国家	发文量(篇)	总被引次数	平均被引次数	中心性
1	印度农业研究会	印度	185	2 444	13.21	0.01
2	美国农业部	美国	156	3 849	24.67	0.34
3	康奈尔大学	美国	47	1 536	32.68	0.02
4	加州大学	美国	45	620	13.78	0.04
5	中国科学院	中国	43	813	18.91	0.11
6	俄亥俄大学	美国	38	776	20.42	0.05
7	费萨拉巴德农业大学	巴基斯坦	37	460	12.43	0.00
8	瓦赫宁根大学	荷兰	36	2 110	58.61	0.04
9	佛罗里达大学	美国	30	468	15.60	0.01
10	加拿大农业及农业食品部	加拿大	29	458	15.79	0.02

2.3.3 作者分析 经统计，数据集中共有 7 162 名作者参与了土壤健康评价相关研究，发文量 10 篇以上的作者共有 24 位，表 4 列出了发文量排名前十位的作者信息。分析可知 Karlen 和 Acosta-martinez 是一作发文量、总被引次数和平均被引次数较高的作者，Doran(3 篇)和 Hill(1 篇)虽然发文量较少，但其发表的文献引用频次较高(分别为 1 201 次和 323 次)，4 位作者均来自美国农业部、康奈尔大学等美国科研机构，进一步说明美国在土壤健康评价领域处于国际领先地位。来自西班牙、印度、新西兰等国家的作者虽然总发文量较高，但是一作发文量、被引次数和平均被引次数均较低，说明多以合作研究为主，学术影响力并不高。

表 4 发文量排名前十位的作者信息
Table 4 The Publication status of top ten authors

排名	作者	所属机构	所属国家	总发文量(篇)	一作数量(篇)	总被引次数	平均被引次数
1	Garbisu C	巴斯克大学	西班牙	24	0	802	33.42
2	Kumar A	印度农业研究会	印度	22	2	281	12.77
3	Kumar S	印度农业研究会	印度	21	4	129	6.14
4	Acosta-martinez V	美国农业部	美国	19	4	681	35.84
5	Ghimire R	新墨西哥州立大学	美国	18	6	132	7.33
5	Karlen D L	美国农业部	美国	18	7	933	51.83
7	Kumar R	印度农业研究会	印度	17	5	129	7.59
8	Singh S	田纳西大学	美国	16	5	130	8.13
9	Sharma S	怀卡托大学	新西兰	15	2	100	6.67
9	Singh R	印度农业研究会	印度	15	3	167	11.13

2.4 研究进展分析

2.4.1 关键词分析 关键词是文献中出现频率最高最为核心的词汇，是对文献内容的高度概括和凝练,通过对某一研究领域不同时期关键词变化趋势的统计分析,可在一定程度上掌握某一研究领域的发展脉络与研究现状^[21]。本研究采用 CiteSpace 关键词共现分析提取了土壤健康评价研究领域的高频关键词，经过同义词合并和无效词组排除后统计结果如表 5

所示。同时，以 1995—2022 年为研究期限，2 a 为一个时间切片绘制关键词时区网络图(图 4)，并对共现频次大于 50 的关键词加以显示。图中每个节点代表一个关键词，节点位置代表其最早出现的年份，年轮颜色代表其不同时间切片中出现频次，节点越大出现频次就越高；节点间的连线代表不同关键词共同出现在同一篇文献中，连线颜色表示共同出现的时间^[20]。

表 5 土壤健康评价研究高频关键词列表
Table 5 List of high-frequency keywords for soil health assessment research

关键词	共现频次	中心性	关键词	出现频次	中心性
soil health	980	0.29	indicator	93	0.06
organic matter	359	0.12	physical property	92	0.07
organic carbon	340	0.17	soil fertility	86	0.05
nitrogen	218	0.10	soil health indicator	84	0.10
soil quality	197	0.10	bulk density	83	0.07
microbial community	181	0.17	organic amendment	81	0.08
enzymatic activity	173	0.13	biological property	76	0.11
microbial biomass	171	0.05	bacterial community	72	0.06
soil property	159	0.11	conservation agriculture	71	0.07
crop productivity	130	0.09	conventional tillage	70	0.04
microbial biomass carbon	112	0.05	microbial activity	66	0.04
no tillage	108	0.03	chemical property	65	0.07
heavy metal	106	0.21	crop rotation	65	0.03
ecosystem service	100	0.04	microbial community structure	64	0.04

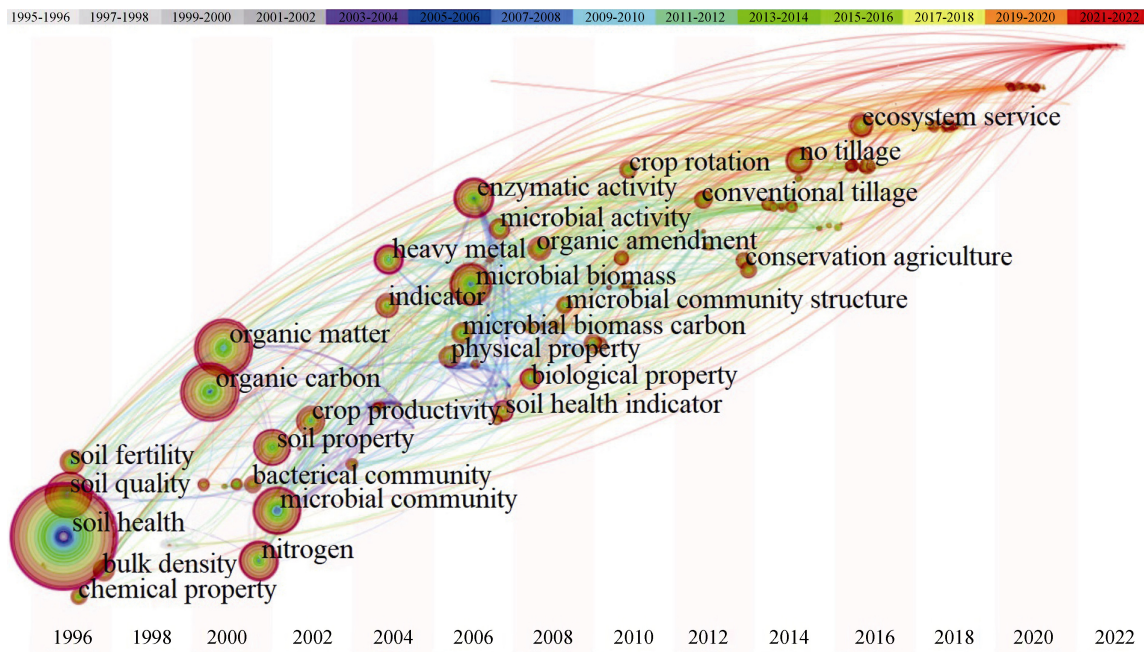


图 4 土壤健康评价研究关键词时区网络图
Fig. 4 Time zone network of key words for soil health assessment

通过表 5 和图 4 可以看出,土壤健康一词自 1996 年首次出现开始一直备受关注,且关注度日益增强,出现频次和中心性均远远高于其他关键词。科研人员围绕土壤健康从基础概念、评价指标、影响因素、管理实践等各方面开展研究。分析不同阶段关键词可以归纳出土壤健康评价研究的发展演变趋势:①20 世纪 90 年代中后期土壤健康逐渐进入人们的视野,这一时期的关键词主要有 soil health(土壤健康)、soil quality(土壤质量)、soil fertility(土壤肥力)、chemical property(化学性质)等,此时土壤健康评价尚处于萌芽阶段,主要以土壤质量和土壤肥力评价研究为主,选用的评价指标更侧重于土壤化学指标^[3,8];②21 世纪初期出现 organic matter(有机质)、microbial community(微生物群落)、soil property(土壤性质)、crop productivity(作物生产力)等词,此时长期耕作导致的土壤有机质下降问题突出,人们在关注土壤生产力的同时开始关注土壤有机碳、微生物群落等,逐渐开始采用综合指标对土壤健康状况进行评价^[22-24];③2010 年前后,随着土地长期不合理利用导致的土壤污染和退化问题越来越严重,heavy metal(重金属)、soil health indicator(土壤健康指标)、biological property(生物性质)、microbial biomass(微生物生物量)、microbial activity(微生物活性)、enzymatic

activity(酶活性)等词相继出现,研究重点逐渐转移到对土壤健康更为敏感的生物学评价指标上^[25-28];④2015 年以后, no tillage(免耕)、crop rotation(作物轮作)、conventional agriculture(保护性农业)等词的出现标志着人们开始注重土壤健康保护, ecosystem service(生态系统服务)一词的出现体现出土壤健康评价开始考虑土壤的生态功能,土壤健康评价研究更加客观、精确,符合农业可持续发展的实际需求^[29-32]。

2.4.2 文献聚类分析 通过文献共被引分析可挖掘文献的共同主题,探究相关领域的研究进展^[33]。本研究检索土壤健康评价相关文献 1 679 篇,引文共 33 044 篇,利用 CiteSpace 对文献及其引文进行共被引分析和聚类,共得到 9 个聚类,聚类模块值 Q 为 0.896 7,平均轮廓值 S 为 0.933 9,说明聚类具有良好的内部一致性,结果非常理想。采用时间线图对聚类结果进行显示,并采用潜在语义索引(latent semantic indexing, LSI)算法显示聚类标签,结果如图 5 所示,图中每一个节点代表一篇文献,节点越大共被引次数越高,节点之间的连线代表其共同被引用关系^[34]。根据图 5 可将聚类结果划分为 3 类:土壤健康概念(集群#0)、土壤健康评价指标选取(集群#1)和土壤健康评价实践(集群#2~ 集群#8)。

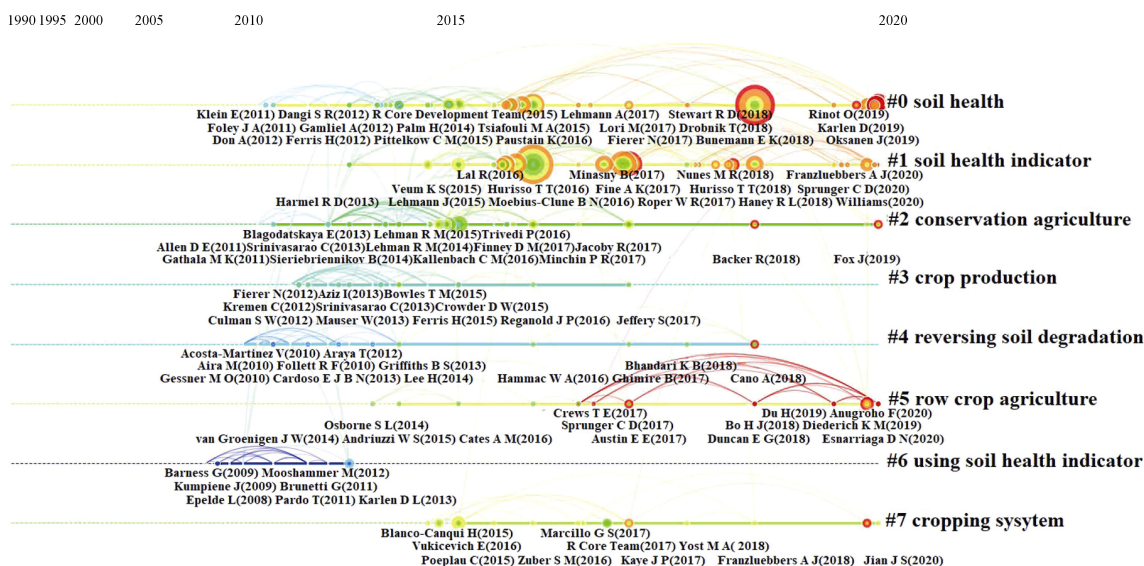


图 5 土壤健康评价研究文献聚类时间线图

Fig. 5 Clustering timeline of soil health assessment research literature

集群#0 所包含的文献主要以土壤健康的内涵、概念由来、发展过程等理论研究为主^[3,4,8,35]。其中, Bunemann 等^[4] 2018 年发表于 *Soil Biology and Biochemistry* 的评论文章共被引次数最高, Bunemann 等对土壤评价相关的土壤肥力、土壤质量、土壤功能、

土壤健康等概念发展历程进行了阐述,认为土壤健康等同于土壤质量。来自美国康奈尔大学的 Lehmann 等^[3]在 2020 年 8 月发表于 *Nature Reviews Earth & Environment* 的论文中将土壤健康定义为土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要生态系统发挥作用的

持续能力,从生态系统服务、土壤功能的角度将土壤健康区别于其他土壤概念。来自美国农业部的 Karlen 等^[8,35]研究团队认为土壤健康是一种动态的、维持生命的条件,强调了土壤的生命力、抵抗力、恢复力等生态属性。通过对比可知,土壤质量侧重于土壤的基本生产功能,而土壤健康是一个综合量度,对土壤的碳封存、污染净化、生物多样性、气候调节等生态系统服务功能给予了更高关注度。

集群#1 主要以土壤健康评价指标体系和方法为研究主题,与集群#0 关系紧密。传统的土壤评价主要关注土壤肥力状况及作物生产能力,以化学性质为主的评价指标体系导致了土壤的污染和严重退化,土壤健康评价扩展了传统的土壤肥力、土壤质量等评价指标,使用土壤生物、物理和化学等指标综合评估土壤健康状况^[36-40]。土壤健康管理评估框架^[37](SMAF)和康奈尔土壤健康评价体系^[38](CASH)是土壤健康评价的重要工具,两种方法均将多种数据与土壤属性相结合,筛选对土地管理措施敏感且与生态系统服务密切相关的评价指标。例如,土壤有机碳、微生物生物量、土壤呼吸、酶活性等指标反映了土壤有机质的数量和质量以及土壤微生物的丰度和活性等,并与多种土壤功能和过程有关,是土壤健康评价的重要指标。Nunes 等^[39]的研究证明了土壤有机碳和生物指标对管理措施非常敏感,证实了其在土壤健康评估中的实用性。Fine 等^[40]通过分析多年历史土壤数据发现,大多数土壤物理、化学和生物指标之间具有一定的相关性,土壤活性有机碳、穿透阻力、呼吸强度和水稳性团聚体可作为简化的土壤健康评价指标。由此可以看出,尽管我们可根据评价目标和对象的不同选取适合的指标进行土壤健康评价,但生物指标和生态服务功能是土壤健康评估必须要考虑的因素。

集群#2~ 集群#8 包括保护性农业、轮作农业、种植制度、退化土壤恢复等与土壤健康密切相关的研究主题,主要利用土壤健康评价指标和方法对传统农业与保护性农业、长期单一种植与轮作种植、长期耕作与少耕免耕等不同管理措施下的土壤健康状况进行评价实践,以期寻找有利于土壤健康和农业可持续发展的土地管理方式^[29,41-46]。Congreves 等^[29]采用康奈尔评估方法对加拿大安大略省的 4 个长期试验点的土壤状况进行健康评价,结果显示免耕与传统耕作相比土壤健康得分更高,作物轮作往往比单作具有较高的土壤健康得分。Bowles 等^[42]对美国加利福尼亚 13 块种植有机番茄的农田土壤调查分析显示,有机农业种植管理的土壤具有较高的酶活性,可有效增强

土壤养分循环能力。Bongiorno 等^[43]对欧洲 10 个长期定位试验田不同管理措施的评估显示,少耕和高有机质输入增加了土壤的活性有机碳,有利于土壤碳固存、养分循环和生物多样性等功能的提高。Poeplau 等^[44]研究表明覆盖作物和种植绿肥相较于对照农田能显著提高土壤有机碳,可将覆盖作物、种植绿肥纳入种植系统,以提高土壤碳库储量。Deng 等^[45]研究了中国东北软土区传统耕作和免耕 10 a 后的土壤剖面细菌结构和理化参数,比较发现,低干扰措施可以恢复土壤的细菌多样性和潜在功能,促进根区的保水和保氮能力,从而减少氮肥用量,减轻对深层地下水的氮污染,最终有助于软土地区的农业可持续性。综上所述,使用土壤健康的概念和评价指标体系指导土地管理和农业生产对于生态环境保护和防止土壤退化至关重要。

2.5 研究前沿分析

突现分析用来探测某一时段内大量被引用的关键词或文献,用以发现某一个关键词衰落或者兴起的情况,近期突现强度较高的关键词在一定程度上代表了该领域的研究前沿^[46]。为准确把握土壤健康评价的研究前沿,本文利用 CiteSpace 对近 5 a(2017—2022 年)土壤健康评价研究领域关键词进行突现分析,结果如图 6 所示。

关键词	年份	强度	开始	结束	2017—2022
momel	2017	4.05	2017	2018	
overall soil health	2017	3.03	2017	2018	
long-term effect	2017	2.87	2017	2019	
soil ecosystem	2017	2.73	2017	2018	
active carbon	2017	2.62	2017	2019	
sustainability	2017	2.48	2017	2018	
sensitive indicator	2017	2.19	2017	2019	
biodiversity	2017	3.45	2018	2019	
sustainable management	2017	3.13	2018	2019	
soil health status	2017	2.73	2018	2019	
disease	2017	2.34	2018	2019	
comprehensive assessment	2017	2.00	2018	2019	
residue retention	2017	3.30	2019	2020	
conservation practice	2017	2.70	2019	2020	
agroecosystem	2017	2.40	2019	2020	
soil bulk density	2017	2.40	2019	2020	
nutrient management	2017	2.12	2019	2020	
nitrogen mineralization	2017	2.74	2020	2022	
mechanism	2017	2.05	2020	2022	
biological health	2017	2.05	2020	2022	

(图中红色表示关键词在该时期内使用频次骤增)

图 6 土壤健康评价研究近期突现关键词

Fig. 6 Keywords emerged recently in soil health assessment research

分析图 6 和相关文献可将土壤健康评价研究前沿总结为以下 4 个方面:

1) 以生物指标为主的土壤健康评价指标筛选。以往土壤评价通常以化学和物理指标为主, 生物指标受技术和成本的限制选择较少, 而土壤生物尤其是土壤微生物在维持土壤生命力、保护土壤健康和可持续利用方面发挥着重要作用, 且对土壤管理措施和环境变化敏感性较高, 其在土壤健康评价中的作用不容忽视^[47]。随着高通量测序、基因组学、代谢组学、基因芯片等分子生物学技术的快速发展, 土壤生物多样性、微生物群落结构、功能微生物等在土壤健康评价方面潜力极大, 未来生物指标对土壤环境变化的响应和量化方法将是研究重点^[48]。

2) 基于生态系统功能的土壤健康综合评价体系。土壤是陆地生态系统的中心, 是维持陆地生态系统功能的重要且有限资源, 以生产功能为主导的土壤评价导致了土壤污染和生态环境恶化, 对农业可持续发展造成严重威胁。从土壤生态系统服务功能入手, 协同考虑土壤初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等功能构建土壤健康综合评价体系是全面、准确评价土壤健康状况的基础^[49]。

3) 利用系统建模方法构建土壤健康评价模型。传统土壤评价主要是依据专家经验、文献资料等先验知识构建指标体系和评分函数^[9], 虽然技术方法简单易行但评价结果存在一定的主观局限性。以土壤大数据为基础, 采用支持向量机、随机森林、神经网络、深度学习等新兴系统建模方法, 构建基于机器学习的土壤健康评价模型, 可更加客观地表征和模拟土壤健康状况, 有利于更加客观地选择评价指标, 进一步优化土壤健康评价体系^[10,50]。

4) 基于健康评价的土壤可持续利用管理措施。监测土壤健康状况, 开展系统评价与模拟预测是土壤健康保育和可持续管理利用的基础, 初步研究发现免耕、休耕、轮作、覆盖等耕作措施更有利于土壤健康^[51-52]。针对不同土壤类型、不同地区、不同作物的土地利用方式和管理措施(多样化种植、有机肥施用、生物防控、保护性耕作、有机种植等)开展健康诊断与评价, 寻找适宜的土壤健康管理措施和农业可持续发展模式是未来一段时期的研究热点^[53]。

3 讨论

3.1 土壤健康的含义

尽管检索结果显示土壤健康的概念在 2000 年后才逐渐被广泛地提及和频繁地使用, 特别是 2010 年

以来生物多样性的快速发展和 2015 年“国际土壤年”等活动的开展, 使得土壤健康成为社会各界关注的焦点^[4], 但土壤评价一直是土壤学研究的一个重要方向。早期土壤评价侧重于以作物产量为目标的肥力评价、地力评价, 随着土壤污染不断加重, 逐渐发展到土壤环境评价、质量评价等^[3-4]。目前, 土壤的健康状况越来越受到重视, 土壤健康评价成为学术界研究的热点。最初, 部分学者将土壤健康等同于土壤质量, 随着相关理论研究和实践探索的不断深入, 目前学术界较为认可的是美国农业部关于土壤健康的定义, 即土壤作为一个生命系统, 持续维持植物、动物和人类生存的能力^[3], 强调了土壤的生命属性、生物多样性和生态系统服务功能。

3.2 土壤健康评价指标选取

量化土壤健康状况是实现土壤健康管理和农业可持续发展的重要基础。Lehmann 等^[3]提出, 土壤健康指标的选取应遵循几个标准: 与土壤生态系统功能相关, 敏感且快速反映土壤健康变化, 实用且成本低廉, 为土壤管理提供信息。相比化学、物理指标的长期稳定性而言, 生物指标更为敏感, 能对土壤健康状况变化做出快速反应, 进而为土壤健康管理提供信息, 且土壤化学、物理属性的变化受到土壤生物活动的影响^[2,8]。由此可见, 生物指标在土壤健康评价中发挥着重要作用。长期以来, 土壤评价指标选取以化学、物理指标为主, 如有机质、有效磷、全氮、pH、容重等, 较少涉及生物指标^[54]。近 10 a 来随着生物指标在土壤健康评价中的潜力逐步被挖掘, 微生物量、土壤呼吸、生物多样性、酶活性等生物属性逐渐引入到土壤健康评价中, 这与前文土壤健康评价关键词的演变趋势一致^[10,54]。但受到检测技术以及生物指标与土壤功能之间的因果关系尚不明确等因素限制, 生物指标选取率仍然较低, 通常只占评价指标的 20% 以下^[3,10]。文献分析结果显示, 随着高通量测序技术的快速发展, 分析和量化土壤生物对土壤功能的影响将是土壤健康评价研究的热点。

3.3 土壤健康评价体系及方法

以往土壤肥力、土壤环境、土壤质量等相关土壤评价中, 通常以化学、物理、生物等属性归类具体指标, 且单个指标可与某一评价目标明确对应, 例如, 氮、磷、钾是土壤肥力评价指标, 重金属及有机污染物是土壤环境评价指标^[8,54]。而土壤健康评价着重强调土壤的多功能性, 土壤的生产功能、调节功能、生物多样性等功能的评价同时涉及化学、物理、生物等多个具体指标, 而某一具体指标是多个土壤功能的反

映。因此,在土壤健康评价中需要将多个指标量化并整合到一个综合指标中^[3]。目前,美国农业部提出的土壤管理评价框架(SMAF)^[6]、康奈尔土壤健康评价体系(CASH)^[5]、欧盟的 Soil Navigator 决策支持模型^[55]等是应用较为广泛的土壤健康评价体系,此外,国内外众多学者提出了针对不同区域的土壤健康评价体系和方法^[30-32,49,56-57]。这些方法的共性是先对每一个具体指标进行量化,再通过专家评分或数学模型建立评价指标与土壤功能之间的非线性关系,最后整合到一个综合的“土壤健康评价指数”中。虽然土壤健康评价体系和方法发展迅速,但仍然存在涵盖指标少(特别是生物指标)、准确性低、灵活性不足等缺点^[3], 这些问题是现阶段和未来土壤健康评价研究的重点。

4 结论与展望

1)文献基本特征分析表明土壤健康评价研究经过了萌芽阶段和逐步发展阶段,现在正处于快速发展阶段;美国最早开展土壤健康评价研究且科研实力和国际影响力远远领先于其他国家,中国虽然起步较晚但发展迅速,有待进一步深入开展相关研究;康奈尔大学、加州大学、中国科学院等是土壤健康评价研究的主要科研机构;土壤健康评价是一个综合研究方向,不仅涉及环境科学和土壤科学,还包括农学、植物学、生态学以及绿色可持续发展技术等。

2)研究进展分析可以看出,土壤健康评价研究从基础概念、评价指标到方法模型等都经历了长足的发展和深入的研究。土壤健康概念从最初被狭义地等同于土壤质量到目前更为广义的土壤维持动植物生产力与多样性、大气与水质、人类健康与良好居住环境的能力,更加重视土壤的生态系统服务功能;评价指标从以理化指标为主发展到物理、化学、生物等综合指标;评价方法从以专家经验诊断到以土壤大数据为基础的数据挖掘和系统建模,评价结果更加准确客观。

3)当前土壤健康评价研究主要集中在以生物指标为主的评价指标筛选、涵盖土壤功能和生态系统服务的评价体系、基于机器学习等系统建模方法的评价模型构建和利用土壤健康评价指导农业生产和土地管理等方面。

随着土壤健康问题越来越受到人们的关注和重视,土壤健康评价进入快速发展时期,未来应运用微生物技术、遥感技术、地理信息等现代新兴技术更深入、准确、全面地开展土壤健康评价研究,为土壤健康保护和农业可持续发展提供理论指导和建议。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796.
- [3] 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.
- [4] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality - A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105-125.
- [5] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health-The Cornell Framework. Edition 3.2[M]. Geneva, NY: Cornell University, 2016.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴克宁, 杨洪钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 537-544.
- [10] 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.
- [11] 邱均平. 文献计量学的定义及其研究对象[J]. 中国图书馆学报, 1986, 12(2): 71.
- [12] Chen C M, Hu Z G, Liu S B, et al. Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace[J]. Expert Opinion on Biological Therapy, 2012, 12(5): 593-608.
- [13] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [14] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M A. Soil health and sustainability[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 1996: 1-54.
- [15] 武雪萍, 徐明岗, 潘根兴. 土壤管理与可持续利用——献给 2015 国际土壤年及《中国农业科学》创刊 55 周年[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4603-4606.
- [16] Nambiar K K M, Gupta A P, Fu Q L, et al. Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 87(2): 209-214.
- [17] Chen W P, Lu S D, Pan N, et al. Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas[J]. Chemosphere, 2015, 119: 654-661.
- [18] 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.
- [19] Zhao R, Wu K N. Soil health evaluation of farmland based on functional soil management—a case study of Yixing city, Jiangsu Province, China[J]. *Agriculture*, 2021, 11(7): 583.
- [20] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016.
- [21] 常畅, 常禹, 胡远满, 等. 基于文献计量的森林和草原可燃物含水率研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1655–1663.
- [22] Hill G T, Mitkowski N A, Aldrich-Wolfe L, et al. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 25–36.
- [23] Doran J W. Soil health and global sustainability: Translating science into practice[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 88(2): 119–127.
- [24] Mandal B, Majumder B, Bandyopadhyay P K, et al. The potential of cropping systems and soil amendments for carbon sequestration in soils under long-term experiments in subtropical India[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 357–369.
- [25] Ranjard L, Dequiedt S, Jolivet C, et al. Biogeography of soil microbial communities: A review and a description of the ongoing French national initiative[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2): 359–365.
- [26] Cardoso E J B N, Vasconcellos R L F, Bini D, et al. Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?[J]. *Scientia Agricola*, 2013, 70(4): 274–289.
- [27] Niemeyer J C, Lolata G B, de Carvalho G M, et al. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 59: 96–105.
- [28] Saha A, Pipariya A, Bhaduri D. Enzymatic activities and microbial biomass in peanut field soil as affected by the foliar application of tebuconazole[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 558.
- [29] Congreves K A, Hayes A, Verhallen E A, et al. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 17–28.
- [30] Sanaullah M, Usman M, Wakeel A, et al. Terrestrial ecosystem functioning affected by agricultural management systems: A review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104464.
- [31] Pheap S, Lefèvre C, Thoumazeau A, et al. Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104349.
- [32] Kihara J, Bolo P, Kinyua M, et al. Soil health and ecosystem services: Lessons from sub-Saharan Africa (SSA)[J]. *Geoderma*, 2020, 370: 114342.
- [33] 史方颖, 张风宝, 杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 381–392.
- [34] 蓝婷, 唐立娜, 徐智邦, 等. 基于文献计量的城市空间紧凑度研究知识图谱分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1645–1654.
- [35] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial)[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 4–10.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Singh S, Jagadamma S, Yoder D, et al. Cropping system management responses to Cornell and Alabama soil health assessment methods in the southeastern United States[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(1): 106–117.
- [39] Nunes M R, Veum K S, Parker P A, et al. The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(4): 1196–1213.
- [40] 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.
- [41] Jat M L, Chakraborty D, Ladha J K, et al. Conservation agriculture for sustainable intensification in South Asia[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(4): 336–343.
- [42] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 252–262.
- [43] Bongiorno G, Bünemann E K, Oguejiofor C U, et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 38–50.
- [44] Poeplau C, Don A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 33–41.
- [45] Deng F B, Wang H J, Xie H T, et al. Low-disturbance farming regenerates healthy deep soil toward sustainable agriculture - Evidence from long-term no-tillage with stover mulching in Mollisols[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153929.
- [46] 陈敏, 秦华, 常健玮, 等. 基于文献计量分析的土壤微生物入侵研究现状及发展趋势[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1492–1503.
- [47] Martin T, Wade J, Singh P, et al. The integration of nematode communities into the soil biological health

- framework by factor analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108676.
- [48] Schlatter D C, Hansen J, Carlson B, et al. Are microbial communities indicators of soil health in a dryland wheat cropping system?[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170: 104302.
- [49] 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.
- [50] Wilhelm R C, van Es H M, Buckley D H. Predicting measures of soil health using the microbiome and supervised machine learning[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 164: 108472.
- [51] Cerecetto V, Smalla K, Nesme J, et al. Reduced tillage, cover crops and organic amendments affect soil microbiota and improve soil health in Uruguayan vegetable farming systems[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2021, 97(3): fiab023.
- [52] Hou D Y, Bolan N S, Tsang D C W, et al. Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138961.
- [53] 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.
- [54] 李鑫, 张文菊, 邹磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043–3056.
- [55] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价[J]. *土壤*, 2006, 38(2): 136–142.
- [56] 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.
- [57] 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.