



张江周,程金,孙新展,张俊伶. 基于文献计量分析的土壤健康研究进展[J]. 中国农业大学学报,2025,30(04):192-205.

ZHANG Jiangzhou, CHENG Jin, SUN Xinzhan, ZHANG Junling. Advances in soil health research based on bibliometric analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(04): 192-205.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.16

基于文献计量分析的土壤健康研究进展

张江周¹ 程金² 孙新展³ 张俊伶^{3*}

- (1. 内蒙古农业大学 资源与环境学院/内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室/农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验,呼和浩特 010018;
2. 福建农林大学 资源与环境学院/国际镁营养研究所,福州 350002;
3. 中国农业大学 资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/养分资源高效利用全国重点实验室,北京 100193)

摘 要 为明确国内外土壤健康领域研究现状与热点,选择中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)作为数据来源,利用文献计量学和 CiteSpace 可视化软件对 2002—2023 年发表的土壤健康领域研究文献进行分析。结果表明: 1)2002—2022 年土壤健康领域中英文发文量均呈上升趋势,中文发文量远低于英文发文量,仅为英文发文量的 14.50%。2)中国和美国土壤健康领域发文量分别占总发文量的 28.63% 和 20.36%;中国科学院、美国农业部、中国农业农村部 and 印度农业研究委员会等是土壤健康领域发文的主要单位。3)中文文献关键词主要为土壤质量、土壤肥力和土地管理等,而英文文献关键词主要关注土壤环境安全。4)从发文时间来看,CNKI 数据库土壤健康领域研究文献依次关注土壤肥力(2002—2014 年),土地占补平衡、土地整治与粮食安全(2015—2019 年),耕地产能、功能及生物活性(2019—2023 年);而 WOS 数据库土壤健康领域研究文献主要关注土壤环境质量(2002—2017 年),面源污染及重金属污染(2018—2023 年)。未来中国和美国仍是土壤健康领域研究的两大中心,耕地质量、耕地产能、土壤污染、健康土壤培育和土壤微生态等可能成为土壤健康领域的研究热点和焦点。

关键词 文献计量法; CiteSpace; 土壤健康; 研究热点

中图分类号 S154

文章编号 1007-4333(2025)04-0192-14

文献标志码 A

Advances in soil health research based on bibliometric analysis

ZHANG Jiangzhou¹, CHENG Jin², SUN Xinzhan³, ZHANG Junling^{3*}

- (1. College of Resources and Environmental Sciences/Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources/Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2. College of Resources and Environment/International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
3. College of Resources and Environmental Sciences/National Academy of Agriculture Green Development/State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to understand the domestical and international research status and hotspots of soil health, this study uses bibliometric analysis and CiteSpace visualization software to analyze the literature on soil health published from 2002 to 2022, based on the Chinese database CNKI and the English database Web of Science (WOS) as data sources. The results showed that: 1) From 2002 to 2023, the number of published papers on soil health shows an upward trend in both Chinese and English. However, the number

收稿日期: 2024-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1901500)

第一作者: 张江周(ORCID:0000-0002-6821-0026),副教授(校聘),主要从事土壤健康与耕地产能提升研究,E-mail: zjzky2010@163.com

通讯作者: 张俊伶(ORCID:0000-0001-8567-4116),教授,主要从事土壤健康与微生物生态研究,E-mail: junlingz@cau.edu.cn

of Chinese publications is much lower than that in English, accounting for only 14.50% of the total English publications. 2) Both China and the United States of America are the two leading countries with the largest number of publications in the field of soil health, accounting for 28.63% and 20.36% of the total publications, respectively. Major contributors to soil health publications include the Chinese Academy of Sciences, the United States Department of Agriculture (USDA), the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, and the Indian Council of Agricultural Research. 3) The main keywords in the CNKI database are soil quality, soil fertility, and land management. In contrast, keywords in the WOS database focus on soil environmental safety. 4) The research on soil health in the CNKI database mainly progressed through three main stages: focus on soil fertility from 2002 to 2014, emphasis on land occupation and compensation balance, land reclamation and food security from 2015 to 2019, and shift towards cultivated land productivity, functions and biological activity from 2019 to 2023. Soil health studies in the WOS database are divided into soil environmental quality from 2002 to 2017 and non-point source and heavy metal pollution from 2018 to 2023. In the future, both China and the United States of America are expected to play leading roles in the research field of soil health. Enhancing cultivated land quality, improving cultivated land productivity, addressing soil pollution, cultivating healthy soil, and exploring soil microecology may become research hotspots and main focuses in the research field of soil health.

Keywords bibliometric method; CiteSpace; soil health; research hotspot

土壤是人类赖以生存的基础,土壤健康是保障国家粮食安全的“压舱石”。土壤健康是指在生态系统和土地利用的范围内,土壤能持续作为有生命的系统维持生物生产力,保持空气和水环境质量,促进植物、动物和人类健康的能力^[1]。与土壤健康相关的概念还有土壤肥力和土壤质量。土壤肥力是指土壤能供应和协调植物生长所需的水、肥、气、热等要素的能力,土壤肥力更侧重于土壤物理和化学特性^[2]。土壤质量与土壤健康是同义词,侧重点略有不同,土壤质量关注土壤长时间静态的状态,而土壤健康更加关注短期内土壤动态的变化过程及土壤生物学与生态系统多功能性^[3]。

土壤污染、土壤酸化、土壤盐渍化和土壤压实等都属于土壤健康的范畴,也是全球普遍存在的土壤退化问题^[4-7]。2021年联合国粮农组织发布的《世界粮食和农业领域土地及水资源状况:系统濒临极限》^[8]指出,全球土壤退化严重,具体表现为土壤侵蚀、养分耗竭和盐碱度上升,其中34%(16.6亿hm²)的农田主要是人为因素造成的退化。《全球土壤污染评估》^[9]报告也明确指出,全球每年产生的废弃物约为20亿t,造成了严重的土壤污染,影响了土壤健康、粮食安全和人体健康。土壤质量下降影响了联合国可持续发展目标(UN Sustainable Development Goals, SDGs)的实施^[10]。因此,消减障碍土壤,提升土壤健康水平成为国际上研究的热点和焦点。

土壤健康研究所(Soil Health Institute)、中国土

壤学会土壤健康工作组及国内外土壤健康领域科研项目和政策的发布带动了土壤健康的研究,相关领域发表的文章数量逐年增加^[11-12]。近些年国内外知名专家在 *Soil Biology and Biochemistry*、*Nature Reviews Earth & Environment*、《中国科学:生命科学》、《土壤学报》等期刊发表了土壤健康方面的综述性文章,系统总结了土壤健康的概念、评价指标体系、评价方法和培育途径等,为土壤健康研究工作提供了方法和思路^[2-3, 13-14]。目前有关土壤健康的研究主要包括土壤健康评价指标体系和评价方法的建立,健康土壤培育过程与原理解析及健康土壤培育技术、落地实施方案与政策。此外,存在明显障碍因子的土壤,如结构性障碍土壤、污染土壤、酸化土壤、盐渍化土壤和侵蚀土壤等都属于土壤健康的研究范畴。随着研究成果的不断出现,为更好地了解国内外土壤健康领域研究进展、研究热点及发展历程,需要借助文献计量学的手段全面分析国内外土壤健康领域的发展趋势与热点。

文献计量学充分融合了数学、统计学和文献学,可以对文献发表数量、文献作者、研究机构和关键词等信息进行分析,结合可视化分析软件 CiteSpace 实现对某一领域研究动态的解析^[15]。目前这种方法已被应用于水足迹^[16]、苹果响应气候变化^[17]、生态风险评价^[18]、功能性有机肥^[19]和大气氮沉降^[20]等方面的研究。因此,为全面了解土壤健康领域研究进展和热点,本研究拟利用文献计量学和 CiteSpace 软

件分析 2002—2023 年在中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 和 Web of Science (WOS) 核心数据集发表的土壤健康为主题的相关文献, 并绘制可视化知识图谱, 旨在揭示国内外土壤健康的发展历程、研究热点与前沿, 以期为土壤健康领域的研究工作提供重要的参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究选择中文数据库 CNKI 和英文数据库 WOS 作为数据来源。采用高级检索进行搜索, CNKI 数据库检索条件设置为: 关键词=“土壤质量”或“土壤健康”或“耕地质量”或“耕地健康”; WOS 数据库检索条件设置为: (KP=(soil quality) OR KP=(soil health) OR KP=(cultivated land quality) OR KP=(cultivated land health) OR KP=(arable land quality) OR KP=(arable land health) OR KP=(farmland quality) OR KP=(farmland health))。时间跨度为 2002 年 1 月 1 日—2023 年 9 月 1 日, CNKI 数据库的文献限定为核心期刊, 语言为中文, 文献类型为研究论文; WOS 数据库的文献限定为核心数据集, 语言为“English”, 文献类型为“Article”。剔除与研究主题不符合或不相关的文献后, 共获得中文文献 1 610 篇, 英文文献 11 134 篇。

1.2 研究方法

利用 CiteSpace(6.2.R4) 可视化分析软件进行

分析。将获得的 CNKI 和 WOS 文献数据导入 CiteSpace 软件后进行格式转换和去重处理, 对文献发表数量、文献作者、研究机构和关键词等信息进行分析和可视化, 获得国内外土壤健康领域研究进展与热点等相关信息。

2 结果与分析

2.1 文章发表数量

2002—2023 年国内外土壤健康领域发表的文章数量如图 1 所示。整体上国内外土壤健康领域发表的文章数量逐年增加, 但 CNKI 和 WOS 数据库发文表现有所不同。CNKI 数据库 2002—2023 年总发文量仅为 WOS 的 14.50%, 发文量总体上可分为 3 个阶段: 1) 2002—2010 年发文量持续增加; 2) 2011—2019 年发文量处于波动稳定期, 年均发文量为 83 篇; 3) 2020—2022 年发文量持续增加, 其中, 2021 年发文量首次突破 100 篇, 这可能与国家耕地质量提升, “藏粮于地、藏粮于技”等国家战略的实施有关。WOS 数据库发文量大致可分为 3 个阶段: 1) 2002—2008 年为起步阶段, 这一时段年均发文量为 139 篇, 占 2002—2023 年总发文量的 8.76%; 2) 2009—2015 年为发展期, 此时段年均发文量为 2002—2008 年年均发文量的 2.6 倍, 发文量占 2002—2023 年总发文量的 23.17%; 3) 2016—2023 年为快速增长期, 这一时段发文数量占 2002—2023 年总发文量的 68.07%, 年均发文量为 947 篇, 为 2002—

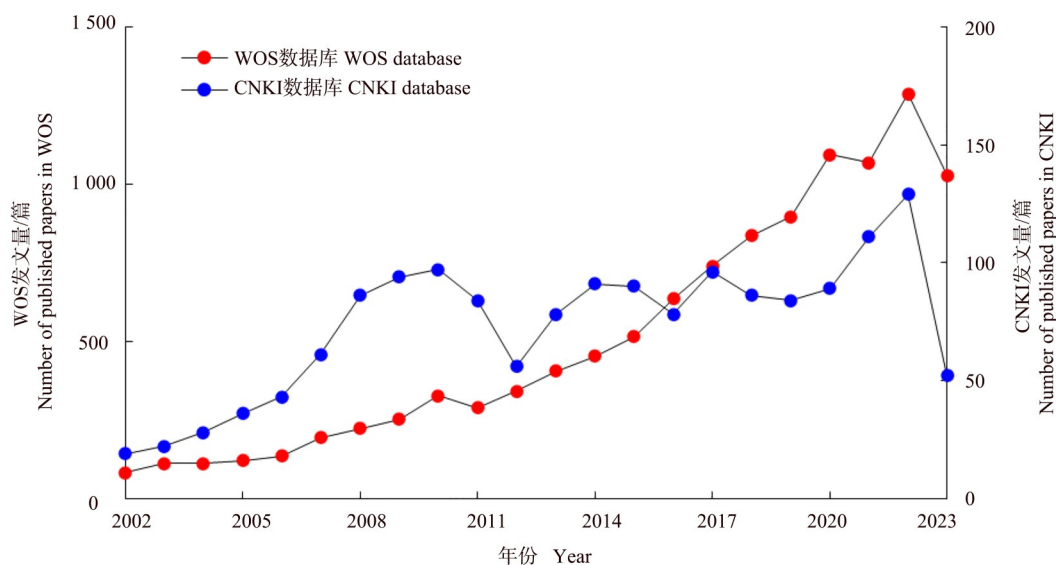


图 1 2002—2023 年基于 CNKI 和 WOS 数据库的土壤健康领域文献数量

Fig. 1 Statistics on the number of papers published for soil health studies based on the CNKI and WOS databases from 2002 to 2023

2008年年均发文量的6.8倍。

2.2 发文国家及机构

2.2.1 发文国家

2002—2023年WOS数据库土壤健康领域发文量前10的国家如表1所示,中国和美国是发文量最

多的2个国家,分别占总发文量的28.63%和20.36%,二者累计发文量占全球的近一半。印度、加拿大、巴西、意大利、西班牙、澳大利亚、德国和英格兰的发文量分列第3到第10位,由此可见中国和美国是土壤健康领域研究的两大中心。

表1 2002—2023年WOS数据库土壤健康领域发文量前10的国家
Table 1 Top 10 countries in terms of number of articles published for soil health studies based on the WOS database

排名 Ranking	国家 Country	发文量/篇 Number of published papers	所占比重/% Proportion
1	中国 China	3 188	28.63
2	美国 The United States of America	2 267	20.36
3	印度 India	601	5.40
4	加拿大 Canada	518	4.65
5	巴西 Brazil	514	4.62
6	意大利 Italy	471	4.23
7	西班牙 Spain	454	4.08
8	澳大利亚 Australia	453	4.07
9	德国 Germany	448	4.02
10	英格兰 England	418	3.75

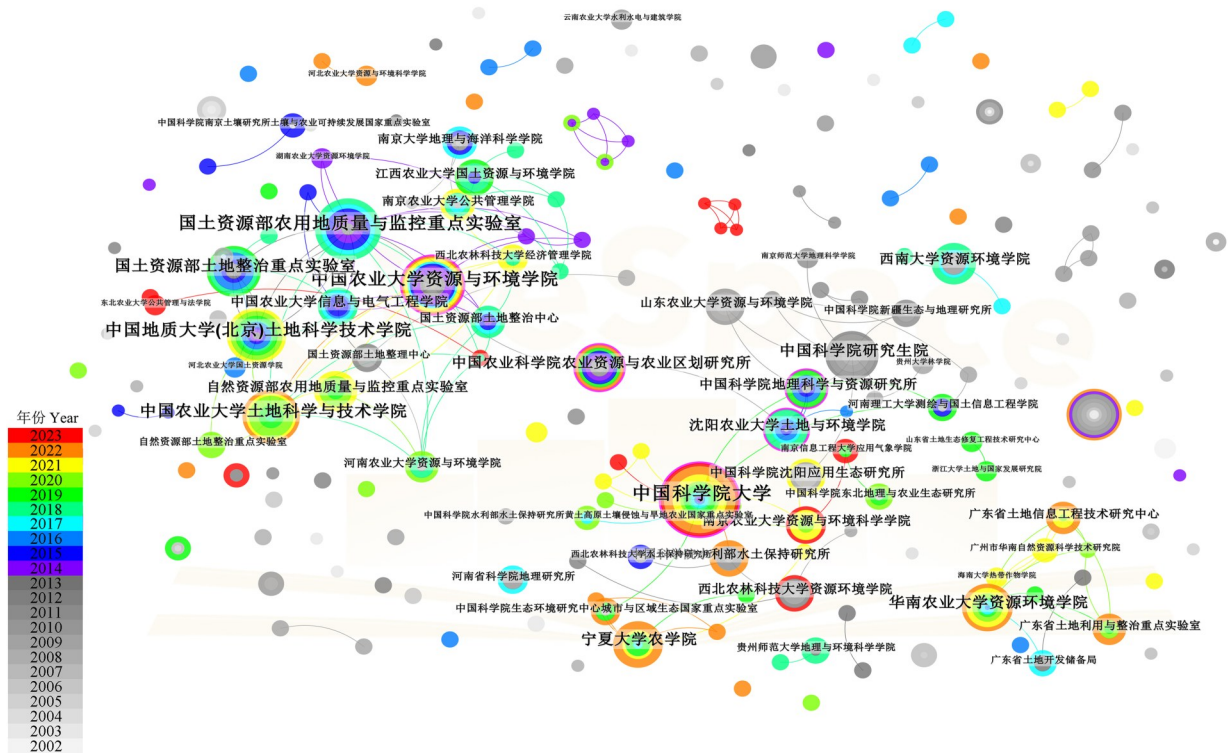
2.2.2 发文科研单位和团队

2002—2023年CNKI数据库土壤健康领域发文机构图谱如图2所示,共有200个节点,156条连接,网络密度为0.0078。2002—2023年土壤健康领域发文量前10的科研单位分别为中国科学院大学、自然资源部农用地质量与监控重点实验室、中国农业大学资源与环境学院、中国地质大学(北京)土地科学技术学院、中国农业大学土地科学与技术学院、中国科学院南京土壤研究所、自然资源部土地整治重点实验室、中国科学院研究生院、华南农业大学资源环境学院和宁夏大学农学院;中国科学院大学与沈阳农业大学土地与环境学院、西北农林科技大学水土保持所、中国科学院地理科学与资源研究所和中国科学院生态环境中心建立有合作关系,自然资源部农用地质量与监控重点实验室和中国农业大学资源与环境学院、自然资源部土地整治重点实验室、中国农业大学信息与电气工程学院及中国地质大学(北京)土地科学技术学院等科研单位建了立密切的合作关系。其中,中国地质大学(北京)土地科学技术学院吴

克宁教授团队和中国农业大学土地科学与技术学院孔祥斌教授团队在土壤健康领域发文较多,2个团队研究方向主要集中在耕地质量评价与提升方面^[21-26]。

国内研究学者非常重视土壤健康研究工作,中国工程院张福锁院士、张佳宝院士和中国科学院朱永官院士团队先后发表了土壤健康和耕地产能的观点性文章,提出了土壤健康评价、土壤生物和耕地障碍消减技术等,明确了我国土壤健康和耕地产量提升的主攻方向^[3,12,27-30]。国家也非常重视耕地质量、土壤健康和耕地产能提升等研究工作,“北方干旱半干旱与南方红黄壤等中低产田产能提升科技创新”重点专项、“黑土地保护与利用科技创新”重点专项、中国科学院战略性先导科技专项(A类)“黑土地保育与智能感知科技创新工程(黑土粮仓)”和“黑土地保护与利用科技创新工程”等科研项目的实施将促进土壤健康与耕地产能理论、技术模式等研究和落地,提升我国耕地质量和产能。

2002—2023年WOS数据库土壤健康领域发文机构图谱如图3所示,共有210个节点,576条连接,



图中圆圈的大小代表发文数量,圆圈越大,表示发文量越多。下同。
The size of the circles in the figure represents the number of published papers, the larger the circle is, the greater the number of published papers.
The same below.

图2 2002—2023年CNKI数据库土壤健康领域发文机构图谱

Fig. 2 Map of publishing institutions for soil health studies based on the CNKI database from 2002 to 2023

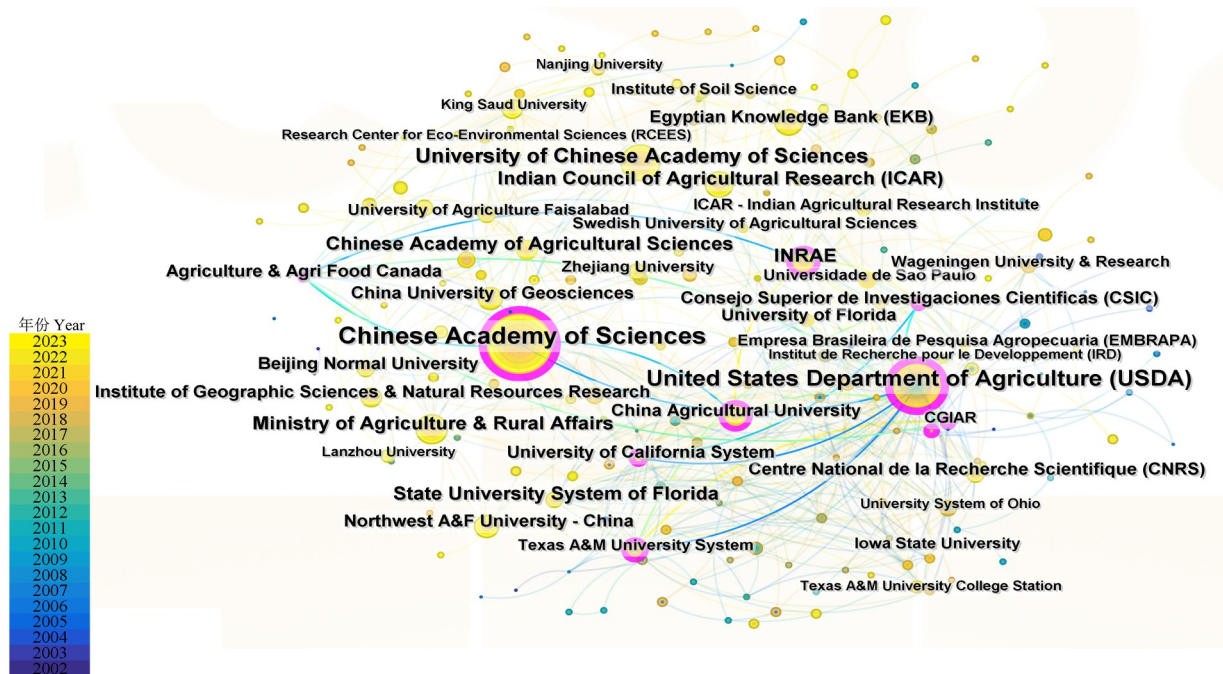


图3 2002—2023年WOS数据库土壤健康领域发文机构图谱

Fig. 3 Map of publishing institutions for soil health studies based on the WOS database from 2002 to 2023

网络密度为0.026 2。土壤健康领域发文量前10的科研单位分别为中国科学院、美国农业部(USDA)、中国科学院大学、中国农业农村部、印度农业研究委员会(ICAR)、佛罗里达州立大学、法国国家农业食品与环境研究院(INRAE)、中国农业科学院、北京师范大学和中国农业大学,其累计发文量占总发文量的24.79%。发文量前10的科研单位中,中国占据6席,其发文量占总发文量的15.71%。不同科研单位的节点数量代表合作的密切程度,中国科学院分别与农业农村部、西北农林科技大学、浙江大学、中国地质大学、中国农业大学、加拿大农业及农业食品部等科研单位建立了密切的合作关系;美国农业部与得克萨斯农工大学、中国科学院、加利福尼亚大学、中国农业大学等科研单位合作较多。WOS数据库发文量较多的学者有Huang Biao(13篇)、Wang Lei(12篇)、Li

Jing(10篇)、Li Yan(9篇)和Wang Lingqing(9篇)。

2.3 研究热点与前沿

2.3.1 关键词图谱及高频关键词

2002—2023年CNKI数据库土壤健康领域研究关键词图谱如图4所示,“土壤质量”“耕地质量”“综合评价”“土壤健康”“土地利用”“土壤养分”“土壤肥力”“评价体系”和“产量”等是出现频率较高的关键词,其中“土壤质量”关键词出现的频率最高,为704次;其次是“耕地质量”(412次),“综合评价”(100次);其他关键词出现30~80次。目前土壤健康的评价越来越引起国内外学者的关注,以往土壤健康评价较多采用土壤物理和化学指标^[2,14]。随着研究技术的进步,土壤生物学指标,如微生物组、土壤线虫、蚯蚓、土壤微生物生物量、土壤蛋白、土壤呼吸和土壤酶等被用作评价土壤健康的重要指标^[31-34]。

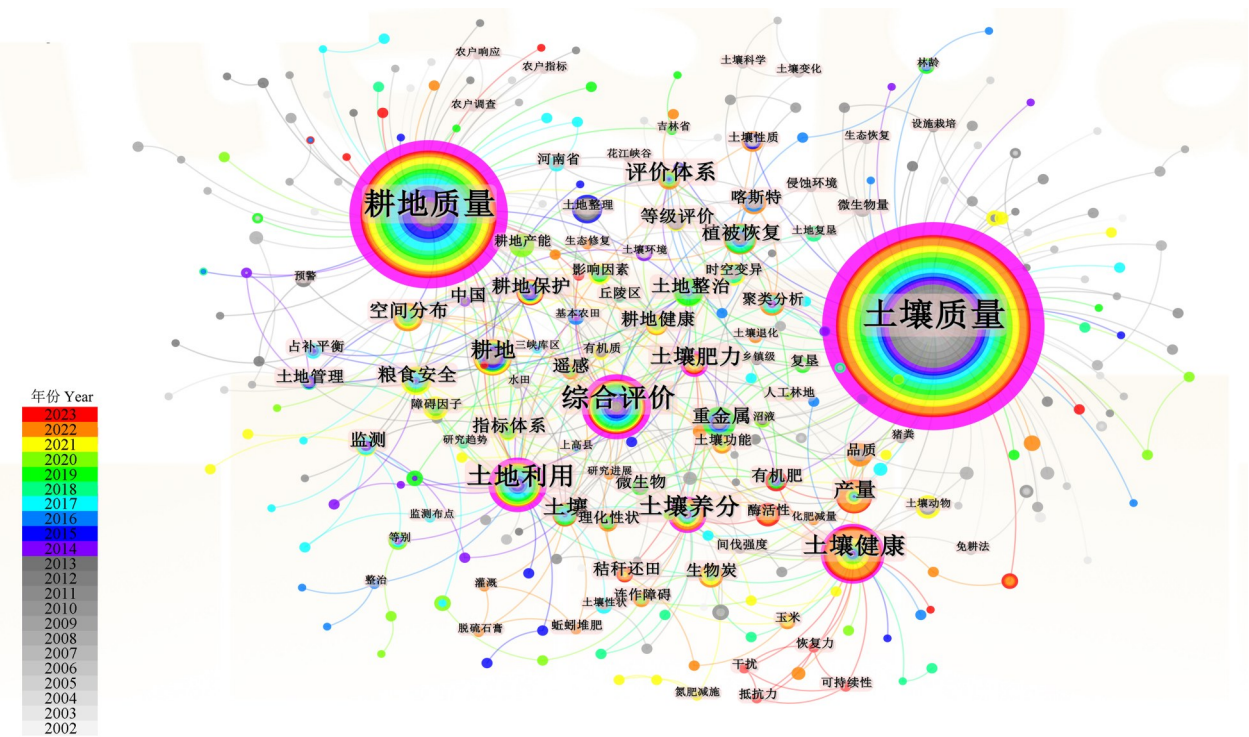


图4 2002—2023年CNKI数据库土壤健康研究关键词图谱

Fig. 4 Map of keywords for soil health studies based on the CNKI database from 2002 to 2023

2002—2023年WOS数据库土壤健康研究关键词图谱如图5所示,“soil quality”“soils”“heavy metals”“water quality”“health risk”“management”“yield”“nitrogen”“growth”“impact”“contamination”“agricultural soil”和“pollution”等关键词出现的频率较高,其中“soil quality”和“soils”2个关键词出现的

频率分别为5 407次和4 958次,“heavy metals”“water quality”“health risk”“management”和“yield”5个关键词出现的频率均超过了1 000次,其他关键词出现频率为700~1 000次。

高频关键词分析可知,基于CNKI和WOS数据库的土壤健康领域研究侧重点不同,CNKI数据库

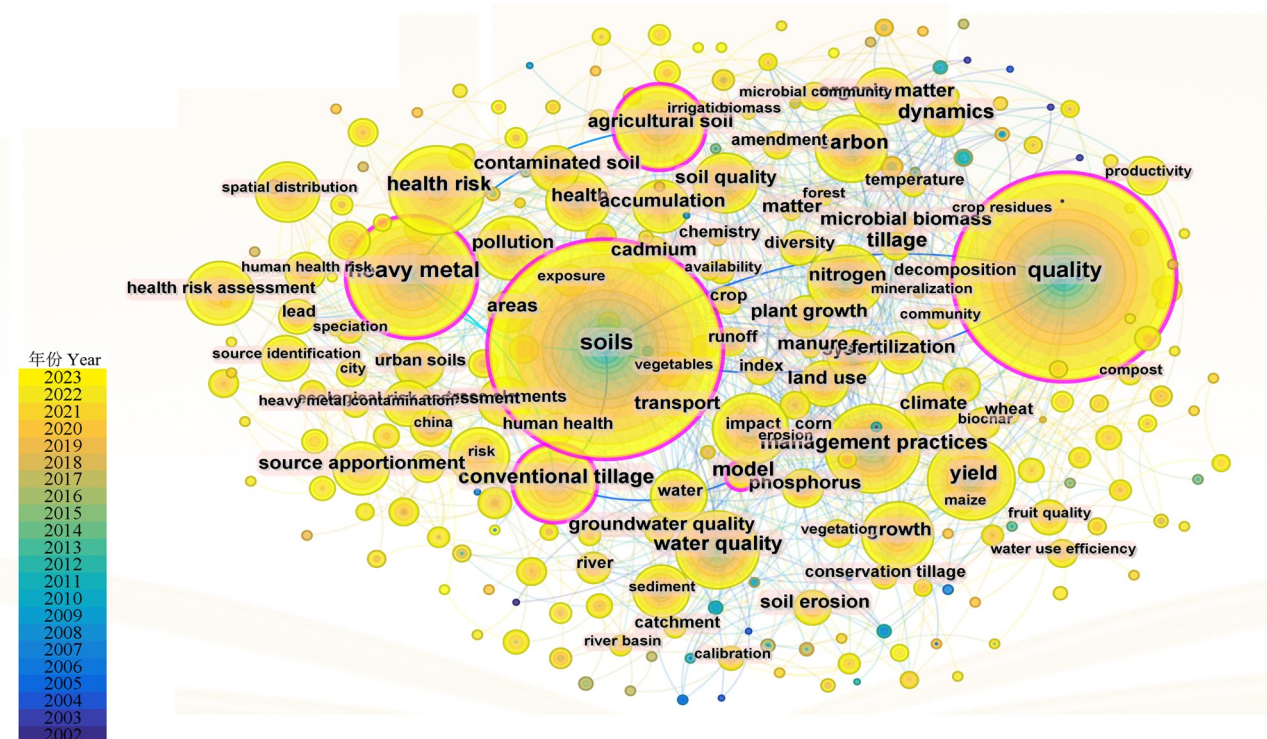


图5 2002—2023年WOS数据库土壤健康研究关键词图谱

Fig. 5 Map of keywords for soil health studies based on the WOS database from 2002 to 2023

更加关注土壤质量、土壤养分或肥力、评价体系建立等;而WOS数据库中的文章更多关注土壤环境安全,如重金属、水质量和健康风险等。CNKI和WOS数据库关注点有所不同的原因可能有:1)我国耕地质量和土壤肥力与国外存在较大差距,提高耕地质量和土壤肥力是近几十年科研工作者关注的焦点。随着国家对耕地质量的重视,耕地质量综合评价是重要的研究方向之一。2)农业较发达的国家,之前主要围绕土壤质量开展工作。从2000年左右开始,开展土壤健康研究工作较多,同时,对土壤生态系统功能和污染(包括水体质量、健康风险和重金属)也非常关注。综上,2个数据库的文章均较关注土壤质量,我国更侧重耕地地力和健康,而国外更加关注环境安全,因此与环境相关的关键词出现频率较高。随着国内外学者对土壤健康的重视,加上相关法律法规的出台,必将推动土壤健康领域相关研究取得更大进步。

2.3.2 关键词聚类分析

关键词聚类分析可将研究方向进行划分,揭示研究之间的类似性和差异性。 Q (聚类模块值)和 S (聚类平均轮廓值)是聚类非常重要的2个参数,一

般认为当 $Q>0.3$ 时,说明聚类结构是显著的; $S>0.7$ 时聚类结果可信度较高^[35]。CNKI数据库文献关键词聚类分析后得出 $Q=0.5823$, $S=0.8144$;WOS数据库关键词聚类分析后得出 $Q=0.5012$, $S=0.8232$,说明本次聚类结果均具有较高可信度。

2002—2023年CNKI和WOS数据库关键词聚类如图6和图7所示。CNKI数据库聚类分析后得到8个聚类标签,分别为#0土壤质量、#1耕地质量、#2土地利用、#3产量、#4土壤健康、#5土壤肥力、#6监测和#7评价指标(图6)。WOS数据库聚类分析得到5个聚类标签,分别为#0 heavy metals、#1 yield、#2 water quality、#3 decomposition和#4 groundwater(图7)。从聚类结果可以看出,国内外研究工作非常重视产量,但研究重点有所不同。CNKI数据库研究主要集中在耕地土壤健康、土壤肥力、监测与评价指标,WOS数据库主要集中在重金属、水质量等土壤环境健康。

2.3.3 关键词突现及其时序演变特征分析

关键词突现代表着在某个时间段的研究前沿,关键词随时间变化的改变,说明研究的焦点也在发

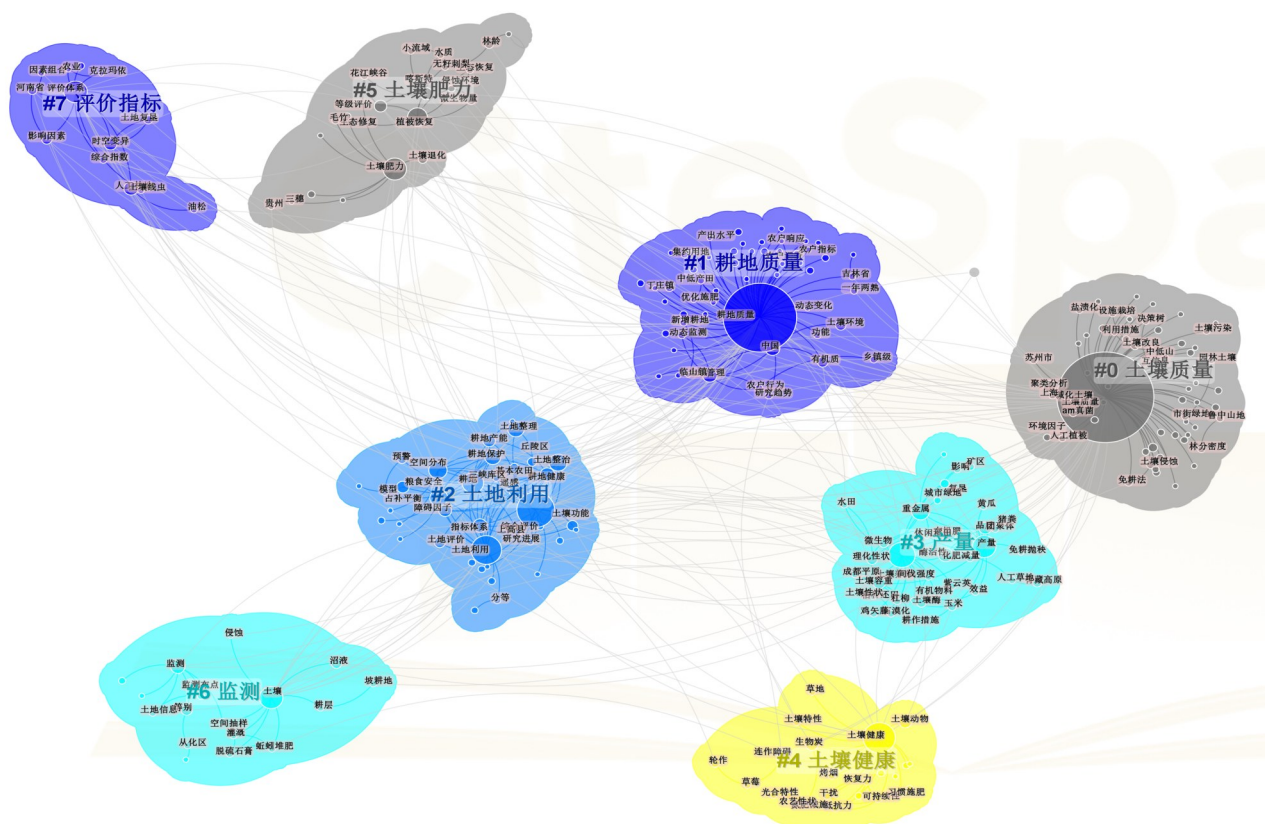


图6 2002—2023年CNKI数据库土壤健康研究关键词聚类图

Fig. 6 Map of keywords clustering for soil health studies based on the CNKI database from 2002 to 2023

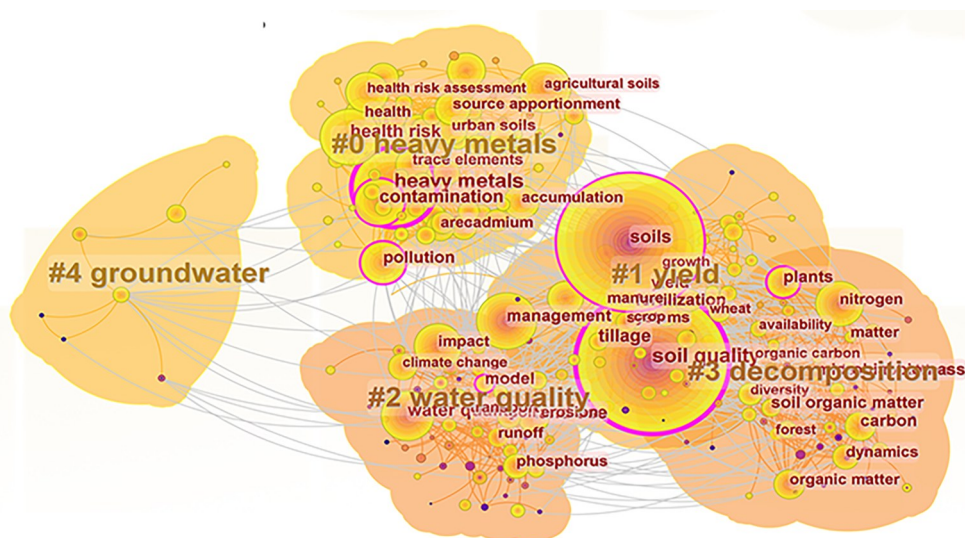


图7 2002—2023年WOS数据库土壤健康研究关键词聚类图

Fig. 7 Map of keywords clustering for soil health studies based on the WOS database from 2002 to 2023

生着变化。2002—2023年CNKI数据库突现性排名前25的关键词和关键词时间线分别如表2和图8所示。土壤健康领域研究工作大致分为3个阶

段：1)第一阶段(2002—2014年),主要突现的关键词为土壤质量、等级评价和土壤养分等,关注的焦点是土壤肥力指标,如土壤pH、有机质、碱解氮、有

表 2 2002—2023 年 CNKI 数据库土壤健康研究突现性排名前 25 的关键词

Table 2 Top 25 keywords with the strongest citation bursts for soil health studies based on the CNKI database from 2002 to 2023

关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year
土壤质量 Soil quality	2002	3.77	2005	2006
等级评价 Grade evaluation	2006	3.69	2006	2010
土壤养分 Soil nutrients	2002	4.27	2007	2010
土地整理 Land consolidation	2008	5.10	2008	2015
土壤 Soil	2009	3.38	2011	2014
耕地 Cultivated land	2004	3.04	2012	2016
监测 Monitoring	2013	4.27	2013	2017
土地占补平衡 Land occupation and compensation balance	2004	3.40	2013	2017
土地利用 Land use	2002	2.67	2013	2017
土地整治 Land reclamation	2014	7.27	2014	2020
粮食安全 Food security	2011	2.99	2016	2017
空间分布 Spatial distribution	2015	4.60	2017	2023
遥感 Remote sensing	2017	2.99	2017	2023
生物炭 Biochar	2018	3.28	2018	2023
重金属 Heavy metal	2006	3.00	2018	2019
耕地产能 Cultivated land productivity	2019	5.24	2019	2020
耕地健康 Cultivated land health	2019	5.03	2019	2023
障碍因子 Obstacle factor	2019	4.57	2019	2021
指标体系 Index system	2006	3.31	2019	2021
土壤健康 Soil health	2003	14.45	2020	2023
土壤功能 Soil function	2020	3.30	2020	2023
产量 Yield	2006	6.17	2021	2023
酶活性 Enzyme activity	2021	5.98	2021	2023
土壤肥力 Soil fertility	2003	2.73	2021	2023
秸秆还田 Straw returning	2011	2.69	2021	2023

效磷和速效钾等。此阶段国家的重要行动是:2005年,开始实行测土配方施肥试点工作;2008年,原农业部发布了《测土配方施肥技术规范》^[36]的通知,带动了土壤健康领域的研究工作。此阶段的核心内容是土壤养分,重点研究施肥、免耕和秸秆还田等农业措施对土壤养分含量的影响。2)第二阶段

(2015—2019年),研究热点是土地占补平衡、土地整治和粮食安全等,这些研究热点与国家相关指导意见和通知的发布密切相关。2016年,原国土资源部出台了《关于补足耕地数量与提升耕地质量相结合落实占补平衡的指导意见》^[37];2019年,自然资源部发布了《关于开展全域土地综合整治试点工

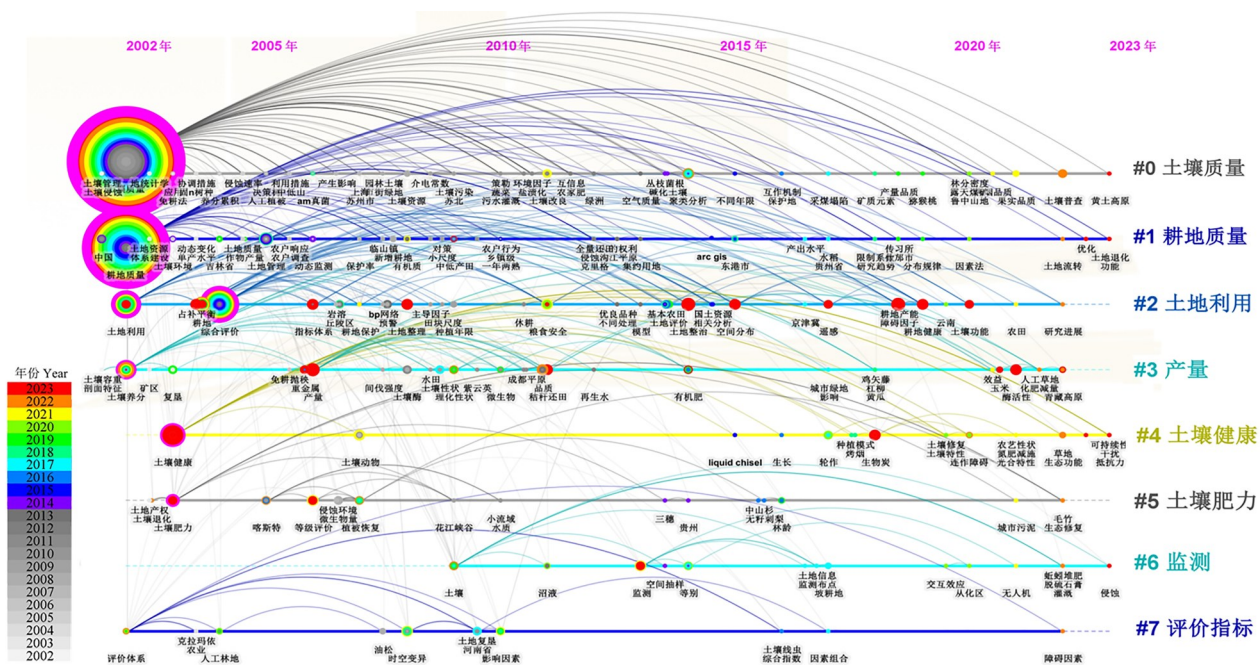


图 8 2002—2023 年 CNKI 数据库土壤健康研究关键词时间线

Fig. 8 Keywords timeline for soil health studies based on the CNKI database from 2002 to 2023

作》^[38]的通知,明确指出了耕地占补平衡与土地综合整治的原则与要求。3)第三阶段(2020—2023 年),研究者不仅关注耕地产能和产量,更加注重耕地健康、土壤功能及土壤生物活性等,维持耕地产量-耕地健康-土壤功能的权衡统一,保障耕地的可持续利用。研究工作的转变不仅与先进手段(如宏基因组、宏转录组等分子生物学技术)的应用有关,更与国家重大战略行动(如“藏粮于地、藏粮于技”,“碳达峰、碳中和”等)密不可分。2022 年《中华人民共和国黑土地保护法》^[39]的颁布为耕地产能和质量提升及耕地保护指明了方向,进一步促进了土壤健康领域理论和技术创新,实现耕地健康培育技术

的落地实施。从 CNKI 数据库关键词突现可以看出,未来国内学者将会更加关注耕地健康、耕地产能、土壤生物活性(如土壤酶)等工作,进行土壤健康理论创新,集成健康土壤培育技术,提高土壤生物活性和内稳性,提升耕地健康和产能,保障耕地可持续利用和国家粮食安全。

2002—2023 年 WOS 数据库土壤健康研究突现性排名前 25 的关键词和关键词时间线分别如表 3 和图 9 所示。土壤健康领域研究工作分为 2 个阶段:第一阶段(2002—2017 年),主要关注土壤水质、养分损失、硝酸盐等,研究的主要对象是河流、森林和农田等生态系统。这些焦点工作跟国际上

表 3 2002—2023 年 WOS 数据库土壤健康研究突现性排名前 25 的关键词

Table 3 Top 25 keywords with the strongest citation bursts for soil health studies based on the WOS database from 2002 to 2023

关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year
Quality	2002	85.04	2002	2012
Water quality	2002	77.91	2002	2012
Nitrogen	2002	50.16	2002	2011
Dynamics	2002	30.98	2002	2012
Decomposition	2002	27.00	2002	2011

表3 (续)

Erosion	2002	19.95	2002	2012
Corn	2002	19.43	2002	2014
Management Practices	2002	13.84	2002	2009
Runoff	2003	34.18	2003	2013
Losses	2003	21.12	2003	2012
Chemistry	2003	17.28	2003	2017
Stream	2003	16.03	2003	2012
Transport	2004	20.05	2004	2012
Phosphorus	2003	19.25	2004	2012
Nitrogen Mineralization	2007	14.97	2007	2014
Soil phosphorus	2007	14.54	2007	2012
Forest soils	2009	15.68	2009	2012
China	2010	15.77	2015	2018
Source identification	2018	15.86	2018	2023
Soil health	2019	14.64	2019	2021
Heavy metal pollution	2018	13.25	2019	2023
Potentially toxic elements	2020	18.85	2020	2023
Loess Plateau	2020	14.75	2020	2023
Cover crops	2020	13.71	2020	2023
Source apportionment	2016	18.77	2021	2023

相关政策的颁布和实施密不可分,如我国发布的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[40]、欧盟发布的硝酸盐法案^[41]、荷兰发布的《土壤质量法令》^[42]和《土壤修复通告》^[43]、美国环保局发布的《生态风险评价指南》^[40]和《土壤生态筛选值指南:草案》^[44]等。第二阶段(2018—2023年),开始关

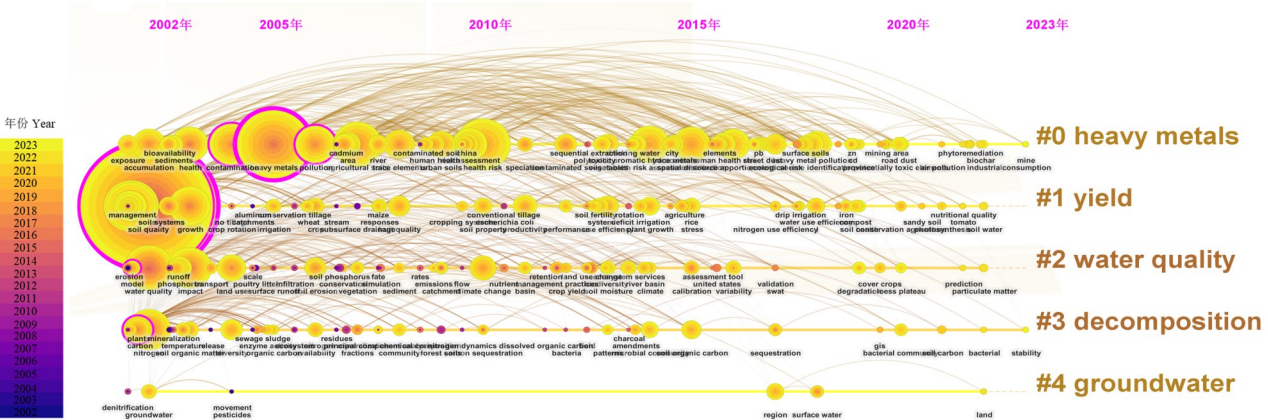


图9 2002—2023年WOS数据库土壤健康研究关键词时间线

Fig. 9 Keywords timeline for soil health studies based on the WOS database from 2002 to 2023

注面源污染和土壤重金属污染等方面。我国颁布的《中华人民共和国土壤污染防治法》^[45]、澳大利亚政府发布的《国家土壤战略行动计划》^[46]、欧盟发布的《2030年土壤战略》^[46]等促进了土壤健康领域研究工作的开展。综上,2个数据库的研究热点有所不同,CNKI数据库中耕地土壤健康、土壤功能可能成为未来的研究热点和焦点,而WOS数据库更聚焦于某一个土壤健康问题(如土壤污染、土壤退化等)。

3 结论与展望

3.1 结论

本研究利用文献计量学和CiteSpace软件对2002—2023年发表在CNKI和WOS核心数据集的土壤健康领域文献进行分析,主要得到以下结论:

1)2002—2022年土壤健康领域中英文发文量均呈上升趋势,中文发文量仅为英文发文量的14.50%;中国和美国是土壤健康领域发文量最多的2个国家,占全球发文量的近50%;中国科学院大学在CNKI数据库和WOS数据库的发文量均跻身前3,是该领域的领跑者,美国农业部是该领域重要的研究机构。

2)中文关键词主要围绕“土壤质量”“耕地质量”和“综合评价”等;英文高频关键词为“soil quality”“soils”“heavy metals”“water quality”和“health risk”等。

3)CNKI数据库土壤健康研究经历了土壤肥力(2002—2014年),土地占补平衡、土地整治与粮食安全(2015—2019年),耕地产能、功能及生物活性(2019—2023年)3个阶段;国际土壤健康研究主要关注土壤环境质量(2002—2017年),面源污染和重金属污染(2018—2023年)2个方向。

3.2 展望

国内外土壤健康领域研究处于快速发展时期,在政府、科研项目、法律法规的支持和影响下,土壤健康研究将会继续成为热点和焦点,未来可在以下4个方面重点开展研究:

1)评价指标体系和评价方法的完善。全球种植体系多样、地形多变,需要针对不同土壤类型、种植体系、地形和管理模式等建立适宜的评价指标和评价方法。

2)开展土壤健康驱动机制研究工作。阐述土壤关键过程、土壤性质和土壤功能与土壤健康的关系,重点阐明土壤有机碳、土壤结构和土壤生物肥

力稳定土壤健康的机理。

3)充分挖掘土壤生物在健康土壤培育中的重要作用。通过外源物质添加,激活土著生物活力,充分发挥土壤多功能性,提升土壤的内稳性和抗胁迫能力,保障土壤可持续利用。

4)针对典型的土壤健康问题,如土壤污染、土壤酸化、土壤盐渍化、土壤压实等,需要研发新技术和新产品,消减土壤障碍因子,提升耕地产能。

参考文献 References

- [1] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M A. Soil health and sustainability [J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 56: 1-54
- [2] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, Creamer R E, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper T W, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J W, Brussaard L. Soil quality - A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125
- [3] 张俊伶, 张江周, 申建波, 田静, 金可默, 张福锁. 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
- [4] Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, Tian J, Jin K M, Zhang F S. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783-796 (in Chinese)
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010
- [6] Wicke B, Smeets E, Dornburg V, Vashev B, Gaiser T, Turkenburg W, Faaij A. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(8): 2669-2681
- [7] Khan S, Naushad M, Lima E C, Zhang S X, Shaheen S M, Rinklebe J. Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies - A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 126039
- [8] Shaheb M R, Venkatesh R, Shearer S A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production [J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021, 46(4): 417-439
- [9] FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Synthesis report 2021 [EB/OL]. [2023-12-20]. <https://www.fao.org/3/cb7654zh/online/cb7654zh.html>
- [10] FAO. Global assessment of soil pollution: report 2021 [EB/OL]. [2023-12-20]. <https://www.fao.org/3/cb4894en/online/cb4894en.html>
- [11] Lal R, Bouma J, Brevik E, Dawson L, Field D J, Glaser B, Hatano R, Hartemink A E, Kosaki T, Lascelles B, Monger C, Muggler C, Ndzana G M, Norra S, Pan X C, Paradelo R, Reyes-Sánchez L B, Sandén T, Singh B R, Spiegel H, Yanai J T, Zhang J B. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective[J]. *Geoderma Regional*, 2021, 25: e00398
- [12] 司绍斌, 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
- [13] Si S C, Wu Y C, Li Y, Tu C, Fu C C, Luo Y M. The current research progress and prospects of cultivated and grassland soil health: A review [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 625-642 (in Chinese)
- [14] 朱永官, 彭静静, 韦中, 沈其荣, 张福锁. 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

- Zhu Y G, Peng J J, Wei Z, Shen Q R, Zhang F S. Linking the soil microbiome to soil health[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2021, 51(1): 1-11 (in Chinese)
- [13] Rinot O, Levy G J, Steinberger Y, Svoray T, Eshel G. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1484-1491
- [14] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, Rillig M C. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(10): 544-553
- [15] 吴胜男, 王晓锋, 刘婷婷, 王继龙, 袁兴中, 何奕忻, 孔维菁. 基于CiteSpace的湿地恢复研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1224-1239
- Wu S N, Wang X F, Liu T T, Wang J L, Yuan X Z, He Y X, Kong W W. Research progress of wetland restoration based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1224-1239 (in Chinese)
- [16] 张灿灿, 孙才志. 基于CiteSpace的水足迹文献计量分析[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 4064-4076
- Zhang C C, Sun C Z. Bibliometric analysis of water footprint based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 4064-4076 (in Chinese)
- [17] 刘园, 刘布春, 程存刚, 邱美娟, 王珂依, 毛留喜, 何延波. 基于全球文献计量对苹果响应气候变化研究的热点分析[J]. 果树学报, 2021, 38(10): 1748-1759
- Liu Y, Liu B C, Cheng C G, Qiu M J, Wang K Y, Mao L X, He Y B. Bibliometric analysis on the effect of climate change to apple based on Citespace[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(10): 1748-1759 (in Chinese)
- [18] 余欣, 余瑞林, 孙松峰, 邓伟平. 基于CiteSpace的生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10338-10351
- Yu X, Yu R L, Sun S F, Deng W P. Research progress of ecological risk assessment based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 10338-10351 (in Chinese)
- [19] 朱康文, 杨红军, 宋丹, 张蓝心, 张晟, 黄昌前, 张可, 陈玉成. 基于CiteSpace的功能性有机肥研究动态与热点分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 202-212
- Zhu K W, Yang H J, Song D, Zhang L X, Zhang S, Huang C Q, Zhang K, Chen Y C. Research trends and hot spot analysis of functional organic fertilizer based on CiteSpace[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(1): 202-212 (in Chinese)
- [20] 肖春艳, 胡情情, 陈晓舒, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏. 基于文献计量的大气氮沉降研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1294-1307
- Xiao C Y, Hu Q Q, Chen X S, Zhao T Q, Guo X M, Chen F H. Research progress of atmospheric nitrogen deposition based on bibliometric[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1294-1307 (in Chinese)
- [21] 高星, 吴克宁, 陈学砧, 周智, 于潇, 魏洪斌. 土地整治项目提升耕地质量可实现潜力测算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 233-240
- Gao X, Wu K N, Chen X Z, Zhou Z, Yu X, Wei H B. Feasible potential of cultivated land quality promoted by land consolidation project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 233-240 (in Chinese)
- [22] 温良友, 孔祥斌, 张蚌蚌, 孙晓兵, 辛芸娜, 张青璞. 基于可持续发展需求的耕地质量评价体系构建与应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 234-242
- Wen L Y, Kong X B, Zhang B B, Sun X B, Xin Y N, Zhang Q P. Construction and application of arable land quality evaluation system based on sustainable development demand[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 234-242 (in Chinese)
- [23] 张小丹, 吴克宁, 赵瑞, 杨淇钧. 县域耕地健康产能评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 294-300
- Zhang X D, Wu K N, Zhao R, Yang Q J. Evaluation of healthy productivity of cultivated land at county scale[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 294-300 (in Chinese)
- [24] 赵瑞, 吴克宁, 杨淇钧, 冯喆, 赵华甫, 张琢. 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
- Zhao R, Wu K N, Yang Q J, Feng Z, Zhao H F, Zhang Z. 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 (in Chinese)
- [25] 陈文广, 孔祥斌, 廖宇波, 王轩, 宋福生, 温良友, 张蚌蚌. 黄土高原区耕地质量评价: 以陕西省延川县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 375-381
- Chen W G, Kong X B, Liao Y B, Wang X, Song F S, Wen L Y, Zhang B B. Evaluation of cultivated land quality in the Loess Plateau: A case study of Yanchuan County, Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 375-381 (in Chinese)
- [26] 陈文广, 孔祥斌, 温良友, 朱红梅, 张蚌蚌. 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
- Chen W G, Kong X B, Wen L Y, Zhu H M, Zhang B B. Construction and application of cultivated land health evaluation index system based on demand-function-dimension[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(5): 106-117 (in Chinese)
- [27] 孙新, 李琪, 姚海凤, 刘满强, 吴东辉, 朱冬, 朱永官. 土壤动物与土壤健康[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1073-1083
- Sun X, Li Q, Yao H F, Liu M Q, Wu D H, Zhu D, Zhu Y G. Soil fauna and soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1073-1083 (in Chinese)
- [28] 张江周, 李奕赞, 李颖, 张俊伶, 张福锁. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616
- Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, Zhang J L, Zhang F S. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603-616 (in Chinese)
- [29] 张佳宝, 孙波, 骆永明, 颜晓元, 沈仁芳. 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
- Zhang J B, Sun B, Luo Y M, Yan X Y, Shen R F. Carry out the construction of healthy cultivated land and consolidate the foundation of food security[J]. *China Rural Science & Technology*, 2023(1): 21-22 (in Chinese)
- [30] 孙波, 朱安宁, 姚荣江, 沈仁芳, 张佳宝. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231-1247
- Sun B, Zhu A N, Yao R J, Shen R F, Zhang J B. Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1231-1247 (in Chinese)
- [31] Gao D D, Wang F M, Li J, Yu S Q, Li Z A, Zhao J. Soil nematode communities as indicators of soil health in different land use types in tropical area[J]. *Nematology*, 2020, 22(6): 595-610
- [32] Onet A, Dincă L C, Grenni P, Laslo V, Teusdea A C, Vasile D L, Enescu R E, Crisan V E. Biological indicators for evaluating soil quality improvement in a soil degraded by erosion processes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2393-2404
- [33] Li K L, Wang C, Zhang H Y, Zhang J L, Jiang R F, Feng G, Liu X J, Zuo Y M, Yuan H M, Zhang C C, Gai J P, Tian J, Li H F, Sun Y, Yu B G. Evaluating the effects of agricultural inputs on the soil quality of

- smallholdings using improved indices[J]. *Catena*, 2022, 209: 105838
- [34] 张江周, 王光州, 李奕赞, 张文菊, 张俊伶, 张福锁. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 879-891
- Zhang J Z, Wang G Z, Li Y Z, Zhang W J, Zhang J L, Zhang F S. Rethinking the establishment of the farmland soil health assessment system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 879-891 (in Chinese)
- [35] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253
- Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, Hu Z G, Wang X W. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains [J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese)
- [36] 农业部. 测土配方施肥技术规范[EB/OL]. [2023-12-20]. http://www.zzys.moa.gov.cn/tzgg/200803/t20080321_6310391.htm
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specifications for soil testing and formula fertilization [EB/OL]. [2023-12-20]. http://www.zzys.moa.gov.cn/tzgg/200803/t20080321_6310391.htm (in Chinese)
- [37] 国土资源部. 关于补足耕地数量与提升耕地质量相结合落实占补平衡的指导意见[J]. *青海国土经略*, 2016(4): 24-25
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Guiding opinions on implementing the balance between occupation and compensation by combining the increase in the quantity of cultivated land with the improvement of the quality of cultivated land [J]. *Qinghai Land & Resources*, 2016, (4): 24-25 (in Chinese)
- [38] 自然资源部. 关于开展全域土地综合整治试点工作[EB/OL]. [2023-12-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/18/content_5462127.htm
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. On carrying out the pilot work of comprehensive land consolidation across the entire region [EB/OL]. [2023-12-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/18/content_5462127.htm (in Chinese)
- [39] 第十三届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国黑土地保护法[EB/OL]. [2023-12-20]. www.zfs.moa.gov.cn/flfg/202207/t20220712_6404544.htm
- Standing Committee of the 13th National People's Congress. Law of the People's Republic of China on the Protection of Black Soil [EB/OL]. [2023-12-20]. www.zfs.moa.gov.cn/flfg/202207/t20220712_6404544.htm (in Chinese)
- [40] 葛峰, 徐珂珂, 刘爱萍, 张可桂, 云晶晶, 张爱国. 国外土壤环境基准研究进展及对中国的启示[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 331-343
- Ge F, Xu K K, Liu A P, Zhang K G, Yun J J, Zhang A G. Progress of the research on soil environmental criteria in other countries and its enlightenment to China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 331-343 (in Chinese)
- [41] European Union. Council Directive of 12 December 1991 Concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC) [EB/OL]. [2023-12-20]. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1991:375:0001:0008;EN:PDF>
- [42] Rijkswaterstaat. Soil quality decree [EB/OL]. [2023-12-20]. <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-quality-decree/>
- [43] Rijkswaterstaat. Soil remediation circular [EB/OL]. [2023-12-20]. <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-remediation/>
- [44] Office of Emergency and Remedial Response. Ecological soil screening level guidance (Draft) [EB/OL]. [2023-12-20]. <https://lmpublicsearch.lm.doe.gov/SiteDocs/SW-A-005273.pdf>
- [45] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 赵永存, 黄标, 骆永明. 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
- Hu W Y, Tao T T, Tian K, Zhao Y C, Huang B, Luo Y M. Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1094-1109 (in Chinese)
- [46] 周璞, 毛馨卉, 侯华丽, 张惠. 澳大利亚和欧盟土壤战略比较与借鉴[J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(1): 60-66
- Zhou P, Mao X H, Hou H L, Zhang H. Comparing and benchmarking on Australian and EU soil strategies [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2023, 36(1): 60-66 (in Chinese)

责任编辑：申青苗



第一作者简介：张江周, 博士, 内蒙古农业大学资源与环境学院副教授(校聘), 硕士生导师, 内蒙古自治区高层次人才, 福建省高层次人才(C类)。主要从事土壤健康与耕地产能提升研究。主持或参与国家自然科学基金、省部级重点研发计划和国家重点研发计划项目等10余项。在 *Agriculture*、*Ecosystems & Environment*、*Geoderma*、《土壤学报》等期刊发表论文40余篇, 主编专著3部。指导学学生获第三届全国农业资源与环境专业大学生实践技能竞赛一等奖、中国研究生乡村振兴科技强农+创新大赛“拼多多杯”第二届科技小院大赛一等奖等荣誉; 任《土壤学报》和《热带作物学报》青年编委。



通讯作者简介：张俊伶, 中国农业大学资源与环境学院教授、博士生导师, 北京市教学名师。主要从事土壤健康和根际微生物研究。在土壤健康和资源可持续利用、微生物多样性和生态功能、土壤生物肥力、以及生物肥料等方面也开展了大量的研究工作。主持或参加国家自然科学基金面上项目/重点项目/创新群体、国家重点研发计划项目、国家重点基础研究发展计划(973计划)、农业部公益性行业专项项目和中荷农业绿色发展项目等30余项。相关研究成果发表在在 *Nature Communications*、*Microbiome*、*Global Change Biology*、*Ecology Letters*、*Environmental Microbiology*、*New Phytologist* 等国际一流期刊。任中国土壤学会土壤健康工作组组长、中国菌物学会内生菌和菌根真菌专业委员会主任、中国植物营养与肥料学会第十届教育工作委员会副主任等。