

康依洁,吴碧波,沈春艳,等.矿物肥施用对土壤生态效应的影响研究热点及趋势的文献计量分析[J].江西师范大学学报(自然科学版),2023,47(2):168-175.

KANG Yijie, WU Bibo, SHEN Chunyan, et al. The bibliometric analysis of research hotspots and trends in the effects of mineral fertilizer application on soil ecological effects [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science), 2023, 47(2): 168-175.

文章编号:1000-5862(2023)02-0168-08

矿物肥施用对土壤生态效应的影响 研究热点及趋势的文献计量分析

康依洁^{1,2}, 吴碧波³, 沈春艳⁴, 丁济娜², 王 聪^{1*}, 魏 亮², 祝贞科², 葛体达²

(1. 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004;

2. 宁波大学植物病毒学研究所, 农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 浙江宁波 315211;

3. 宁海县林特技术推广站, 浙江宁波 315600; 4. 宁波市鄞州区农产品质量安全监管站, 浙江宁波 315100)

摘要:为全面了解矿物肥对土壤生态效应影响的研究现状,该文检索了 Web of Science 核心数据库 1995—2021 年关于矿物肥施用对土壤生态效应影响的研究论文,并利用文献可视化软件 VOSviewer 和 CiteSpace 对检索到的相关文献的年发文数量、文献被引频次、核心作者与国家(地区)、学科分布及关键词进行分析,追溯探讨了矿物肥对土壤生态效应影响研究的发展概况及热点方向. 研究结果表明:1995—2021 年间矿物肥对土壤生态效应影响研究的发文数量不断增加;中国总发文量位居世界第 1,但相关研究创新性仍需进一步提高;核心作者组内联系较紧密,中国科学院是发文数量最多的研究机构. 矿物肥对土壤生态效应影响的研究涉及环境科学、林学和农学等多个学科,研究热点集中在土壤养分循环、重金属污染土壤修复、土壤微生物群落结构变化等方向. 未来应加强矿物肥对土壤碳循环、土壤生态系统稳定性的影响等方向的研究.

关键词:矿物肥;土壤生态效应;文献计量;可视化分析

中图分类号:S 65.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.02.08

0 引言

矿物肥是以白云石、玄武岩等常见的天然矿石为原材料,通过水热反应形成的矿物肥料,富含硅、钙、镁、磷、钾等营养元素^[1]. 矿物肥不仅能调节土壤 pH 值,增加土壤的有效养分,促进养分平衡,提高土壤肥力,使土壤微环境逐步趋向良性化^[2],还能缓解土壤重金属危害^[3-4]. 在矿物肥中大多数元素以枸溶性形态存在,不溶于水,在土壤中缓慢释放,相当于一种缓释肥料,这不仅可以提高肥料的利用率,还可以避免污染环境.

近年来,矿物肥在生态环境领域中受到广泛关注. 矿物肥对土壤生态效应影响的研究是目前热门

研究方向之一,有关矿物肥的研究在 2010 年后获得了长足发展. 有研究表明:在土壤中施用矿物肥可以改变土壤理化性质、影响土壤微生物群落结构,这揭示了矿物肥在改良土壤环境、改善土地质量及修复土壤生态系统中起到的作用. 另外, E. P. Kantzas 等^[5]提出矿物肥施加到土壤中能吸附在大气中的 CO₂,降低土壤 N₂O 的排放,对缓解全球气候变暖起着重要作用.

文献计量法是基于数学和统计学方法对某研究领域进行定量分析的手段^[6],可以客观地反映特定领域的研究现状、研究热点及发展趋势. 本文基于 Web of Science(WOS)收录的 1995—2021 年的数据,利用文献计量学方法就矿物肥的施用对土壤生态效应影响的研究进行文献计量分析,通过对相关

收稿日期:2022-08-02

基金项目:财政部和农业农村部课题(CARS-08-G-09)和宁波市科技计划重大课题(2021Z101,2021S013)资助项目.

通信作者:王 聪(1989—),男,陕西汉中,讲师,博士,主要从事土壤碳氮循环研究. E-mail:wangcuriel@foxmail.com

文献进行图谱分析,归纳其研究现状和发展方向,以期对相关学者准确把握该领域的研究进展及热点提供理论依据。

1 数据来源与统计方法

1.1 数据来源

本文用于文献计量分析的数据来源于科睿唯安的 Web of Science 核心合集数据库,以“Article”为文献类型进行高级检索,检索条件为 $AB = \text{“Phosphate mine wastes” “Mineral soil conditioners” “phosphate rocks” “Fly ash” “Hydroxyapatite” “zeolite” “phosphogypsum” “Multielement mineral amendment” “phosphogypsum organic” “yellow gypsum” “Dolomite” “basalt”}$ 且 $TI = \text{“soil” “Soil properties” “Soil remediation” “soil management”}$,检索年限为 1995—2022 年,对检索结果进行整理,删除不相关条目,得到相关文献共 990 篇。

1.2 统计方法

本文通过文献计量学方法,利用 VOSviewer、CiteSpace(V. 5. 8. R3)^[7] 软件实现文献分析。从矿物肥对土壤影响相关研究领域的发文数量、主要发文国家和机构以及作者之间的合作网络关系、关键词及研究热点等方面进行分析。利用 CiteSpace(V. 5. 8. R3) 进行分析,时间跨度设置为 1995—2021 年,时间节点设置为 1 年,选择 Country(国家)和 Keyword(关键词)等选项,节点强度默认 Cosine(余弦函数)和 Within slices(时间切片内),网络裁剪功能区选择 Pathfinder 进行图谱分析。在分析不同时间的关键词时,选择 time-zone。在 VOSviewer 分析中对关键词和作者进行分析,数据来源于 WOS,计数方法选择 Full counting(全计数)及词条最小出现频次等进行图谱分析。年发文数量、发文国家、发文机构及发文作者等利用 Excel 进行数据的统计与分析。

2 结果与分析

2.1 时间发展脉络

本文从 1995 年开始筛选施用矿物肥对土壤生态效应影响的文献,图 1 展现了不同年限发文数量总体分布情况。从文献总量来看,年际间发文量虽有小的波动,但总体呈递增趋势。根据发文量的多

少将矿物肥对土壤生态效应影响的研究发展分为 4 个时期:1995—2005 年为起始期,这一时期处于研究的开始期,从事这一领域研究的学者较少,发文量平稳且较少;2005—2015 年为波动期,这一时期有许多学者开始关注这一领域,由于还未形成持续的研究,因此这一时期发文量虽有较大增长但也伴有一定的波动;2015—2019 年为增长期,发文量较上一时期出现大幅增长,这表明该时期有越来越多的学者进行这一方向的研究;2019 年至今为激增期,这一时期发文数量较上一时期出现大幅度的增长,其中 2021 年发文数量达到 122 篇,被引频次高达 3 356 次。这表明该领域已成为研究的热点之一。

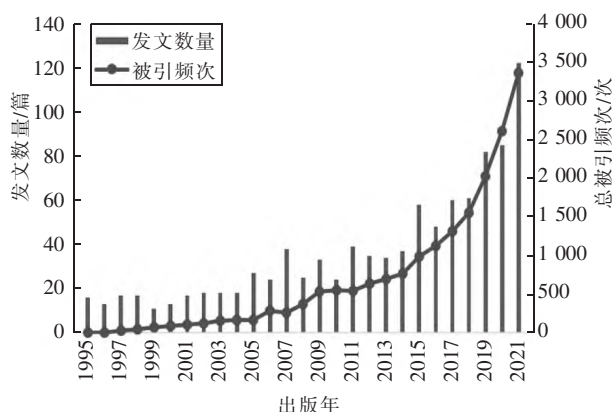


图1 矿物肥对土壤生态效应影响的年度发文数量及被引频次

2.2 国家间对比及国际合作

在矿物肥对土壤生态效应影响这一研究领域中总发文数量为 990 篇。从图 2(a) 可以看出:中国是总发文数量第 1 的国家,发文量为 241 篇,占总发文量的 24%,总被引频次为 4 309 次,这说明中国学者参与该领域的研究较多,且受到国内外同行的关注和认可。德国总发文数量位列第 9,但其平均被引频次最高,这说明德国论文的创新性及影响力较大。美国、印度、澳大利亚、波兰年均发文量呈现波动状态。中国学者前期在矿物肥对土壤生态效应影响方面的研究较少,但自 2013 年起发文数开始快速增长,且从 2014 年起中国年均发文数量稳居第 1 (见图 2(b))。

利用 CiteSpace 对各国关于矿物肥对土壤生态效应影响研究领域发文国家间的合作网络关系、发文数量及其论文影响力进行了可视化分析,发文国家间的合作联系由连线表示,发文量由节点大小表示,括号内的数字表示中介中心性。中介中心性是衡量节点在网络中重要性的指标,表示对应国家在其研究领域的国际影响力^[8]。从图 3 可以看出:中

国、美国、澳大利亚、波兰及印度联系强度高,与其他国家合作密切.从中介中心性来看,美国在矿物肥对土壤生态效应影响研究领域的中介中心性最大(0.77),在研究中起着关键作用,对此研究领域

的影响较大.中国虽然发文量最多,但其中介中心性值较小,这表明其研究成果影响力较小,研究创新性也不足.

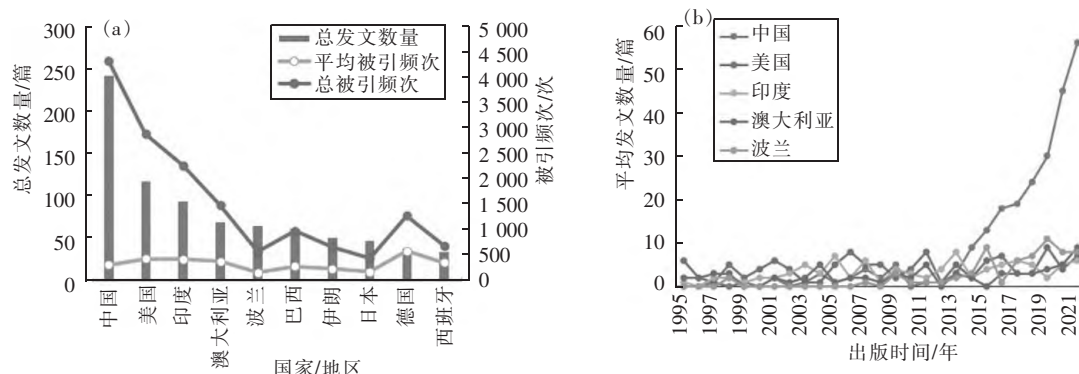


图2 排名前10的国家的发文数量与被引频次及排名前5的国家1995—2021年的年发文量



图3 矿物肥对土壤生态效应影响研究的国际合作

2.3 发文机构

利用 VOSviewer 对各研究机构在矿物肥对土壤生态效应影响研究领域中各发文机构之间的合作

关系进行网络化分析,研究机构发文量由圆圈的大小表示,各机构之间的联系由连线表示.对发文研究机构间的合作进行网络分析(见图4)可知:中国科学院的总联系强度参数(TSL)最高(81),其合作单位主要有安徽农业大学、华中农业大学、中国农业大学和西北大学等.在科研机构的国际合作中,浙江大学和佛罗里达大学、中国农业科学院和西澳大学等合作紧密.

利用 VOS viewer 统计发现:研究矿物肥对土壤生态效应影响的机构共 1 093 个,合著发表 2 篇及以上论文的机构共有 342 个(数据未显示),占发文机构总数的 31%,这说明机构之间合作较为紧密,学术交流比较密切.从表 1 可以看出:发文量排名前

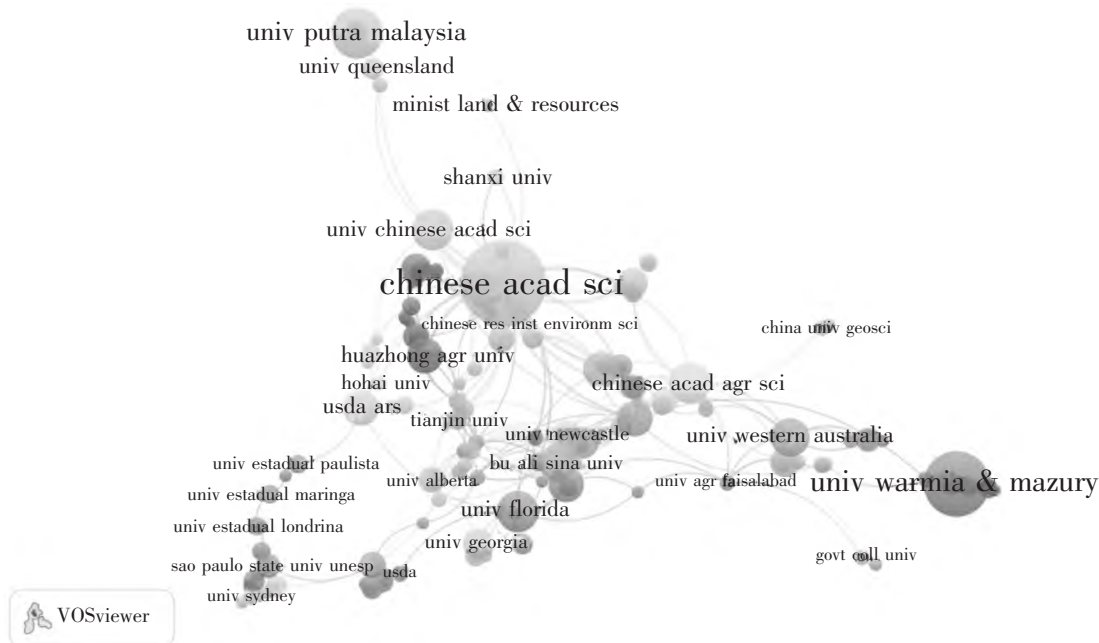


图4 矿物肥对土壤生态效应影响研究的机构间合作关系

5 的研究机构依次是中国科学院、瓦尔米亚玛祖里大学、印度科学与工业研究理事会、马来西亚普特拉大学、埃及知识库,其中中国科学院的发文量最多,这说明中国在此领域中的研究比较活跃。中国科学院的主要研究内容是在不同土地利用方式下,施加矿物肥对重金属污染土壤的理化性质及土壤

生物的影响,明确施加矿物肥对土壤修复的作用。印度科学工业研究理事会发文数量虽排名第 3,但其平均被引频次最高(36.11),其研究内容主要为施加矿物肥对土壤肥力和作物生长的影响,以及施加矿物肥对土壤重金属的迁移及在作物中重金属积累的影响。

表 1 发文数量前 5 的科研机构及其信息

序号	机构	发文数量/篇	总被引频次/次	平均被引频次/次	所属国家
1	中国科学院	60	1 311	21.85	中国
2	瓦尔米亚玛祖里大学	36	256	7.11	波兰
3	印度科学与工业研究理事会	28	1 011	36.11	印度
4	马来西亚普特拉大学	24	277	11.54	马来西亚
5	埃及知识库	22	535	24.32	埃及

2.4 作者与作者间合作

通过 VOSviewer 软件分析及数据处理显示共有 3 759 名学者参与了矿物肥施用对土壤生态效应影响这一领域的研究,发文数量前 5 的作者(见表 2)依次是 M. Wyszkowski(20 篇,总被引次数为 103

次)、M. Jalali(12 篇,总被引次数为 187 次)、M. Shaaban(11 篇,总被引次数为 150 次)、Zhou Jun(11 篇,总被引次数为 216 次)、Cui Hongbiao(9 篇,总被引次数为 161 次)、Kucharski(9 篇,总被引次数为 78)及 J. Wyszowska(9 篇,总被引次数为 78 次)。

表 2 发文数量在前 5 的作者及其他信息

序号	作者	所属机构	所属国家	发文数量/篇	H 指数	总被引频次/次	平均被引频次/次
1	M. Wyszkowski	瓦尔米亚和玛祖里大学	波兰	20	6	103	5.15
2	M. Jalali	布阿里大学	伊朗	12	7	187	15.75
3	M. Shaaban	华中农业大学	中国	11	7	150	13.64
4	Zhou Jun	中国科学院土壤研究所	中国	11	7	216	19.64
5	Cui Hongbiao	安徽科技大学	中国	9	6	161	17.89
5	J. Kucharski	瓦尔米亚和玛祖里大学	波兰	9	4	78	8.67
5	J. Wyszowska	瓦尔米亚和玛祖里大学	波兰	9	4	78	8.67

通过检索研究方向的核心作者可以获得较为全面的文献情报。核心作者是推动学术创新与学科发展的重要力量,通过对其发文量进行分析,可以把握学科的研究现状及发展方向。普莱斯理论的相关公式为 $N=0.749 N_{\max}^{1/2}$,其中 N_{\max} 为发文量最多的作者, N 为核心作者最少需要的发文量^[9]。在此次分析中,经计算在该领域中发表 5 篇及以上($N=4.47$)论文的研究者可以被认为是核心作者。经 VOS viewer 分析,本研究领域的核心作者共有 39 位。将发文作者间的合作网络进行了可视化处理,结果如图 5 所示。在图 5 中圆圈大小反映发文数量,距离远近表示合作关系的紧密程度。从图 5 可以看出:M. Jalali 与 M. Shaaban、J. Rinklebe、Ok Yong Sik

等作者合作密切,其合作的研究方向为添加矿物肥对土壤中的重金属和磷吸附和固定的影响^[10-11];M. Shaaban 与 Hu Ronggui、Wu Yupeng 等作者有较多合作,其合作的研究方向是施加矿物肥对酸性土壤的改良及在添加矿物肥后土壤中碳氮的转化对温室气体排放的影响^[12-13];J. Wyszowska 与 J. Kucharski 等作者合作较为紧密,其合作研究的方向是在重金属污染土壤中施加矿物肥对土壤酶活性及微生物种群的影响,并明确了施用矿物肥对土壤修复的作用^[14];M. Wyszkowski 与其他学者的合作较少,其主要研究方向是施加矿物肥对重金属污染土壤中微量元素含量及作物对土壤中营养元素吸收利用的影响^[15-16]。

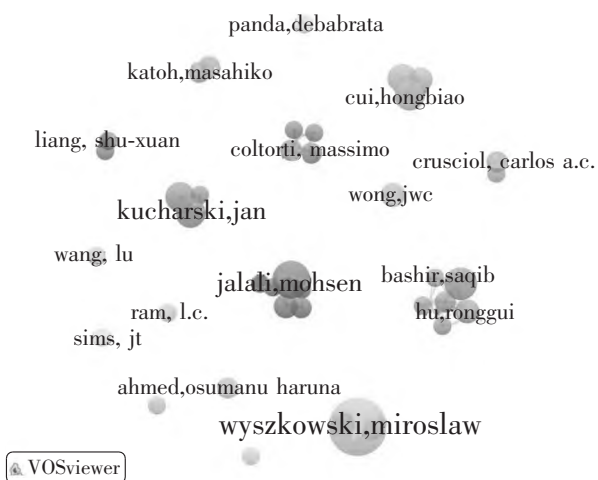


图5 矿物肥对土壤生态效应影响研究的作者间合作关系

2.5 研究领域

矿物肥对土壤生态效应影响研究涉及 114 个学科。从表 3 可以看出:论文发表量前 10 的学科分别是生态环境科学、农业、土壤科学、植物科学、农艺学、化学分析、工程环境、水资源、毒理学及生态学。其中生态环境科学领域发文数量第 1, 占比为 26.13%;农业领域发文数量第 2, 占比为 22.51%。由于这 2 个研究领域内容具有较高的实用性,因此未来这 2 个领域将依然是矿物肥对土壤生态效应影响研究的重要学科领域。

表3 矿物肥对土壤生态效应影响研究排名前 10 的学科类别

序号	发文数量	中心性	学科类别
1	446	0.05	生态环境科学
2	384	0.32	农业
3	264	0.08	土壤科学
4	130	0.13	植物科学
5	146	0.13	农艺学
6	130	0.16	化学分析
7	75	0.13	工程环境
8	63	0.08	水资源
9	38	0.00	毒理学
10	30	0.25	生态学

2.6 热点与前沿

学科领域的关键词处于动态变化,多数学者的研究是基于前人研究成果,关键词具有继承和延展性^[17],基于关键词可以进行学科研究热点识别和趋势分析^[18]。本文对矿物肥施用对土壤生态效应影响的研究在文献中关键词的共现和聚类进行了分析,发现在关键词中出现频次最高的为 heavy metals (181 次)。根据计算,出现频次大于 13 ($N = 13.45$) 的核心词汇共有 171 个(见图 6)。

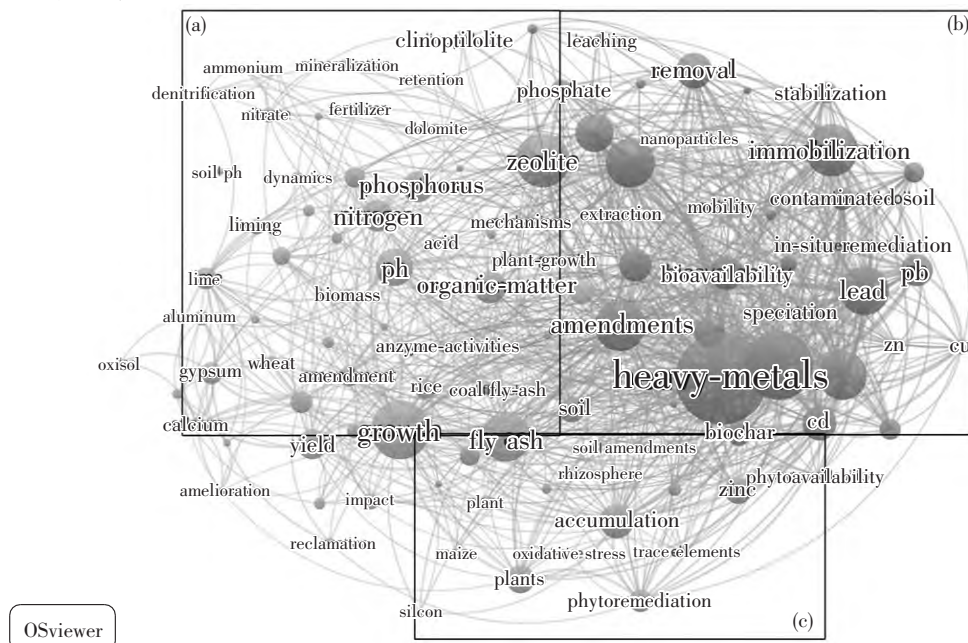


图6 矿物肥对土壤生态效应影响研究的关键词网络图

从聚类分析来看,矿物肥对土壤生态效应影响的研究可以大致归纳为(a)、(b)、(c)3 组聚类。(a)聚类组的核心词汇为飞灰(fly ash)、作物增长(growth)、有机质(organic-matter)、氮磷动态变化(nitrogen、phosphorus)、土壤 pH、石膏(gypsum)和石

灰(lime)等。该聚类组的研究内容是以飞灰、石膏及石灰为主的矿物肥施加到土壤中引起有机质和 pH 值的改变,进而影响氮的硝化及反硝化作用,土壤的固铵能力随 pH 值的增加而增加^[19-20],土壤 pH 值的改变也会对磷的吸附和解吸产生影响^[21];同时施用

矿物肥对作物产量的影响也是现在研究的一个重要方向。

(b) 聚类组的核心词汇是重金属 (heavy metals)、改良剂 (amendments)、固定 (immobilization)、生物利用度 (bioavailability)、转移 (removal)、铅 (pb)、镉 (Cd) 及稳定 (stabilization) 等, 该聚类组的研究内容是以施加矿物肥修复重金属污染土壤为主。在土壤中过量的重金属会抑制植物生长及微生物的活动^[22], 重金属污染会改变土壤的理化性质, 导致生态系统失衡^[23]。有研究表明施加矿物肥能够明显改良重金属污染的土壤, 但由于试验条件不同其结果也不尽相同, 所以研究者深入探究了矿物肥对土壤重金属治理的作用机制。现有研究的作用机制主要有 4 种: 1) 施用碱性矿物肥可以提高土壤的 pH 值, 从而能够降低土壤重金属的迁移性及生物有效性^[24]; 2) 在矿物肥中含有的钙、镁、硅等微量元素, 其结构与重金属元素结构相似, 在施加到土壤后所含的元素会与重金属形成竞争关系, 从而降低植物对重金属的吸收; 3) 矿物肥的施用能够增加土壤的孔隙度, 使土壤对重金属 (镉、铅) 的吸附能力增强, 从而降低土壤中有效态重金属的含量; 4) 在矿物肥中的硅可以使植物体内关于重金属转运蛋白基因的表达显著下调, 而相关抗性基因的表达上调, 可产生相关蛋白质, 缓解重金属毒害^[25]。

(c) 聚类组的核心词汇是沸石 (zeolite)、积累 (accumulation)、植物 (plants)、土壤 (soil)、植物修复 (phytoremediation)、铜 (copper)、锌 (zinc) 等。在研究中涉及植物和土壤 2 大类, 它们之间联系紧密。研究内容主要是施加矿物肥对土壤与植物的影响, 在施加矿物肥后土壤 pH 值发生改变, 重金属的生物有

效性降低, 植物对重金属的吸收受到抑制^[26-27], 提高了植物对土壤养分的利用率, 改变了土壤微生物群落结构, 并增加了植物促生菌的相对丰度^[28]。

目前学者们已经就矿物肥对土壤修复、土壤理化性质影响及土壤微生物活性、多样性、群落结构及功能的影响进行了较多的研究, 但土壤微生物对矿物肥施用的反应机制尚不明确。未来应加强在施加矿物肥后土壤微生物对其响应机制的研究。

2.7 研究热点的演变

研究热点变化图是从时间跨度上展现研究热点变化的视图, 图 7 展示了矿物肥对土壤生态效应影响研究的变化趋势及相互之间的影响。其中横轴为时间, 十字架图形代表此关键词在此年份中新出现, 十字架图形依据关键词首次出现的时间放置在相应的时区内^[29]。十字架图形是这一阶段的研究热点, 在图 7 中十字架图形越大表示其代表的关键词出现的频次越高, 关注此内容的研究者也越多。此外, 通过各时区十字架图形的连线关系, 可以看出不同时间段研究的演变关系^[30]。由图 7 可知: 早期矿物肥对土壤生态效应影响的研究主要集中在治理重金属污染土壤方面, 以土壤调理剂 (soil amendment)、重金属 (heavy metal) 为研究重点, 近年来逐渐偏向土壤碳循环 (carbon)、土壤酸化 (soil acidity)、土壤酶活性 (soil enzyme) 等研究方向, 涉及土壤、植物、微生物等多个研究对象。总体而言, 矿物肥对土壤生态效应影响的研究从对土壤理化性质分析逐渐转为矿物肥在土壤环境中的作用及其调节机制, 与关键词热点呈现一致性。

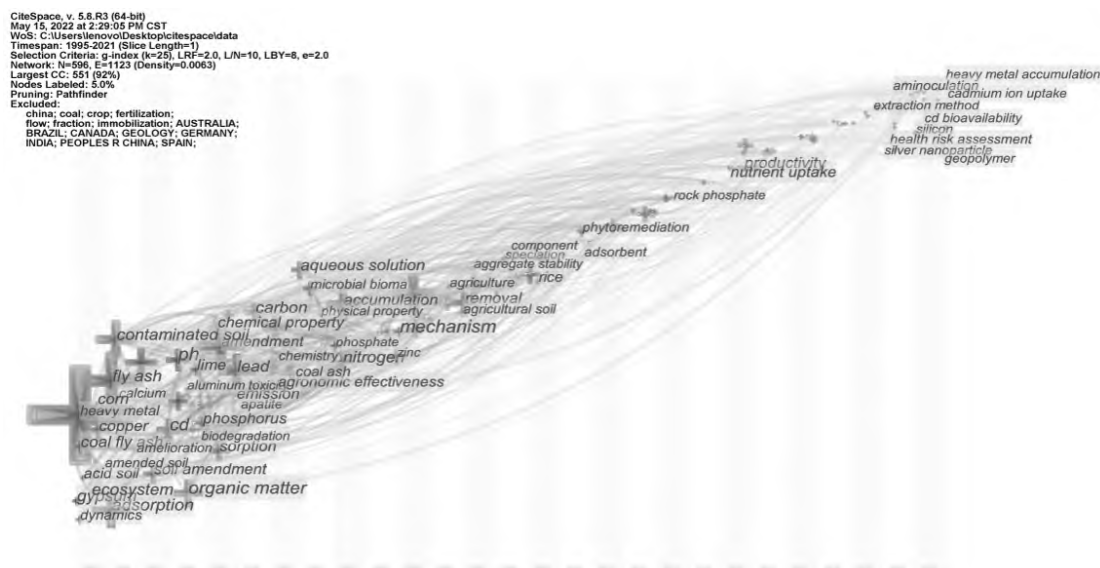


图7 研究热点在 1995—2021 年间的变化

3 结论

在矿物肥对土壤生态效应影响这一领域中的研究越来越多,自 1995 年起经历了研究的起始期(1995—2005 年)、波动期(2005—2015 年)、增长期(2015—2019 年)和激增期(2019—2021 年),发文量前期发展较慢且波动较大,后期总体呈现上升态势。中国在矿物肥对土壤生态效应影响方面的研究在近 10 年来迅速发展,尤其在 2014 年以后年均发文量一直居于世界首位,且中国科学院是世界上发文数量第 1 的研究机构。

对发文作者进行分析发现学者在聚组内联系密切,聚组间联系较少。对研究领域进行分析可以看出学科间的内容会有交叉融合出现新的研究课题,这为更深刻地探究矿物肥对土壤生态效应影响提供了基础。目前,矿物肥对土壤生态效应影响的研究可分为 3 个聚类,每个聚类研究的侧重点各有不同,研究对象包括土壤、植物、微生物、水资源等。其中矿物肥对土壤养分循环及改善土壤 pH 值与修复重金属污染土壤的研究由重点关注土壤养分的变化转向整个生态系统内养分的流动变化,而矿物肥对土壤及植物的影响因素的研究开始由宏观的变化转向微生物等微观的动态变化。矿物肥在改良酸化土壤、修复重金属污染土壤和提高作物产量等方面已有多年的研究,但矿物肥对土壤固碳的影响研究较少,特别是矿物肥如何影响土壤碳循环、微生物在该过程中的作用机制等亟需进一步研究。因此,未来应注重土壤微生物对矿物肥的响应机制的研究,明确影响其发生变化的关键因子;深入研究矿物肥对土壤温室气体排放的影响机制,为其对缓解温室效应及在碳中和中的作用提供理论依据;进一步探讨矿物肥对土壤和植物相互作用的影响,明确矿物肥对土壤和植物作用机理;进一步加强矿物肥对土壤生态系统影响的研究,为维持土壤生态系统稳定提供理论依据。

4 参考文献

- [1] 齐鑫,韩成,盛学斌,等. 钾硅钙微孔矿物肥对褐潮土水稻生长及土壤性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011,19(2):258-264.
- [2] 罗贵荣. 天然矿物肥料及其农业应用[J]. 浙江农业科学, 2006,52(3):348-349.
- [3] HE Mao, SHI Hui, ZHAO Xinyue, et al. Immobilization of Pb and Cd in contaminated soil using nano-crystallite hydroxyapatite[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013,18:657-665.
- [4] 贾倩,胡敏,张洋洋,等. 钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2245-2251.
- [5] KANTZAS E P, MARTIN M V, LOMAS M R, et al. Substantial carbon drawdown potential from enhanced rock weathering in the United Kingdom[J]. Nature Geoscience, 2022,15(5):382-389.
- [6] NEDERHOF A J. Bibliometric monitoring of research performance in the social sciences and the humanities: a review[J]. Scientometrics, 2006,66(1):81-100.
- [7] 钟业喜,邵海雁,徐晨璐,等. 基于文献计量分析的流域山水林田湖草生命共同体研究进展与展望[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2020,44(1):95-101.
- [8] 杜慧,关舒文,王美艳,等. 基于文献计量法的土壤退化研究现状及热点分析[J]. 中国水土保持, 2020(3): 33-36.
- [9] 曹梦,李勇,勾宇轩,等. 基于知识图谱的土壤中抗生素研究进展分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5):627-635.
- [10] WU Hongtao, HU Jinli, SHAABAN M, et al. The effect of dolomite amendment on soil organic carbon mineralization is determined by the dolomite size[J]. Ecological Processes, 2021,10(1):1-12.
- [11] BASHIR, SAQIB, SHAABAN M, et al. Influence of organic and inorganic passivators on Cd and Pb stabilization and microbial biomass in a contaminated paddy soil[J]. Journal of Soil and Sediments, 2018,18(9):2948-2959.
- [12] WU Hongtao, HAO Xiaohui, XU Peng, et al. CO₂ and N₂O emissions in response to dolomite application are moisture dependent in an acidic paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(8):3136-3147.
- [13] SHAABAN M, WU Yupeng, PENG Qi'an, et al. The interactive effects of dolomite application and straw incorporation on soil N₂O emissions[J]. European Journal of Soil Science, 2018,69(3):502-511.
- [14] ZABOROWSKA M, WYSZKOWSKA J, KUCKARSKI J. The possibilities of restoring the enzymatic balance of soil contaminated with cadmium[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2015,58(3):197-214.
- [15] WYSZKOWSKI M, BRODOWSKA M S. Phytoextraction with maize of soil contaminated with copper after application of mineral and organic amendments[J]. Agronomy-Basel, 2020,10(10):1597.
- [16] RADZIEMSKA M, WYSZKOWSKI M, BES A, et al. The applicability of compost, zeolite and calcium oxide in assisted remediation of acidic soil contaminated with Cr(III) and Cr(VI)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(21):21351-21362.
- [17] 奉国和,孔泳欣. 基于时间加权关键词词频分析的学科热点研究[J]. 情报学报, 2020,39(1):100-110.
- [18] 李凤,张运春. 植物修复研究的知识谱图分析[J]. 四川环境, 2021,40(1):155-162.
- [19] LUMBANRAJA J, EVANGELOU V P. Adsorption-desorption of potassium and ammonium at low cation concentrations in three Kentucky subsoils[J]. Soil Science, 1994,

- 157(5):269-278.
- [20] GOUVEIA G, EUDOXIE G. Relationship between ammonium fixation and some soil properties and effect of cation treatment on fixed ammonium release in a range of Trinidad soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2002, 33(11/12):1751-1765.
- [21] DEVAU N, HINSINGER P, LE CADRE E, et al. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(10):2980-2996.
- [22] SEREGIN I V, IVANOV V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(4):523-544.
- [23] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7):1241-1249.
- [24] ONDRASEK G, ZOVKO M, KRANJEC F, et al. Wood biomass fly ash ameliorates acidic, low-nutrient hydromorphic soil & reduces metal accumulation in maize [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 283:124650.
- [25] KIM Y H, KHAN A L, KIM D H, et al. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14(1):13.
- [26] OOSTERHUIS D M, LOKA D A, KAWAKAMI E M, et al. The physiology of potassium in crop production [J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 126:203-233.
- [27] 罗思颖, 周卫军, 潘诚良, 等. 钾硅钙微孔矿物肥对水稻重金属镉的降阻效果研究 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(29):90-94.
- [28] ZHANG Wenhui, SUN Ruibo, XU Lei, et al. Effects of micro-/nano-hydroxyapatite and phytoremediation on fungal community structure in copper contaminated soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174:100-109.
- [29] 王亚礼. 21 世纪以来我国幼儿体育的研究热点和发展态势:基于 CNKI 数据库期刊的 Citespace 可视化知识图谱分析 [J]. *中国学校体育(高等教育)*, 2018, 5(3):58-64.
- [30] 陈悦, 陈超美, 胡志刚, 等. 引文空间分析原理与应用: CiteSpace 实用指南 [M]. 北京:科学出版社, 2014.

The Bibliometric Analysis of Research Hotspots and Trends in the Effects of Mineral Fertilizer Application on Soil Ecological Effects

KANG Yijie^{1,2}, WU Bibo³, SHEN Chunyan⁴, DING Jina², WANG Cong^{1*},
WEI Liang², ZHU Zhenke², GE Tida²

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, College of Forestry, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China; 2. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Plant Virology, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China; 3. Forestry Technology Promotion Station in Ninghai County, Ningbo Zhejiang 315600, China; 4. Agricultural Products Quality and Safety Management Station in Yinzhou District, Ningbo Zhejiang 315100, China)

Abstract: In order to comprehensively understand the research status of the impact of mineral fertilizer on soil ecological effects, the research papers on the impact of mineral fertilizer application on soil ecological effects from 1995 to 2021 in the Web of Science core database are searched, and the literature visualization software VOSviewer and CiteSpace are used to analyze the annual number of publications, citation frequency, core authors and countries, subject distribution and keywords of the retrieved relevant literature. The development overview and hot directions of the research on the impact of mineral fertilizer on soil ecological effect were discussed retrospectively. The results show that the number of publications on the influence of mineral fertilizers on soil ecological effects has been increasing during 1995—2021. China accounts for the largest number of publications in the world, but the innovation of related research still needs to be further improved; the core authors are closely connected within the group, and the Chinese Academy of Sciences is the research institution with the largest number of publications. The impact of mineral fertilizers on soil ecological effects involves many disciplines such as environmental science, forestry and agronomy, and research hotspots focus on soil nutrient cycling, remediation of heavy metal contaminated soil, and changes in soil microbial community structure. In the future, the research on the impact of mineral fertilizer on soil carbon cycle and soil ecosystem stability shall be strengthened.

Key words: mineral fertilizers; soil properties; bibliometrics analysis; visualization analysis

(责任编辑:刘显亮)