

基于文献计量学分析土壤氮素矿化研究进展

蒋竹青^{1,2}, 彭 辉^{1,2*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 为了深入了解土壤氮素矿化的研究现状和发展趋势, 应用 CiteSpace 信息可视化分析软件, 对 Web of Science (WOS) 数据库中 1990—2020 年土壤氮素矿化领域的 1804 篇文献进行了基础知识框架、研究热点、发展趋势的可视化分析, 对土壤氮素矿化研究进展和演变趋势进行了图谱解读和追踪分析。结果表明: 土壤氮素矿化研究正处于不断发展阶段; 该领域研究具有很强的学科交叉特点, 主要涉及环境科学与生态学、生态学、环境科学和农业等学科; 其重要研究主题是土壤氮素转化机理及其动力学过程; 近期研究前沿主要集中在探究不同土地利用类型或农业管理措施对微生物特性的影响、微生物又影响土壤中氮素迁移转化过程方面; 我国该领域研究发展迅速, 但还面临在国际上影响力较低等问题。

关 键 词: 土壤氮素矿化; 文献计量学; CiteSpace; 研究进展; 研究热点

中图分类号: X **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)04-0975-13

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020102101

蒋竹青, 彭 辉. 基于文献计量学分析土壤氮素矿化研究进展 [J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 975 - 987

JIANG Zhu-qing, PENG Hui. Review on the Progress of Soil Nitrogen Mineralization Based on Bibliometrics Analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 975 - 987

氮素是作物生长所必需的营养元素之一, 是作物生长和产量的重要影响因子^[1]。作物中积累的氮素约 50% 来自土壤, 有些则高达 70% 以上, 土壤中的氮素绝大部分以有机氮形式存在, 有机氮必须通过微生物的矿化作用转化为铵态氮和硝态氮才能被植物吸收利用, 土壤有机氮矿化在很大程度上决定了土壤氮的供氮能力。为解决土壤供氮与作物需氮之间的矛盾, 全球氮肥的使用量在不断增加^[2], 我国是世界上氮肥消费量最多的国家之一, 但氮肥的利用率仅为 30%~50%^[3]。过量施用氮肥不仅降低肥料的生产效益, 还造成严重的环境污染问题, 如硝态氮在土壤中大量积累, 增加地表水和地下水中的氮素含量, 导致水体富营养化和地下水硝酸盐污染, 此外, 矿化、硝化和反硝化的同时作用还会导致温室气体 N₂O 的释放^[4]。因此, 研究土壤氮素矿化是确定最佳施肥量以减少氮肥对环境污染的主要依据, 也是生态系统中氮素循环和平衡研究的重要组成部分, 同时对研究全球氮素循环也有重要意义^[5]。

虽然已有综述报道了土壤氮素矿化的研究进展, 但却很少有文献采用文献计量学的方法来研究土壤

氮素矿化的发展现状和研究热点, 为了全面了解国内外对该领域的研究情况, 本文在前人研究的基础上, 以 Web of Science (WOS) 数据库中的文献为数据源, 采用 CiteSpace 软件对 1990—2020 年与土壤氮矿化研究相关的文献进行全面且系统的文献计量分析。目的是了解该领域的发展过程, 评估作者、机构和国家的表现, 总结主要主题类别和重要文献, 识别土壤氮矿化领域的新兴热点和前沿, 从而展示全球趋势, 并协助研究人员确定未来的研究方向^[6]。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

Science Citation Index(SCI) 是美国科学情报研究所 (Institute for Scientific Information, ISI) 出版的用来检索期刊文献的工具, 它收录全球范围内重要且具有影响力的研究成果, 并于 1997 年创建了多学科引文数据库 WOS^[7], 该数据库包括很多在世界范围内最具影响力的高质量期刊, 且数据库一直不断更新^[8]。

本文数据来源于 WOS 核心合集数据库, 分别检

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2021-03-21

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51409236; No.41731280) 资助

作者简介: 蒋竹青 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事有机氮模型研究。E-mail: 17866632160@163.com

*通讯作者: E-mail: pengh@ouc.edu.cn

索出标题和摘要中包含氮素矿化 (“nitrogen mineralization”) 的文献, 并将两次的检索结果以 “OR” 的方式进行组配, 搜索出 1990—2020 年与该研究领域相关的所有文献, 按照 CiteSpace 软件规定的格式导出数据, 并对数据进行去重, 得到相关文献 1804 篇, 将此作为分析的数据基础。

1.2 研究方法

文献计量分析方法是采用数学和统计学方法对文献的外部特征进行分析, 从而来描述、评价和预测科学发展的动态^[9]。科学知识图谱分析是文献计量学的一种分析方法, 它以科学知识作为研究对象, 用图形的形式显示科学知识的发展进程和结构关系^[10], 它展示了各知识单元间的网络、结构、互动、交叉、演化等多种复杂关系^[11]。

随着信息可视化技术的发展, 开发出了各种绘制科学知识图谱的工具, 其中 CiteSpace 软件成为目前最为流行的知识图谱绘制工具之一。该软件是由陈超美博士开发的用于计量和分析文献数据的可视化工具, 能够直观地展现科学知识领域的信息全景, 识别不同研究领域的重要文献、热点和前沿。在实际应用中科学有效、操作简单, 具有丰富而美观的可视化界面, 在国内外信息科学领域得到了广泛的应用^[12]。

本文利用 CiteSpace 可视化分析软件对处理后的数据进行分析, 时间段设为 1990—2020, 时间分区为 3 年, 节点类型依次设置 “Author”、“Institution”、“Country”、“Reference”、“Keyword”、“Catagory” 等节点, 分别生成相关的知识图谱进行分析。

2 结果与讨论

2.1 基本情况分析

2.1.1 发文数量 发文量能够反应研究领域的发展力度和发展历程, 同时能够对研究领域进行阶段性的划分, 通过绘制发文数随时间的变化曲线, 动态地分析文献量的变化情况^[13]。本研究采用 Excel 软件绘制了 1990—2020 年与研究主题相关的 1804 篇文献随时间的变化趋势 (图 1)。从图中可以看出土壤氮素矿化领域起步较早, 从 90 年代初期就有研究者开始关注该领域, 该时期处于探索阶段, 发文量基本在 50 篇以下。1993—2014 年, 该领域处于缓慢发展阶段, 每年发文数量在 50~70 篇间波动且波动幅度较大。2015 年之后, 虽然每年的发文数量仍然存

在较小的波动性, 但从整体的趋势来看, 发文量处于不断上升的趋势, 表明该研究处于不断发展阶段。

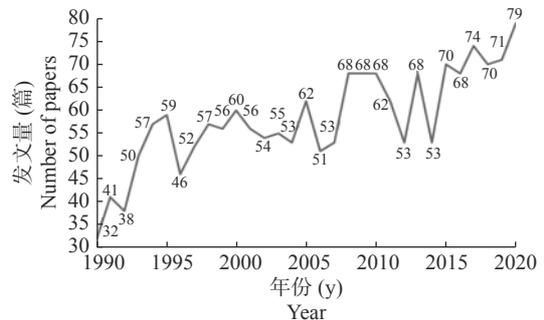


图 1 发文数量随时间变化趋势图

Fig.1 The trend of the number of papers published over time

2.1.2 作者、机构和国家合作网络分析 通过作者合作网络分析, 能够识别出该领域高产作者或核心作者以及各作者之间的合作关系, 再通过进一步的聚类分析, 能够探究该领域的知识结构和热点主题。利用 CiteSpace 构建了土壤氮素矿化研究领域作者合作网络 (图 2)。

图 2 中共包含 850 个节点, 节点大小与发文频次成正比, 发文量越多, 节点越大。连线条数共 521 条, 代表这些作者之间存在合作关系, 连线颜色展示了作者间首次合作的年份, 连线的粗细表示作者间合作的强度。作者合作网络密度为 0.0039, 说明团体内部具有一定合作关系, 存在具有凝聚力的科研团体。

表 1 选取了发文数量 6 篇以上的作者, 结合图谱可得出发文量较多的作者分别为 Malkomes H P、Berendse F、Brussaard L 和 Kizildag N, 说明他们对该领域研究较为深入。其中 Malkomes H P 和 Berendse F 均与其他作者没有合作, 仅专注于独立研究, 而 Brussaard L 和 Kizildag N 与其他作者有合作, 且与其他作者间连线粗且密, 合作强度大。表中仅有一位中国作者 Bai J H (北京师范大学), 他与其他几位北京师范大学的作者 Gao H F、Jia J、Wang W、Wang X 和 Huang C 间形成合作网络, 虽然他们首次发文时间较晚, 但发文量较多, 说明他们在该领域的参与度较高且发展较快。

再对导入的数据进行机构合作网络分析, 绘制出机构合作图谱 (图 3)。图谱中每个节点表示一个研究机构, 节点大小与该机构的发文量成正比, 节点间连线表明机构间的合作关系。图谱中共包含 413 个节点, 478 条连线, 网络密度为 0.0056, 说明

各机构在土壤氮素矿化领域研究中有较好的合作关系, 从图中也可以看出几乎所有的机构间均有合作, 故有利于推进该领域的发展进程。图中最大的节点

为中国科学院, 说明中科院的发文量最多, 对该领域研究较为深入。



图 2 作者合作图谱
Fig.2 The map of authors collaborated

表 1 1990—2020 年土壤氮素矿化研究领域发文量 6 篇以上的作者
Table 1 Author published more than 6 papers in the field of soil nitrogen mineralization from 1990 to 2020

作者 Author	频次 Count	首发年份 First published year	作者 Author	频次 Count	首发年份 First published year
Malkomes H P	13	1990	Geisseler D	6	2018
Berendse F	11	1990	Edwards C A	6	2000
Brussaard L	8	1990	Saglikler H A	6	2014
Kizildag N	7	2014	Cabrera M L	6	1993
Bai J H	7	2012	Gonzalezfernandez C	6	2014
Jarvis S C	7	1996	Deruiter P C	6	1993
Cenkseven S	6	2014	Zak D R	6	1991

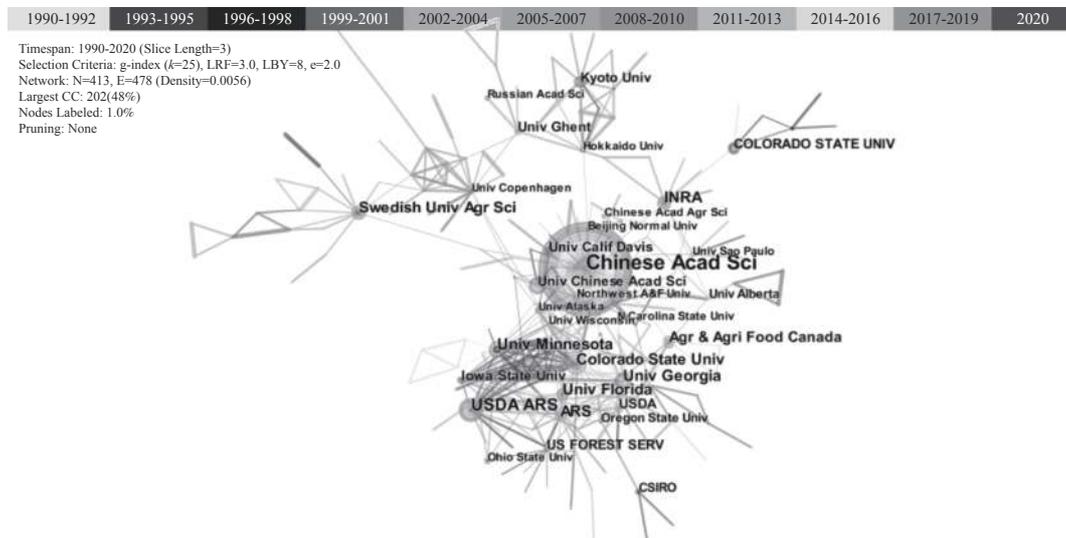


图 3 机构合作图谱
Fig.3 The map of institutions cooperated

中介中心性值是用来表征节点重要性的指标，中心性越大，其影响力往往越大^[4]。表 2 统计了中介中心性排名前 10 的机构的中介中心性、发文数和首发年份，从表中可知，中国科学院的中介中心性值最大，为 0.22，说明中科院与其他机构合作密切并且研究成果在该领域具有较大的影响力。福建农林大学的首发时间最晚，虽然发文量很少，但中介中心性值相对较高，说明该大学在土壤氮素矿化领域发展比较迅速。

表 2 1990—2020 年土壤氮素矿化研究中介中心性排名前 10 的机构

Table 2 The top 10 institutions of the ranking of media-centrality in the research of soil nitrogen mineralization from 1990 to 2020

机构 Institution	中介中心性 Centrality	频数 Count	首发年份 First published year
中国科学院	0.22	92	2001
哥本哈根大学 (丹麦)	0.09	11	2000
明尼苏达大学	0.08	29	1990
科罗拉多州立大学	0.08	29	1998
瑞典农业科学大学	0.07	24	1998
法国国家农业科学院	0.06	26	1990
科罗拉多大学	0.06	6	2000
威斯康辛大学	0.05	10	2006
福建农林大学	0.05	2	2019
北海道大学	0.04	11	2011

表 3 统计了发文量排名前十的国家的发文数、中介中心性和首发年份。根据表中数据可知，美国的发文量最多，且远多于其他国家，其中介中心性值也最大，说明美国在该领域的相关文献影响力较大，综上美国对土壤氮素矿化的研究远远超过其他

国家，处于相对领先的地位^[15]。中国首发年份在 10 个国家中最晚，但发文量却处于第二位，说明我国在该领域发展迅速，但仍存在中介中心性较低，文献影响力较小等问题需要继续努力。

表 3 1990—2020 年土壤氮素矿化研究发文数排名前 10 的国家
Table 3 The top 10 countries of the ranking of the number of papers published on soil nitrogen mineralization from 1990 to 2020

国家 Country	频数 Count	中介中心性 Centrality	首发年份 First published year
美国	597	0.79	1990
中国	198	0.06	2001
加拿大	110	0.12	1990
德国	105	0.26	1990
日本	69	0.06	1990
澳大利亚	67	0.2	1990
西班牙	65	0.1	1992
荷兰	65	0.1	1990
印度	60	0.11	1990
法国	60	0.06	1992

2.1.3 学科共现特征分析 学科共现分析主要是通过构建各学科间的关系来揭示它们之间的内在联系。输出的学科共现图谱表明 (图 4)，共有 56 个节点，即 56 个学科，各学科间的连线共 231 条，网络密度为 0.15，说明各学科间联系比较紧密，该领域属于多学科交叉的研究领域。根据节点大小可以判断出发文量排名前三的学科依次为农业、土壤科学以及环境科学与生态学，其中环境科学与生态学的中介中心性最大，说明该学科与其他学科交叉最广泛，土壤科学虽然发文量较多但中介中心性不高，说明与该学科交叉的领域有限。

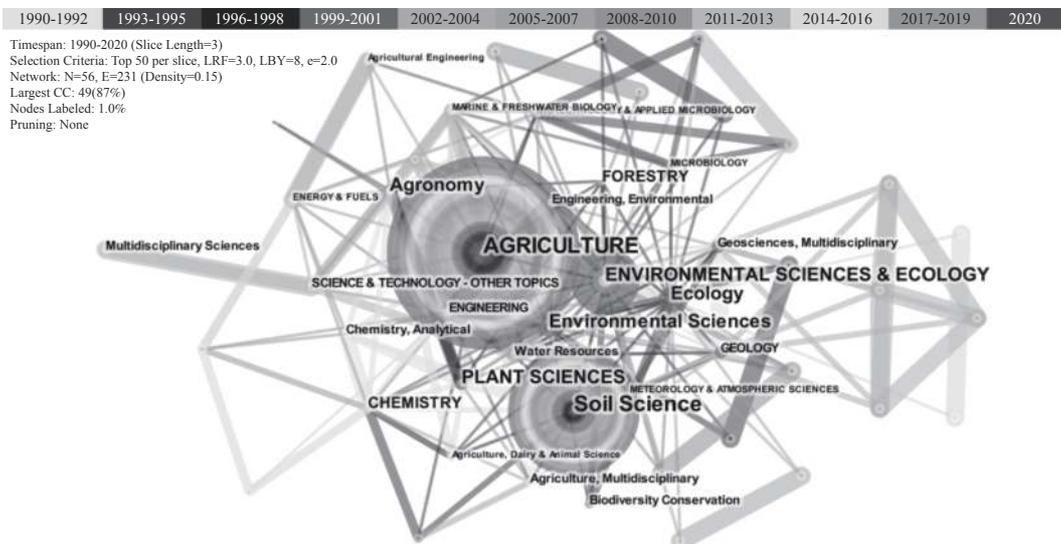


图 4 学科共现图谱
Fig.4 Co-occurrence map of subjects

表 4 统计了中介中心性排名前 10 学科的发文数、中介中心性和首发年份。综合考虑发文量和中介中心性值可以得出, 该研究领域的学科分布主要集中在环境科学与生态学、生态学、环境科学和农业等学科, 且这些学科的首次发文年份均在 1990 年甚至之前, 说明该领域学科交叉时间久远且复杂。

表 4 1990~2020 年学科共现特征及频次统计表

Table 4 Statistical table of co-occurrence characteristics and frequency of subjects from 1990 to 2020

学科 Category	频数 Count	中介中心性 Centrality	首发年份 First published year
环境科学与生态学	596	0.42	1990
生态学	311	0.28	1990
环境科学	358	0.19	1990
农业	1037	0.15	1990
地质学	75	0.12	1990
地质、多学科	73	0.11	1990
工程学	48	0.1	1993
科学与技术-其他主题	50	0.08	1997
化学	107	0.05	1990
海洋与淡水生物学	322	0.04	1990

2.1.4 共被引聚类分析 文献共被引是指两篇或多篇文献共同被后来的一篇或多篇文献引用, 则称被

引的这两篇或多篇文献构成共被引关系。通过共被引分析能够让我们认识到各文献间的联系, 但无法从内容的角度了解各主题间的联系, 此时可以通过对共被引文献进行聚类分析来了解每一簇共被引文献所代表的主题。这是因为施引文献的关键词和其被引文献的主题具有较强的相关性, 故共被引文献可以从施引文献中获取聚类标签。利用 CiteSpace 软件进行文献共被引聚类分析, 节点类型选择文献共被引 (“Reference”), 阈值设定为 Top N = 25 (即从每个片段中选择被引次数排名前 25 的文献), 得到图 5 所示的图谱。

在共被引聚类网络图中一个节点代表一篇文章, 节点大小与被引次数成正比, 连线粗细程度与文献间相互引用次数成正比, 图谱中共包含 501 个节点, 1726 条直线和 12 个聚类, 表明土壤氮素矿化研究集中性高且分支众多。聚类从 0 排列到 11, 序号越小, 聚类中包含的关键词越多, 每个聚类中包含多个紧密相关的关键词。对各聚类进行分析, 得到每个群组的专题、主要关键词及主要研究内容 (对应被引次数较多的文献), 列于表 5。

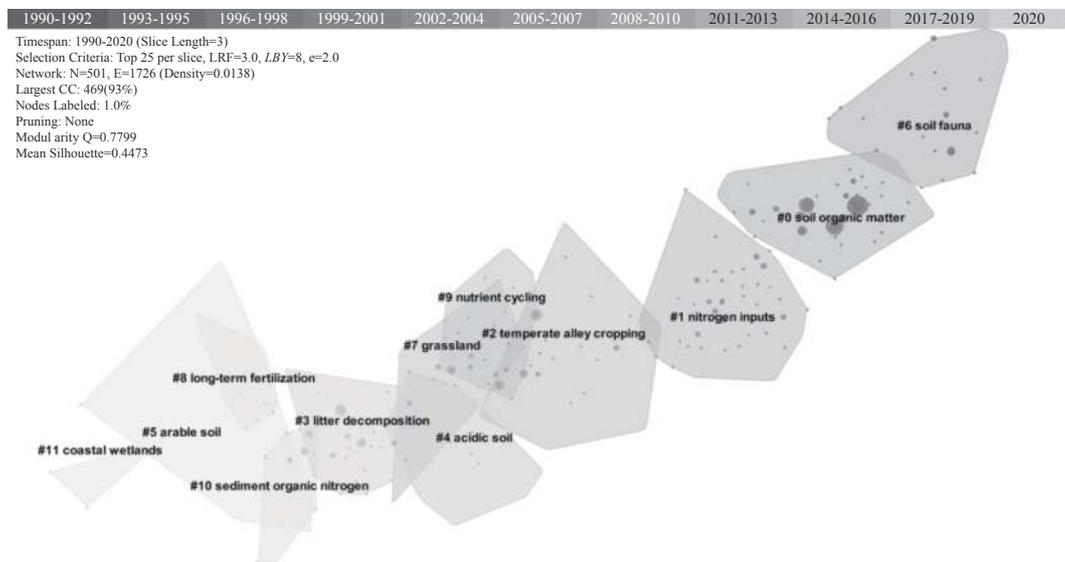


图 5 共被引聚类网络图谱
Fig.5 Co-cited clustering network map

表 6 统计了中介中心性排名前十文献、被引次数和中介中心性。综合被引次数和中介中心性两项指标, 得到比较有影响力和代表性的文章分别为 Khalil M I 的《Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials》^[16]、Stark J M 《High rates of

nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests》^[17]、Mikha M M 的《Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles》^[18] 和 Nadelhoffer K J 《Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in six arctic soils》^[19]。上述这些文献的

表 5 各聚类主要关键词及研究内容
Table 5 Main keywords and research contents or cluster

群组编号 Code	群组专题 Group topics	主要关键词 Main keywords	主要研究内容 Main research content
#0	土壤有机质	土壤有机质; 白桦; 草; 垃圾; 森林	基于连续取芯和金属管或PVC管内原状土柱的原位培养技术, 研究土壤中矿质氮通量 ^[20] ; 温度对微生物呼吸速率、土壤氮矿化、硝化和磷矿化速率的影响 ^[19] 。
#1	氮输入	氮输入; ¹⁵ N标记的秸秆; 收割; 割载系统; 氮矿化动力学	在完整的土壤岩心中使用 ¹⁵ N同位素稀释技术来测量未受干扰的森林生态系统中的硝化作用和微生物同化的总速率, 发现总硝化率很高, 与之前的假设矛盾 ^[17] ; 采用分析方程式估算土壤氮矿化、固定和损失, 并分析它们如何造成土壤在无氧和有氧培养期间净氮生产差异 ^[21] 。
#2	温带狭径种植	温带狭径种植; 微生物呼吸; 有机氮源和无机氮源; 初始组分; 普通小麦	收集了在森林、灌木丛、草地和农业系统中进行的100项研究的土壤特征和总速率数据, 通过同位素稀释研究, 分析无机氮生产和消费的主要驱动因素, 同时发现在不同的生态系统类型中, 驱动因素和比率之间的关系有所不同 ^[22] ; 通过比较恒定含水量土壤和干燥再湿润土壤矿化碳和矿化氮的含量变化, 发现矿化的碳和氮的冲刷似乎主要来源于微生物, 而团聚体粒径分布不受干燥再湿润循环的影响 ^[18] 。
#3	凋落物分解	凋落物分解; 温度敏感性; 活化能; 青藏高原; 自由二氧化碳富集	研究森林、草地、农田3种土壤的净氮矿化受温度和水分的影响, 结果表明土壤净氮矿化对温度的敏感性在25 °C时最大, 而土壤水分对土壤净氮矿化的影响很小 ^[23] ; 任何单一的化学方法都不能很好地预测土壤氮矿化潜力, 应采用一种整体的方法来估算湿润温带地区的土壤氮供应 ^[24] 。
#4	酸性土壤	酸性土壤; 气候带; 生长性能; 实验室培养; 改良土壤	检验了三个温度函数 (Q_{10} , Arrhenius, Logistic) 作为土壤氮矿化率k温度依赖性预测因子的适用性, 结果表明, 温度响应模型的选择对土壤氮矿化速率的预测并不重要, 相比之下, 参考温度的选择比温度模型的选择对预测的土壤氮矿化率有更显著的影响 ^[4] ; 实地研究中的鸡粪氮矿化与实验室研究有相同的趋势, 但净无机氮含量低得多, 这是由于环境因素导致反硝化和固定化作用增大, 因此有必要进行额外的研究以量化鸡粪氮的利用率 ^[25] 。
#5	耕地土壤	耕地土壤; 地形; 土壤有机质分解; 可溶性有机氮; 种内竞争	研究了美国中西部施用堆肥和新鲜猪粪后玉米净氮矿化和氮素吸收的同步效应, 结果表明在土壤施用前对肥料进行堆肥对玉米作物的氮同步没有明显的好处 ^[26] ; 叶面和土壤养分在不同的土壤养分梯度上是一致的, 氮对凋落物分解的负面影响减弱了对土壤肥力的正反馈, 根系分解可增强凋落叶对土壤肥力的正向反馈, 除N和木质素外, 凋落物特征是影响分解的主要因素, 植物种类对土壤有机质动态的影响值得重视 ^[27] 。
#6	土壤动物区系	土壤动物区系; 常规管理; 农业生态系统; 土壤; 生物质	使用单组分模型、双组分模型和特殊模型描述了四种作物系统中土壤潜在矿化氮, 结果表明, 在所有情况下特殊模型都能最好得描述累积矿质氮的曲线 ^[28] ; 为了预测田间土壤矿化氮, 通过土壤温度调整矿化速率常数, 并通过土壤含水量进一步调整利用氮矿化势预测的氮矿化量和调整的速率常数, 结果发现该方法大大高估了田间土壤氮矿化量, 可能由于含水量系数不合适或者样品的前处理导致 ^[29] 。
#7	草原	草原; 放牧强度; 内蒙古; 硝化作用; Logistic函数	雪深的增加影响了两种北极苔原的微生物活性和土壤氮矿化 ^[30] ; 研究了中国北部的内蒙古草原在不同温度、水分及其交互作用下的净硝化速率和净氮矿化率 ^[31] 。
#8	长期施肥	长期施肥; 有机碳矿化; 泥炭基生长介质; 温室园艺; 有机肥	评估长期施用化肥和农家肥条件下水稻系统土壤碳、氮矿化动力学差异, 研究了不同水分条件 (好氧和淹水) 下土壤碳、氮矿化速率, 结果表明不同的施肥方式和水分状况对土壤碳、氮矿化均有显著影响 ^[32] ; 研究集约化管理农业景观中有机农业生态系统的土壤酶活性、微生物群落和碳氮有效性, 有机农业生态系统管理的差异强烈地影响了土壤养分和酶活性, 但对土壤微生物群落没有重大影响 ^[33] 。
#9	养分循环	养分循环; 分解者化学计量学; 可溶性有机氮; 一级动力学模型; 鸡粪肥	讨论了土壤氮循环理论的演变, 提出了一个新的综合概念模型, 解释了氮循环如何随着生态系统氮有效性的变化而变化, 并讨论了陆地氮循环变化模式引发的方法论问题 ^[34] ; 研究了添加作物残渣和鸡粪后亚热带不同旱地土壤碳氮矿化特征 ^[16] 。
#10	沉积物有机氮	沉积物有机氮; 人为影响; 磷肥; 分数; 老化生物炭	研究表明粗质地土壤中添加桉树生物炭降低了土壤微生物生物量和氮矿化 ^[35] ; 研究了碳和氮的交互作用对有机质矿化的影响及其与微生物生长动力学和5种水解酶活性的关系, 这包括两组参数控制启动效应, 微生物氮开采和化学计量分解理论 ^[36] 。
#11	沿海湿地	滨海湿地; 硫酸钠; 氯化钠; 硝化作用; 氮矿化; 温度	研究了盐对土壤微生物分解者群落的影响及其在有机碳循环中的作用 ^[37] ; 研究了水和盐对沿海湿地土壤氮矿化的影响, 总结了其他土壤理化性质和植物群落对土壤氮矿化过程的影响 ^[38] 。

主要内容均在表 5 中进行简要介绍, 它们不仅被引的频次较多, 同时还与其他文献相互交叉, 在网络

中起到重要的沟通桥梁的作用, 说明这些文献具有重要的理论价值和知识基础, 值得我们去阅读和研究。

表 6 被引次数排名前十的文献
Table 6 The top ten cited papers

参考文献 Cited references	被引次数 Count	中介中心性 Centrality
Wang W J, 2001, SOIL BIOL BIOCHEM, V33, P1305	7	0.7
Khalil M I, 2005, SOIL BIOL BIOCHEM, V37, P1507	13	0.47
Stark J M, 1997, NATURE, V385, P61	10	0.47
Dessureault-Rompere J, 2010, GEODERMA, V157, P97	9	0.46
Mikha M M, 2005, SOIL BIOL BIOCHEM, V37, P339	13	0.38
Nadelhoffer K J, 1991, ECOLOGY, V72, P242	15	0.34
Mohanty S, 2013, EUR J SOIL BIOL, V58, P113	7	0.26
Burke I C, 1989, ECOLOGY, V70, P1115	9	0.18
Janssen B H, 1996, PLANT SOIL, V181, P39	11	0.15
Franzluebbers A J, 2000, SOIL SCI SOC AM J, V64, P613	3	0.15

2.2 研究热点与前沿分析

2.2.1 研究热点

关键词是对文章内容和中心思想的高度概括和规划整合, 通过对关键词进行分析可以了解文章的主题, 出现频次高且中介中心性值大的关键词能够代表研究领域的热点, 通过分析研究热点, 能够了解研究领域的关注焦点和发展动向, 从而更好地明确研究方向^[39]。然而仅仅对关键词的频次和中介中心性进行分析远不能满足研究的需求, 因此还需要对关键词进行共现分析, 找到关键词之间的联系。如果两个关键词在不同的论文中同时出现的次数越多, 说明它们之间的关系越紧密, 越能

够代表领域的研究主题。在 CiteSpace 界面中节点选择“Keyword”, 阈值设定为 Top N = 25 (即从每个片段中选择出现次数排名前 25 的文献), 得到关键词共现网络图谱 (图 6)。图谱中共包含 523 个节点和 875 条连线, 一个节点代表一个关键词, 节点中分布颜色代表该关键词出现的年份, 同种颜色出现的粗细与该年份关键词出现的频次成正比, 节点间的连线表示了各关键词间的共现关系, 连线越粗, 共现强度越大, 联系越紧密。从共现网络来看, 节点分布较为广泛且分支较多, 网络重叠较多, 表明该领域的研究内容较为丰富和集中^[40]。

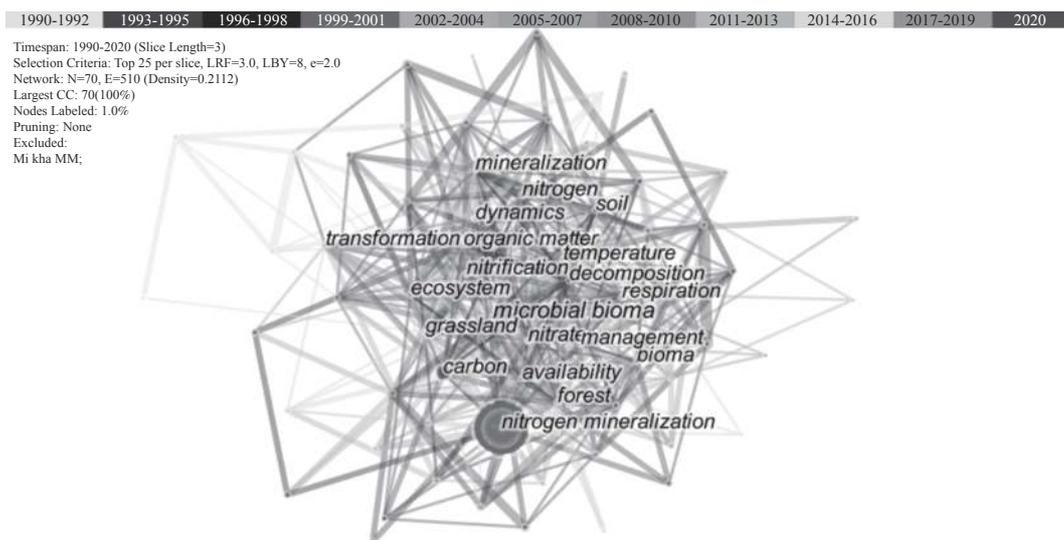


图 6 关键词共现网络图谱
Fig.6 Co-occurrence network map of keywords

表 7 统计了出现频次排名前二十的关键词的频次、中介中心性值和首发年份, 结合表 7 以及关键

词贡献图谱可以得出, “氮矿化”、“硝化作用”、“土壤”、“矿化”、“有机质”等与土壤氮素转化机理

及动力学相关的关键词出现频次较多且中介中心性值较大，它们可以看作是土壤氮素矿化领域重要的研究主题。为了能够更加清晰地展示各关键词出现的时间顺序以及它们之间的关联，在关键词共现图谱的基础上，选择“Timezone”进行关键词时区图分析（图 7）。从图谱中可以看出，该领域很多重要的高频关键词，如“氮矿化”、“碳”、“分解”、“硝化

作用”等大多数都在 1990 年左右甚至是之前就已经开始使用且延续时间较长，说明它们一直以来就是该研究领域不可或缺的部分。随着时间的推移，新出现的关键词逐渐减少，且关键词和中介中心性频次进一步下降，研究出现分化现象并向多个领域渗透，近十年来，“多样性”、“酶活性”、“群落”、“土地利用”等关键词逐渐成为新的热点和趋势。

表 7 出现频次排名前二十的关键词
Table 7 The top twenty keywords of the most frequently appeared

关键词 Keywords	频次 Count	中介中心性 Centrality	首发年份 First published year	关键词 Keywords	频次 Count	中介中心性 Centrality	首发年份 First published year
氮矿化	475	0.07	1991	可用性	196	0.13	1991
碳	353	0.05	1990	温度	178	0.09	1991
分解	280	0.03	1990	森林	137	0.09	1990
硝化作用	277	0.08	1990	生态系统	137	0.05	1991
动力学	276	0.06	1990	生物量	105	0.1	1993
土壤	268	0.14	1990	转换	98	0.08	1992
矿化	253	0.07	1990	硝酸	98	0.08	1993
有机质	247	0.1	1990	草原	96	0.12	1990
氮	238	0.09	1990	管理	85	0.04	2000
微生物生物量	228	0.14	1990	呼吸	81	0.02	1993

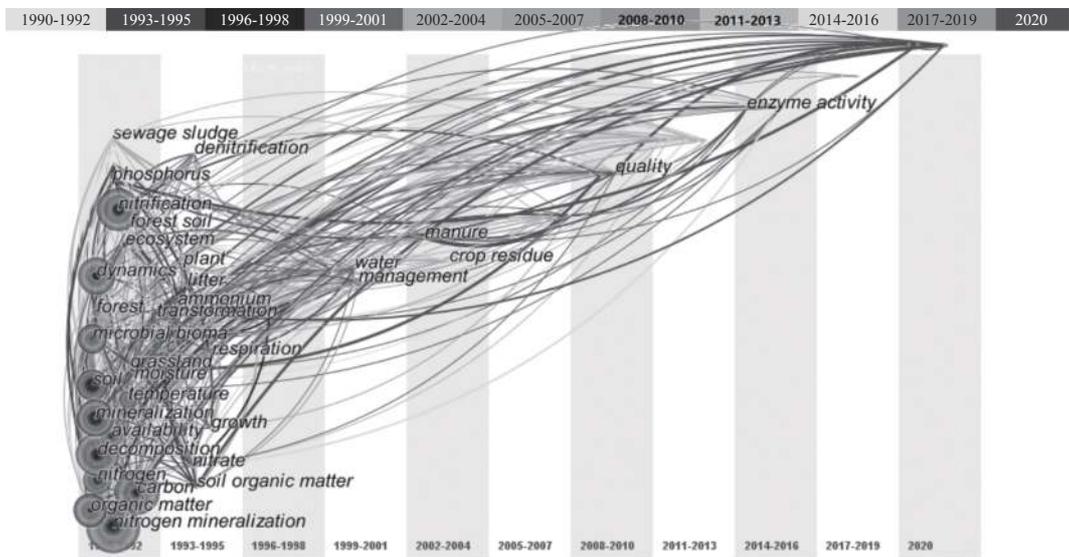


图 7 关键词时区图谱
Fig.7 Time zone map of keywords

2.2.2 研究前沿和发展趋势 为了了解研究领域的最新发展趋势，需要对研究前沿进行动态分析，研究前沿随着时间的变化此消彼长，反映研究领域的着重点，可以通过提取突变的主题词，对研究前沿进行识别与追踪。在基于关键词共现分析的基础上，利用 CiteSpace 软件的突变检测对关键词进行分析，得到突现强度排名前 26 的关键词突现网络图谱（图 8）。

从图谱中可以看出“凋落物”、“管理”、“多样性”、“酶活性”等关键词的突现强度较高，说明这些关键词为该时期的主要研究主题。“凋落物”、“耕作”、“施肥”、“水”、“肥料”、“氨氮”、“管理”、“群落”等突现词出现时间较长，说明与这些关键词有关的研究方向较为基础。根据突现词图谱可以将土壤氮矿化研究大致分为三个阶段，第一阶段是 1990—1995 年，该阶段主要研究原位土壤的转化过

添加单宁后真菌和细菌的比值会增大。有关“多样性”的文献多是针对微生物的功能多样性或种群多样性而言, Kumar 等^[47]以亚热带半湿润水稻种植体系为研究对象,研究了有机肥和无机肥对土壤微生物群落功能多样性的长期影响及其与土壤有机碳、微生物生物量和活性的关系,结果表明,长期单独施用氮肥对土壤微生物群落的变化有一定的响应,降低了微生物的功能多样性; Peay 等^[48]在不同的海拔和降水梯度范围内,研究了夏威夷地区土壤真菌、细菌和古细菌的丰富度和组成变化,结果表明,由于环境变化的复杂性和微生物类群生态的多样性,微生物对气候梯度的响应具有异质性。有关“酶活性”的相关文献主要从微观的角度探讨了微生物的细胞外酶活性影响微生物种群和生物量,进而影响了土壤中氮素矿化以及植物的生长过程, Panke-Buisse 等^[49]发现当植物寄主内和寄主之间合作时,土壤微生物组在改变植物开花时间和土壤功能方面具有高度可重复性,生物量的增加与土壤中氮矿化相关的微生物胞外酶活性增加 2~5 倍有关,植物寄主间开花表型的可重复性表明,可以选择微生物群来改变植物性状和协调土壤资源库的变化; Masunga 等^[50]评估了添加有机改良剂后土壤氮矿化动态,并评估了微生物种群的变化,结果表明四种有机添加物的土壤氮矿化潜力不同,使用三叶草改良土壤中的细菌、放线菌和真菌含量比用肥料或堆肥改良土壤中的含量更高,故施用有机改良剂的时间和类型应与作物的营养需求相匹配。上述这些突现词属于近几年的研究前沿并且很可能成为未来的主要研究方向。

3 结论

本文利用 CiteSpace 软件对 1990—2020 年 Web of Science 数据库中土壤氮素矿化研究领域的 1804 篇文献进行了可视化分析,得出如下结论。

(1) 有关土壤氮矿化研究的发文量整体上呈不断上升的趋势,表明该领域处于不断发展阶段。

(2) 作者、研究机构和国家间存在联系和合作关系,有利于推动该领域的发展。对作者合作网络分析得出中国作者的首发时间虽较晚,但发文量多,说明对该领域的研究参与度较高且发展较快。在对机构合作网络进行分析时发现,中国科学院的发文量最多,且中介中心性值最大,说明中科院的文献

在该领域具有一定影响力且对该领域研究较为深入。在对国家合作网络分析时发现,美国在该领域研究处于相对领先的地位。中国的首发年份较晚,但发文量较多,说明我国在该领域研究发展迅速,但同时也还存在文章影响力较低的问题。

(3) 在对学科共现分析时发现,该领域共囊括了 56 个学科且各学科联系紧密,说明该领域属于多学科交叉的研究领域,且学科分布主要集中在环境科学与生态学、生态学、环境科学和农业等学科。

(4) 在对文献进行共被引聚类分析时发现, Khalil M I、Stark J M、Mikha M M、Nadelhoffer K J 等的文章不仅被引频次多且与其他文献相互交叉,说明这些文献具有重要的研究价值。

(5) 在对研究热点进行分析时发现,“氮矿化”、“硝化作用”、“土壤”、“矿化”、“有机质”等有关土壤氮素转化机理及动力学的研究属于该领域的重要研究主题。而近几年来,该领域逐渐关注微生物群落特征、土地利用类型、农业管理方式及环境因素对土壤氮矿化过程的影响。

(6) 通过对突现词进行分析,不仅可以了解到不同时期的研究前沿,还可以判断出哪些属于较为基础的研究方向,更重要的是能够大致推测出近几年的研究前沿,通过分析可知近期研究前沿主要集中在分析不同土地利用类型或农业管理措施对微生物特性的影响,进而影响土壤中氮素迁移转化过程,这很可能成为未来该领域的主要研究方向。

(7) 尽管这项研究对该领域的研究热点和动向分析具有一定的启发意义,但也具有一定的局限性。首先,在这项研究中,我们只针对 WOS 数据库中的文献进行分析,而没有考虑其他数据库的文献,因此分析的结果可能有失偏颇,有待进一步改进以获取更加准确的结果。其次,尽管我们确定了主要的研究热点及其发展,但仍需要了解每个研究热点的更深信息,例如方法、理论背景以及每项工作的主要发现^[51]。最后,应该指出的是,尽管该技术已用于许多文献计量研究,但 CiteSpace 软件也有其自身的局限性,且在分析图谱和数据的过程中存在一定的主观性,可能会造成分析结果存在偏差。

参考文献:

- [1] 赵平,孙谷畴,彭少麟.植物氮素营养的生理生态学研究[J].生态科学,1998,(2):39-44.
- [2] Curtin D, Beare M H, Lehto K, et al. Rapid assays to predict

- nitrogen mineralization capacity of agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 979 – 991.
- [3] 崔玉亭. 化肥与生态环境保护[M]. 化学工业出版社, 2000.
- [4] Dessureault-Rompré J, Zebarth B J, Georgallas A, et al. Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: Comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3-4): 97 – 108.
- [5] 廖中建, 黎理. 土壤氮素矿化研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2007, (1): 56 – 59.
- [6] Xiang C, Wang Y, Liu H. A scientometrics review on nonpoint source pollution research[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 400 – 408.
- [7] 宋国香, 郑京晶, 刘康, 等. 基于文献计量学的水体修复技术研究趋势及热点分析[J]. *湿地科学*, 2016, 14(2): 185 – 193.
- [8] 王泽宇, 马妍, 刘振海, 等. 土壤重金属污染植物修复技术的文献计量学分析: 《环境工程》2019年全国学术年会[C]. 中国北京, 2019.
- [9] 刘丽, 白秀广, 姜志德. 国内保护性耕作研究知识图谱分析——基于CNKI的数据[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(4): 76 – 81.
- [10] 陈悦, 刘则渊, 陈劲, 等. 科学知识图谱的发展历程[J]. *科学学研究*, 2008, (3): 449 – 460.
- [11] 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.
- [12] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace软件应用研究的回顾与展望[J]. *现代情报*, 2013, 33(4): 99 – 103.
- [13] 王立盟, 孟浩. 基于文献计量的生态文明评价研究态势分析[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(13): 250 – 258.
- [14] 李洪远, 杜志博. 基于Citespace V的城市生态修复研究的可视化分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1209 – 1214.
- [15] 唐浩竣, 李海萍, 陈文悦, 等. 基于科学知识图谱谈土壤有机碳研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 541 – 552.
- [16] Khalil M I, Hossain M B, Schmidhalter U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(8): 1507 – 1518.
- [17] Stark J M, Hart S C. High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests[J]. *Nature*, 1997, 385(6611): 61 – 64.
- [18] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2): 339 – 347.
- [19] Nadelhoffer K J, Giblin A E, Shaver G R, et al. Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in six arctic soils[J]. *Ecology*, 1991, 72(1): 242 – 253.
- [20] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(5): 521 – 530.
- [21] Wang W J, Chalk P M, Chen D, et al. Nitrogen mineralisation, immobilisation and loss, and their role in determining differences in net nitrogen production during waterlogged and aerobic incubation of soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10): 1305 – 1315.
- [22] Booth M S, Stark J M, Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data[J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(2): 139 – 157.
- [23] Guntiñas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48: 73 – 80.
- [24] Luce M S, Whalen J K, Ziadi N, et al. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 112: 55 – 102.
- [25] Sistani K R, Adeli A, McGowen S L, et al. Laboratory and field evaluation of broiler litter nitrogen mineralization[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2603 – 2611.
- [26] Loecke T D, Cambardella C A, Liebman M. Synchrony of net nitrogen mineralization and maize nitrogen uptake following applications of composted and fresh swine manure in the Midwest US[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(1): 65 – 74.
- [27] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: Revisiting litter feedbacks[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(6): 357 – 363.
- [28] Bonde T A, Rosswall T. Seasonal variation of potentially mineralizable nitrogen in four cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(6): 1508 – 1514.
- [29] Chua T T, Bronson K F, Booker J D, et al. Division S-4—Soil fertility & Plant nutrition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1428 – 1438.
- [30] Schimel J P, Bilbrough C, Welker J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 217 – 227.
- [31] Wang C, Wan S, Xing X, et al. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 1101 – 1110.
- [32] Mohanty S, Nayak A K, Kumar A, et al. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil of rice-rice system under long term application of chemical fertilizers and farmyard manure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 58: 113 – 121.
- [33] 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.

- [34] Schimel J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm[J]. *Ecology*, 2004, 85(3): 591 – 602.
- [35] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z I, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1): 311 – 324.
- [36] Chen R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356 – 2367.
- [37] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 108 – 123.
- [38] Bai J, Gao H, Xiao R, et al. A review of soil nitrogen mineralization as affected by water and salt in coastal wetlands: issues and methods[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40(10): 1099 – 1105.
- [39] 李文元, 王 平. 基于CiteSpace的我国顾客参与研究可视化分析[J]. *电子商务*, 2020, (2): 35 – 37.
- [40] 柴海燕, 王 璐, 任秋颖. 国家公园型保护地管理研究述评——基于科学计量及知识图谱分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(12): 96 – 101.
- [41] Birkhofer K, Bezemer T M, Bloem J, et al. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2297 – 2308.
- [42] Postma J, Schilder M T, Bloem J, et al. Soil suppressiveness and functional diversity of the soil microflora in organic farming systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2394 – 2406.
- [43] Yoo G, Kang H. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short - term laboratory experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1193 – 1202.
- [44] Nie M, Wang Y, Yu J, et al. Understanding plant-microbe interactions for phytoremediation of petroleum-polluted soil[J]. *Plos One*, 2011, 6(3): e17961.
- [45] Ros G H, Temminghoff E, Hoffland E. Nitrogen mineralization: A review and meta - analysis of the predictive value of soil tests[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 162 – 173.
- [46] Ushio M, Balsler T C, Kitayama K. Effects of condensed tannins in conifer leaves on the composition and activity of the soil microbial community in a tropical montane forest[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1): 157 – 170.
- [47] Kumar U, Shahid M, Tripathi R, et al. Variation of functional diversity of soil microbial community in sub-humid tropical rice-rice cropping system under long-term organic and inorganic fertilization[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 536 – 543.
- [48] Peay K G, Sperber C, Cardarelli E, et al. Convergence and contrast in the community structure of bacteria, fungi and archaea along a tropical elevation -climate gradient[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, 93(5)
- [49] Panke-Buisse K, Poole A C, Goodrich J K, et al. Selection on soil microbiomes reveals reproducible impacts on plant function[J]. *The ISME journal*, 2015, 9(4): 980 – 989.
- [50] Masunga R H, Uzokwe V N, Mlay P D, et al. Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 185 – 193.
- [51] Huang L, Zhou M, Lv J, et al. Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119908.

Review on the Progress of Soil Nitrogen Mineralization Based on Bibliometrics Analysis

JIANG Zhu-qing^{1,2}, PENG Hui^{1,2*}

(1. *Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao266100, China*)

Abstract: In order to deeply understand the research status and development trend of soil nitrogen mineralization, the CiteSpace information visualization analysis software was used to conduct a visual analysis on the basic knowledge framework, research hotspots and development trends, from 1804 documents in the field of soil nitrogen mineralization based on the web of science (WOS) database from 1990 to 2020. The results showed that the research on soil nitrogen mineralization is in a stage of continuous development showing a strong interdisciplinary trend in the fields of environmental science, ecology and agriculture. The important research topics in this field were the mechanisms and dynamics of soil nitrogen transformation. Recently, the research was mainly focused on the effects of different land use types or agricultural management measures on microbial characteristics, which in turn affecting the process of soil nitrogen transfer and transformation. The contribution from Chinese researches were increasing rapidly, but the impacts is still low in the international arena.

Key words: Soil nitrogen mineralization; Bibliometrics; CiteSpace; Research progress; Research hot spot

[责任编辑: 张玉玲]