

氮沉降对土壤碳循环影响研究热点与前沿分析 ——基于 CiteSpace 可视化分析

刘俊聪¹, 刘涛泽^{1*}, 程红光², 张淑怡¹, 杨成¹, 李亮亮¹

(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要:近年来, 全球大气氮沉降日益加剧, 对土壤碳循环产生了不可忽视的影响。关于氮沉降对土壤碳循环的影响已开展了一系列的研究, 然而对其响应机制和影响程度方面的认识还存在巨大分歧。运用 CiteSpace 文献可视化软件, 对 1991~2021 年 Web of Science 核心数据库收录的 2414 篇关于氮沉降对土壤碳循环方面的文献进行数据挖掘, 从国家、机构、作者、关键词、突现词等方面进行可视化, 以阐明该领域的研究热点与前沿。结果表明: 大气氮沉降对土壤碳循环影响的研究美国仍具有较高影响力, 但我国在该领域的研究正持续发力, 其中以中国科学院大学在该领域的发文数量最多, 同时文献涉及方向广, 内容丰富。当前, 对于氮沉降对土壤碳循环影响的研究热点主要围绕“氮沉降对土壤碳、氮库的影响”“氮沉降对土壤碳、氮耦合循环的影响”“土壤生态环境对氮沉降的响应”这三个主题, 氮沉降对土壤碳循环影响的研究前沿更加注重响应机制、氮利用效率和磷限制等方面。

关键词: Web of Science; 氮沉降; 土壤碳循环; 文献计量学; 可视化分析

中图分类号: S153;G353.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)05-1205-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022051801

刘俊聪, 刘涛泽, 程红光, 张淑怡, 杨成, 李亮亮. 氮沉降对土壤碳循环影响研究热点与前沿分析——基于 CiteSpace 可视化分析 [J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1205-1214

LIU Jun-cong, LIU Tao-ze, CHENG Hong-guang, ZHANG Shu-yi, YANG Cheng, LI Liang-liang. Analysis of Research Hotspots and Frontiers of the Effects of Nitrogen Deposition on Soil Carbon Cycle-- Based on Citespace Visual Analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1205-1214

大气氮沉降激增是全球环境变化最重要特征之一, 氮沉降对陆地生态系统碳、氮循环, 以及全球尺度上“碳失汇”的影响, 是全球环境变化和地球关键带研究领域关注的热点科学问题^[1-3]。在过去的几十年里, 由于氮肥大量施用、化石燃料和生物质燃烧, 大气中的氮沉降量增加了 3~5 倍, 而且这一趋势还在不断持续增长, 预计到 2050 年, 全球氮沉降量将增加至 125~152 Tg yr⁻¹^[4-5]。中国作为全球最大的发展中国家, 在过去的 30 多年里, 中国的氮排放大幅增加, 当前已成为氮利用和排放最多的国家之一, 是全球氮沉降最严重的区域^[6-8]。21 世纪以来, 国内外学者就氮沉降对陆地生态系统碳、氮库的影响进行了深入而广泛的研究, 如植物从大气中获得碳源进行光合作用, 从土壤中获取可利用氮以维持植物的生长, 从而将碳、氮固定在植物体内, 再以凋落物的形式返还到土壤碳、氮库中^[9]。长期以来, 氮沉降对土壤碳循环的影响的认识分歧较大, 主要

是因为整体碳库的储量大, 响应不敏感。但后期通过对土壤碳、氮库分组研究发现, 土壤 DON、DOC、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、MBC 和 MBN 等活性组分的碳、氮含量在不同的气候带和环境背景下具有很大的差异, 对氮沉降和温度等全球变化具有很高的敏感性, 响应速度较快^[10-13], 因此研究的方向和热点也随之发生了变化。本文采用文献计量方法, 运用 CiteSpace 可视化软件, 对 1991~2021 年 Web of Science (WOS) 核心数据库中收录的大气氮沉降对土壤碳循环影响的研究进行可视化分析。探讨未来大气氮沉降对土壤碳循环影响的研究热点和趋势, 为相关科研人员提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

本文所称“氮沉降对土壤碳循环影响”研究进展

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42167067)、贵州民族大学科研基金资助项目 (GZMUZK[2021]YB15) 和贵州省高新技术产业示范工程项目 (黔发改高技 [2020]896 号) 资助

作者简介: 刘俊聪 (1998-), 男, 贵州省黔南布依族苗族自治州, 硕士研究生, 主要研究领域为环境地球化学。E-mail: 1363556775@qq.com

*通讯作者: E-mail: liutaoze@foxmail.com

与热点主要是运用“科学知识图谱”的方法，利用可视化的手段，从不同维度进行可视化统计分析，以呈现开展这一大类研究的国家、机构、作者、文献变化趋势、文献引用频次、关键词聚类等，运用的软件主要是由陈超美教授创建的一种基于 Java 语言编写的文献分析可视化软件 CiteSpace^[14]。

1.2 数据来源

为了更好地把握“氮沉降对土壤碳循环影响”研究的发展趋势、热点及前沿，将 WOS 核心合集数据库作为研究数据的来源，期刊检索式如下：TS = “(Nitrogen deposition and Soil carbon (cycl* OR circula*)) OR (Nitrogen deposition and Soil C (cycl* OR circula*)) OR (N deposition and Soil carbon (cycl* OR circula*)) OR (N deposition and Soil C (cycl* OR circula*))”，时间跨度 1991 ~ 2021 年，发表时间从 1991 年 7 月 1 日 ~ 2021 年 12 月 31 日，共检索出论文 2588 篇，经过 CiteSpace 自带筛选功能去重后共获得有效文献 2414 篇。

1.3 研究过程

主要采取的模式是对经过甄别筛选的文献有效关键词进行可视化分析。对文献类型及研究机构进行筛选精炼，共提取出 2414 篇文献；按照可视化软件 CiteSpace6.1.R1 能够识别的文件格式进行编码转化，按照软件所需的文件格式，进行导入可得到聚类分析结果，并以可视化图谱的方式展示；将分析结果结合不同文献进行深入分析，有助于研究人员了解和掌握当前“氮沉降对土壤碳循环影响”研究的热点与前沿。

2 结果与分析

2.1 文献统计分析

2.1.1 年度发文量统计 近年来，氮沉降对土壤碳循环影响的研究逐渐得到了国内外专家学者的关注，尤其是 2005 年之后，相关的研究成果直线增长（图 1）。从发文量来看，氮沉降对土壤碳循环影响的探索和发展经历着三个发展阶段：①萌芽期（1991 ~ 1994 年）：氮沉降对土壤碳循环的研究处于初始阶段，期刊论文数量较少，研究集中在陆地生态系统碳、氮循环方面；②初步探索期（1995 ~ 2005 年）：此阶段核心期刊论文有缓慢增长，以定性研究为主，逐渐认识到氮沉降对土壤碳循环的影响，研究呈现团队化发展；③快速发展期（2006 年至

今）：2006 年以后该领域呈现快速增长趋势，2020 和 2021 年发文量分别高达 154 和 164 篇，研究趋向土壤碳、氮循环对氮沉降的响应机制等方面。这主要得益于以下三个方面：第一，土壤碳库理论的逐渐完善使研究人员对氮沉降和土壤碳循环影响重要作用的认识越来越深刻；第二，国际上对于不同地区土壤碳库对氮沉降的响应研究逐渐丰富，使得后续相关研究能够得到更多数据和技术的支撑；第三，更多氮沉降模拟实验的研究，通过相关模型的计算和拟合，为揭示氮沉降对土壤碳循环的影响机制提供了数据支撑。

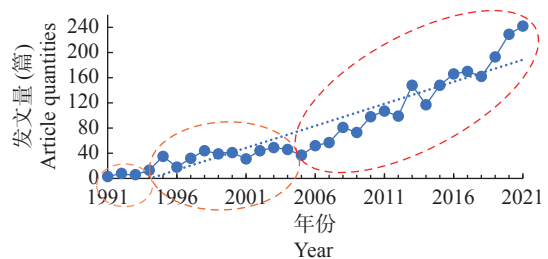


图 1 1991 ~ 2021 年在 WOS 中关于氮沉降对土壤碳循环影响的论文年度分布

Fig.1 Annual distribution of papers on the effect of nitrogen deposition on the soil carbon cycle in WOS from 1991 to 2021

2.1.2 文献共被引分析 通过 CiteSpace 软件中“Reference”来进行操作分析关键文献，阈值选择各时区前 15 个高被引或高频节点，其余参数保持默认不变。通过共被引也更容易找到该研究方向的核心期刊和基础性文献（表 1）。

由图 2 可以看出，每个聚类都与其他聚类产生连线，研究表明“#0 biogeochemistry”被同一论文被引用的频次较高，“#4 arbuscular mycorrhizal fungi”和“#9 extracellular enzyme”具有较高的中介中心性，从聚类连线来看，经典文献围绕中介中心性较高区域被引次数较多的点进行演变。由表 1 可知，从共被引前十的文献里可以发现排名第一的作者 Gundersen^[15] 在 1998 年发表的论文《Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of nitrex data》确定了氮限制和氮饱和的森林生态系统可以进行定量表征。Nadelhoffer^[16-17] 在 1999 年发表的两篇文献《Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests》和《Sinks for 15N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation》共同出现在主要文献总结里，

表 1 主要文献总结
Table 1 Summary of main literature

共被引频次 Co-Cited Count	作者 Author	文献 Reference	期刊 Journal	年份 Year	聚类号 Cluster number
25	Gundersen P et al.	Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data	FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	1998	#0
19	Nadelhoffer KJ et al.	Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests	NATURE	1999	#6
19	Dise NB et al.	Nitrogen leaching from european forests in relation to nitrogen deposition	FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	1995	#2
16	Stoddard JL et al.	Long-term changes in watershed retention of nitrogen - its causes and aquatic consequences	ADVANCES IN CHEMISTRY SERIES	1994	#2
16	Galloway JN et al.	Nitrogen cycles: past, present, and future	BIOGEOCHEMISTRY	2004	#9
16	Aber J et al.	Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems - Hypotheses revisited	BIOSCIENCE	1998	#0
15	Galloway JN et al.	Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions	SCIENCE	1998	#10
15	Nadelhoffer KJ et al.	Sinks for 15n-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation	ECOLOGICAL APPLICATIONS	1999	#0
15	Fenn ME et al.	Nitrogen excess in north american ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies	ECOLOGICAL APPLICATIONS	1998	#0
14	Vitousek PM et al.	Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences	ECOLOGICAL APPLICATIONS	1997	#6



图 2 文献共被引知识图谱
Fig.2 Knowledge graph of literature co-citation

文献表明不断增加的氮沉降可以有效增加植物初级生产力来减缓大气中二氧化碳的持续上升。尽管树木吸收的氮沉降比例可能随着氮素输入速率的增加而增加，但温带森林保留的大部分氮沉降可能积累在低 C/N 比值的土壤库中，而不是积累在高 C/N 比的本植物生物量中。Galloway^[4, 18] 在 1995 年和 2004 年的《Nitrogen-fixation-anthropogenic enhancement-environmental response》和《Nitrogen cycles: past, present, and future》两篇文献中描述了生态系统对氮输入增加和氮循环的响应，认为氮循环中的不确定的因数主要是反硝化速率和氮生成速率之间的关系，

并且预测随着年限的增加，人类活动的固氮率将增加约 60%。

综上所述：从共被引文献频次和内容来看，文献涉及广泛、内容丰富，但是共被引文献少，原因主要是针对氮沉降对土壤碳循环影响的研究处于一个爆发增长阶段，相关研究方向比较分散。

2.2 文献概况

2.2.1 国家/机构合作图谱分析 以“氮沉降对土壤碳循环的影响”研究的英文文献绘制宏观的国家/机构合作网络图谱（图 3）和编制文献数量前 10 的国家（表 2）、发表论文数量前 10 的机构排名表（表 3）。

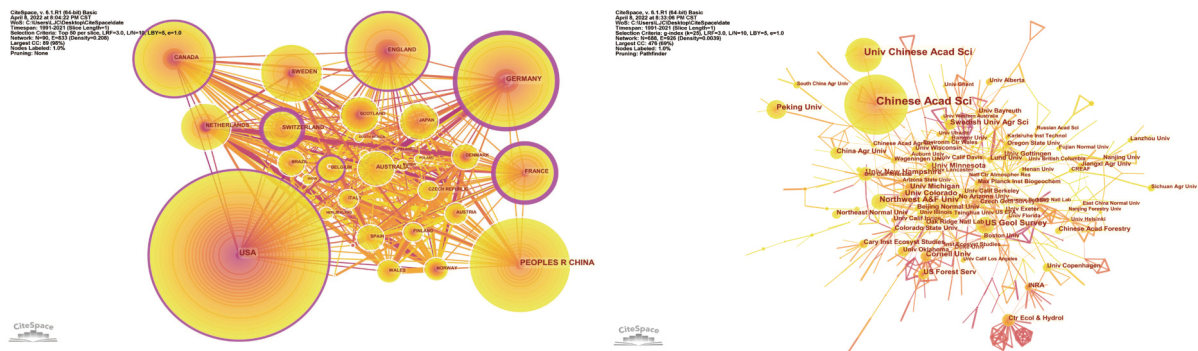


图 3 国家/机构合作网络图谱
Fig.3 Collaboration network map of country/institution

表 2 文献数量前 10 的国家
Table 2 Top 10 countries by the number of publications

排名 Ranking	国家 Country	发文量 Published article	中介中心性 Betweenness centrality
1	USA (美国)	920	0.11
2	PEOPLES R CHINA (中国)	734	0.03
3	GERMANY (德国)	266	0.32
4	CANADA (加拿大)	212	0.12
5	ENGLAND (英国)	197	0.16
6	FRANCE (法国)	145	0.23
7	SWEDEN (瑞典)	134	0.03
8	AUSTRALIA (澳大利亚)	110	0.08
9	NETHERLANDS (荷兰)	108	0.04
10	SWITZERLAND (瑞士)	95	0.23

表 3 发表论文数量前 10 的机构
Table 3 Top 10 institutions in terms of number of published papers

排名 Ranking	机构 Institution	发文量/篇 Published article	中介中心性 Betweenness centrality
1	Chinese Acad Sci (中国科学院)	384	0.07
2	Univ Chinese Acad Sci (中国科学院大学)	165	0.02
3	US Geol Survey (美国地质调查局)	56	0.03
4	Northwest A&F Univ (西北农林科技大学)	55	0.14
5	Peking Univ (北京大学)	47	0.01
6	Univ New Hampshire (新罕布什尔大学)	43	0.04
7	Univ Colorado (科罗拉多大学)	42	0.05
8	Swedish Univ Agr Sci (瑞典农业科学大学)	42	0.03
9	Cornell Univ (美国康奈尔大学)	40	0.04
10	US Forest Serv (美国林业局)	35	0.02

在参与分析的 2414 篇文献中，由于其作者分布于 90 个国家，为保证图谱的辨识度，隐藏发文量低于 10 篇的国家。由图 3 可见德国、法国、瑞士、英国、比利时、加拿大、美国有较高的中介中心性，表明这些国家与其他国家合作的研究次数较多。发文量前五的国家依次是美国、中国、德国、加拿大、英国（表 2）。其中美国发文量居世界首位（920 篇），中国发文量位居第二（734 篇），但结合表 2、图 3 可以发现，近年我国在氮沉降对土壤碳循环影响方面的研究在逐渐增多。

机构合作网络图谱中共包含节点数 $N = 688$ 个，节点连线 $E = 926$ 条，网络密度 Density 为 0.0039，这意味着过去有 688 个研究机构进行了氮沉降对土壤碳循环影响的研究，节点连线数量远高于节点数同时网络密度较高则表明这些研究机构之间合作较为紧密。由表 3 可以看出，发文量前十的机构我国占据 4 个，其中发文量前 3 的机构依次是 Chinese Acad Sci (CAS, 中国科学院)、Univ Chinese Acad Sci (UCAS, 中国科学院大学)、US Geol Survey (USGS, 美国地质调查局) 结合机构合作网络图谱

可以发现 UCAS 在与周围的科研机构合作方面做的较好，处于合作关系的中心点，呈现与不同机构之间合作的辐射态势。但从图中也可以看出 CAS 虽然产量最高，节点突出，但在合作方面的表现并不佳，与其他科研机构合作较少。以上结果表明我国中国科学院和中国科学院大学等机构在氮沉降对土壤碳循环影响方面的研究成果最为显著。

2.2.2 作者合作分析 运用 CiteSpace 软件节点选择 “Author”，对发文作者进行合作网络分析，得到作者合作网络图谱（图 4），图中共含有 1106 个节点与 2850 个连线，节点密度为 0.0047。该数据表明在氮沉降对土壤碳循环影响研究领域中，研究者相互之间有合作发文的情况。但是从图 4 可知，主要作者缺少较高的中心度节点，学者之间的合作多因为地缘性的原因，在同一研究方向相互合作的性质呈现较少，作者之间的合作和交流关系不是很紧密但是也在逐渐形成集中的、具有影响力的研究学者网络。

2.3 研究热点分析

文献关键词是从文章抽取出来的高度概括文章

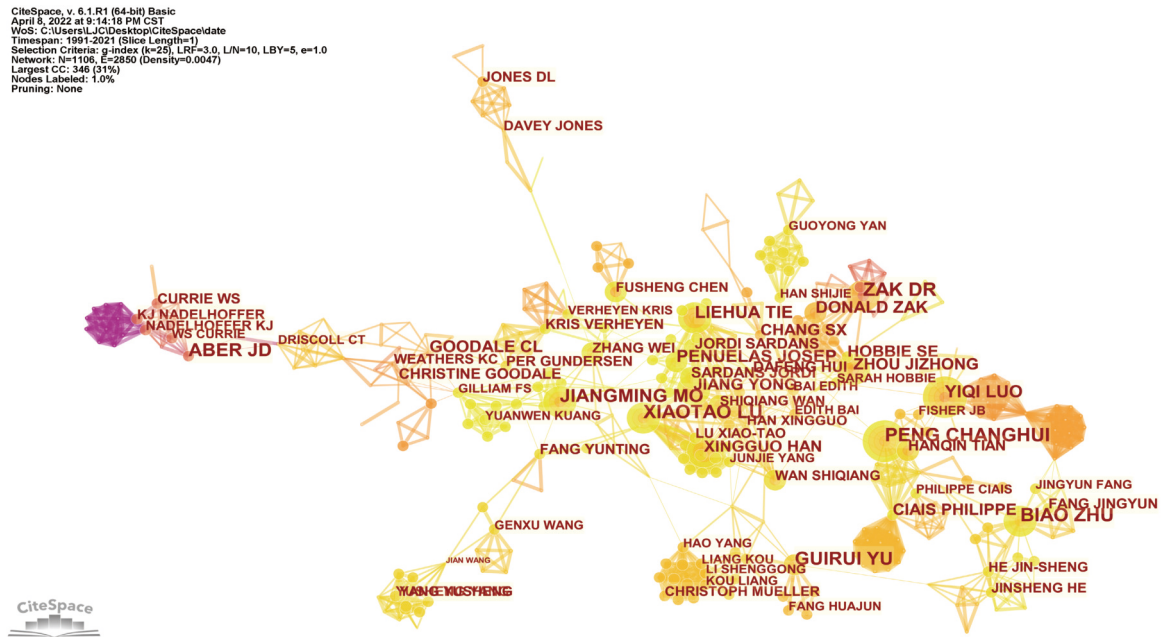


图4 作者合作网络图
Fig.4 Collaboration network map of author

主题的核心词汇，而关键词聚类可以反应主要的研究方向及该方向的关键主题^[19]。对“氮沉降对土壤碳

循环影响”的研究热点的阐述，可以通过对关键词聚类图谱和时间线图谱（图5）进行分析来实现。

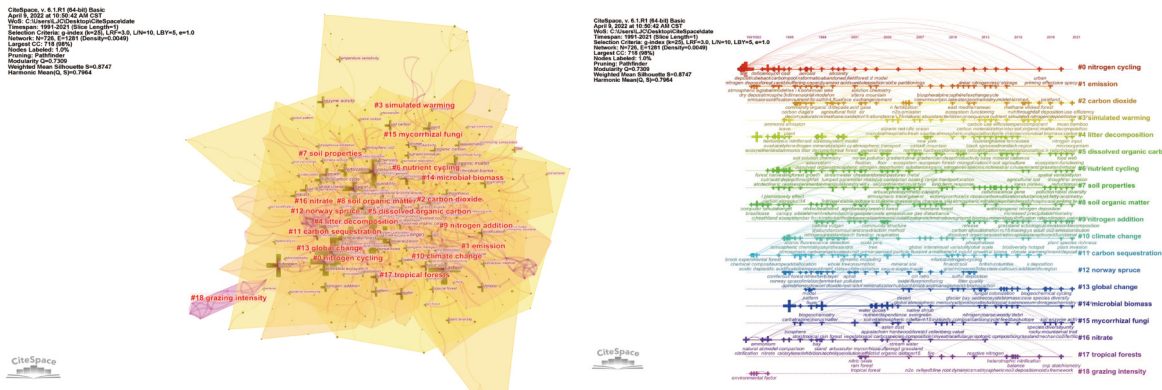


图5 氮沉降对土壤碳循环影响的研究关键词聚类图谱/时间线图谱
Fig.5 Keyword clustering mapping/timeline mapping about the effect of nitrogen deposition on soil carbon cycle

使用 CiteSpace 关键词聚类功能将时间年限设为 1991 ~ 2021 年，时间切片为“1”，选择节点种类为“Keyword”，其余参数保持默认，关键词采用对数似然法（LLR）将关键词共线网络聚成 18 个不规则区域（图 5），聚类模块值为 0.7309，大于 0.3，聚类结构显著，聚类平均轮廓值为 0.8747，大于 0.7，聚类结果属于令人信服。为了更清晰的展示关键词聚类情况，本文统计了 18 个聚类的成员数量、剪影度和平均年份（表 4）。每个聚类由多个关系紧密的关键词组成，顺序从#0 ~ #18 排列，数字越小，在聚

类中包含的关键词越多。

结合“氮沉降对土壤碳循环影响”的研究高频关键词前十位，关键词聚类共现图谱、时间线图谱进一步总结分析研究的热点问题。可以发现在过去 30 余年“氮沉降对土壤碳循环影响”的研究在围绕三个主题展开：“氮沉降对土壤碳、氮库的影响”（#1、#2、#3、#5、#9、#14、#16）“氮沉降对土壤碳、氮耦合循环的影响”（#0、#6、#7、#8、#11、#13）“土壤生态环境对氮沉降的响应”（#3、#4、#10、#12、#15、#17、#18）。

表 4 关键词聚类标签数据表
Table 4 Keyword clustering tag data

聚类号 Cluster number	聚类名称 Cluster name	聚类大小 Cluster size	剪影度 Silhouette	平均年份 Mean year	聚类标签 (LLR) Cluster label
#0	Nitrogen cycling	49	0.941	1999	Nitrogen cycling; nitrogen deposition; carbon cycling; deposition
#1	Emission	47	0.9	2000	Emission; dry deposition; nh3; denitrification; basin
#2	Carbon dioxide	46	0.865	2006	Carbon dioxide; nitrous oxide; methane; nutrient release; nitrogen fixation
#3	Simulated warming	45	0.855	2010	Simulated warming; microbial respiration; tibetan plateau; temperature sensitivity; moso bamboo
#4	Litter decomposition	44	0.876	2005	Soil organic matter; cycle; management; nitrogen budget; root biomass
#5	Dissolved organic carbon	44	0.798	2008	Soil properties; soil respiration; nitrogen fertilization; net ecosystem productivity; carbon cycle
#6	Nutrient cycling	44	0.881	2003	Nutrient cycling; atmospheric deposition; acid deposition; water; organic carbon
#7	Soil properties	44	0.865	2009	Dissolved organic carbon; plant diversity; soil solution; ecosystem function; forest soil
#8	Soil organic matter	44	0.848	2003	Litter decomposition; nitrogen cycle; ecosystem; quality; nitrogen additions
#9	Nitrogen addition	43	0.87	2010	Nitrogen addition; n addition; soil erosion; dissolved organic matter; topsoil removal and addition
#10	Climate change	41	0.839	2005	Climate change; climate; elevated CO ₂ ; CO ₂ ; global warming
#11	Carbon sequestration	39	0.906	2004	Norway spruce; nitrate leaching; productivity; coniferous forest; equilibrium
#12	Norway spruce	39	0.819	2002	Carbon sequestration; acidic deposition; response; temperate; addition
#13	Global change	32	0.855	2011	Microbial biomass; soil nitrogen; organic matter; stoichiometry; phosphatase
#14	Microbial biomass	32	0.842	2007	Global change; fluxe; primary productivity; nutrient stoichiometry; atmospheric mercury
#15	Mycorrhizal fungi	29	0.927	2011	Nitrate; n-15 pool dilution; critical loads; mediterranean-type ecosystems; gross nitrogen mineralization
#16	Nitrate	29	0.961	1998	Mycorrhizal fungi; soil carbon; salmon-derived nutrients; microbial ecology; semiarid grassland
#17	Tropical forests	16	0.902	2011	Tropical forests; tropical forest; balance; n-15 tracing model; net primary productivity
#18	Grazing intensity	11	0.996	1992	Grazing intensity; simulation; serengeti; competition; ammonium

“氮沉降对土壤碳、氮库的影响” (#1、#2、#3、#5、#9、#14、#16) 是传统氮沉降研究的重要经典主题。氮沉降是指大气中的氮元素以 NH_x (包括 NH_3 、 RNH_2 和 NH_4^+) 和 NO_x 的形式, 降落到陆地和水体的过程, 其中硝态氮主要来自化石燃料燃烧, 而铵态氮主要产生于农业施肥活动中的肥料和粪便等分解^[4,20]。氮沉降进入到土壤后其生物化学过程主要包括: ①氮的输入过程 (不同的氮源: 铵态氮、硝态氮等等); ②转化过程 (包括矿化作用, 同化作用); ③固定或流失过程 (土壤固定, 径流输出, 呼吸作用导致的气态损失)^[10,21]。自养呼吸和异养呼吸是碳返回大气的主要途径, 氮挥发、硝化、反硝化和淋溶作用则是氮损失的主要途径^[22]。氮沉降输入土壤后对土壤碳、氮库影响主要表现为: 首先, 高强度的氮沉降会导致土壤氮容量超载, 引起氮的淋溶损失^[23]; 其次, 导致土壤增温和酸沉降对微生物可利用碳库的消耗、微生物生物量的减少、微生物碳利用效率以及微生物群落组成的变化都产生了巨大影响^[24-25]。另外, 也会影响土壤微生物活性或与土壤中有有机物及盐基离子相结合而影响其离子强度, 从而直接或间接影响土壤碳的输入输出过程^[26]。

“氮沉降与土壤碳、氮耦合循环的影响” (#0、#6、#7、#8、#11、#13) 是一个世界性难题, 一直是相关学者的关注点。大量研究表明, 氮沉降输入导致土壤碳、氮循环的变化没有明显的规律性, 而且研究结果差异性较大。一些研究认为会加速土壤碳、氮循环过程, 造成土壤中碳、氮的流失, 因为氮沉降的输入改变了土壤 C/N 比值, 从而增加土壤微生物活性, 加速土壤有机碳的分解^[27-28]。同时, 也会对土壤 pH 值和离子强度产生影响, 导致可溶性碳、氮增加^[29]。但另一些研究则认为, 土壤碳、氮库储量巨大, 氮沉降的增加对土壤整体碳、氮库的影响较小, 而且氮沉降的增加对初级生产力的促进作用与促进土壤有机质分解的作用相互抵消^[16,30]。基于上述原因, 导致土壤碳、氮库对全球变化的响应机制存在较大的争议, 认识严重不足。土壤有机碳库储量巨大且环境驱动因子十分复杂, 各组分之间存在复杂的相互转化关系^[31]。土壤活性碳、氮主要是指土壤中有效性较高, 不稳定、对微生物和植物来说活性较高的那一部分土壤碳素和氮素, 是土壤中碳、氮耦合循环最活跃的部分, 常常被作为土壤碳库变化的敏感指标, 对研究土壤碳、氮转化和生态系统碳、

氮耦合循环都具有十分重要的意义^[32-33]。

“土壤生态环境对氮沉降的响应”（#4、#10、#12、#15、#17、#18）也一直是氮沉降对土壤碳循环影响研究的重要主题。研究发现全球二氧化碳浓度、温度和氮沉降的增加会影响森林土壤生态系统微生物活性和凋落物分解，土壤真菌对生态环境变化非常敏感，大量的有机氮沉降会使土壤微生物群落转化为以真菌为主的土壤生态系统，土壤真菌可以通过同化大气中的碳来提高土壤碳的固存速度^[34-36]。另外，放牧强度的不同对氮循环产生影响较大，当放牧强度增强时凋落物减少，从而影响土壤中碳、

氮的总沉降量，土壤矿质氮也随之增强^[37-38]。综上所述，氮沉降对土壤碳循环影响的研究集中性很高，不同聚类之间均存在交叉情况，相互联系紧密。

2.4 研究前沿分析

研究前沿分析对某一时刻正在关注的热点领域，涌现的具有发展潜力的研究方向和科学研究中最先进、最新的研究主题进行的科学分析^[39]。CiteSpace 软件提供了对突变词的探测技术，即通过探测在某一时间段内被引频次或共现频次突现度增加的节点来预测领域内的研究前沿^[14]。将数据导入 CiteSpace 软件对关键词进行了突现分析，得到如下图谱（图 6）。

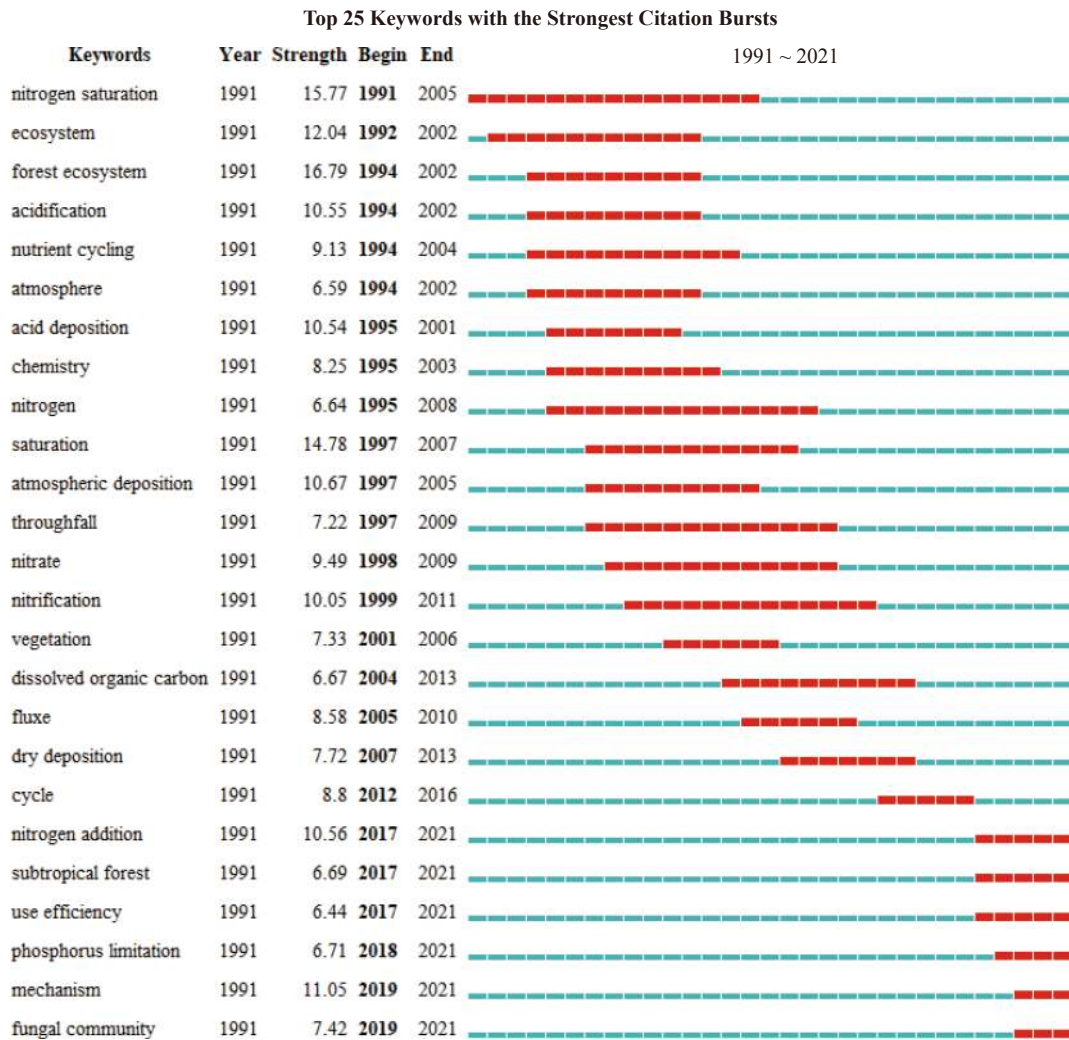


图 6 25 个高引用关键词突现图谱
Fig.6 Mapping of 25 Keywords with the strongest citation bursts

由图 6 可见，通过对突现词分析发现，现在的研究者关注点逐渐的集中在氮沉降对森林土壤生态系统碳循环的研究和土壤微生物对土壤碳循环影响方面，期间以 nitrogen addition（氮添加）、

subtropical forest（亚热带森林）、fungal community（真菌菌群）为研究的关注点，Gao 等^[40]在 2018 年研究氮添加会减缓亚热带森林生态系统中土壤呼吸强度，从而影响土壤有机碳固存。Carrara 等^[41]2021

年研究随着氮沉降增加,在森林土壤中外生菌根真菌为主的土壤比丛枝菌根真菌为主的土壤碳库更稳定。随着相关理论研究的增加,mechanism(机制)、use efficiency(利用效率)和 phosphorus limitation(磷限制)等问题也受到广泛关注,期间 Cheng 等^[3]在 2020 年研究发现土壤有机层和矿物层的总氮转化率对氮添加有不同的响应机制。Chang 等^[42]2019 年研究发现土壤微团聚体有机碳对氮添加响应更加迅速。Yuan 等^[43]2021 年通过田间施肥实验表明,土壤微生物残体对氮和磷响应机制不同,磷的增加导致微生物残体对土壤有机碳的贡献率下降,不利于氮和贫磷热带森林中土壤有机碳的稳定。综上所述,随着研究者对全球氮沉降不断增加的背景下土壤碳循环响应机制的深入认识,我们对氮沉降所引起的环境效应有了更全面的了解。

3 研究结论与展望

通过对 1991~2021 年 WOS 核心数据库中氮沉降对土壤碳循环影响研究的文献进行国家合作、机构合作、作者合作、发文数量、共被引、研究热点、研究前沿等方面的分析得,到如下结论:

(1) 从国家合作、机构合作和作者间合作来看在大气氮沉降对土壤碳循环影响研究方面,美国仍具有较高的影响力,但我国在该领域的研究近些年也逐渐增多并且发展迅速,其中中国科学院和中国科学院大学在该领域的研究起到了重要作用。而学者之间的合作多因为地缘性的原因,研究者在同一研究方向相互合作的情况较少,作者之间的合作和交流关系不是很紧密,但是具有影响力的研究者网络也在逐渐集中。

(2) 从文献的增长速度来看,氮沉降对土壤碳循环影响的研究大致可以分为萌芽期(1991~1994 年)初步探索期(1995~2005)和快速发展期(2005 年至今)三个阶段。在经过对文献高被引和共被引分析可以看出文献广泛且内容丰富。

(3) 当前“氮沉降对土壤碳循环的研究热点”主要围绕“氮沉降对土壤碳、氮库的影响”“氮沉降对土壤碳、氮耦合循环的影响”“土壤生态环境对氮沉降的响应”这三个主题进行发散式研究。并且研究逐渐从欧美等发达国家转向发展中国家,研究区域从温带区扩展到热带亚热带区。

(4) 研究者主要关注氮沉降对森林生态系统和

土壤微生物的研究,来揭示对土壤碳循环的影响,同时更加注重对影响机制、利用效率和磷限制的研究。

针对现有研究的热点和不足,“氮沉降对土壤碳循环的影响”的未来研究发展方向应为:

(1) 我国作为氮沉降的重点地区,“氮沉降对土壤碳循环的影响”方面的研究发文量虽然多,但也存在研究层次单一,缺少多元化、国家与国家之间的合作不紧密,研究团队相对封闭等情况。因此,应该及时更新科研动态,加强国际之间的合作交流,构建全球范围的氮沉降监测研究网络,从而更好地探究氮沉降对土壤碳循环影响的发生规律。

(2) 另外,还应加强不同地貌、气候、植被类型下土壤碳循环对氮沉降响应机制方面的研究,同时结合当前全球环境变化因素,保持实验观测和研究的连续性。

参考文献:

- [1] Reay D S, Dentener F, Smith P, et al. Global nitrogen deposition and carbon sinks[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(7): 430 - 437.
- [2] 张甘霖,朱永官,邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续发展的机理[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(12): 1945 - 1947.
- [3] Cheng Y, Wang J, Wang J, et al. Nitrogen deposition differentially affects soil gross nitrogen transformations in organic and mineral horizons[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103033.
- [4] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153 - 226.
- [5] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis[J]. *Ecological applications*, 2010, 20(1): 30 - 59.
- [6] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459 - 462.
- [7] 郑丹楠,王雪松,谢绍东,等. 2010 年中国大气氮沉降特征分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1089 - 1097.
- [8] Yu G, Jia Y, He N, et al. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 424 - 429.
- [9] Mo J, Zhang W E I, Zhu W, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403 - 412.
- [10] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems[J]. *Environmental Reviews*, 1997, 5(1): 1 - 25.
- [11] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem[J]. *European journal of soil science*, 1999, 50(4): 579 - 590.
- [12] 白洁冰,徐兴良,付刚,等. 温度和氮素输入对青藏高原 3 种

- 高寒草地土壤氮矿化的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 14698 - 14700.
- [13] Nottingham A T, Turner B L, Stott A W, et al. Nitrogen and phosphorus constrain labile and stable carbon turnover in lowland tropical forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 26 - 33.
- [14] 陈超美, 陈悦, 侯剑华, 等. CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. 情报学报, 2009, (3): 401 - 421.
- [15] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and management*, 1998, 101(1-3): 37 - 55.
- [16] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, et al. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. *Nature*, 1999, 398(6723): 145 - 148.
- [17] Nadelhoffer K J, Downs M R, Fry B. Sinks for ¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation[J]. *Ecological Applications*, 1999, 9(1): 72 - 86.
- [18] Galloway J N, Schlesinger W H, Levy H, et al. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response[J]. *Global biogeochemical cycles*, 1995, 9(2): 235 - 252.
- [19] Olawumi T O, Chan D W M. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 183: 231 - 250.
- [20] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 等. ¹⁵N 示踪技术在湿地氮素生物地球化学过程研究中的应用进展[J]. 地理科学, 2005, 25(6): 762 - 768.
- [21] Addiscott T, Brookes P. What governs nitrogen loss from forest soils?[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 604 - 604.
- [22] Lovett G M, Weathers K C, Arthur M A. Control of nitrogen loss from forested watersheds by soil carbon: Nitrogen ratio and tree species composition[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(7): 0712 - 0718.
- [23] Chiwa M, Tateno R, Hishi T, et al. Nitrate leaching from Japanese temperate forest ecosystems in response to elevated atmospheric N deposition[J]. *Journal of Forest Research*, 2019, 24(1): 1 - 15.
- [24] Schmidt S K, Lipson D A, Ley R E, et al. Impacts of chronic nitrogen additions vary seasonally and by microbial functional group in tundra soils[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 69(1): 1 - 17.
- [25] Zhang T, Chen H Y H, Ruan H. Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes[J]. *The ISME journal*, 2018, 12(7): 1817 - 1825.
- [26] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. *Nature*, 2002, 419(6910): 915 - 917.
- [27] Griepentrog M, Bodé S, Boeckx P, et al. Nitrogen deposition promotes the production of new fungal residues but retards the decomposition of old residues in forest soil fractions[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 327 - 340.
- [28] de Vries W, Posch M, Simpson D, et al. Modelling long-term impacts of changes in climate, nitrogen deposition and ozone exposure on carbon sequestration of European forest ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 1097 - 1116.
- [29] Monteith D T, Stoddard J L, Evans C D, et al. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry[J]. *Nature*, 2007, 450(7169): 537 - 540.
- [30] Zeng D H, Li L J, Fahey T J, et al. Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 185 - 193.
- [31] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49 - 56.
- [32] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic - matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil science society of America journal*, 1992, 56(3): 777 - 783.
- [33] Zhou X, Wu H, Koetz E, et al. Soil labile carbon and nitrogen pools and microbial metabolic diversity under winter crops in an arid environment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 53: 49 - 55.
- [34] Gifford R M. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink[J]. *Functional Plant Biology*, 1994, 21(1): 1 - 15.
- [35] Malyan S K, Kumar A, Baram S, et al. Role of fungi in climate change abatement through carbon sequestration[M]//Recent advancement in white biotechnology through fungi. Springer, Cham, 2019: 283 - 295.
- [36] Li S, Du Y, Guo P, et al. Effects of different types of N deposition on the fungal decomposition activities of temperate forest soils[J]. *Science of the total environment*, 2014, 497: 91 - 96.
- [37] Seagle S W, McNaughton S J, Ruess R W. Simulated effects of grazing on soil nitrogen and mineralization in contrasting Serengeti grasslands[J]. *Ecology*, 1992, 73(3): 1105 - 1123.
- [38] Vaieretti M V, Cingolani A M, Pérez Harguindeguy N, et al. Effects of differential grazing on decomposition rate and nitrogen availability in a productive mountain grassland[J]. *Plant and soil*, 2013, 371(1): 675 - 691.
- [39] 王宏宇, 王晓光. 基于大规模开放学术图谱的研究前沿分析框架[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(1): 102 - 109.
- [40] Gao Q, Bai E, Wang J, et al. Effects of litter manipulation on soil respiration under short-term nitrogen addition in a subtropical evergreen forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 77 - 83.
- [41] Carrara J E, Walter C A, Freedman Z B, et al. Differences in microbial community response to nitrogen fertilization result in unique enzyme shifts between arbuscular and ectomycorrhizal - dominated soils[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(10): 2049 - 2060.
- [42] Chang R, Zhou W, Fang Y, et al. Anthropogenic nitrogen deposition increases soil carbon by enhancing new carbon of the soil aggregate formation[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2019, 124(3): 572 - 584.
- [43] Yuan Y, Li Y, Mou Z, et al. Phosphorus addition decreases microbial residual contribution to soil organic carbon pool in a tropical coastal forest[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(2): 454 - 466.

Analysis of Research Hotspots and Frontiers of the Effects of Nitrogen Deposition on Soil Carbon Cycle-- Based on Citespace Visual Analysis

LIU Jun-cong¹, LIU Tao-ze^{1*}, CHENG Hong-guang², ZHANG Shu-yi¹, YANG Cheng¹, LI Liang-liang¹

(1. College of Eco- Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)

Abstract: In recent years, global atmospheric nitrogen (N) deposition has been intensifying and has a significant impact on the soil carbon (C) cycle. A series of studies have been conducted on the impact of N deposition on the soil C cycle, however, there are still great differences in the understanding of the response mechanism and the extent of the impact. In this paper, we used CiteSpace literature visualization software to data-mining 2414 papers on N deposition on soil C cycle included in the Web of Science core database from 1991 to 2021, and visualize them in terms of countries, institutions, authors, keywords, and emergent words to elucidate the research hotspots and frontiers in this field. The results showed that the research on the influence of atmospheric N deposition on the soil C cycle was still highly influential in the United States, but China's research in this field was continuing to gain momentum, with the University of Chinese Academy of Sciences having the largest number of publications in this field, while the literature covered a wide range of directions and was rich in content. In addition, the current research on the influence of N deposition on the soil C cycle is mainly focused on three themes: "Response of soil ecological environment to N deposition", "Effect of N deposition on soil C pool", and "Effect of N deposition on coupling cycle of C and N in soil". The current research frontier on the effects of N deposition on the soil C cycle is more focused on the response mechanisms, N use efficiency, and phosphorus limitation.

Key words: Web of Science; Nitrogen deposition; Soil carbon cycle; Bibliometrics; Visual Analysis

[责任编辑: 张玉玲]