

# 氮沉降对土壤微生物影响研究热点与趋势分析 ——基于 Citespace 可视化分析

杨 阳<sup>1</sup>, 李海亮<sup>2</sup>, 虞凡枫<sup>1</sup>, 牛世全<sup>1\*</sup>

(1. 西北师范大学生命科学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 【目的】随着大气氮沉降现象加剧, 其对生态系统的影响也日益严重; 氮沉降改变了土壤氮库的特征, 也影响了土壤中微生物群落组成和功能。采用文献计量学方法总结了近 20 年来国际上有关氮沉降对土壤微生物影响方面研究的特征、前沿、热点及其变化趋势。【方法】采用 Citespace 软件, 自 Web of Science 核心数据库中选取 2001~2020 年间发表的有关大气氮沉降对土壤微生物影响方面的研究论文, 从国家、学术机构、作者、期刊、关键词和学科类别等方面进行可视化分析, 以阐明该研究领域的发展趋势和研究热点。【结果】结果表明, 大气氮沉降对土壤微生物影响研究发文量最大的国家为美国, 而发文量最大的学术机构为中国科学院, 研究领域集中在环境科学、生态学和农学等学科, 研究内容呈现出多学科融合趋势。【结论】目前有关大气氮沉降对土壤微生物影响方面的研究趋向于探究氮沉降影响土壤养分循环和土壤微生物对大气氮沉降响应机制。

**关键词:** 氮沉降; 土壤微生物; 文献计量学; Citespace

**中图分类号:** Q938.1+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)01-0116-11

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021052503

杨 阳, 李海亮, 虞凡枫, 牛世全. 氮沉降对土壤微生物影响研究热点与趋势分析——基于 Citespace 可视化分析 [J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 116-126

YANG Yang, LI Hai-liang, YU Fan-feng, NIU Shi-quan. Research Hotspots and Trends of the Effects of Nitrogen Deposition on Soil Microorganisms-- Based on Citespace Visual Analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 116-126

【研究意义】随着工业的快速发展、化石燃料和化学肥料的大量使用, 近年来全球范围大气氮沉降量呈现出逐年增加的趋势, 日益严重的大气氮沉降影响了生态系统中物质的循环和能量的流动<sup>[1-2]</sup>。土壤微生物作为土壤生态系统重要组分, 不仅影响着土壤中物质的循环, 也影响着生态系统的平衡与稳定<sup>[3-4]</sup>, 大气氮沉降改变了土壤中微生物的结构和功能, 对生态系统产生了巨大影响<sup>[5]</sup>。【前人研究进展】氮沉降 (Nitrogen deposition) 是指大气中的氮 (N) 元素以  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  等形式降落到陆地和水中, 分为干沉降 (dry deposition) 和湿沉降 (wet deposition)。主要以干沉降为主, 约占氮沉降总量的 60%<sup>[6]</sup>。截止 2015 年, 全球氮沉降总量已达到 79.5 Tg  $\text{a}^{-1}$ 。2005~2015 年, 全球氮沉降通量 (干沉降和湿沉降总量) 较高的地区有东亚 (24.48 kg  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )、南亚 (16.31 kg  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )、西欧 (8.99 kg  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )、中亚 (8.87 kg  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>, 其中以中国东部、欧洲西部、美国东部地区最为严

重。目前, 我国已成为世界三大高氮沉降区之一, 主要集中在华北、华东、华中、华南地区, 截止到 2015 年全国总氮沉降通量已达到 19.56 (kg  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ), 且呈现出逐年增加的趋势<sup>[7-8]</sup>。研究表明一定程度的氮沉降可以提高土壤中氮素的有效性, 提高土壤微生物的活性, 促进土壤中养分的周转, 调节植物养分再吸收和分配, 进而促进植物生长<sup>[9]</sup>。但随着大气氮沉降量的增加, 土壤中氮素的积累则会影响土壤中微生物的群落结构特征和其生态功能, 进而改变土壤中物质的循环和能量的流动<sup>[10-11]</sup>。此外大气氮沉降加速了土壤的酸化过程, 进而抑制土壤微生物的呼吸作用, 降低土壤中微生物量<sup>[12]</sup>。目前, 大气氮沉降所带来的环境效应已引起了国内外学者的关注。

【本研究切入点】本文基于 2001~2020 年 Web of Science 数据库中收录的有关大气氮沉降对土壤微生物影响的研究文献数据, 利用文献计量学分析软件 Citespace 对文献数据进行了可视化分析。【拟解决的问题】以阐明大气氮沉降对土壤微生物影响的研

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31260134) 资助

作者简介: 杨 阳 (1995-), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要研究领域为微生物资源与生态。E-mail: Yang66354@163.com。

\*通讯作者: E-mail: sqniu@nwnu.edu.cn

究特征、研究热点和研究趋势等,明晰该研究领域的特征和潜在的研究趋势<sup>[13]</sup>,同时为该领域的研究者提供参考。

## 1 数据的采集和分析方法

### 1.1 数据的采集

本文中所用来分析的文献数据均来自 Web of Science (WOS) 核心数据库(中国知网数据库中 2001~2020 年间所发表的 N 沉降与土壤微生物相关的文章只有 27 篇,无法进行文献计量学分析),检索式如下: TS = ((N deposition AND soil microbe) OR (N deposition AND microorganism of soil) OR (N deposition AND soil microorganism) OR (N deposition AND edaphon) OR (N deposition AND soil microbes) OR (nitrogen deposition AND soil microbe) OR (nitrogen deposition AND microorganism of soil) OR (nitrogen deposition AND soil microorganism) OR (nitrogen deposition AND edaphon) OR (nitrogen deposition AND soil microbes)), 语言为“English”, 论文类型为“Article”, 检索时间范围为 2001~2020 年,共检索出相关文献 897 篇。

### 1.2 数据分析方法

为确保分析结果的准确性和可信性,在文献数据分析前,使用 UltraEdit 25.10 软件剔除与主题内容

不符的文献记录。本文中使用 Citespace 5.7 R2 软件对文献数据的关键词、作者、国家/地区和机构进行可视化分析<sup>[14]</sup>。软件参数设置为:时间分段(Time slicing)为 2001~2020 年,时间切片为 1 年,节点类型(Node types)根据分析目的选择不同的类型。阈值 G-index、Top N 和 Top N% 分别为 25、50 和 100,其他参数均为系统默认值。

## 2 结果与分析

### 2.1 国家/地区和机构合作分布

大气氮沉降对土壤微生物影响研究发文量较大的前 15 个国家/地区(共 51 个)和机构(共 397 个)如表 1 所示,国家/地区和机构分布知识图谱如图 1 和图 2 所示。从表 1 可知:大气氮沉降对土壤微生物影响方面研究发文量最大的国家为美国(USA)(194),其次为中国(China)(184)、德国(Germany)(64)、英国(England)(30)和加拿大(Canada)(27)。本文结果表明具有高发文量的国家其在知识图谱中不一定具有较高的中心值(图 1),如美国(0.24)这一节点的中心值略低于德国(0.27)。此外,加拿大、澳大利亚、瑞典、荷兰和瑞士等国在知识图谱中的中心值也较低,表明这些国家的研究者与其他国家合作较少<sup>[14-16]</sup>。

表 1 发文量前 15 的国家与机构  
Table 1 Top 15 Countries and institution of published papers

排名 Ranking	国家 Country	频数 Count	中心性 Centrality	机构 Institution	频数 Count	中心性 Centrality
1	USA (美国)	194	0.24	Chinese Academy of Sciences (中国科学院)	104	0.56
2	China (中国)	184	0.24	University of Chinese Academy of Sciences (中国科学院大学)	51	0.03
3	Germany (德国)	64	0.27	University of Colorado (科罗拉多大学)	14	0.08
4	England (英国)	30	0.21	Northwest A&F Univ (西北农林科技大学)	14	0.01
5	Canada (加拿大)	27	0.01	University of Gottingen (哥廷根大学)	13	0.07
6	Sweden (瑞典)	25	0.05	University of Minnesota System (明尼苏达大学)	12	0.14
7	France (法国)	19	0.17	Cornell University (康奈尔大学)	10	0.07
8	Australia (澳大利亚)	19	0.01	The University of Michigan (密歇根大学)	9	0.01
9	Netherlands (荷兰)	18	0.01	Swedish University of Agricultural Sciences (瑞典农业科学大学)	9	0.11
10	Switzerland (瑞士)	17	0.01	Northeast Normal University (东北师范大学)	8	0
11	Scotland (苏格兰)	17	0.06	University of Copenhagen (哥本哈根大学)	8	0.04
12	Spain (西班牙)	16	0.09	University of California-Irvine (加州大学欧文分校)	7	0.04
13	Japan (日本)	16	0.08	Colorado State University (科罗拉多州立大学)	7	0.03
14	Denmark (丹麦)	15	0.02	Beijing Forestry University (北京林业大学)	7	0
15	New Zealand (新西兰)	13	0.05	Arizona State University (亚利桑那州立大学)	7	0.05

从有关的科研机构发文量来看(表 1),中国科学院(Chinese Academy of Sciences)发文量位列第一(104),且其具有较大的中心值(0.56)。其次为中国科学院大学(University of Chinese Academy

of Sciences)(51)、科罗拉多州立大学(University of Colorado)(14)、西北农林科技大学(Northwest A&F University)(14)、哥廷根大学(University of Gottingen)(13)。以上结果表明大



图 1 国家/地区合作知识图谱

Fig.1 Collaboration network map of countries/regions.

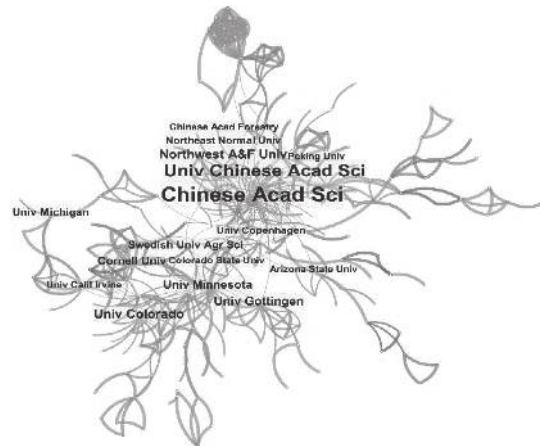


图 2 机构合作知识图谱

Fig.2 Collaboration network map of institutions.

气氮沉降所带来的环境效益在我国具有较高的关注度<sup>[14]</sup>。且中国科学院在该研究领域具有较高的影响力，在一定程度上起到了“领导者”的作用<sup>[16-17]</sup>。

2.2 作者和共被引作者分析

涉及大气氮沉降对土壤微生物影响研究领域的作者共 533 位，其中发文量排名前 15 的作者如表 2 所示。由表 2 可见，发文量较大的作者分别为 Donaldr Zak (10)、Peter M Groffman (5) 和 Wei Zhang (5)。其中 Donaladr Zak 在知识图谱中也具有最高的中心值 (0.05) (图 3)。此外，发文量前 15 的作者中来自于中国的研究者占总量的 47%。目前，我国已成为继美国和欧洲之后的全球第三大氮

沉降区域，大气氮沉降所引起的生态效应已成为我国研究者所关注的热点问题之一。共被引作者分析结果表明涉及大气氮沉降与土壤微生物方面研究的共被引作者共 660 位，其中共被引频次较高的前 15 作者如表 2 所示。由表 2 可见，Vitousek P. M 具有较高的共被引频次 (135)，其次为 Fierer N (131)、Sinsabaugh R. L (123)、Treseder K. K (119) 和 Allison S. D (114)，表明以上研究者在该研究领域具有较大的影响力。此外，Vitousek P. M 在知识图谱中也具有最高的中心值 (0.1) (图 4)。

表 2 频数排名十五的作者和共被引作者  
Table 2 Top 15 authors and co-cited authors in frequency

排名 Ranking	作者 Author	频数 Count	中心性 Centrality	共被引作者 Co-Cited Author	频数 Count	中心性 Centrality
1	Donald Zak	10	0.05	Vitousek P.M	135	0.1
2	Peter M Groffman	5	0.02	Fierer N	131	0.04
3	Wei Zhang	5	0.01	Sinsabaugh R.L	123	0.07
4	Weijun Shen	4	0.01	Treseder K.K	119	0.05
5	Stefan Scheu	4	0.01	Allison S.D	114	0.09
6	Chao Liang	4	0.01	Waldrop M.P	93	0.05
7	Yanxia Nie	4	0.02	Bardgett R.D	85	0.08
8	Dashua Tian	4	0.01	Schimel J.P	80	0.05
9	Gubin Liu	4	0.01	Saiya-Cork K.R	73	0.05
10	Jiangming Mo	4	0	Vance E.d	69	0.05
11	Benjamin Z Houlton	4	0	Zak Dr	67	0.04
12	Tao Zhang	3	0	Frey S.d	66	0.05
13	Gene E Likens	3	0	Ramirez Ks	63	0.03
14	Kirstne S Hofmockel	3	0	Kuzyakov Y	60	0.04
15	Evgenia Blagdatskaya	3	0	Frostegard A	60	0.01

2.3 期刊共被引分析

由表 3 可知，在发文量前 15 的期刊中，Soil Biology and Biochemistry 具有最高的共被引频次

(455)，该期刊属于农林科学和土壤科学研究领域的权威期刊，其中所刊发的论文也具有较高的影响力；其次为 Ecology (378)、Nature (346)、





图3 作者合作知识图谱  
Fig.3 Collaboration network map of authors.



图4 共被引作者知识图谱  
Fig.4 Co-citation network map of cited authors.

Global Change Biology ( 343 ) 和 Biogeochemistry ( 340 ) 。而从相关节点的中心值来看, Applied And Environmental Microbiology 在知识图谱中具有最高

的中心值 ( 0.05 ) , 表明该期刊在一定程度上属于该研究领域的“核心期刊”<sup>[18]</sup>。

表3 发文量前15的期刊及相关信息  
Table 3 The information of the top 15 journals

排名 Ranking	期刊 Journal	频数 Count	中心性 Centrality	出版国家 Publishing Country	影响因子 Impact Factor
1	Soil Biology and Biochemistry	455	0	英国	5.795
2	Ecology	378	0	美国	4.700
3	Nature	346	0.01	英国	42.779
4	Global Change Biology	343	0.01	英国	8.555
5	Biogeochemistry	340	0.01	荷兰	4.161
6	Plant and Soil	336	0.01	荷兰	3.299
7	Science	296	0.02	美国	41.846
8	Ecology Letters	277	0.02	英国	8.665
9	New Phytologist	271	0.01	英国	8.512
10	Biology and Fertility of Soil	261	0.02	德国	5.521
11	Ecological Applications	258	0.02	美国	4.248
12	Oecologia	255	0.01	德国	2.654
13	Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America	247	0.01	美国	9.412
14	Applied and Environmental Microbiology	245	0.05	美国	4.016
15	Ecosystems	244	0.02	美国	4.207

2.4 学科共现分析

一般的 WOS 数据库中每篇文章隶属于一个或者多个学科类别, 通过学科结构分布可视化分析, 研究者可以明晰该研究领域的学科结构特征<sup>[19]</sup>。本文中, 通过对检索的文献进行学科共现分析, 共得到与主题研究相关的学科共 67 个。其中, 频数较高的学科为“环境科学与生态学”( Environmental Science and Ecology ) ( 216 ) 和“农学”( Agriculture ) ( 204 ) , 其次为“土壤科学”( Soil Science ) ( 195 ) 、 “环境科学”( Environmental Sciences ) ( 124 ) 、 “生态学”( Ecology ) ( 121 ) 。结果表明目前关于大气氮沉降方面的研究趋于多学科和多元化。此外, “植物学”( Plant Sciences ) ( 104 ) 、 “地质学”( Geology )

( 45 ) 、 “地质学、交叉学科”( Geosciences, Multidisciplinary ) ( 44 ) 、 “微生物学”



图5 共被引期刊知识图谱  
Fig.5 Network map of co-occurring journals

(Microbiology) (38) 虽频数较低, 但这些研究领域为研究者提供了新的研究视角。由图 6 和表 4 可见“环境科学与生态学”(Environmental Science and Ecology) (0.56) 具有较高的中心值, 表明该学科在大气氮沉降研究领域属于“优势学科”<sup>[20]</sup>。

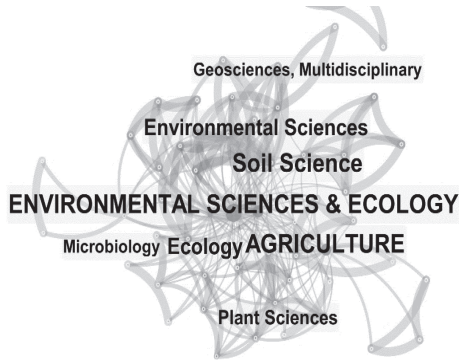


图 6 学科类别知识图谱  
Fig.6 Network map of Categories

## 2.5 学科突现分析

在文献计量学分析中, 学科突现分析常被研究者用来明晰某一研究领域的学科演化特征<sup>[21]</sup>。经过分析后共得到 13 个相关学科 (表 5), 从表 5 可见 2001 ~ 2020 年间, 爆发期持续时间最长的学科为 Biodiversity Conservation (生物多样性保护), 其突现强度显著高于其他学科。研究表明大气氮沉降量的增加会影响土壤生态系统中微生物群落的组成和功能, 改变物种间和种内竞争关系, 影响生态系统中的物种多样性, 进而影响生态系统的稳定性<sup>[22]</sup>, 而随着大气氮沉降量的持续增加, 这种影响更为显著<sup>[23]</sup>。由表 5 可见关于大气氮沉降方面的研究早期侧重于水域生态系统, 这是因为大气氮沉降量会加剧

水体富营养化<sup>[24-25]</sup>, 而后期研究重点则侧重于陆地生态系统。此外, 大气氮沉降研究所涉及到学科在 2008 年前主要集中在 Water Resources、Meteorology & Atmospheric sciences 和 Environmental Sciences, 而 2008 年后则逐渐呈现多学科融合化, 该领域的研究侧重于植物—土壤—微生物系统<sup>[26-28]</sup>。

从学科突现时间的变化特征可见“Agriculture, Multidisciplinary”这一学科领域为目前研究热点领域。大气氮沉降很大程度上改变了陆地生态系统中氮素的特征, 也改变了农田生态系统碳氮元素的循环和蓄积过程<sup>[29]</sup>。农业生产过程中产生了大量温室气体, 土壤中的微生物参与了温室气体的产生, 据统计全球温室气体排放量的 25% 至 30% 来自农业和土地 (FAO, 2019), 土壤微生物通过参与养分循环和土壤碳的固存, 在农业对气候变化响应方面起到了重要的作用。此外, 土壤生态系统还扮演着碳汇的角色, 间接影响了全球气候变化<sup>[30]</sup>。而随着大气氮沉降量的持续增加, 土壤中氮素水平的增加加速了土壤的酸化, 导致土壤微生物多样性丧失, 影响了农田生态系统的稳定性和生产力<sup>[31]</sup>, 进而影响到了全球粮食安全, 因此该研究领域日趋受研究者青睐。

## 2.6 共被引文献分析

在文献计量学分析中, 共被引文献分析可用来分析某一研究领域的知识基础构成。本文中, 共获得共被引文献 331 篇, 其中共引用频数较高文献如表 6 和图 7 所示, 这些具有高被引频次的文献对于该研究领域具有重要的影响。其中共引用频次最高的论文是由 Ramirez 等人于 2012 年发表于 Global Change Biology 上的“Consistent effects of nitrogen

表 4 发文量排名前 15 的学科  
Table 4 Top 15 subjects of published articles

排名 Ranging	学科 Category	频数 Frequency	中心性 Centrality
1	Environmental Science and Ecology (环境科学与生态学)	216	0.56
2	Agriculture (农学)	204	0.22
3	Soil Science (土壤学)	195	0.01
4	Environmental Sciences (环境学)	124	0.20
5	Ecology (生态学)	121	0.19
6	Plant Sciences (植物学)	104	0.01
7	Geology (地质学)	45	0.01
8	Geosciences, Multidisciplinary (地质学、交叉学科)	44	0.21
9	Microbiology (微生物学)	38	0.05
10	Agronomy (农艺学)	34	0.05
11	Science and Technology-other topics (科学技术交叉学科)	34	0.05
12	Multidisciplinary Sciences (交叉学科)	32	0
13	Biodiversity Conservation (生物多样性保护)	25	0
14	Forestry (林学)	21	0.01
15	Water Resources (水资源学)	14	0.05





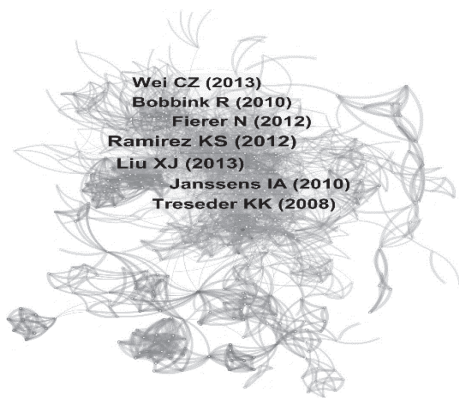


图 7 共被引文献知识图谱  
Fig.7 Co-citation network map of cited references.

养分的循环，氮沉降阻碍了土壤中有机质分解，引起了碳的固存<sup>[34]</sup>。

### 2.7 关键词共现分析

对于一篇研究论文而言，关键词是其核心内容的总结。文献计量学分析中，关键词共现分析用来明晰某一研究领域的研究热点变化。本文中，频数较高的关键词分别为“碳”（carbon）（105）、“多样性”（diversity）（78）、“响应”（response）（67）、“施肥”（fertilization）（64）、“氮”（nitrogen）（58）、“微生物量”（microbial biomass）（55）等（表 7）。由表 7 和图 8 可见目前关于大气氮沉降研究方法上主要采用施肥的方法模拟大气氮沉降，而在研究内容上则侧重于土壤生态系统对大气氮沉降的响应方面。

表 7 频数排名前十五的关键词  
Table 7 Top 15 keywords in terms of citation counts and centrality

排名 Ranging	关键词 Key word	频数 Frequency count	中心性 Centrality
1	carbon (碳)	105	0.12
2	diversity (多样性)	78	0.14
3	response (响应)	67	0.07
4	fertilization (施肥)	64	0.07
5	nitrogen (氮素)	58	0.08
6	microbial bioma (微生物量)	55	0.07
7	bioma (生物群落)	55	0.11
8	organic matter (有机质)	49	0.05
9	microbial community (微生物群落)	45	0.01
10	climate change (气候变化)	42	0.06
11	enzyme activity (酶活力)	42	0.05
12	ecosystem (生态系统)	36	0.02
13	grassland (草场)	36	0.14
14	litter decomposition (凋落物分解)	32	0.04
15	decomposition (分解)	31	0.07

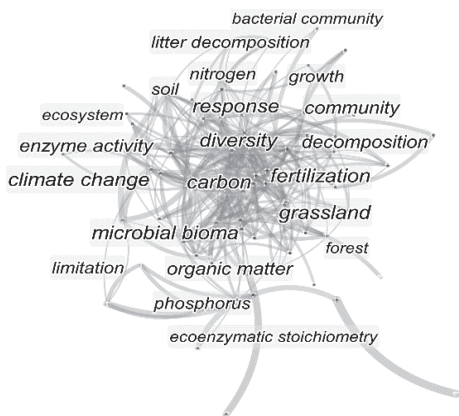


图 8 关键词共现知识图谱  
Fig.8 Cluster map of keywords

土壤微生物是地球生物化学循环重要组成部分，而土壤微生物对于大气氮沉降较为敏感，目前大气

氮沉降已成为全球气候变化的主要驱动因素<sup>[35]</sup>。研究表明当生态系统处于氮限制时，氮输入水平的增加会刺激植物生长，提高土壤微生物活性，增加生态系统中碳的蓄积量，改变生态系统的碳周转时间<sup>[36]</sup>。此外，研究发现大气氮沉降会引起“氮促碳汇”效应，Johnson 等研究发现当大气氮输入速率相对较低时，土壤对氮的固持能力远大于植物<sup>[37]</sup>。当生态系统受氮限制时，高水平的大气氮沉降可能会产生显著的碳汇<sup>[38]</sup>。而大气氮沉降所引起的土壤氮水平的升高降低了土壤的 C : N，加速了土壤中养分的释放速率和土壤微生物对凋落物的分解速率，进而提高了土壤中氮素的初期矿化速率，改变了土壤中真菌和细菌生物量的比率，进而导致土壤中微生物群落结构失衡<sup>[39-40]</sup>。

土壤是陆地生态系统重要的碳储库和生物的栖





如文献计量学分析要求文献数据须与主题内容一致,而通常所检索到的部分文献与主题内容不符,须对文献数据进行甄别并删除以保证分析结果的可信度。

大气氮沉降作为一种常见的自然现象,虽然其数量因地区间的差异而有所不同,但其所产生的生态效应目前已引起世界各国研究者的普遍关注。通过探究土壤微生物对大气氮沉降的响应为我们明晰大气氮沉降所引起的环境效应提供了有价值的信息,通过这些研究有助于我们更好的理解两者之间的耦合关系。但是大气氮沉降一直处于动态变化中,氮沉降数据难以准确测定,加之受限于数据的获取,大气氮沉降方面的研究仍存在着较大的不确定性,因此必须完善氮沉降的长期监测网络,以为研究生态系统对大气氮沉降的响应提供支持。此外大气氮沉降所产生的环境效应方面的研究目前主要集中于小区域尺度,而大气氮沉降作为全球范围的现象,其对全球气候变化的影响日趋严重,故而应加强国际间的交流合作与数据共享,以明晰大气氮沉降对全球生物化学循环的影响。土壤微生物作为生态系统的重要组分,其对生态系统的稳定性具有重要的作用,而目前关于大气氮沉降对土壤微生物影响的研究内容较为单一,忽略了生态系统的复杂性,而基于多学科的融合,有助于研究者探究大气氮沉降对生态系统和地球生物化学循环的影响及其驱动机制。此外,目前关于大气氮沉降方面的研究多采用人为氮添加来模拟实现,试验周期较短,与自然中的大气氮沉降特征有一定的差别,因此在未来研究中对于该研究方法还需进一步优化,使得试验结果更能够反应自然情况下大气氮沉降对生态系统和地球生物化学循环的影响。此外,目前国内外对于大气氮沉降对土壤微生物影响方面虽较多,所涉及的研究领域较为广泛,但目前国内的研究多集中于大气氮沉降对于土壤微生物量、群落结构组成以及土壤碳氮循环方面研究,而关于土壤微生物对大气氮沉降的响应机制及反馈机制方面的研究则比较匮乏,因此需加强该方面的研究。

## 4 结论

用文献计量学的方法对近 20 年来大气氮沉降对土壤微生物影响研究文献进行可视化分析,结果表明:

(1) 目前在大气氮沉降对土壤微生物影响研究方面美国具有较高的影响力,我国在该研究领域的

研究发展迅速,其中中国科学院、中国科学院大学在该领域具有较强的影响力。近年来,该领域已成为科研工作者关注的热点内容之一,但在该研究领域国际间的科研交流合作方面我国研究者和他国研究者合作较少,须加强国际间的合作交流,同时建立全球性的氮沉降长期监测网络。

(2) 大气氮沉降对土壤微生物影响方面的研究主要集中在环境与生态科学、农学和土壤学等领域,且呈现出明显的多学科交叉融合发展趋势,这有助于研究者更好的明晰大气氮沉降对生态系统的影响。

(3) 大气氮沉降对土壤微生物影响的研究热点内容主要集中在大气氮沉降对陆地生态系统结构和功能的影响上,通过模拟大气氮沉降的方法研究植物和土壤微生物结构与功能、生态系统养分循环的变化。

## 参考文献:

- [1] Verma P, Sagar R. Effect of nitrogen (N) deposition on soil-N processes: a holistic approach[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10470.
- [2] Cheng J, Ma W, Hao B, et al. Divergent responses of nematodes in plant litter versus in top soil layer to nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 157: 103719.
- [3] Bach E M, Ramirez K S, Fraser T D, et al. Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 2662.
- [4] Zong N, Geng S B, Duan C, et al. The effects of warming and nitrogen addition on ecosystem respiration in a Tibetan alpine meadow: The significance of winter warming[J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(20): 10113 – 10125.
- [5] 郑裕雄, 曹际玲, 杨智杰, 等. 氮沉降对亚热带常绿阔叶天然林不同季节土壤微生物群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1534 – 1544.
- [6] Cheng Y, Wang J, Ge Z, et al. Correction to: Background nitrogen deposition controls the effects of experimental nitrogen addition on soil gross N transformations in forest ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2020, 151(2-3): 1 – 1.
- [7] 贾彦龙. 中国及全球大气氮沉降的时空格局研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [8] Zhao Y, Zhang L, Chen Y, et al. Atmospheric nitrogen deposition to China: A model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance[C]. *Atmospheric Environment*, 2017, 153: 32 – 40.
- [9] Li D J, Zhang Q S, Xiao K C, et al. Divergent responses of biological nitrogen fixation in soil, litter and moss to temperature and moisture in a karst forest, southwest China[C]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 1 – 7.
- [10] Huang Z Q, Wan X H, He Z M, et al. Soil microbial biomass, community composition and soil nitrogen cycling in relation to tree species in subtropical China[J]. *Soil Biology and*

- Biochemistry*, 2013, 62: 68 – 75.
- [ 11 ] 程 蕾, 周嘉聪, 林开森, 等. 氮添加对亚热带毛竹林土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 1929 – 1937.
- [ 12 ] 隋 心, 张荣涛, 刘赢男, 等. 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1226 – 1233.
- [ 13 ] 赵 超, 彭 赛, 阮宏华, 等. 氮沉降对土壤微生物影响的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3): 149 – 155.
- [ 14 ] Li H L, Crabbe M J C, Chen H K. History and Trends in Ecological Stoichiometry Research from 1992 to 2019: A Scientometric Analysis[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8909.
- [ 15 ] Wei F W, Grubestic T H, Bishop B W. Exploring the GIS knowledge domain using CiteSpace[J]. *The Professional Geographer*, 2015, 67(3): 374 – 384.
- [ 16 ] Gao H, Ding X H, Wu S M. Exploring the domain of open innovation: Bibliometric and content analyses[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 122580.
- [ 17 ] Gandia R M, Antonialli F, Cavazza B H, et al. Autonomous vehicles: scientometric and bibliometric review[J]. *Transport reviews*, 2019, 39(1): 9 – 28.
- [ 18 ] Liu H, Jiang Y, Fan H, et al. Visualization analysis of knowledge network research based on mapping knowledge[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2020: 1 – 12.
- [ 19 ] 单文俊, 付 琦, 邢亚娟, 等. 氮沉降对长白山白桦山杨天然次生林土壤微生物量碳氮和可溶性有机碳氮的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8): 1522 – 1530.
- [ 20 ] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135 – 1142.
- [ 21 ] Li Y, Xu Z S, Wang X X, et al. A bibliometric analysis on deep learning during 2007–2019[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2020, 11(12): 2807 – 2826.
- [ 22 ] Chen X M, Hu Z G, Liu S B, et al. Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace[J]. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 2012, 12(5): 593 – 608.
- [ 23 ] Phoenix G K, Hicks W K, Cinderby S, et al. Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: The need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(30): 470 – 476.
- [ 24 ] Deininger A, Kaste H, Austnes K. Organic nitrogen steadily increasing in Norwegian rivers draining to the Skagerrak coast[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1 – 9.
- [ 25 ] Ti C P, Xia Y Q, Pan J J, et al. Nitrogen budget and surface water nitrogen load in Changshu: a case study in the Taihu Lake region of China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91(5): 55 – 66.
- [ 26 ] Yuan X, Niu D, Weber-Grullon L, et al. Nitrogen deposition enhances plant-microbe interactions in a semiarid grassland: The role of soil physicochemical properties[J]. *Geoderma*, 2020, 373: 114446.
- [ 27 ] Ma S, Chen G, Tian D, et al. Effects of seven-year nitrogen and phosphorus additions on soil microbial community structures and residues in a tropical forest in Hainan Island, China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114034.
- [ 28 ] Li Y P, Feng Y L, Chen Y J, et al. Soil microbes alleviate allelopathy of invasive plants[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60: 1083 – 1091.
- [ 29 ] Kannoja P, Sharma P K, Sharma K. Climate Change and Soil Dynamics: Effects on Soil Microbes and Fertility of Soil[J]. *Climate Change and Agricultural Ecosystems*, 2019: 43 – 64.
- [ 30 ] Zhang H, Liu H, Zhao J, et al. Elevated precipitation modifies the relationship between plant diversity and soil bacterial diversity under nitrogen deposition in *Stipa baicalensis* steppe[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 345 – 353.
- [ 31 ] 文海燕, 傅 华, 牛得草, 等. 大气氮沉降对黄土高原土壤氮特征的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(5): 694 – 698.
- [ 32 ] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes[J]. *Global change biology*, 2012, 18(6): 1918 – 1927.
- [ 33 ] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459 – 462.
- [ 34 ] Janssens I A, Dieleman W, Luysaert S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315 – 322.
- [ 35 ] Wu J B, Li N, Wang X D. Nitrogen deposition strengthens the relationship between plants and the soil fungal community in alpine steppe, North Tibet[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 147: 103441.
- [ 36 ] Tian D, Jiang L, Ma S H, et al. Effects of nitrogen deposition on soil microbial communities in temperate and subtropical forests in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 1367 – 1375.
- [ 37 ] Johnson D W. Nitrogen retention in forest soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(1): 1 – 12.
- [ 38 ] Zhang T, Chen H Y H, Ruan H H. Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes[J]. *The International Society for Microbial Ecology Journal*, 2018, 12: 1817 – 1825.
- [ 39 ] 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.
- [ 40 ] Minu A, Routh J, Machiwa J F. Distribution and sources of organic matter in the Rufiji Delta in Tanzania: Variability and environmental implications[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 122: 104733.
- [ 41 ] 郭萍萍, 郑丽丽, 黄幸然, 等. 模拟大气氮沉降对不同树种土壤微生物生物量的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(5): 772 – 777.
- [ 42 ] Throop H L, Holland E A, Parton W J, et al. Effects of nitrogen deposition and insect herbivory on patterns of ecosystem level carbon and nitrogen dynamics: results from the CENTURY model[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1092 – 1105.
- [ 43 ] Gundersen P, Emmett B A, Kjo-naas 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.
- [ 44 ] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, et al. Nitrogen saturation in

- temperate forest ecosystem-hypothesis revisited[J]. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921 – 934.
- [ 45 ] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100[J]. *Science*, 2000, 287(5459): 1770 – 1774.
- [ 46 ] Norby R J. Nitrogen deposition: a component of global change analyses[M]. *New Phytologist*, 1998, 139(1): 189-200.
- [ 47 ] Nordin A, Strengbom J, Witzell J, et al. Nitrogen deposition and the biodiversity of boreal forests: implications for the nitrogen critical load[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2005, 34(1): 20 – 24.
- [ 48 ] Haddad N M, Haarstad J, Tilman D. The effects of long-term nitrogen loading on grassland insect communities[J]. *Oecologia*, 2000, 124(1): 73 – 84.
- [ 49 ] Bobbink R, Hornung M, Roelofs J G. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation[J]. *Journal of Ecology*, 1998, 86(5): 717 – 738.
- [ 50 ] Mansson K F, Falkengren-Grerup U. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralisation and litter C: N ratios in oak (*Quercus robur* L. ) forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 179(1-3): 455 – 467.
- [ 51 ] Eisenlord S D, Freedman Z, Zak D R. Microbial mechanisms mediating increased soil C storage under elevated atmospheric N deposition[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(8): 2847 – 2847.
- [ 52 ] Zavaleta E S, Shaw M R, Chiariello N R, et al. Additive effects of simulated climate changes, elevated CO<sub>2</sub>, and nitrogen deposition on grassland diversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(13): 7650 – 7654.
- [ 53 ] Millán M M, Sanz M J, Salvador R. Atmospheric dynamics and ozone cycles related to nitrogen deposition in the western Mediterranean[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118(2): 167 – 186.
- [ 54 ] Zhao H F, Yao X J, Wang Q, et al. Nitrogen deposition and soil nitrogen dynamics in subtropical evergreen broad-leaved stands along an age-sequence[J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2013, 13(2): 237 – 250.
- [ 55 ] Yue K, Jarvie S, Senior A M, et al. Changes in plant diversity and its relationship with productivity in response to nitrogen addition, warming and increased rainfall[J]. *Oikos*, 2020, 129(7): 939 – 952.

## Research Hotspots and Trends of the Effects of Nitrogen Deposition on Soil Microorganisms-- Based on Citespace Visual Analysis

YANG Yang<sup>1</sup>, LI Hai-liang<sup>2</sup>, YU Fan-feng<sup>1</sup>, NIU Shi-quan<sup>1\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] With the increasing of atmospheric nitrogen (N) deposition, the effects of N deposition on ecosystems have been drawn great attention of researchers. Nitrogen deposition changes the characteristics of soil N pool, and also affects the function and structure characteristics of soil microorganisms. In this paper, the bibliometrics was used to explore the distribution characteristics of international studies on the effects of N deposition on soil microorganisms in the past 20 years and the trends of research frontiers and hot spots. The aims were to clarify the development trend and research hotspots of this research field, and provide certain guidance for future research. [Method] The Citespace software was used to conduct a bibliometric review of the research between N deposition and soil microorganisms published from 2001 to 2020 and extracted from the Web of Science. The distribution characteristics of the state, academic institutions, author, journal, cite-reference, category and keywords of these literature data were analyzed. [Result] The results showed that the United States has been a major contributor to this field and published the most number of papers in this field, and the Chinese Academy of Sciences was the academic institution with the most number of publications. In addition, the research fields on the effects of atmospheric N deposition on microorganisms were mainly focused in the environmental science, ecology and agriculture. Overall, the research between the atmospheric N deposition and soil microorganism has changed from single discipline to a multidisciplinary in different fields. [Conclusion] The current researches on the effects of atmospheric N deposition on soil microorganisms tend to explore the coupling mechanism between soil microorganisms and soil nutrient cycling and the response mechanism of soil microorganisms to atmospheric N deposition.

**Key words:** Nitrogen deposition; Soil microorganisms; Bibliometrics; Citespace

[ 责任编辑: 张玉玲 ]