



DOI: 10.5846/stxb202201070055

肖春艳, 胡情情, 陈晓舒, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏. 基于文献计量的大气氮沉降研究进展. 生态学报, 2023, 43(3): 1294-1307.

基于文献计量的大气氮沉降研究进展

肖春艳, 胡情情, 陈晓舒, 赵同谦*, 郭晓明, 陈飞宏

河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003

摘要: 氮沉降是氮素输入生物圈的重要途径。为全面、系统地了解大气氮沉降的研究热点与前沿趋势, 基于文献计量学方法运用 CiteSpace 软件对 1984—2021 年 Web of Science 核心数据库中大气氮沉降的相关文献进行可视化统计分析。结果表明: 大气氮沉降相关的文献数量呈现逐年上升的趋势; 学科领域涉及环境科学、生态学、气象学与大气科学等; 美国的研究实力最强, 中国则需要加强与其他国家科研机构的交流合作。中国科学院、英国生态水文中心和瑞典农业科学大学等研究机构文章数量较多; Liu XJ、Mo JM、Verheyen K 等为核心作者群; *Atmospheric Environment*、*Global Change Biology*、*Science of the Total Environment* 以及 *Environmental Pollution* 等期刊为主要载体。氮沉降特征、氮沉降的生态效应、氮沉降化合物溯源是氮沉降领域研究的核心内容。大尺度的全球氮沉降动态研究、植物和土壤微生物协同响应氮添加的机制、氮沉降源解析及减排策略的制定是当前氮沉降研究领域的前沿热点。上述研究结果可为大气氮沉降领域学者凝练科学问题提供参考。

关键词: 氮沉降; 文献计量; Web of Science 核心数据库; CiteSpace

氮沉降是氮素输入生物圈的重要途径。近几十年来, 由于化石燃料燃烧、化肥施用及畜牧业发展等向大气中排放的含氮化合物激增, 大气氮沉降迅速增加^[1-3]。干湿沉降过程将大气氮污染物迁移到地面生态系统, 深刻影响着陆地和水生生态系统的物质和能量循环^[4-6]。段娜等研究表明, 2019 年全球氮沉降通量已经达到 103 Tg N/a, 预计到 2050 年将超过全球氮通量负荷, 达到 195 Tg N/a^[7]。Ackerman 等估算了 1984—2016 年间全球干湿氮沉降的年际变化, 发现全球多数区域的氮沉降均呈现上升趋势, 其中我国东部沿海以及中原地区的氮沉降增加最为明显, 达到 50 kg N km⁻² a⁻¹, 中国已成为继欧洲和美国之后的第三大氮沉降区^[8-9]。氮沉降通量的增加提高了生态系统生产力, 促进生物量的积累, 但是过量的氮素输入引发了土壤营养元素淋失、水体富营养化、生物多样性丧失和氮饱和等负面效应, 进而影响了陆地和水生生态系统的健康和服务功能^[10-15]。日渐凸显的氮沉降问题及其生态效应越来越成为当前生态学领域和环境科学领域研究的焦点之一。

氮沉降的研究始于 1843 年成立的英国的洛桑试验站, 1980 年确定的美国国家酸雨评估计划和 1997 年启动的欧洲监测与评价计划被认为是里程碑式的氮沉降研究计划, 实现了各国家大气氮素干湿沉降输入的评估, 推动了氮沉降监测网络的发展^[16-17]。我国的氮沉降研究起步于 20 世纪 70 年代, 主要集中在湿沉降的监测研究^[17-19]。自 2004 年起, 中国农业大学组织建立了涵盖草原、城市、农田、森林等生态系统的全国性氮沉降监测网络 (NNDMN), 在大气氮素干湿沉降的定量研究和大气活性氮来源的辨识方面取得了很大进展^[2-3, 20]。近几十年来, 国内外学者在氮沉降的形态、过程、通量、来源以及生态效应等方面做了大量的工作,

基金项目: 国家自然科学基金 (U1704241, 42007175); 中原科技创新领军人才项目 (194200510010); 高等学校基本科研业务费 (NSFRF200326)

收稿日期: 2022-01-07; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaotq@hpu.edu.cn

发表了大量的论文论著^[21–25]。面对大气氮沉降研究领域海量的文献,采用文献计量方法进行可视化描述,可以客观地反映该学科领域的研究现状和发展态势^[26]。本文基于 1984 年至 2021 年 10 月 Web of Science 核心数据集收录的大气氮沉降研究相关文献,运用可视化分析软件 CiteSpace 进行发展梳理和可视化计量分析,对大气氮沉降研究的现状进行回顾与展望,旨在为该领域的研究提供理论参考与依据。

1 研究方法

1.1 数据来源

为了对大气氮沉降领域进行比较系统客观的分析,本文选取美国汤姆森路透公司出版的 Web of Science 核心合集数据库为数据来源。在 Web of Science 中将主题词(Topic)设定为:“(nitrogen near/5 deposition *) OR (ammonia near/5 deposition *) OR (nitrate near/5 deposition *)”,选择文献类型为“Article”,语种为“English”,检索时间跨度为 1984 年至 2021 年 10 月(检索时间为 2021 年 11 月 1 日),共检索文献 10324 篇。对检索结果逐条筛选,剔除不相关的文章以及书评、卷首语等非学术性文章,并删除重复文献,最终得到涉及氮沉降研究的文献 4996 篇。将筛选后的文献以“全记录与引用的参考文献”的格式下载保存为纯文本文件,作为分析数据的样本。

1.2 分析方法

本文运用美国德雷塞尔大学陈超美教授基于 Java 语言开发的 CiteSpace 软件进行分析^[27–28]。CiteSpace 软件通过对科学文献信息的分析,绘制特定科学和技术领域的知识图谱,直观地呈现特定学科领域的知识结构,获取该领域研究现状、研究热点以及前沿方向^[29]。本文利用 CiteSpace 软件的 Web of Science 数据分析板块进行处理,对关于氮沉降研究的发文数量、国家/地区、研究机构、发文作者、学科分类、期刊来源以及关键词等进行统计分析,在绘制知识谱图的基础上,对其研究动态、研究热点等进行可视化分析,在此基础上探讨氮沉降相关研究的未来发展趋势。

2 结果与分析

2.1 年度发文量变化趋势

发文量反映了科研人员对该领域热点问题的关注程度,表明了相关领域研究的发展程度和发展速度^[26]。1984—2021 年间大气氮沉降研究文献的年度发文量总体呈上升趋势(图 1)。大气氮沉降研究大致分为 3 个阶段:第一阶段(1984—1992 年),为大气氮沉降相关领域的研究的起步阶段,文献发表量不高,研究主要集中在大气氮沉降化合物形态及沉降通量估算等方面^[30–31]。第二阶段(1993—2002 年),大气氮沉降的研究开始有显著增长,年均发文量约为 58 篇,研究主要围绕氮沉降/氮添加对森林、草地生态系统以及苔藓和灌丛等多

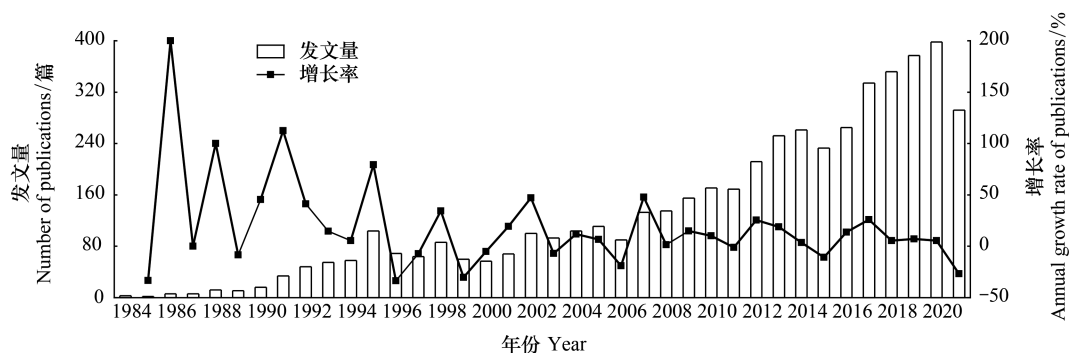


图 1 1984—2021 年文献的年度发文量和增长率

Fig.1 The annual number and growth rate of publications during the period of 1984—2021

2021 年数据截止于 2021 年 10 月 31 日

种陆地生态系统的影响开展^[32-34]。第三阶段(2003—2021 年),年度文献发表量持续增加,趋势明显加快,在研究内容、范围和方法等方面都取得了长足发展,研究范围从局地尺度向区域或全球尺度拓展^[35-36],研究内容也拓展到关注氮沉降对碳循环、磷循环或不同元素循环之间的耦联和平衡^[37-39]。工业革命以来,大气氮沉降通量迅速增加引起了各国学者的关注,尤其是 20 世纪 90 代末期开始,其受关注的程度日益增加,因而 1992 年后发文量明显增加。从大气氮沉降研究文献数量的增长率来看,文献发表量增长处于不断波动状态,增长率介于-33.65%—200%之间,年平均增长率为 19.34%。随着社会经济快速发展,国内外学者对大气氮沉降及其生态效应等开展了大量的研究工作,同时吸引更多的学者关注该领域,因而近些年文献发表量出现稳定的适度增长趋势。

2.2 研究力量分布

2.2.1 国家/地区分布

一个国家/地区的发文量一定程度上代表了该国家在某领域研究的活跃程度^[26]。中介中心性反映了某一节点在整个网络中所处地位及重要性,中介中心性大于 0.1,则该节点为网络中的关键节点^[40]。中介中心性由 CitseSpace 计算生成,反映一个国家/地区在某领域的科研实力以及对该领域的重视程度^[40]。CiteSpace 中使用紫色外圈进行重点标注,紫色外圈越厚代表中介中心性越高^[41]。节点大小代表国家/地区的中心度,节点越大,表明该国家/地区的影响力和重要程度越高;节点间连线粗细程度反映合作关系强弱^[42]。1984 年以来发表文章总数排在前 10 的国家详见表 1。由表 1 可知,1984—2021 年 10 月发文量前 10 的国家中除了中国以外,其余 9 个国家为欧洲和北美国家/地区,表明氮沉降研究主要集中在欧美发达国家/地区。美国发文量最多,发文量为 1632 篇,占总发文量的 32.67%,其次是中国和德国。美国的发文量分别是中国和德国的 1.16 倍和 3.43 倍,表明美国在此领域投入了较多的科研力量,并产出了较为丰硕的科研成果。中国发文量位列第二,发文量为 1404 篇,占总发文量的 28.10%,尤其是近 5 年发展迅速,发文量所占比例高达 65.53%,超过了发文量前 10 的所有国家,由此可见我国氮沉降研究虽然晚于欧美发达国家,但近几年科研投入显著增加,取得了丰硕成果。其余排名前 10 的国家从高到低依次为:德国(9.83%)、英格兰(9.01%)、加拿大(6.57%)、瑞典(6.49%)、荷兰(6.47%)、苏格兰(5.12%)、瑞士(4.16%)和挪威(3.92%)。

发文量排名前 10 的国家/地区合作关系图谱如图 2 所示。从表 1 和图 2 中可知,美国、德国、英格兰、加拿大、荷兰和瑞士的中介中心性超过 0.1,分别为 0.37、0.26、0.21、0.11、0.18 和 0.14,表明该 6 个国家在国家合作网络中占有重要地位。美国发表文献数量最多,中介中心性也最高(0.37),表明美国在氮沉降领域与其他国家交流合作频繁。中国关于氮沉降的研究起步较晚,中介中心性较低(0.03),说明中国在氮沉降研究领域需要加强同其他国家科研机构合作。中国在近 20 年时间发展迅速,发文数量仅次于美国,表明中国的氮沉降研究处于快速发展时期,中国学者对该领域研究关注度较高。

表 1 发文量排名前 10 的国家/地区

Table 1 Top 10 countries or regions in the number of messages sent

序号 Ordinal	国家/地区 Country/Region	数量 Count	近 5 年发文量所占比例 Proportion of publications in recent five years%	中介中心性 Centrality
1	美国 USA	1632	32.41	0.37
2	中国 China	1404	65.53	0.03
3	德国 Germany	491	33.66	0.26
4	英格兰 England	450	24.44	0.21
5	加拿大 Canada	328	43.60	0.11
6	瑞典 Sweden	324	28.09	0.07
7	荷兰 Netherlands	323	27.55	0.18
8	苏格兰 Scotland	256	20.55	0.10
9	瑞士 Switzerland	208	35.10	0.14
10	挪威 Norway	196	25.51	0.06

2.2.2 研究机构分布

分析研究机构的分布可以帮助了解学术界对该领域的支持和认同程度,从而有利于机构之间的合作^[40]。对文献作者所属机构进行统计,4996 篇文献共出自 437 个机构。对发文前 10 的机构进行统计(表 2),位居榜首的是中国科学院(含中国科学院大学),其发文量达 1083 篇,占总发文量的 21.68%,远远高于排在第二位的英国生态水文中心(120 篇)和第三位的瑞典农业科学大学(114 篇),分别是其发文量的 9.03 倍和 9.50 倍。中国科学院是我国具有较高科研水平的研究机构,承担着大量的研究工作,对我国大气氮沉降领域发展做出了突出贡献。排名前 10 的机构分别来自 4 个国家,其中有 3 所研究机构属于中国,发文量最多,共计 1280 篇,占比达到 25.62%,可见我国在大气氮沉降研究领域具有举足轻重的地位。此外,我国排名前 10 的研究机构

中国科学院、中国农业大学和北京大学近 5 年发文量所占比例分别高达 68.14%、83.17%和 62.50%,呈现出较快速增长的态势,表明我国研究机构在近年来大气氮沉降研究做出了主要贡献且发展迅速。

从研究机构合作关系图谱和中介中心性来看(图 3 和表 2),中国科学院在网络中的节点最大,中介中心性(0.08)第二,表明中国科学院是大气氮沉降领域的核心研究机构,与其他研究机构合作交流频繁。英国生态水文中心的发文量(120 篇)和中介中心性(0.09)均相对较高,说明英国生态水文中心在大气氮沉降领域占有重要地位。排名前 10 的机构有 5 个来自美国政府机构和高等院校,近 5 年发文量所占比例为 27.40%—42.39%,由此可见美国对大气氮沉降的研究由政策和科研共同推进,近年来发展迅速。

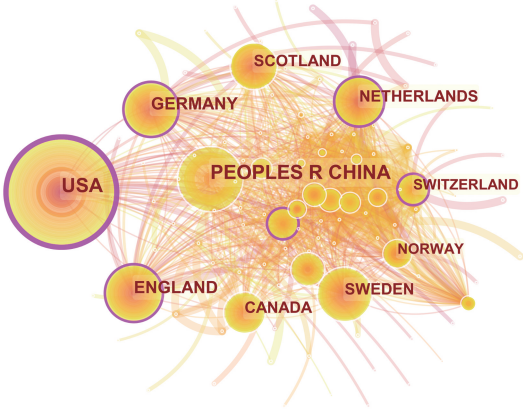


图 2 发文量排名前 10 的国家/地区合作关系图谱
Fig.2 Map of cooperation between top 10 countries/ regions in the number of articles

表 2 发文量排名前 10 的研究机构

Table 2 Top 10 institutions in the number of messages sent

序号 Ordinal	机构 Institute	数量 Count	近 5 年发文量所占比例 Proportion of publications in recent five years /%	中介中心性 Centrality
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	1083	68.14	0.08
2	英国生态水文中心 UK Centre for Ecology & Hydrology	120	41.67	0.09
3	瑞典农业科学大学 Swedish University of Agricultural Sciences	114	38.60	0.06
4	美国林务局 US Forest Service	113	33.63	0.03
5	中国农业大学 China Agricultural University	101	83.17	0.03
6	北京大学 Peking University	96	62.50	0.04
7	美国环保局 US Environmental Protection Agency	93	37.63	0.06
8	美国地质调查局 US Geological Survey	92	42.39	0.02
9	科罗拉多州立大学 Colorado State University	86	37.21	0.02
10	科罗拉多大学 University of Colorado	73	27.40	0.02

2.2.3 发文作者分布

文献作者是科学研究的主体,可以反映一个领域的杰出贡献者^[40]。目前氮沉降研究领域已有 17418 位作者发表过学术研究,文章发表数量排名前 10 位的作者主要来自中国、美国、比利时和西班牙,其中有 6 位作者来自中国(表 3),反映出中国在该领域研究地位位居世界前列,科研成果数量较多。发表论文数量最多的作者是来自中国农业大学的刘学军(Liu X J)教授,发表论文数目为 75 篇,占总论文发表量的 1.50%,且近 5

年发表的论文数量占其总发文量的 68.00%,说明刘学军教授团队在氮沉降领域的研究实力较强,尤其是近年来科研成果显著。

通过发文作者共现网络分析可以得出合作密切的学者群,发掘学术研究的团队效应^[42]。为进一步了解主要研究作者间的合作关系,统计论文发表量居于前 10 位的发文作者并绘制作者间的合作关系图谱(图 4)。由图 4 和表 3 可知,图中节点大多独立分散,中介中心性最高的是莫江明(Mo J M)研究员,其中介中心性为 0.11,是合作网络中与外界联系较多的主要作者,表明其在氮沉降领域的研究具有较强的影响力。此外,来自 University Ghent 的 Verheyen K 发表论文数量位于第三位。从全球范围来看,多数研究人员以小范围独立研究为主,表明大部分氮沉降研究人员分布广泛且独立性较强。

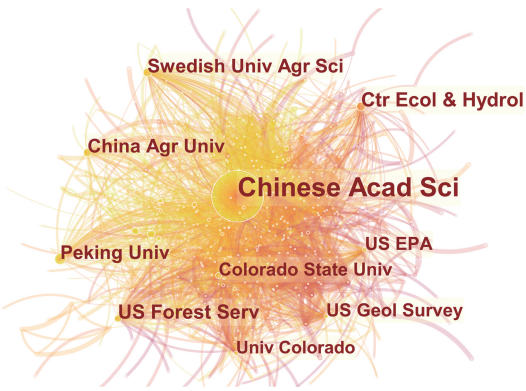


图 3 发文量排名前 10 的研究机构合作关系图谱
Fig.3 Map of cooperation between top 10 institutions in the number of articles

表 3 发文量排名前 10 的发文作者
Table 3 Top 10 authors in the number of messages sent

序号 Ordial	作者 Author	机构 Institute	中介中心性 Centrality	发文量 Number of articles	近 5 年发文量所占比例 Proportion of publications in recent five years/%
1	LIU X J(刘学军)	China Agricultural University	0.01	75	68.00
2	MO J M(莫江明)	Chinese Academy of Sciences	0.11	55	47.27
3	Verheyen K	University Ghent	0.01	45	51.11
4	Han X G(韩兴国)	Chinese Academy of Sciences	0.02	42	38.10
5	Yu G R(于贵瑞)	Chinese Academy of Sciences	0.02	40	42.50
6	Zhang W(张伟)	Chinese Academy of Sciences	0.03	38	60.53
7	Zak D R	University Michigan	0.01	36	13.89
8	Tian H Q(田汉勤)	Auburn University	0.01	36	33.33
9	Penuelas J	Global Ecology Unit CREAF-CSIC-UAB	0.01	34	67.65
10	Fang Y T(方运霆)	Chinese Academy of Sciences	0.03	34	61.76

2.2.4 文献期刊分布

对某一研究领域发文量的文献期刊进行分析,可以帮助研究人员准确把握研究领域的核心期刊,为文献查询、论文撰写与投稿提供专业指导^[26]。对 1984—2021 年 10 月大气氮沉降领域期刊发文量进行分析,发文量排名前 10 的期刊总发文量为 2337 篇,占该领域英文期刊发文总量的 46.78%(表 4)。刊物级别最高的是 *Nature*,近 5 年平均影响因子达 44.374,属于世界顶级期刊。发文量排第 1 位的期刊是 *Atmospheric Environment*,发文 363 篇,占总发文的 7.27%,近 5 年平均影响因子为 4.633。发文量排在第二和第三位的期刊分别是 *Science of the Total Environment* 和 *Environmental Pollution*,发文量分别为 327 篇和 326 篇,占总发文量的 6.55%和 6.53%,近 5 年平均影响因子分别为 6.938 和 6.940。这 10 种期刊中,近 5 年平均影响因子最高的期刊为 *Global Change Biology*,为 9.827,发文量 239 篇,位居第四位。发文量排在第 8 位的期刊 *Soil Biology and Biochemistry*,近 5 年平均影响因子较高,为 6.767。在 2021 年期刊引证报告中,*Global Change Biology*、*Environmental Pollution*、*Science of the Total Environment*、*Soil Biology and Biochemistry*、*Atmospheric Chemistry and Physics*、*Plant and Soil* 和 *Forest Ecology and Management* 7 种期刊属于 Q1 类,其余 3 种期刊影响因子在 2.520—4.825 之间,在引证报告中属 Q2 和 Q3 类。近年影响因子最高的期刊 *Global Change Biology* 为 10.863,说明该



图 4 发文量排名前 10 的发文作者合作关系图谱

Fig.4 Map of cooperation between top 10 authors in the number of articles

期刊潜力最高。此外,中国的期刊未进入排名前 10,说明在氮沉降领域中国期刊影响力较低,整体研究水平还需进一步发展。

表 4 发文量排名前 10 的文献期刊

Table 4 Top 10 journals in the number of messages sent

序号 Ordinal	来源出版物 Source journal	数量 Count	分区 Partition	5 年平均影响因子 5-year average impact factor	2021 年影响因子 Impact factor of 2021
1	Atmospheric Environment 大气环境	363	2	4.633	4.798
2	Science of the Total Environment 总体环境科学	327	1	6.938	7.963
3	Environmental Pollution 环境污染	326	1	6.940	8.071
4	Global Change Biology 全球变化生物学	239	1	9.827	10.863
5	Forest Ecology and Management 森林生态与管理	207	1	3.581	3.558
6	Plant and Soil 植物与土壤	200	1	3.880	4.192
7	Water, Air and Soil Pollution 水、空气和土壤污染	183	3	2.041	2.520
8	Soil Biology and Biochemistry 土壤生物学与生物化学	179	1	6.767	7.609
9	Biogeochemistry 生物地球化学	176	2	4.535	4.825
10	Atmospheric Chemistry and Physics 大气化学与物理学	137	1	5.958	6.133

2.2.5 研究力量比较

发文量和文献的篇均被引频次可以反映某研究领域内国家、机构、作者和期刊的研究实力,发文量表征了对某领域的关注度,篇均被引频次反映了论文水平和影响力强弱^[43]。分别从国家/地区、机构、作者和期刊 4 个方面进行了研究力量比较(图 5)。从国家/地区层面看,美国的文献数量和篇均被引频次均较高,属于大气氮沉降研究领域发展势头较为强劲的国家/地区;挪威发文量较少,排在第 10 名,但篇均被引频次较高,表明挪威发文注重质量;加拿大的发文量位居第五,但篇均被引频次较低,在研究成果的质量上有待进一步提升。我国发文量虽然较高,但篇均被引频次最低,表明大气氮沉降研究虽然得到了我国学者的广泛关注,但是研究的深度和成果质量略显不足。

从机构层面看,发文量位居榜首的中国科学院,其篇均被引频次较低;篇均被引频次最高的英国生态水文中心,发文量占比仅为 2.40%,进一步表明国际学者关于氮沉降研究力量分布不均,尤其是我国关于大气氮沉

降研究在质量上存在提升空间。

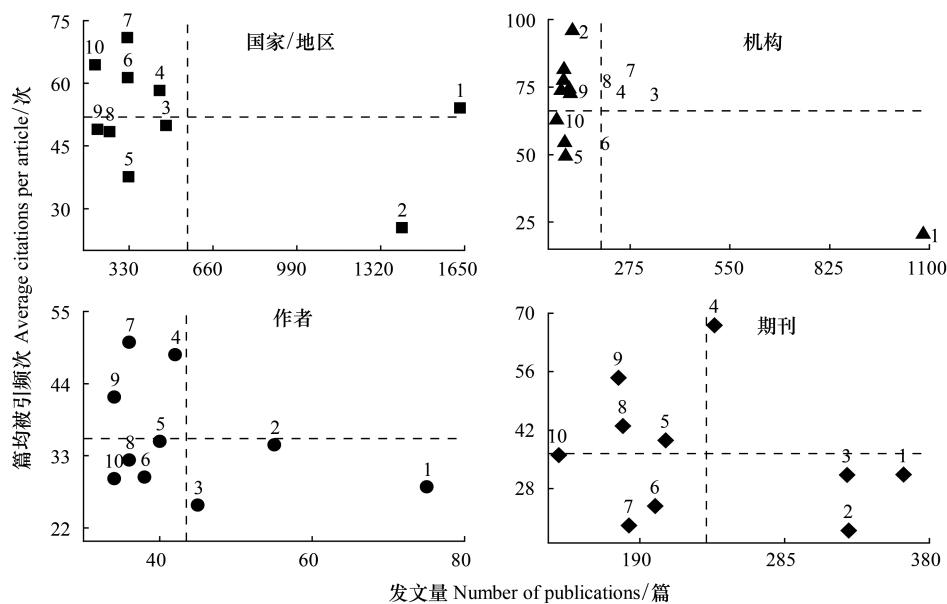


图 5 研究力量比较

Fig.5 Comparison in research strength

图中所有数字分别与表 1 至表 4 中的序号相对应,图中两条虚线的交叉点为发文量和篇均被引频次的平均值

通过对发文作者研究实力的分析,发现中国农业大学刘学军教授和中国科学院华南植物园莫江明研究员在氮沉降研究领域的发文量最多,且篇均被引频次也处于中上水平,表明刘学军教授和莫江明研究员为大气氮沉降研究领域的领军人物;Michigan University 的 Zak DR 发文虽然不多(位居第 7),但篇均被引频次最高(50.33 次),表明 Michigan University 在大气氮沉降领域研究实力较强。

分析期刊的研究实力,刊登大气氮沉降研究的文献量多且篇均被引频次高的期刊是 *Global Change Biology*,表明该期刊是大气氮沉降研究论文的主要载体。*Atmospheric Environment* 刊文量最高,但篇均被引频次略低于平均水平,可见该期刊是大气氮沉降领域论文的主要刊登期刊,但发文质量存在提升空间。*Soil Biology and Biochemistry*、*Forest Ecology and Management* 和 *Biogeochemistry* 刊载论文数量相对较少,但是篇均被引频次较高,表明这 3 个期刊刊载论文质量较高。

2.3 学科分布

对某一研究领域的学科进行分类可以看出该领域研究所涉及的学科类型,为研究提供明确的目的^[42]。大气氮沉降发表论文共涉及 32 个研究领域,其中发文量排名前 10 的学科如图 6 所示。环境科学发文量最多,共计 2193 篇,占文献总数的 43.90%;其次是生态学(1178 篇, 23.58%)和气象学与大气科学(823 篇, 16.47%)。此外,还涉及植物科学、地球科学多学科、土壤科学、林学、生物多样性保护、自然科学(多学科科学)和水资源学等多个学科。氮沉降的增加是改变陆地和水生生态系统结构和功能的重要驱动因子之一,深刻影响着大气、土壤、植被、水环境等,已经引起了科研工作者的重视并进行了深入研究^[4-6]。氮沉降涉及学

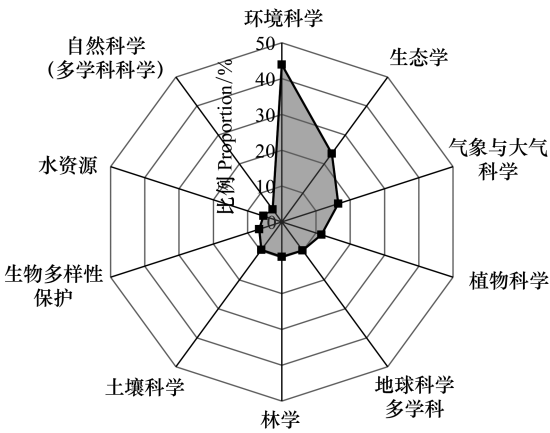


图 6 发文量前 10 学科领域

Fig.6 Top 10 subject categories in the number of messages sent

科领域分布广泛,以环境科学、生态学和气象学与大气科学领域研究为主,并且逐渐向其他学科领域渗透,利用多学科交叉理论与方法来研究氮沉降领域的科学问题已经成为趋势。

2.4 研究热点与前沿分析

2.4.1 核心文献分析

两篇及以上文献同时被其他文献引证形成了文献的共被引关系,其共被引频次高的文献能够反映某个研究领域的基础理论或基础知识^[44]。突现性是指某一文献在一个时期内被引次数陡然增加,反映了一定时期内研究热点的转变,一定程度上可以代表该领域的研究前沿^[26]。氮沉降领域被引频次前 10 的文献及其突现性如表 5 所示。由表 5 可知,被引频次最高的文献是 2008 年美国学者 Galloway 等(共被引 717 次)在 *Science* 发表的关于氮循环方式转换方面的研究,该研究在绘制 2000 年全球氮沉降空间分布图的基础上估算了氮沉降通量,并预测 2050 年氮沉降通量可翻番,认为北美、西欧和东亚(包含中国)是全球 3 大氮沉降的热点地区,是氮沉降领域的新突破,研究得出的氮沉降加速增长的态势引起了国内外学者广泛的关注。排在二位的是 2010 年荷兰学者 Bobbink 等(共被引 622 次)发表在 *Ecological Applications* 上的文章,综合评估了全球氮沉降对植物多样性的影响,提出氮沉降临界负荷超标是影响生物多样性发生变化的重要因素,为后人研究氮沉降污染防治提供技术支撑。Galloway 等(共被引 601 次)于 2004 年在 *Biogeochemistry* 上发表的关于氮循环的过去、现在和未来,对比了活性氮的自然源和人为源的差异,在全球和区域尺度上估算了各类生态系统的氮沉降通量。突现性最高的文献是 2013 年我国学者刘学军教授(突现性 141.84)在 *Nature* 发表的关于中国 20 年来氮沉降动态及其生态效应研究,认为中国的氮沉降以还原态氮沉降为主,而氧化态氮排放和沉降的增长率更快,为氮污染减排政策的制定提供了明确的思路。Vitousek 等发表在 *Ecological Applications* 的文章(共被引频次略低,但突现性较高)在研究全球氮素增长速率及来源的基础上,阐明了氮素增加导致的高氮沉降通量对陆地和水生生态系统的负面影响。此外,共被引频次排在前四的文献突现性均很高(表 5),由此可以看出,这些文献在发表时期均关注了大气氮沉降领域的热点问题,具有较高的理论性、创新性和应用性。从研究的主题来看,氮沉降特征及其生态效应、人类活动对氮循环的影响是氮沉降领域始终关注的话题。

表 5 高被引文献及其突现性信息表

Table 5 Information of highly co-cited and burst literatures

序号 Ordinal	共被引频次 Co-cited frequency	作者 Author	文章名称 Article name	突现性 Burst	发表年份 Year of publication
1	717	Galloway JN	Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions 氮循环的转变:近期趋势、问题和潜在的解决方案	107.97	2008 ^[9]
2	622	Bobbink R	Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis 氮沉降对陆地植物多样性影响的全球综合评估	106.03	2010 ^[12]
3	601	Galloway JN	Nitrogen cycles: past, present, and future 氮循环的过去、现在和未来	104.52	2004 ^[1]
4	511	Liu XJ	Enhanced nitrogen deposition over China 日益加剧的中国氮沉降	141.84	2013 ^[14]
5	292	LeBauer DS	Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed 陆地生态系统净初级生产力的氮限制具有全球性	39.46	2008 ^[45]
6	292	Janssens IA	Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition 森林土壤呼吸的减少对氮沉降的响应	49.86	2010 ^[15]
7	282	Stevens CJ	Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands 氮沉降对草地群落丰富度的影响	45.05	2004 ^[5]
8	230	Clark CM	Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands 长期低水平氮沉降下草原植物物种的损失	25.39	2008 ^[23]
9	227	Liu XJ	Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview 中国氮沉降及其生态效应研究进展	43.61	2011 ^[46]
10	223	Vitousek PM	Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Sources and Consequences 人类活动对全球氮循环的改变:来源与影响	88.94	1997 ^[22]

2.4.2 关键词分析

关键词是对文章核心内容的高度提炼和概括,其出现频率可以反映某领域的研究方向和内容^[26]。通过关键词共现分析,能够厘清某领域发展趋势,把握该领域的研究现状^[40]。在 CiteSpace 将节点选择为“keyword”,共得出了 853 个关键词信息,综合复现频次前 30 的高频关键词(表 6),发现氮沉降研究主要集中在氮沉降形态及通量特征(如:nitrogen deposition、deposition、nitrogen、atmospheric deposition、nitrate、dry deposition、precipitation、ammonia 等关键词)、氮沉降对生态系统的影响(如:ecosystem、growth、response、carbon、forest、soil、diversity、vegetation、acidification、impact、plant、phosphorus、dynamics、grassland、biodiversity、decomposition、critical load 等关键词)以及氮沉降化合物来源(如:climate change、fertilization、emission、model、chemistry 等关键词)等 3 个方面。氮沉降形态及通量特征始终是氮沉降研究者关注的首要内容。从 20 世纪 80 年代开始,美国推行的国家酸雨评估计划(NADP)、欧洲启动的监测与评价计划(EMEP)、日本开展的东亚酸沉降监测网络(EANET)、加拿大进行的大气与降雨监测网站(CAPMON)以及中国组建的全国大气氮沉降监测网(NNDMN)和中国生态系统研究网(CERN),基本实现了各国家对大气氮素干湿沉降的监测,但相关研究集中在无机氮沉降,对有机氮沉降通量特征研究较少^[2,16-17,47]。国内外学者对大气氮沉降的生态效应进行了较为系统的研究。从 20 世纪 90 年代开始,各国科学家开展大气氮沉降对植物生理生态的影响研究^[33],随后逐渐扩展到研究大气氮沉降对土壤微生物群落和生态系统元素(碳、氮和磷)循环的影响^[25,37,48],并在研究的过程中提出了氮沉降临界负荷的概念,以此评价过量的氮沉降通量引发的生态负面效应^[49]。氮沉降化合物的来源辨识一直是氮沉降领域研究的热点问题。化石燃料燃烧、过量施肥和牲畜排放造成了大气活性氮含量增加,从而使得氮沉降通量增加^[2-3]。与传统方法相比,氮沉降化合物中的稳定同位素为解析不同的含氮化合物排放来源提供了指纹信息,基于同位素质量平衡的 SIAR 等源解析模型,成功区分了不同的氮污染来源并量化了其各自的贡献率^[20]。

表 6 排名前 30 关键词频次
Table 6 Top 30 keywords frequency

序号 Ordinal	年份 Year	数量 Count	关键词 Keywords	序号 Ordinal	年份 Year	数量 Count	关键词 Keywords
1	1991	1794	nitrogen deposition 氮沉降	16	1987	316	Dry deposition 干沉降
2	1990	707	Deposition 沉降	17	1990	303	Acidification 土壤酸化
3	1990	692	Nitrogen 氮	18	1992	300	Impact 影响
4	1991	553	Ecosystem 生态系统	19	1992	290	Plant 植物
5	1994	524	Climate change 气候变化	20	1991	288	Emission 排放
6	1991	485	Growth 生长	21	1992	280	Phosphorus 磷
7	1995	482	Response 响应	22	1991	278	Dynamics 动态
8	1991	459	Forest 森林	23	1991	273	Model 模型
9	1995	421	Carbon 碳	24	1987	271	Precipitation 降水
10	1991	415	Soil 土壤	25	1992	267	Grassland 草场
11	1991	400	Atmospheric deposition 大气沉降	26	1992	244	Ammonia 氨气
12	1990	390	Nitrate 硝酸盐氮	27	1994	241	Critical load 临界负荷
13	1996	360	Diversity 多样性	28	1987	240	Chemistry 化学作用
14	1991	352	Vegetation 植被	29	1996	232	Biodiversity 生物多样性
15	1991	345	Fertilization 施肥	30	1991	226	Decomposition 分解作用

关键词共现分析时区图可以显示研究内容的演变过程,图中节点和线条的颜色代表不同的时间切片,节点所在位置表示关键词最早出现的时间,节点间的连线代表两个关键词同时出现在同一篇文献中,节点大小和连线粗细代表关键词的频次高低及其共现次数的多少^[26]。运用 CiteSpace 软件将关键词共现知识图谱投射到时间轴上,设置 2 年为一个时间切片,阈值选择 50,绘制氮沉降研究领域的关键词时区图(图 7)。结合

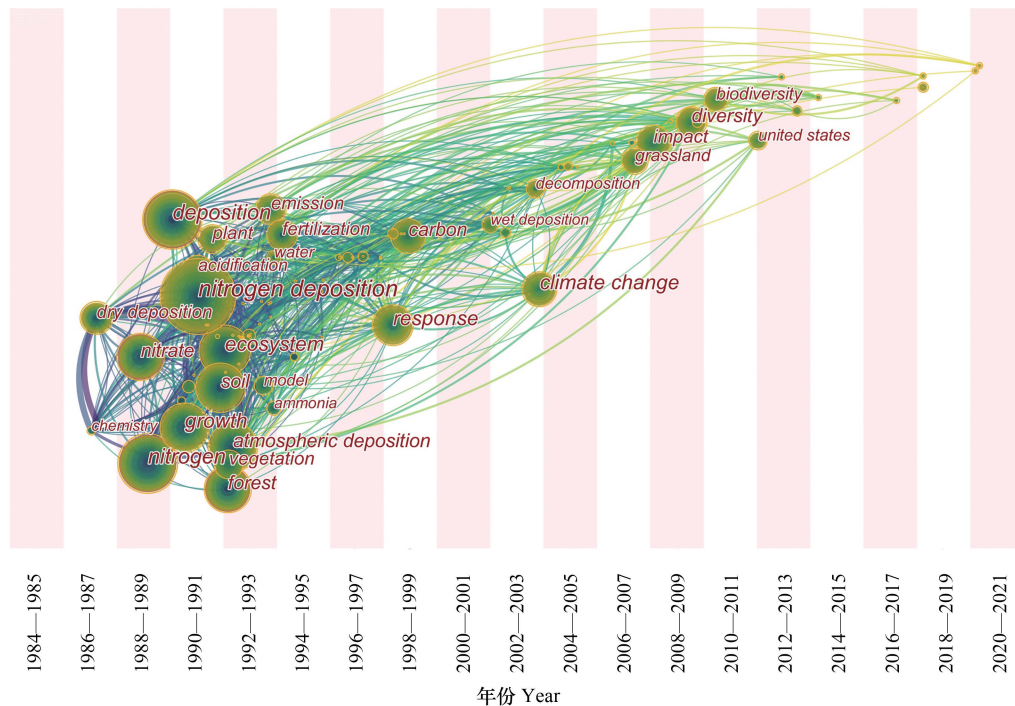


图7 氮沉降研究领域关键词共现时区视图

Fig.7 Time zone view of keyword co-occurrence in the field of nitrogen deposition research

图7,归纳出氮沉降研究的大致发展特点。(1)20世纪90年代的关键词主要是 nitrogen deposition、deposition、nitrogen、growth、ecosystem、atmospheric deposition、nitrate、carbon、forest、soil、dry deposition 等,此时的研究主要关注活性氮化合物通过干湿沉降的方式沉降到地球表面的氮沉降通量及其环境效应^[30—32]。Response 一词在20世纪90年代末出现,表明氮沉降研究已经聚焦于不同生态系统类型对氮沉降的响应。快速的工业、农业和城市发展导致大气活性氮排放及其沉降通量显著增加,短期内增加的活性氮提高了生态系统的生产力,而过量的氮沉降则导致土壤酸化、植物多样性减少等,进而影响碳、氮、磷等的生物地球化学循环^[31—37]。(2)21世纪开始出现 climate change、decomposition、wet deposition 等词,说明这一时期开始关注氮沉降与气候变化的内在联系,大气氮沉降和降雨量增加影响了陆地生态系统的固碳作用,相关研究表明氮沉降提升了森林生态系统碳汇,缓解了全球气候变暖^[50]。此外,关于氮沉降对生态系统影响的研究更加具体,如开展植物凋落物功能性状对氮沉降的响应研究,发现氮沉降通量增加通过影响凋落物化学组分及群落组成进而提高凋落物初始质量和分解速率^[51]。(3)2008年之后出现了 diversity、biodiversity 等词,反映该时期关注氮沉降对生物多样性的影响,研究认为人为活动导致的氮沉降增加降低了生物多样性,改变了植物群落结构,进而严重影响了生态系统的结构和功能^[12]。(4)2011年左右出现了 United States 一词,标志着研究区域扩大到国家层面。为遏制大气污染,各国相继实施了清洁空气行动计划,削减 SO₂、NO_x 等工业污染源排放,近年来欧美国家以及中国的氮沉降通量呈稳定或下降趋势,具体表现为大气氧化态氮沉降通量下降而还原态氮沉降通量上升^[2, 8]。目前,发达国家的氮沉降研究继续朝着网络化和系统化的方向发展,并开发和应用了适于不同空间尺度和精度需要的氮排放、传输和沉降模拟模型,为氮减量策略的制定提供科学依据^[8, 16]。

突现性较高的关键词是某个时期内频次变化率高的词,能够挖掘研究热点,反映研究前沿和趋势^[26]。通过 CiteSpace 的突现分析共获得 248 个关键词及名词性短语,合并相近意思的关键词及短语后,筛选突现性较高的前 20 个关键词及名词性短语如表 7 所示。由表 7 可知,Nitrogen(氮)是氮沉降领域出现的具有最高突现性的关键词(突现性为 29.02,持续时间 10 年),与之相关的关键词还包括 Nitrate(硝酸盐,突现性为 23.88,持

续时间 15 年)、Ammonium(铵,突现性为 15.91,持续时间 14 年)等。大气活性氮的化学形态包括无机氮和有机氮,无机氮又以还原态氮和氧化态氮形式存在。虽然全球氮沉降总量及其形态存在较大的空间变异性,但普遍认为社会经济结构的变化和对 NO_x 排放的控制共同推动了全球范围内还原态氮沉降的比例增加^[8]。不同的植物对于氮形态的需求存在差异,还原态氮沉降增加的趋势不可避免地影响了植物物种间的竞争平衡^[52–53]。Nitrogen addition(氮添加,突现性为 20.43,持续时间 4 年)、Acid deposition(酸沉降,突现性为 20.41,持续时间 13 年)、Atmospheric deposition(大气沉降,突现性为 12.62,持续时间 6 年)突现性相对较高。氮沉降对生态系统的影响是国内外学者一直关注的科学问题,其最直接的影响体现在陆地生态系统养分循环、植物生产力、植物多样性和土壤微生物多样性等方面^[12, 25]。早期氮沉降研究主要集中于北美和欧洲(Europe,突现性为 12.13,持续时间 17 年),20 世纪 80 年代在挪威云杉林(Picea aby,突现性为 12.23,持续时间 13 年)等地区建立了长期定位监测森林的氮沉降的研究网络,初步阐述氮沉降对森林生态系统(Forest ecosystem,突现性为 16.88,持续时间 10 年)的影响机制^[54]。大量氮添加实验表明,长期氮沉降导致植物多样性(Plant diversity,突现性为 17.16,持续时间 4 年;Vegetation,突现性为 13.86,持续时间 4 年)丧失^[36],增强了土壤硝化和反硝化过程^[25](Chemistry,突现性为 14.90,持续时间 18 年)、土壤酸化^[12](Acidification,突现性为 21.92,持续时间 15 年;Sulfate,突现性为 15.62,持续时间 11 年)以及氮饱和^[13](Saturation,突现性为 16.35,持续时间 6 年),改变了土壤微生物群落(Soil microbial community,突现性为 13.15,持续时间 3 年)结构和功能^[25]。随着研究的深入,氮沉降的生态效应也涉及苔原(Bryophyte,突现性为 13.41,持续时间 7 年)和灌丛(Heathland,突现性为 13.58,持续时间 18 年)等多种陆地生态系统类型,研究范围也从局地尺度向区域(Catchment 流域,突现性为 16.05,持续时间 9 年)和国家(Netherland,突现性为 15.72,持续时间 15 年)尺度扩展^[35]。突现性距今最近的 3 个关键词 Nitrogen addition(突现时间 2017—2021 年)、Plant diversity(突现时间 2018—2021 年)以

表 7 高突现性关键词

Table 7 Top burst value keywords

序号 Ordinal	关键词 Keywords	发表年份 Year	强度 Strength	开始年 Begin	结束年 End	1984—2021 From 1984 to 2021
1	氮 Nitrogen	1984	29.02	1992	2002	
2	硝酸盐 Nitrate	1984	23.88	1990	2005	
3	酸化 Acidification	1984	21.92	1990	2005	
4	氮添加 Nitrogen addition	1984	20.43	2017	2021	
5	酸沉降 Acid deposition	1984	20.41	1992	2005	
6	植物多样性 Plant diversity	1984	17.16	2017	2021	
7	森林生态系统 Forest ecosystem	1984	16.88	1996	2006	
8	饱和 Saturation	1984	16.35	1995	2001	
9	流域 Catchment	1984	16.05	1997	2006	
10	铵 Ammonium	1984	15.91	1990	2004	
11	荷兰 Netherland	1984	15.72	1991	2006	
12	硫酸盐 Sulfate	1984	15.62	1990	2001	
13	化学反应 Chemistry	1984	14.9	1987	2005	
14	植被 Vegetation	1984	13.86	2006	2010	
15	石南灌丛 Heathland	1984	13.58	1994	2012	
16	苔藓植物 Bryophyte	1984	13.41	2004	2011	
17	土壤微生物群落 Soil microbial community	1984	13.15	2018	2021	
18	大气沉降 Atmospheric deposition	1984	12.62	1999	2005	
19	挪威云杉林 Picea aby	1984	12.23	1994	2007	
20	欧洲 Europe	1984	12.13	1991	2008	

全部线段代表数据时间段 1984—2021,加粗线段表示关键词突现的时间段(起始年和结束年部分),未加粗线段表示关键词未突现的时间段(其他年份)

及 Soil microbial community(突现时间 2017—2021 年)表明,植物和土壤微生物协同响应氮添加的机制是当前氮沉降研究领域的前沿热点^[55]。此外, NO_x 和 NH_3 是大气重霾污染过程二次颗粒物形成或增长过程中的气态前体物, NO_x 和 NH_3 的排放强度影响了大气污染物的源汇关系、环境行为及生态效应,量化不同 NO_x 和 NH_3 排放源对氮沉降的贡献从而建立有针对性的有效减排措施也是目前氮沉降研究领域的前沿热点^[3]。

3 结论

本文以 1984—2021 年 Web of Science 核心数据库中有关大气氮沉降的 4996 篇论文为研究对象,运用文献信息可视化方法,从文献数量的年变化趋势、主要研究力量、学科分布以及研究热点与前沿分析研究了当前大气氮沉降研究的现状及趋势,得到以下结论:

(1)关于大气氮沉降的研究论文数量呈现出快速增长的趋势,美国的研究实力在世界各国中居于领先地位,中国的相关研究起步较晚,应加强与其他国家的合作;中国科学院、英国生态水文中心和瑞典农业科学大学等研究机构发文数量位居前三;Liu XJ、Mo JM、Verheyen K 等为核心作者群;*Atmospheric Environment*、*Global Change Biology*、*Science of the Total Environment* 以及 *Environmental Pollution* 等期刊为主要载体;学科领域涉及环境科学、生态学、气象学与大气科学等,体现出综合性和交叉性的特点。

(2)通过对高共被引文献以及高频和高突现性关键词的分析发现,大气氮沉降领域研究的核心内容为基于地面监测、大气化学传输模型和卫星遥感技术相结合的方法量化不同形态沉降氮通量,氮沉降对植物、土壤微生物以及生态系统地球化学循环(碳、氮、磷)的影响,基于稳定同位素技术的不同形态氮沉降化合物的溯源研究。

(3)区域和全球大尺度上不同形态氮排放以及氮素沉降动态的长期系统研究、植物和土壤微生物协同响应氮添加的机制、量化不同污染排放源对不同形态氮沉降化合物的贡献并在此基础上制定有针对性的减排策略是目前大气氮沉降领域的前沿热点。

4 展望

化石燃料大量燃烧和氮肥的广泛施用等人类活动正在全球范围内改变着氮素从大气向陆地和水生生态系统输入的方式和速率,氮沉降通量的增加成为影响生态系统结构和功能的重要全球变化因子。现有的大气氮沉降监测网络建立在不同的国家和地区,导致难以在全球范围内准确评估大气活性氮污染及氮沉降通量,亟待建立一套标准的校正体系以提高全球各观测网络数据的可比性。目前相关研究主要集中在无机氮沉降,对于有机氮沉降研究较少,造成了生态系统氮沉降风险的低估。因此,应建立开放的国家氮沉降监测网络开展干湿沉降中氮素特别是有机氮的研究。此外,氮沉降通量监测、氮沉降模型建立和环境影响评估等方面应开展更加广泛的国际合作。

目前关于氮沉降的生态效应研究多采用喷淋加氮实验,未考虑植物与大气活性氮的相互作用及干沉降过程,无法全面评估大气氮沉降对自然生态系统的真实影响。因此,亟待开展氮素干沉降对生态系统影响以及植物冠层对的氮沉降的截留效应研究,以期能更完整地评估大气氮沉降过程及其生态效应。

基于稳定同位素技术的氮素溯源研究方法展现了巨大的潜力,但受到氮同位素分馏效应和不同排放源的氮同位素源谱特征值的影响,导致溯源结果存在不确定性。因此,开展基于氮氧同位素($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}$)的大气铵盐和硝酸盐形成机制研究以及本地排放源的氮同位素源谱特征研究是氮沉降领域前沿方向,有助于实现氮污染物初始来源解析,为区域大气污染物的生态效应评估和减排策略的制定提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.

- [2] Wen Z, Xu W, Li Q, Han M J, Tang A H, Zhang Y, Luo X S, Shen J L, Wang W, Li K H, Pan Y P, Zhang L, Li W Q, Collett J L, Zhong B Q, Wang X M, Goulding K, Zhang F S, Liu X J. Changes of nitrogen deposition in China from 1980 to 2018. *Environment International*, 2020, 144: 106022.
- [3] Song W, Liu X Y, Hu C C, Chen G Y, Liu X J, Walters W W, Michalski G, Liu C Q. Important contributions of non-fossil fuel nitrogen oxides emissions. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 243.
- [4] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 闫慧敏, 李洁, 郭瑞, 钟秀丽. 1961—2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, Gowing D J. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [6] Gurnesa G A, Wang A, Li S L, Peng S S, de Vries W, Gundersen P, Ciais P, Phillips O L, Hobbie E A, Zhu W X, Nadelhoffer K, Xi Y, Bai E, Sun T, Chen D X, Zhou W J, Zhang Y P, Guo Y R, Zhu J J, Duan L, Li D J, Koba K, Du E Z, Zhou G Y, Han X G, Han S J, Fang Y T. Retention of deposited ammonium and nitrate and its impact on the global forest carbon sink. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 880.
- [7] 段娜, 李清河, 多普增, 汪季. 植物响应大气氮沉降研究进展. *世界林业研究*, 2019, 32(4): 6-11.
- [8] Ackerman D, Millet D B, Chen X. Global estimates of inorganic nitrogen deposition across four decades. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(1): 100-107.
- [9] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [10] Bouwman A F, Van Vuuren D P, Derwent R G, Posch M. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 141(1/4): 349-382.
- [11] 陈洁, 骆土寿, 周璋, 许涵, 陈德祥, 李意德. 氮沉降对热带亚热带森林土壤氮循环微生物过程的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(23): 8528-8538.
- [12] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman J W, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [13] Niu D C, Yuan X B, Cease A J, Wen H Y, Zhang C P, Fu H, Elser J J. The impact of nitrogen enrichment on grassland ecosystem stability depends on nitrogen addition level. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1529-1538.
- [14] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [15] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [16] 吴玉凤, 高霄鹏, 桂东伟, 刘学军. 大气氮沉降监测方法研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3605-3614.
- [17] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 吕金岭, 宋韦. 大气氮沉降研究进展. *干旱区研究*, 2012, 29(6): 972-979.
- [18] Wang H B, Shi G M, Tian M, Chen Y, Qiao B Q, Zhang L Y, Yang F M, Zhang L M, Luo Q. Wet deposition and sources of inorganic nitrogen in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 520-528.
- [19] 郭晓明, 金超, 孟红旗, 肖春艳, 张春霞, 赵同谦. 丹江口水库淅川库区大气氮湿沉降特征. *生态学报*, 2021, 41(10): 3901-3909.
- [20] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, Fang Y T, Zhu X Y, Gao M, Gao J, Michalski G, Wang Y S. Isotopic evidence for enhanced fossil fuel sources of aerosol ammonium in the urban atmosphere. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 942-947.
- [21] Yu G R, Jia Y L, He N P, Zhu J X, Chen Z, Wang Q F, Piao S L, Liu X J, He H L, Guo X B, Wen Z, Li P, Ding G A, Goulding K. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 424-429.
- [22] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Technical report: human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [23] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [24] 方海富, 冯为迅, 罗来聪, 高宇, 王佰慧, Nasir S, 魏启轩, 邹瑜, 苏思思, 张令. 氮沉降背景下土壤微生物对入侵植物乌柏叶绿素荧光特征的影响. *生态学报*, 2021, 41(23): 9377-9387.
- [25] Xu S Q, Liu X Y, Sun Z C, Hu C C, Wanek W, Koba K. Isotopic elucidation of microbial nitrogen transformations in forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35(12): e2021GB007070.
- [26] 张增可, 王齐, 吴雅华, 刘兴诏, 黄柳菁. 基于 CiteSpace 植物功能性状的研究进展. *生态学报*, 2020, 40(3): 1101-1112.
- [27] Chen C M. Searching for intellectual turning points: progressive knowledge domain visualization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(S1): 5303-5310.
- [28] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.

- [29] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. Citespace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [30] Goulding K W T. Nitrogen deposition to land from the atmosphere. *Soil Use and Management*, 1990, 6(2): 61-63.
- [31] Aber J D. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 1992, 7(7): 220-224.
- [32] Hurd T M, Brach A R, Raynal D J. Response of under-story vegetation of Adirondack forests to nitrogen additions. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(6): 799-807.
- [33] Morecroft M D, Sellers E K, Lee J A. An experimental investigation into the effects of atmospheric nitrogen deposition on two semi-natural grasslands. *Journal of Ecology*, 1994, 82(3): 475-483.
- [34] Gordon C, Wynn J M, Woodin S J. Impacts of increased nitrogen supply on high Arctic heath: the importance of bryophytes and phosphorus availability. *New Phytologist*, 2001, 149(3): 461-471.
- [35] 付伟, 武慧, 赵爱花, 郝志鹏, 陈保冬. 陆地生态系统氮沉降的生态效应: 研究进展与展望. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 475-493.
- [36] Yang G J, Hautier Y, Zhang Z J, Lü X T, Han X G. Decoupled responses of above- and below-ground stability of productivity to nitrogen addition at the local and larger spatial scale. *Global Change Biology*, 2022, 28(8): 2711-2720.
- [37] Fleischer K, Dolman A J, Molen M K, Rebel K T, Erisman J W, Wassen M J, Pak B, Lu X J, Rammig A, Wang Y P. Nitrogen deposition maintains a positive effect on terrestrial carbon sequestration in the 21st century despite growing phosphorus limitation at regional scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(6): 810-824.
- [38] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [39] Peng Y F, Peng Z P, Zeng X T, Hou J H. Effects of nitrogen-phosphorus imbalance on plant biomass production: a global perspective. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 245-252.
- [40] 严陶韬, 薛建辉. 中国生物多样性研究文献计量分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7879-7892.
- [41] 陈香, 李卫民, 刘勤. 基于文献计量的近 30 年国内外土壤微生物研究分析. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1458-1470.
- [42] 马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 孟晨, 倪细炉. 基于 CiteSpace 的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势. *生态学报*, 2020, 40(15): 5441-5449.
- [43] 周元慧, 胡刚, 张忠华, 陶旺兰, 王俊丽, 付瑞玉. 基于 Web of Science 的国际海草研究文献计量评价. *生态学报*, 2019, 39(11): 4200-4211.
- [44] 张超, 文涛, 张媛, 赵梦丽, 刘婷, 袁军, 沈其荣. 基于文献计量分析的镰刀菌枯萎病研究进展解析. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1280-1291.
- [45] Lebauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [46] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C E, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [47] Zhang Q, Li Y N, Wang M R, Wang K, Meng F L, Liu L, Zhao Y H, Ma L, Zhu Q C, Xu W, Zhang F S. Atmospheric nitrogen deposition: A review of quantification methods and its spatial pattern derived from the global monitoring networks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 216: 112180.
- [48] Guo W J, Ding J X, Wang Q T, Yin M Z, Zhu X M, Liu Q, Zhang Z L, Yin H J. Soil fertility controls ectomycorrhizal mycelial traits in alpine forests receiving nitrogen deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 161: 108386.
- [49] 陆晨东, 张六一, 夏利林, 王佳, 陈阳, 黄承桃, 杨复沫, 李廷真. 大气活性氮沉降临界负荷研究进展. *地球与环境*, 2021, 49(6): 750-756.
- [50] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗鸿. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. *生态学报*, 2002, 22(1): 94-103.
- [51] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [52] Kanakidou M, Myriokefalitakis S, Tsigaridis K. Aerosols in atmospheric chemistry and biogeochemical cycles of nutrients. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 063004.
- [53] Liu X Y, Koba K, Koyama L A, Hobbie S E, Weiss M S, Inagaki Y, Shaver G R, Giblin A E, Hobara S, Nadelhoffer K J, Sommerkorn M, Rastetter E B, Kling G W, Laundre J A, Yano Y, Makabe A, Yano M, Liu C Q. Nitrate is an important nitrogen source for Arctic tundra plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(13): 3398-3403.
- [54] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, McDowell W H, Nadelhoffer K J, Melillo J M, Steudler P. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 238-253.
- [55] Lu X F, Qin Z F, Lambers H, Tang S B, Kaal J, Hou E Q, Kuang Y W. Nitrogen addition increases aboveground silicon and phytolith concentrations in understory plants of a tropical forest. *Plant and Soil*, 2021, doi: 10.1007/s11104-021-05236-w.