

# 基于图谱可视化的中国大气氮沉降研究态势分析

李盼盼<sup>1</sup>, 王兵<sup>2</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>, 李彬彬<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部

水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 系统地探究近 10 a 中国大气氮沉降研究态势, 为今后的相关研究提供科学借鉴。[方法] 基于科学计量学与信息可视化分析方法, 借助 Citespace 软件, 从文献中分析近 10 a 中国大气氮沉降研究热点及趋势。[结果] 近 10 a 来, 在氮沉降背景下, 森林生态系统中凋落物分解与土壤微生物特征一直是研究热点; 近 5 a 草地生态系统的研究地区更加广泛, 但较少涉及林下草地; 碳氮循环相关研究多集中于温带及亚热带森林区, 研究内容更加丰富, 研究方法向大数据分析 & 模型建立方向发展; 大气氮沉降通量观测以水域生态系统为主, 近 5 a 来较多地结合了非点源污染及示踪技术。[结论] 近 10 a 来, 中国氮沉降领域各学科交叉性和系统性增强, 研究内容和尺度不断扩大, 研究方法和技术趋于多样化; 草地生态系统及微生物群落特征、氮沉降与全球变化及人类活动耦合关系研究成为近年来关注的热点。

**关键词:** 氮沉降; 研究热点; 研究趋势; Citespace

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0189-09

**中图分类号:** X142

**文献参数:** 李盼盼, 王兵, 刘国彬, 等. 基于图谱可视化的中国大气氮沉降研究态势分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 189-197. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 032; Li Panpan, Wang Bing, Liu Guobin, et al. Research trends analysis of atmospheric nitrogen deposition in China based on mapping visualization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 189-197. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 032

## Research Trends Analysis of Atmospheric Nitrogen Deposition in China Based on Mapping Visualization

LI Panpan<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>2</sup>, LIU Guobin<sup>1,2</sup>, LI Binbin<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Systematical study the research trends of atmospheric nitrogen deposition in last decade in China, in order to provide reference basis for relevant research. [Methods] The scientific metrology and information technology were used to visualize the patterns and trends of atmospheric nitrogen deposition in last decade in scientific literature by Citespace software. [Results] In the last decade, the effect of nitrogen deposition in forest ecosystem has been focused on the subjects of litter decomposition and soil microbial properties. Researches on the response of grass ecosystem to nitrogen deposition got increase significantly during 2005—2010. Regarding to the research of different ecosystems or sub-ecosystems, grass glade was not attracted as much attention as grassland. In addition, processes of carbon and nitrogen cycles were concentrated on the temperate zone and subtropical zone, and the research content becomes more abundant at present, and the methods are expected to promote the developments of big data analysis and modelling. In respect of the observation of nitrogen deposition flux, most studies referred to aquatic ecosystems. Moreover, nitrogen

收稿日期: 2017-01-07

修回日期: 2017-03-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤有效 N 升高对白羊草群落特征及土壤侵蚀过程的影响机制”(41471438); 陕西省引进博士专项配套经费(Z111021504); 水保所青年人才择优项目“植被恢复对土壤侵蚀过程的影响机制”(A315021442)

第一作者: 李盼盼(1992—), 女(汉族), 山东省德州市, 硕士, 研究方向为流域生态。E-mail: lipanpan2014050769@163.com。

通讯作者: 刘国彬(1958—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域治理与恢复研究。E-mail: gblu@ms. iswc.ac.cn。

deposition flux with non-point source pollution got more attention due to the environmental degradation and the development of research methods. [Conclusion] The interdisciplinary and systematicness of atmosphere nitrogen deposition in China were getting enhanced gradually. And the research contents and scale were gradually getting associated and widened. Grass ecosystem, characteristic of microbial community and coupling relationship among nitrogen deposition, global climate change and human activities had attracted more attention in the last decade.

**Keywords: nitrogen deposition; research hotspot; research trends; Citespace**

大气氮沉降指含氮化合物( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $NH_4^+$ ,  $N_2O$  等)由地表排放源排放至大气中,再经过大气转化与大气环流作用,大约 60%~80% 的氮素从大气中移除又降落回地表(或植物冠层)的复杂耦合过程<sup>[1]</sup>。全球每年沉降到陆地生态系统的活化氮达 43.47 Tg/a(以 N 计),沉降到海洋表面的活化氮达 27 Tg/a(以 N 计),至 20 世纪 90 年代中期,由人类活动产生的活性氮已达到 165 Tg/a(以 N 计),较 19 世纪中期增加了 11 倍,是全球氮素临界负荷的 1.6 倍<sup>[2-4]</sup>。大气氮沉降量的急剧变化将严重影响陆地及水生生态系统的生产力和稳定性<sup>[5]</sup>,因而成为各国科学家和公众广泛关注的议题。

国外有关大气氮沉降的研究始于英国洛桑试验站,该站自 1843 年建立起,一直对生态系统氮循环进行研究<sup>[2]</sup>。继洛桑试验站之后,各地的零散监测陆续增多,而系统化、网络化的研究直至 20 世纪 70 年代才初见端倪<sup>[1]</sup>。联合国欧洲经济委员会(united nations economic commission for europe, UNECE)于 1984 年正式通过了“欧洲监测与评价规划”(european monitoring and evaluation programme, EMEP),执行 25 个缔约国于 1979 年签署的“长程跨界空气污染公约”(convention on long-range transboundary air pollution, CLRTAP),以应对空气污染物长程输移等问题。目前已有 40 个 UNECE 国家的超过 200 个监测站参与该项目。1980 年,美国国会通过“酸沉降法案”,确立 10 a 研究计划—“国家酸雨评估规划”(national acid precipitation assessment programme, NAPAP),以调查二氧化硫和氮氧化物等污染物的排放情况及酸沉降的起因与影响<sup>[6]</sup>,这 2 项被公认为空气污染防治里程碑式的规划。随后,各国都先后建立起全国性或跨国界的大气沉降监测网络,如加拿大的空气与降水监测网(CAPMON)、日本的东亚酸沉降网(EANET)等<sup>[7]</sup>。近期,为全方位评估欧盟 27 国由于氮素过量输入而引发的生态与经济损害,来自 89 个国际组织,21 个国家的 200 位专家以大洲为研究尺度,共同撰写了《The European Nitrogen Assessment》,这也是迄今为止最为系统的氮评估报告<sup>[1]</sup>。

中国的氮沉降研究起步较晚,发展进程相对滞

后。改革开放以来,由于中国能源和粮食消耗的迅速增加,导致氮沉降量迅速激增。鲁如坤等<sup>[8]</sup>于 20 世纪 70 年代末,通过对浙江金华地区雨水中养分含量的测定,开启了国内氮沉降的研究进程。进入 80 年代,针对局部地区降水中大气含氮化合物的定量研究逐渐增多<sup>[9]</sup>。90 年代末,国家环保部、中国气象局开始独立运作超过 300 个氮沉降监测网络。1999 年,中国 4 座城市(厦门、西安、重庆、珠海)加入了东亚酸沉降监测网。2004 年起,中国农业大学组织建立了涵盖 40 个监测点的全国性氮沉降监测网络(national nitrogen deposition monitoring network, NNDMN),涵盖了农田、草原、森林、城市等生态系统,以更加全面系统地检测各生态系统的氮沉降状况<sup>[1]</sup>。

目前,国内有关大气氮沉降的诸多文献对推动大气氮沉降的研究具有重要意义。但是,面对庞大的文献群,文献阅读、总结归纳的传统方法存在明显的局限性,如方华军等<sup>[10]</sup>、郑利霞等<sup>[11]</sup>仅就大气氮沉降的某个方面进行了综述,其参考价值也取决于研究者自身的研究水平,无法客观、全面地反映该领域的发展脉络以及研究趋势。目前,科学计量学与信息计量学的迅速发展,为大数据可视化研究提供了可靠的途径,同时也弥补了传统文献综述的不足。美国德雷塞尔大学陈超美教授于 2004 年首次推出基于 Java 环境的引文网络分析工具 Citespace,主要用于科学文献数据计量分析,表明科学发展趋势与动态,具有准确高效的特点。但 Citespace 软件只能勾勒出研究领域的概况,无法提供深入的文献细节,所以本研究拟依据软件的分析结果,结合对文献的批判性阅读,进一步系统梳理该领域的研究内容,从而分析中国大气氮沉降研究态势,为今后的研究提供一些借鉴和启示。

## 1 研究方法 with 数据获取

### 1.1 研究方法

通过分析近 10 a 来不同时段中国大气氮沉降研究文献的关键词共现图谱,来识别和聚类相关研究领域,同时对不同时段高频关键词及其中介中心性进行比对研究,对国内该领域发表的中英文文献进行批判性阅读并系统梳理,进而归纳近 10 a 来中国大气氮

沉降研究态势。在本研究中,Citespace V 参数设置具体如下:时间段分别为 2005—2010,2011—2016 年 2 个时段,以 1 a 为时间切片,节点类型分别选择关键词,文献选取标准为每个时间切片内出现频次前 100 的关键词进行图谱绘制,选择最小生成树作为图谱剪枝方式。

### 1.2 数据获取

本文所使用的数据来源于 Web of Science (WOS)核心数据库和中国知网(CNKI)核心期刊库及硕博论文库。数据采集时间为 2016 年 11 月 21 日,中文检索条件为:关键词为“氮沉降”或“氮添加”,英文文献检索条件为:主题词为“nitrogen deposition”或“nitrogen addition”。将所检索到的文献进行数据清洗,排除无效文献,最终共检索出 912 条中文文献和 867 条英文文献,每份文献包括了标题、作者、摘要、关键词、参考文献等信息。

## 2 结果与分析

### 2.1 全球大气氮沉降研究概况

进入 20 世纪 90 年代以来,国际上对大气氮沉降的研究热度不断升高,相关研究文献逐年增多(图 1)。全球大气氮沉降研究主要集中在欧洲、北美洲和亚洲,且以欧洲和北美洲研究较多。对比典型国家发文数量,发达国家尤其是美国等较早开展了大气氮沉降研究。中国大气氮沉降中文和英文研究文献的发表基本同步,且在 2005 年之后开始进入较快的发展期,到 2013 年后,进入高速发展阶段。根据 Web of Science 数据库给出的该领域主要研究方向可以看出,全球大气氮沉降主要研究方向为环境科学领域,而植物科学和农业科学研究相对较少,相对于全球大气氮沉降研究方向来说,中国大气氮沉降关于环境科学方向的研究增长迅速,紧随其后的是农业科学方向,说明中国大气氮沉降研究在注重环境科学领域研究的同时,也开展了对农业方向的研究。

### 2.2 中国大气氮沉降研究态势分析

采用信息可视化软件 CitespaceV 综合定量分析了中国大气氮沉降 2005—2010,2011—2016 年发表的中英文文献,以可视化的图像直观地展现出中国大气氮沉降近 10 a 来的热点领域与研究趋势,分析比较 2 个时段的高频关键词和图谱特征结果表明,同一时段的研究内容相似,但是研究热点略有不同;且中国大气氮沉降还处于基础研究阶段,对各方面内容的研究还不够系统化。本研究采用中介中心性来衡量关键词的重要性。中介中心性高的关键词可能成为图谱网络中由一个研究向另一个研究过渡的关键

节点,这类关键词也可能成为当下或未来的研究热点。

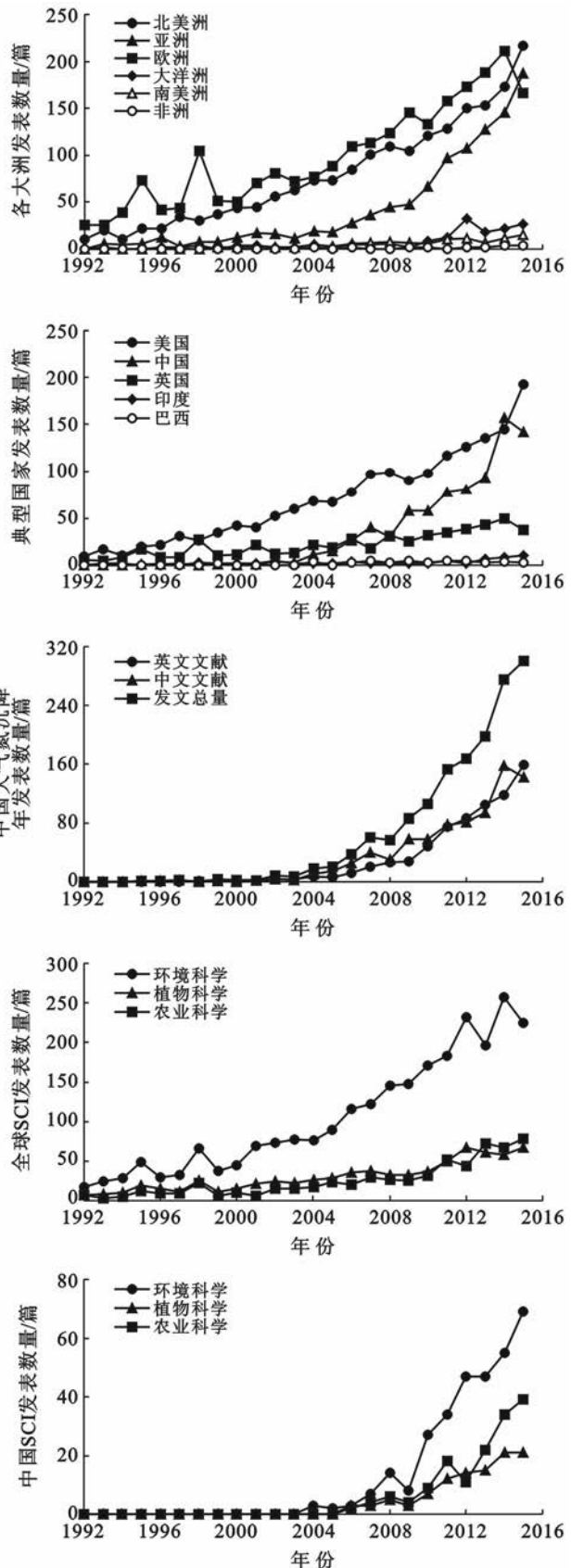


图 1 大气氮沉降研究发文数量特征

综合比较不同时段中国大气氮沉降的中英文文献关键词可以发现(表 1),在 2005—2010 年,具有高中介中心性的中文关键词有杉木人工林(0.22)、湿沉降(0.24)、陆地生态系统(0.51)、酸沉降(0.28)、凋落物(0.27),同时段高中介中心性的英文关键词有 precipitation(0.56), elevated CO<sub>2</sub> (0.54), atmosphere CO<sub>2</sub> (0.44);2011—2016 年,具有高中介中心性的关键词有土壤呼吸(0.33)、凋落物(0.67)、凋落物分解(0.3)、土壤酶活性(0.74)、常绿阔叶林(0.86)、全球变化(0.22)、气候变化(0.25)、森林土壤(0.61),同时

段高中介中心性的英文关键词有 climate change (0.43), terrestrial ecosystem (0.52), diversity (0.42), elevated CO<sub>2</sub> (0.86), litter decomposition (0.54), microbial biomass (0.67), tropical forest (0.23), soil respiration (0.25), forest soil (0.96)。通过以上高频且高中介中心性关键词可以发现,森林土壤、凋落物分解、陆地生态系统及土壤呼吸一直是国内大气氮沉降的研究热点,而微生物、酶活性、全球变化、亚热带森林、生物多样性是近几年热度迅速上升的关键词。

表 1 近 10 a 中国大气氮沉降中英文文献前 20 位高频关键词

2005—2010 年文献		2011—2016 年文献	
中文	英文	中文	英文
凋落物分解(15, 0.03)	precipitation(13, 0.56)	土壤呼吸(25, 0.33)	climate change(101, 0.43)
大气氮沉降(11, 0.21)	ecosystem(13, 0.01)	凋落物(17, 0.67)	terrestrial ecosystem(93, 0.52)
杉木人工林(8, 0.22)	elevated CO <sub>2</sub> (13, 0.54)	凋落物分解(14, 0.3)	ecosystem(90, 0)
土壤呼吸(6, 0.15)	growth(13, 0.02)	模拟氮沉降(13, 0.5)	fertilization(68, 0.07)
湿沉降(4, 0.24)	litter decomposition(12, 0.01)	湿沉降(12, 0.2)	carbon(68, 0.05)
森林土壤(4, 0)	dynamics(12, 0.01)	土壤微生物(10, 0.06)	grassland(60, 0.02)
有机碳矿化(4, 0.04)	grassland(11, 0.13)	土壤酶活性(8, 0.74)	organic matter(58, 0.6)
陆地生态系统(4, 0.51)	climate change(11, 0.07)	土壤酶(8, 0.16)	precipitation(52, 0.05)
氮含量(3, 0)	terrestrial ecosystem(10, 0)	干沉降(8, 0.12)	diversity(52, 0.42)
酸沉降(3, 0.28)	carbon(10, 0.29)	光合作用(8, 0.01)	response(52, 0)
华西雨屏区(3, 0.01)	inorganic nitrogen(9, 0.01)	生物量(7, 0.01)	soil(50, 0)
土壤养分(3, 0.05)	plant(8, 0)	杨树人工林(7, 0.01)	litter decomposition(50, 0.54)
N <sub>2</sub> O 排放(3, 0)	temperate forest(8, 0)	有机碳(6, 0.01)	elevated CO <sub>2</sub> (49, 0.86)
硝态氮(3, 0.13)	soil(7, 0)	多样性(6, 0.17)	microbial bioma(48, 0.67)
林木养分(3, 0.16)	atmospheric CO <sub>2</sub> (7, 0.44)	功能群(6, 0.05)	Inner Mongolia(48, 0)
杉木幼龄林(3, 0.04)	dry deposition(7, 0.15)	常绿阔叶林(6, 0.86)	growth(46, 0)
养分释放(3, 0)	wet deposition(6, 0.01)	全球变化(5, 0.22)	tropical forest(45, 0.23)
凋落物(3, 0.27)	agroecosystem(6, 0.01)	气候变化(5, 0.25)	forest ecosystem(41, 0.05)
全球变化(3, 0.03)	South China(6, 0)	森林土壤(5, 0.61)	soil respiration(41, 0.25)
模拟氮沉降(3, 0.09)	organic matter(6, 0.01)	光合特性(5, 0.09)	forest soil(39, 0.96)

注:每个关键词后括号内的数字依次分别是频数和中心性。

### 2.3 中国大气氮沉降 2005—2010 年阶段研究态势

2005—2010 年,根据中文文献和英文文献图谱特征,中国大气氮沉降研究可以划分为 5 个聚类领域。一是氮沉降对森林凋落物分解养分释放及土壤呼吸的影响研究,二是关于大气氮沉降通量观测研究,三是关于氮沉降与生态系统碳氮循环的研究,四是关于大气酸沉降及其对土壤理化性质的影响研究,五是关于氮沉降对草地生态系统的影响研究。具体研究内容包括以下方面:

#### (1) 氮沉降对森林凋落物分解、养分释放及土壤

呼吸的影响研究。凋落物是植物生态系统碳库和养分库的主要组成部分,其分解是森林生态系统的重要过程。该时段国内学者针对大气氮沉降的研究主要为森林凋落物分解、养分释放、土壤呼吸等对不同梯度氮添加的响应,且集中在四川省西南部的华西雨屏区、福建省沙县的杉木人工林等地区<sup>[12]</sup>。国际上有关氮沉降对森林凋落物分解影响的研究开始于 20 世纪 80 年代初<sup>[13]</sup>,而中国对于此方面的研究稍晚且尚处于起步阶段<sup>[14]</sup>。凋落物在分解过程中元素发生迁移,最终养分释放到土壤中以供植物生长利用,但目前关

于氮沉降对养分释放影响的研究较少<sup>[15]</sup>。氮沉降通过增加土壤中氮素的输入及影响凋落物分解和养分释放进而影响微生物活性等方式,从而对土壤呼吸产生一定的作用,同样表现为促进、无影响和抑制 3 种作用<sup>[16]</sup>。

(2) 大气氮沉降通量观测研究。欧美等国开展大气氮沉降通量观测较早<sup>[2]</sup>,且已由分散观测发展为定位研究,其研究内容、范畴和技术取得长足发展<sup>[17]</sup>,中国对大气氮沉降化学组成及通量的研究开始于 20 世纪中期,迄今为止研究方法较零散。在该阶段,中国诸多学者陆续开始了对水域生态系统<sup>[18]</sup>、农田生态系统<sup>[19]</sup>、森林生态系统<sup>[20]</sup>的大气氮沉降化学组成和通量等展开研究。由于中国生态系统类型多样,而氮沉降的空间变异性较大,因此在该阶段诸多学者对不同观测方法进行了讨论和实践<sup>[21-22]</sup>。苔藓植物特殊的形态构造和生物学特性使其对大气物质相当敏感,但在该阶段苔藓植物与氮同位素示踪技术结合对大气氮沉降的研究在国内开展甚少<sup>[23]</sup>。今后应在在氮沉降通量观测、示踪的基础上,科学地制定酸沉降控制政策,建立临界负荷标准,对保护生态系统及其物种组成有重要意义,同时可为政府采取有效的酸雨防治对策和措施提供科学依据<sup>[24]</sup>。

(3) 关于氮沉降与陆地生态系统碳氮循环的研究。氮沉降通过改变植物叶片的光合作用、土壤微生物活动以及土壤呼吸作用,进而影响碳汇等一系列过程。该阶段主要关注了碳、氮转化对大气氮沉降的响应<sup>[25]</sup>,且主要集中在温带森林地区<sup>[26]</sup>,少部分研究也关注了草甸生态系统<sup>[27]</sup>。但该阶段对碳、氮转化过程的机理研究还相对缺乏。

(4) 关于大气酸沉降对土壤理化性质的影响研究。土壤是酸沉降物的最大接受者,土壤遭受了持续的酸沉降后其物理化学性质发生变化,造成土质恶化,使正常生态系统失去平衡,而且,这种变化常常是不可逆的<sup>[28]</sup>。该时段重点关注大气酸沉降对土壤理化性质的影响。主要研究区域为中国西南部地区,土壤类型主要为红壤及黄壤,研究方法主要以模拟酸沉降及土壤相关指标测量分析为主,涉及的主要是土壤养分特征,pH 值、盐基饱和度的变化及重金属离子释放特征。研究结果表现在酸沉降使土壤 pH 值下降,交换性酸含量,尤其是交换性  $Al^{3+}$  增加,交换性盐基离子含量减少,盐基饱和度下降<sup>[29]</sup>。而利用试验分析数据、遥感数据和气象数据,将所有信息进行整合构

建模型成为较新型的研究方向<sup>[30]</sup>。

(5) 关于氮沉降对草地生态系统的影响研究。该时段关于氮沉降对草地生态系统的影响的研究较少,研究地区主要为中国北方,集中在内蒙古草原、科尔沁沙地及天山地区<sup>[31]</sup>。研究方法主要是氮素添加模拟氮沉降,氮源多为  $NH_4NO_3$ 。研究方向大多与增温、水分控制、刈割等相结合,研究内容涉及草地初级生产力及多样性,土壤微生物特征,土壤呼吸,土壤养分特征(如有机质含量、磷含量、氮矿化)等<sup>[32]</sup>。

## 2.4 中国大气氮沉降 2011—2016 年阶段研究态势

2011—2016 年,该领域的研究同样划分为 5 个聚类领域。一是关于大气氮沉降通量观测研究,二是氮沉降对森林生态系统影响的研究,三是关于氮沉降对草地生态系统的影响研究,四是关于氮沉降与生态系统碳氮循环的研究,五是关于微生物群落特征的研究。具体研究内容如下:

(1) 关于大气氮沉降通量观测研究。该时段关于大气氮沉降通量的研究区域主要集中在在中国东南部及东部等近海地区,而对西南部的关注较少,而对于西北部的研究尚存在较大的空白<sup>[33]</sup>。研究方法仍以原位观测降水及大气中的氮素沉降速率和浓度,进而计算大气氮沉降通量为主<sup>[34]</sup>。研究对象与上一时段类似,主要以河流湖泊等水体生态系统为主,还涉及森林、农田生态系统,而对于草地生态系统的研究很少<sup>[35]</sup>。研究内容结合非点源污染,倾向于大气氮湿沉降的化学研究,而对干沉降的专门研究涉及较少;且对无机活性氮的关注仍然高于有机活性氮<sup>[36]</sup>。该时段有关氮同位素示踪技术得到一定应用,但技术仍不成熟<sup>[37]</sup>。今后应不断完善研究手段,加强有机氮及干沉降通量的监测,综合同位素示踪、模型推算、遥感等技术手段,扩大监测范围,形成全国范围的长期监测网,并建立开放的数据库,以便制定更有效的环境改善方案。

(2) 关于氮沉降对森林生态系统的影响研究。该时段有关氮沉降对森林生态系统的研究主要集中在在中国南部、东南部的亚热带森林及中国东北部的温带森林<sup>[38]</sup>。该时段对森林生态系统氮通量及植物生理生态特征的单一研究较少,主要集中在凋落物分解,微生物群落特征,土壤中可溶性物质含量及变化,碳、氮转化,且对于氮沉降与养分(如磷元素)限制及温室气体( $CH_4$ ,  $N_2O$  等)排放结合的研究也相对较多<sup>[39]</sup>。研究方法仍以原位施氮模拟氮沉降为主,且模

拟氮源主要为无机活性氮,而对于有机活性氮的研究仍相对较少<sup>[38]</sup>。今后可加强有关同位素示踪在碳氮循环研究中的应用,以更加明确其中的过程及机理,同时可进行时间和空间尺度的拓展,进行长期定位监测,扩大研究区域,建立更为系统的数据库<sup>[40]</sup>。

(3) 关于氮沉降对草地生态系统的影响研究。该阶段有关氮沉降对草地生态系统影响的研究区域重点在中国北部及东北部的内蒙古典型草原及松嫩平原<sup>[41]</sup>,与上阶段相比,有关高寒草甸(青藏高原等地区)及黄土高原地区的关注度也在逐渐上升<sup>[42]</sup>。研究方法以野外原位施氮模拟氮沉降为主。由于全球变化及人类活动对草地生态系统的影响日益增大,因此该时段的研究内容多与全球气候变化(气候变暖、降水量变化、温室气体排放)及人类活动(放牧、刈割等)有关,主要为草地植被的群落特征,土壤微生物特征,生态系统碳循环、氮周转及土壤养分特征等<sup>[43]</sup>。且关于枯落物和氮沉降对草地生态系统的研究是该阶段的新兴方向<sup>[44]</sup>。而目前有关林下草地植被的研究甚少,今后应加强对该部分空缺的关注<sup>[45]</sup>。

(4) 关于大气氮沉降对陆地生态系统碳循环影响研究。目前氮沉降以及人为氮输入对陆地生态系统碳循环的影响研究依然是目前四大碳汇机制研究最为薄弱的环节<sup>[46]</sup>。该阶段针对氮沉降对陆地生态系统碳循环的研究主要集中在森林生态系统(亚热带森林和部分温带森林),对草地和湿地的研究也开展了部分相关研究,而对农田生态系统的研究相对较少<sup>[46]</sup>。研究方法中以大数据整合分析及模型建立发展较快,而长期持续的试验数据较少,研究内容多与氮沉降背景下细根及凋落物分解,植被及土壤碳储量,土壤温室气体排放或吸收通量相关<sup>[47]</sup>,而针对土壤有机碳组分的研究较少。今后的研究应向微观和宏观两方面拓展,一方面应更加细致地探究循环机理,另一方面应利用遥感数据扩大研究尺度,并根据不同标准(如土壤是否处于氮饱和状态)将不同区域的植被类型划分,分别建立各自的碳循环模型,以便更加准确的掌握不同生态系统的碳收支情况,为生态系统保护提供科学依据。

(5) 关于氮沉降对微生物群落特征影响研究。该时段关于氮沉降对微生物群落特征影响的研究主要集中在森林生态系统和农田生态系统,而对草地生态系统的研究相对较少<sup>[48]</sup>。研究方法以野外添加无机氮为主,而对有机氮的研究还鲜有报道,且与全球变化的结合研究尚不足。研究内容主要为微生物群落组成结构及多样性,微生物生物量,微生物碳氮源

的利用及酶活性等<sup>[49]</sup>。目前有关沙漠生态系统微生物研究及各生态系统微生物分子水平、影响机制的系统性研究还比较缺乏<sup>[50]</sup>。

## 2.5 中国大气氮沉降研究趋势

表 2 为关键词突现指标。关键词突现是指在一定时间阶段内该关键词大量出现,表现了学者对该领域的关注,而突现强度则表现了其受关注的强度,开始年份和结束年份说明了该关键词突现的时间长度,时间越长,说明受关注越久。从表 2 中可以发现,从 2005—2016 年国内大气氮沉降的研究经历了快速的过渡阶段,这表明国内关于大气氮沉降研究近几年所关注的范围越来越广,且发展速度较快。从早期对农业生态系统、碳通量观测、无机氮、中国南部亚热带森林地区等过渡到对土壤呼吸、碳汇、微生物量、可溶性有机碳的研究。大气氮沉降对碳汇的影响则一直是学者关注的热点领域。近几年,除了对中国南部亚热带地区氮沉降研究继续深入以外,内蒙古草原等中国北部地区及青藏高原地区的草原及草甸地区也受到关注,成为研究热点地区。

## 3 讨论与结论

(1) 2005—2016 年,氮沉降领域的研究内容及主题关联性和系统性增强,由第一阶段内容主题的衔接交叉性弱,聚类分散的研究发展到后期的主题鲜明,关联紧密,学科交叉性强的系统研究。今后应继续加强学科之间的交叉互动,增强氮沉降领域的基础理论研究,完善全球变化的学科体系。

(2) 氮沉降领域的研究热点内容及发展态势日益突出。近 10 a 来,氮沉降对森林生态系统和碳循环的研究一直处于高度关注水平,同时,对碳循环贡献极大的微生物群落特征及酶活性也成为热点。且近几年来草地生态系统也逐渐引起学者的重视,有望成为今后的研究热点。

(3) 由于全球气候变化及人类活动问题的日益严重,因此有关氮沉降与增温、增雨、温室气体排放及放牧等研究方向的结合逐渐增多,有利于更加系统地解释全球气候变化对陆地及海洋生态系统的影响,为今后保护环境措施的发展方向提供依据。

(4) 氮沉降问题在中国各地区普遍存在,因此,中国有关氮沉降的研究区域也在不断扩大,由原来主要为亚热带及温带地区扩展到高寒及沙漠地区,所涉及的生态系统类型更为全面,有利于更有针对性地了解氮沉降所带来的影响,以更有效地制定相应的生态系统保护措施。

表 2 2005—2016 年中国大气氮沉降研究关键词突现指标

关键词	突现强度	开始年份	结束年份	2005—2016 年
European forest(欧洲森林)	2.8403	2006	2009	○●●●●○○○○○○○
agroecosystem(农业生态系统)	3.2747	2006	2012	○●●●●●●○○○○○
transport(转运)	3.133	2007	2011	○○●●●●●○○○○○
nitrate(硝酸盐)	3.3334	2008	2011	○○○●●●●○○○○○
inorganic nitrogen(无机氮)	6.0726	2008	2013	○○○●●●●●○○○○
Subtropical China(南亚热带)	2.7141	2008	2009	○○○●●○○○○○○○
delta n 15(δ 氮 15)	3.5833	2009	2011	○○○○●●●○○○○○
ammonia(氨)	2.8557	2009	2011	○○○○●●●○○○○○
nitrogen(氮)	2.9761	2009	2010	○○○○●●○○○○○○○
south China(华南)	4.0651	2009	2011	○○○○●●●○○○○○
primary productivity(初级生产力)	2.9836	2009	2010	○○○○●●○○○○○○○
organic nitrogen(有机氮)	2.721	2010	2011	○○○○○●●○○○○○
photosynthesis(光合作用)	3.792	2010	2012	○○○○○●●●○○○○○
impact(影响)	2.9677	2011	2012	○○○○○○●●○○○○○
soil microbial bioma(土壤微生物量)	2.6934	2011	2013	○○○○○○●●●○○○
water(水分)	3.9283	2011	2013	○○○○○○●●●○○○
phosphatase activity(磷酸酶)	2.8189	2012	2013	○○○○○○○●●○○○
mineralization(矿化作用)	3.1126	2012	2013	○○○○○○○●●○○○
management(管理)	3.7608	2012	2013	○○○○○○○●●○○○
nutrient limitation(营养限制)	2.9901	2012	2012	○○○○○○○●○○○○○
chemical composition(化学组成)	3.0659	2012	2013	○○○○○○○●●○○○
respiration(呼吸作用)	5.888	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
storage(储存)	3.0438	2013	2016	○○○○○○○○●●●●●
microbial bioma(微生物量)	3.8889	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
temperature sensitivity(温度敏感)	3.3487	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
model(模型)	2.8863	2013	2013	○○○○○○○○●○○○○○
subtropical forest(亚热带森林)	2.666	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
addition(添加)	3.3751	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
wetland(湿地)	2.9292	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
terrestrial ecosystem(陆地生态系统)	2.8863	2013	2013	○○○○○○○○●○○○○○
phosphorus limitation(磷限制)	3.3487	2013	2014	○○○○○○○○●●○○○
dissolved organic carbon(水溶性有机碳)	3.4541	2013	2013	○○○○○○○○●○○○○○
competition(竞争)	2.6288	2014	2016	○○○○○○○○○●●●●
nitrogen deposition(氮沉降)	3.4475	2014	2016	○○○○○○○○○●●●●
southern China(华南)	4.0717	2014	2016	○○○○○○○○○●●●●
critical load(临界荷载)	2.5976	2014	2016	○○○○○○○○○●●●●
plant diversity(植物多样性)	3.5253	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●
Inner Mongolia(内蒙古)	3.6532	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●
northern China(华北)	2.8493	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●
net primary productivity(净初级生产力)	3.5696	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●
species richness(物种丰度)	2.6277	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●
biodiversity loss(生物多样性丧失)	2.8008	2015	2016	○○○○○○○○○○●●●

注:●表示突现年份;○表示不突现年份。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 常运华,刘学军,李凯辉,等. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究,2012,29(6):972-979.

[2] Goulding K, Bailey N J, Bradbury N J, et al. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes[J]. New Phytologist, 1998,139(1):49-58.

[3] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. A Journal of the Human Environment, 2002,31(2):64.

[4] Kaiser J. Environmental policy: The other global pollutant: Nitrogen proves tough to curb[J]. Science, 2001,

- 294(5545):1268-1269.
- [5] van Breemen N. Natural organic tendency[J]. Nature, 2002,415(6870):381-382.
- [6] 刘文竹,王晓燕,樊彦波. 大气氮沉降及其对水体氮负荷估算的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2014,36(5):88-93.
- [7] Fagerli H, Aas W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980—2003 [J]. Environmental Pollution, 2008,154(3):448-461.
- [8] 鲁如坤,史陶钧. 金华地区降雨中养分含量的初步研究[J]. 土壤学报,1979,16(1):81-84.
- [9] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究,2010,23(5):527-532.
- [10] 方华军,程淑兰,于贵瑞,等. 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展[J]. 土壤学报,2015,52(2):262-271.
- [11] 郑利霞,刘学军,张福锁. 大气有机氮沉降研究进展[J]. 生态学报,2007,27(9):3828-3834.
- [12] 李仁洪,胡庭兴,涂利华,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(11):2588-2593.
- [13] Emmett B A, Boxman D, Bredemeier M, et al. Predicting the Effects of Atmospheric Nitrogen Deposition in Conifer Stands: Evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments[J]. Ecosystems, 1998,1(4):352-360.
- [14] Mo Jiangming, Brown S, Xue Jinghua, et al. Response of litter decomposition to simulated n deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2006,282(1/2):135-151.
- [15] 宋学贵,胡庭兴,鲜骏仁,等. 川西南常绿阔叶林凋落物分解及养分释放对模拟氮沉降的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(10):2167-2172.
- [16] 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林凋落物分解、土壤酶活性和土壤呼吸的影响[D]. 四川雅安:四川农业大学,2010.
- [17] Clarke J F, Edgerton E S, Martin B E. Dry deposition calculations for the clean air status and trends network [J]. Atmospheric Environment, 1997,31(21):3667-3678.
- [18] 石金辉,高会旺,张经. 大气有机氮沉降及其对海洋生态系统的影响[J]. 地球科学进展,2006,21(7):721-729.
- [19] 王体健,刘倩,赵恒,等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究[J]. 土壤学报,2008,45(2):280-287.
- [20] 樊建凌,胡正义,庄舜尧,等. 林地大气氮沉降的观测研究[J]. 中国环境科学,2007,27(1):7-9.
- [21] 王志辉,张颖,刘学军,等. 黄土区降水降尘输入农田土壤中的氮素评估[J]. 生态学报,2008,28(7):3295-3301.
- [22] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. 生态学报,2006,26(6):1633-1639.
- [23] Liu Xueyan, Xiao Huayun, Liu Congqiang, et al.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of moss *Haplocladium microphyllum* (Hedw.) broth. for indicating growing environment variation and canopy retention on atmospheric nitrogen deposition [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(23):4897-4907.
- [24] Bobbink R, Roelofs J G M. Nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: The empirical approach[J]. Water, Air & Soil Pollution, 1995,85(4):2413-2418.
- [25] 涂利华. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹人工林生态系统碳循环过程和特征的影响[D]. 四川雅安:四川农业大学,2011.
- [26] 汪金松. 模拟氮沉降对暖温带油松林土壤碳循环过程的影响[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [27] 吕琳玉. 大气氮沉降对海北高寒草甸生态系统碳循环的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [28] 周修萍,江静蓉,梁伟,等. 模拟酸雨对南方五种土壤理化性质的影响[J]. 环境科学,1988,9(3):6-12.
- [29] 吴甫成,彭世良,王晓燕,等. 酸沉降影响下近 20 年来衡山土壤酸化研究[J]. 土壤学报,2005,42(2):219-224.
- [30] 白晓辉,张晶,杨胜天,等. 酸沉降对森林生长固碳和土壤盐基保持功能的影响[J]. 环境科学学报,2010,30(01):44-51.
- [31] Zhu Cheng, Ma Yiping, Wu Honghui, et al. Divergent effects of nitrogen addition on soil respiration in a semi-arid grassland[J]. Scientific Reports, 2016,6:33541.
- [32] Zeng Dehui, Li Lujun, Fahey T J, et al. Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland[J]. Biogeochemistry, 2010,98(1/2/3):185-193.
- [33] Xu Wen, Luo Xiaosheng, Pan Yuepeng, et al. Quantifying atmospheric nitrogen deposition through a nationwide monitoring network across China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(21):12345-12360.
- [34] 崔键. 典型红壤农田区大气氮沉降通量研究[D]. 南京:南京师范大学,2011.
- [35] Hu Zhujun, Anderson N J, Yang Xiangdong, et al. Catchment-mediated atmospheric nitrogen deposition drives ecological change in two alpine lakes in SE Tibet [J]. Global Change Biology, 2014,20(5):1614-1628.
- [36] 盛文萍,于贵瑞,方华军,等. 离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量:以千烟洲人工针叶林为例[J]. 生态学报,2010,30(24):6872-6880.



- [37] Qu Linglu, Xiao Huayun, Guan Hui, et al. Total N content and  $\delta^{15}\text{N}$  signatures in moss tissue for indicating varying atmospheric nitrogen deposition in Guizhou Province, China[J]. Atmospheric Environment, 2016, 142:145-151.
- [38] Du Yuhan, Guo Peng, Liu Jianqiu, et al. Different types of nitrogen deposition show variable effects on the soil carbon cycle process of temperate forests[J]. Global Change Biology, 2014, 20(10):3222-3228.
- [39] Vries W D, Du Enzai, Butterbach-Bahl K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2014, 9-10 (S1): 90-104.
- [40] Zhan Xiaoyun, Yu Guirui, He Nianpeng, et al. Nitrogen deposition and its spatial pattern in main forest ecosystems along north-south transect of eastern China [J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(2): 137-146.
- [41] Long Min, Wu Honghui, Smith M D, et al. Nitrogen deposition promotes phosphorus uptake of plants in a semi-arid temperate grassland [J]. Plant and Soil, 2016, 408(1/2):475-484.
- [42] Gao Yongheng, Ma Xingxing, Cooper D J. Short-term effect of nitrogen addition on nitric oxide emissions from an alpine meadow in the Tibetan Plateau[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(12): 12474-12479.
- [43] Tian Dashuan, Niu Shuli, Pan Qingmin, et al. Nonlinear responses of ecosystem carbon fluxes and water-use efficiency to nitrogen addition in Inner Mongolia grassland[J]. Functional Ecology, 2016, 30(3):490-499.
- [44] Shen Yue, Chen Wenqing, Yang Gaowen, et al. Can litter addition mediate plant productivity responses to increased precipitation and nitrogen deposition in a typical steppe[J]. Ecological Research, 2016, 31(4): 579-587.
- [45] 潘冬荣. 减少降水和模拟氮沉降下神农架不同林下草地土壤温室气体排放研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [46] 曹丛丛, 齐玉春, 董云社, 等. 氮沉降对陆地生态系统关键有机碳组分的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 323-332.
- [47] Li Weibin, Jin Changjie, Guan Dexin, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 82:112-118.
- [48] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林 (*Cunninghamia lanceolata*) 土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J]. 土壤, 2013, 45(1):120-128.
- [49] Zhong Yangquanwei, Yan Weiming, Shangguan Zhouping. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 91:151-159.
- [50] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(12):3340-3349.

(上接第 188 页)

- [7] 刘国忠, 黄嘉宏, 曾小团, 等. 引发广西两次严重山洪地质灾害的暴雨过程分析[J]. 气象, 2013, 39(11): 1402-1412.
- [8] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警实践: 2003-2012[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1):1-8.
- [9] 刘艳辉, 刘传正, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4):738-746.
- [10] 唐亚明, 张茂省, 薛强, 等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述[J]. 地质论评, 2012, 58(3):533-541.
- [11] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11):1078-1082.
- [12] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2):1-7.
- [13] 隋志龙, 黄春霞, 陈国兴, 等. 恭城—栗木断裂带活动特征及其与地质灾害的关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2):160-166.
- [14] 李进, 万军伟, 黄琨, 等. 福建省长汀县地质灾害的形成条件与防治对策[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 192-196, 201.