

# 氮沉降对森林生态系统影响的研究进展

于美佳<sup>1</sup>, 叶彦辉<sup>1,2,3</sup>, 韩艳英<sup>1\*</sup>, 张光祖<sup>1</sup> (1. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏林芝 860000; 2. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏林芝 860000; 3. 北京市生物多样性与有机农业重点实验室, 北京 100093)

**摘要** 森林在生态系统中有大自然氧吧和维持生态平衡的意义, 通过查阅国内外有关于氮沉降的文献, 从氮沉降对森林植物、动物和微生物的影响等方面和角度综述氮沉降对森林生态系统的影响, 介绍了相应的响应机制, 并对今后的进一步研究工作提出展望。氮沉降的研究还存在一些问题, 如目前国际上对氮沉降研究方法还没有形成一套比较完备的标准体系, 世界各地氮沉降量测定的研究方法和仪器设备都不相同, 导致研究结果会出现差异, 所以对真实生态情况很难进行统一的定论和科学的比较分析。相比国外研究而言, 国内研究虽然形成了比较规范的监测网, 但研究的技术手段缺乏确凿性和一致性, 并且研究对象不全面, 树种选择局限, 对阔叶树种研究较少。

**关键词** 氮沉降; 森林; 生态系统; 研究现状; 响应机制

**中图分类号** S718.55 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)03-0019-06

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress on the Effects of Nitrogen Deposition on Forest Ecosystem

YU Mei-jia<sup>1</sup>, YE Yan-hui<sup>1,2,3</sup>, HAN Yan-ying<sup>1</sup> et al (1. College of Resources and Environment, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Tibet 860000; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Forest Ecology, Ministry of Education, Linzhi, Tibet 860000; 3. Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming, Beijing 100093)

**Abstract** Forests have a natural oxygen bar in the ecosystem and the significance of maintaining ecological balance. By consulting domestic and foreign literature on nitrogen deposition, this paper summarized the impact of nitrogen deposition on forest ecosystems from the aspects and perspectives of the effect of nitrogen deposition on forest plants, animals and microorganisms, introduced the corresponding response mechanism, and proposed prospects for future research work. There were still some problems in the research of nitrogen deposition. For example, the international research methods for nitrogen deposition had not yet formed a relatively complete standard system, and the research methods and equipment for the determination of nitrogen deposition were different around the world, leading to differences in research results. Therefore, it is difficult to make a unified conclusion and scientific comparative analysis of the real ecological situation.

**Key words** Nitrogen deposition; Forest; Ecosystem; Research status; Response mechanism

大气氮沉降已成为全球变化的一个主要因子<sup>[1]</sup>。大气氮沉降增加呈现全球化趋势, 我国是继欧洲、北美之后的第3大氮沉降区, 大气氮沉降远高于全球平均水平<sup>[2]</sup>。近年来, 由于化石燃料的燃烧和氮肥的使用, 全球大气氮(N)沉降量已明显增加, 并严重影响陆地生态系统的物质循环<sup>[3-4]</sup>。我国在2000—2009年平均氮沉降量已达21.1 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 并将继续增长<sup>[5]</sup>。同时在我国西部的青藏高原东缘地区大气氮沉降已十分明显[湿沉降已达7.55~12.84 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 并呈逐年增加的趋势<sup>[6]</sup>。研究发现, 大气沉降是许多陆源污染物和营养物质从陆地输送到海洋的重要途径, 排放到空气中的氮70%~80%以大气干湿沉降的方式返回到陆地和水体<sup>[7-10]</sup>。氮素是陆地植物净初级生产力的限制性因子, 大气氮沉降的增加对植物净初级生产力及土壤固碳能力的提高有一定的贡献, 但也产生土壤酸化、生物多样性丧失、氮损失增加等不利影响<sup>[11]</sup>。因此, 研究氮沉降问题成为各界热门关注话题。

国外对氮沉降方面的研究起步较早, 英国洛桑实验站自19世纪50年代建立起就开始了雨水氮的收集与分析测

定<sup>[12]</sup>。但是氮沉降研究发展的一直很缓慢, 直至20世纪70年代末, 这些研究还仅集中在欧洲、北美等经济发达的地区, 而在偏远地区的研究位点也相对较为分散, 没有形成整齐划一的规模研究<sup>[13]</sup>。在欧洲及美洲等一些发达国家, 从20世纪80年代开始, 各个国家均建立了全国或跨国性的大气沉降监测网络, 如欧洲氮沉降监测网络NITREX、EXMAN<sup>[14]</sup>, NITREX在7个国家的8个试验点增加或减少大气氮沉降, 特别是针叶林; EXMAN在4个国家的6个试验站点借由改变周边大气氮沉降的化学组成和数量来分析氮沉降研究现状<sup>[15]</sup>。在美国, 长期试验研究站点有马萨诸塞州的哈佛森林长期氮素增加试验和缅因州 Bear brook 集水区 and Mt. Ascutney 森林的模拟氮沉降试验<sup>[16-17]</sup>。东亚酸沉降网EANET、加拿大的空气和降水监测网络CAPMO N等<sup>[18]</sup>, 这些大气氮沉降模型对研究森林生态系统关于大气氮沉降的响应和机理有着重要启示和借鉴意义。

我国大气氮沉降监测研究起步较晚, 有关氮沉降的研究始于20世纪30年代, 系统的研究氮沉降始于20世纪70年代, 以湿沉降为主<sup>[19-20]</sup>。从这之后我国对大气氮沉降的定量研究开始增加, 中国农业大学在2004年组建了华北平原的大气氮素沉降监测网<sup>[21]</sup>, 随后于2010年建立了涵盖43个监测点的全国大气氮沉降, 监测网络NNDMN<sup>[22]</sup>, 监测点包括草原、城市、农田、森林等生态系统。全国大气氮沉降监测网络的建立使得大气氮素干湿沉降的定量研究以及大气活性氮来源的估测方面有了很大进展。Lu等<sup>[23-25]</sup>近年来通过在

**基金项目** 国家自然科学基金项目(31860141, 31360119); 北京市生物多样性与有机农业重点实验室开放课题(BOF201905); 西藏自治区高等学校优秀教学团队项目(2017); 西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2020-27)。

**作者简介** 于美佳(1994—), 女, 辽宁阜新新人, 硕士研究生, 研究方向: 森林培育学。\*通信作者, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 从事森林经理研究。

**收稿日期** 2020-07-16

广东鼎湖山森林建立长期氮沉降研究样地,对我国南方森林生态系统的氮沉降及其对土壤酸化以及植物多样性和适应性的影响等进行了一系列研究。中国科学院地理科学与资源研究所组建了“中国生态系统研究网”<sup>[26]</sup>,该研究网络涵盖了 40 多个野外站,包括农田、森林、湖泊、草地、海洋、沙漠等生态系统。

人类活动加剧以及氮肥大量使用,氮沉降问题在全球范围内普遍存在,而氮作为一种重要的生命元素,无处不在人们的生活当中。森林作为人类生存发展的重要氧吧和关键依托,对人类健康至关重要。过多的氮沉降问题会导致一系列生态问题,尤其对森林影响显著。笔者通过查阅国内外有关氮沉降的文献,从氮沉降对森林植物、动物和微生物的影响等方面综述氮沉降对森林生态系统的影响,并介绍了相应的响应机制。

## 1 氮沉降对森林植物的影响

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,在全球碳循环中起着极其重要的作用<sup>[27-28]</sup>。很多专家认为森林有着更高的氮沉降速率,氮沉降对森林生态系统的影响要大于其他陆地生态系统<sup>[29]</sup>。森林生态系统的结构和功能一般比较复杂,其多样性的变化更多与林下植物多样性变化有关<sup>[30]</sup>。氮沉降对森林生态系统林下生物多样性的影响也常有报道<sup>[31-32]</sup>。关于氮沉降对生物多样性以及不同生活型植物的影响则各有争论,有研究认为氮沉降会降低林下植物的物种多样性<sup>[33-34]</sup>;而 Du<sup>[35]</sup>在温带针叶林进行的 3 年氮添加试验发现,氮添加并未改变林下植物的物种多样性;胡钧宇等<sup>[36]</sup>在温带针阔混交林进行的为期 1 年的施肥试验表明,低氮处理使林下物种多样性增加,高氮处理则有抑制作用。众多研究表明,森林生态系统不同生活型植物对氮沉降的响应与草原草甸等生态系统不同生活型植物对氮沉降的响应大体相同,即氮沉降能够促进禾草类植物和落叶灌木的生长,抑制杂类草和常绿灌木的生长<sup>[37-38]</sup>。也有研究表明,氮沉降对草本植物和灌木植物生长均无显著影响<sup>[39]</sup>。当然,氮沉降对生物多样性的影响还因施肥时间长短不同存在差异<sup>[40-41]</sup>。有研究发现,3 年的氮沉降提高了林下植物曲芒发草的丰富度,而 4 年氮沉降却降低了曲芒发草的丰富度<sup>[42-43]</sup>。

**1.1 氮沉降对森林植物化学元素的影响** 大气氮沉降会直接作用于植物,或者通过改变土壤化学元素的组成来间接影响植物元素平衡<sup>[44-45]</sup>,并最终导致生态系统水平上的元素失衡<sup>[46-47]</sup>。就目前而言,有关于氮沉降对森林植物化学元素的研究多为地上,而地下研究则相对较少。

地上部分,国内最先出自李德军等<sup>[48]</sup>的研究,他总结前人研究,指出氮沉降会造成植物体内养分元素比例的失衡;对南亚热带 3 种乔木幼苗的研究表明,氮施肥增加了植物 N 含量,增加了 N 与 P、K、Ca、Mg 和 Mn 等元素的比值。除 N/P 比外,N/K 比也可以作为植物对氮沉降响应的敏感指标<sup>[49]</sup>。对温带森林的研究表明,氮素输入普遍增加了植物 N 含量<sup>[50]</sup>,进一步验证了温带区域的氮素限制性<sup>[51]</sup>。但也有研究报道 5 年的 N 添加对温带落叶松各器官 N、P、K、Ca 和

Mg 含量的影响不明显<sup>[52]</sup>。最近分析表明,随着氮沉降的增加,木本和草本植物的叶中氮含量增加,但是叶中磷绝对含量变化不显著<sup>[53-55]</sup>。对元素比值的整合分析表明,氮沉降普遍降低了中国各生态系统植物的 C/N 比,增加了 N/P 比,但是对 C/P 比的效应不显著,根本原因是氮沉降增加了植物中氮含量<sup>[56-58]</sup>。另一方面,Lu 等<sup>[55]</sup>在“富氮”的热带成熟林的研究表明,为期 10 年的高氮输入并没有显著改变乔木植物叶片中 N、K、Ca、Mg 和 Al 等元素的含量,这主要是由于该生态系统已经达到氮饱和以及植物产生的自我适应性调整;并由此提出了植物适应性新假说:“富氮”生态系统植物可以通过提升自身蒸腾能力适应高氮沉降来维持养分平衡。

地下部分,虽然对植物细根的研究颇多,但研究数量远少于对植物叶片的研究,且研究结论不统一。Mo 等<sup>[59]</sup>对热带次生林的研究表明,氮添加增加了细根氮素含量,但对磷含量没有影响,进而导致了 N/P 比降低。Zhu 等<sup>[60]</sup>对南亚热带成熟林、混交林和马尾松林的研究表明,为期 5 年的氮添加并没有改变细根氮和磷的含量。分析表明,全球氮沉降显著增加了植物总根的生物量和植物细根的 N 含量,但是减少了细根的生物量,降低了细根的 C/N 比,且没有显著改变细根的 C 含量<sup>[61]</sup>。

不同生态系统植物元素化学对氮沉降的响应不同,主要原因有 2 个:第一,植物在长期生存进化中形成了不同的发育特征,导致对氮沉降的敏感度不同。另外,植物自我调整的适应性也是一大影响因素。第二,植物发育的外部环境也会影响植物的响应。如中国北方温带地区一般认为氮限制,但是南方热带亚热带本身富氮,多受磷或其他阳离子限制,因此森林植物对氮沉降响应可能存在不同。

**1.2 氮沉降对森林植物生长的影响** 全球氮添加对不同植物物种生长通常表现出刺激效应<sup>[62]</sup>。不同生态系统和功能类群对氮沉降响应的敏感程度有差异,次生林树木的生长一般比原始林敏感<sup>[63]</sup>,草本植物比木本植物敏感<sup>[62-64]</sup>。另外,氮沉降对森林净初级生产力或植物生长的影响也随着氮沉降量而异,具有生态学中普遍存在的非线性关系<sup>[65]</sup>。中国东北地区森林中,较低的氮添加[25 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]导致最大的净生产力,伴随氮添加的增加[50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]正面效应降低,氮添加量最大时(75 kg/(hm<sup>2</sup>·a))正面效应则会消失<sup>[66]</sup>。

早先观点认为,大气氮沉降对于森林来说是一种养分,但也需要适量,如果过量的氮沉降会造成一定程度上的累积效应。例如处于温带中的美国 Harvard 森林的长期生态系统中,9 年的施氮处理,各林木生物量比对照都有不同幅度的增加,但 9 年以后,森林林木生物量随着氮输入量的增加而减少,高氮处理样方林木生物量与对照比显著减少<sup>[67]</sup>。从另外一个角度来看,过量氮沉降到森林最严重危害是伴随工业废气中的 SO<sub>2</sub> 一起形成酸雨从而直接危害森林,使森林冠层稀疏,降低抵抗病虫害的能力,随着时间逐渐加重甚至有可能导致森林衰亡<sup>[68]</sup>。此外,长期在森林酸雨会导致土壤酸化,主要表现在土壤 pH 下降、盐基饱和度降低、Ca<sup>2+</sup> 的

大量流失、 $\text{Al}^{3+}$  的活化与迁移等<sup>[69]</sup>。

目前在中国氮沉降对树木径向生长的影响研究较少。树木的生长响应因个体大小或生长阶段而不同<sup>[70-72]</sup>。刘修元等<sup>[70]</sup>研究了模拟氮沉降对落叶松原始林树木胸径生长的影响,认为不同高度的树木对氮添加的响应有明显差异,较低树木(树高<16.5 m)的生长对氮添加无显著响应,较高树木(树高>16.5 m)在中氮和高氮[50 和 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]处理下胸径生长显著加速,但树木越高,这种加速作用越下降。在亚热带阔叶林,Tian 等<sup>[71]</sup>研究表明 3 年的氮添加[50 和 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]使甜栲幼树和林下幼苗生长显著降低,但是大树的生长没有受到影响。7 年的氮添加[40 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]导致重庆马尾松林土壤酸化和氮饱和,并使马尾松生长显著下降<sup>[73]</sup>。从长远来看,氮沉降对森林群落树木结构的改变、物种组成和碳吸存能力可能存在一定影响。

**1.3 氮沉降对森林植被多样性的影响** 大气氮沉降升高已成为全球多样性丧失的第三大驱动因素<sup>[74]</sup>。但中国相关研究报道较少。由于乔木植物与林下层植物相比对环境因素的响应较慢,所以现有研究主要在林下层植物多样性上。长期氮沉降会改变林下层物种组成,但改变程度取决于森林类型、功能类群以及氮状态等影响因素。在温带地区,Du<sup>[75]</sup>研究发现 3 年的氮添加试验对北方原始森林林下层植物的物种丰富度没有影响,但显著增加了禾草类植物的盖度,并降低了矮小灌木植物的盖度。在热带/亚热带原始林,Lu 等<sup>[76]</sup>研究发现 5 年的高氮添加[>100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]显著降低了林下植物多样性,并首次提出负面效应主要与土壤酸化机制有关而不是传统上的竞争机制。Wu 等<sup>[77]</sup>研究表明 8 年的高氮添加[>120 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]可能通过降低土壤 pH 和菌根真菌丰度来削弱亚热带森林林下植物丰富度。Huang 等<sup>[78]</sup>通过对比  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  处理在亚热带马尾松林的效应,认为林下主要物种多样度的降低可能是氮饱和与土壤酸化共同作用的结果。与模拟氮沉降控制试验的结果基本一致,Huang 等<sup>[79]</sup>研究发现在广州城乡氮沉降梯度上[30.1~43.3 kg/(hm<sup>2</sup>·a)],成熟林林下草本层植物多样性与氮沉降量呈负相关,与土壤中的有效  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  浓度呈正相关。另外,氮沉降效应也与土地利用方式有关,与原始林相比,人工林或次生林中植物多样性对氮沉降的响应相对不敏感<sup>[80-81]</sup>。

## 2 氮沉降对森林动物的影响

**2.1 氮沉降对森林土壤动物生物量的影响** 土壤动物在土壤和生态系统中都占有重要作用,氮添加对土壤动物会产生影响。南亚热带地区人工苗圃样地研究成果表明,首先是在 1 年的试验处理中,氮沉降整体上一直表现对土壤动物群落的促进作用;其次是氮沉降增加具有明显的阈值效应,在 1 年的时间内,中氮处理(100 kg/hm<sup>2</sup>)始终为动物各参数取值高峰及变化的临界点<sup>[82]</sup>。研究表明,氮沉降的阈值作用确实存在,一定限度内的氮输入是有利的,但过量的氮沉降则会造成负面影响<sup>[83]</sup>,对植物和微生物也有参考价值。Xu 等<sup>[84]</sup>对南亚热带 3 种典型森林(季风常绿林、针阔混交林和针叶林)的研究表明,1 年的氮处理并未对土壤动物生物量

产生显著影响,但低氮处理[50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]各林分生物量都有不同程度的上升,而高氮处理[100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]均出现下降。Xu 等<sup>[85]</sup>对鼎湖山森林苗圃地的研究进一步表明,氮沉降对土壤动物群落多样性的影响存在阈值效应[100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]。在北亚热带杨树人工林进行 2 年氮添加试验表明,中等浓度的氮添加对土壤动物群落有促进作用,高浓度则有抑制作用<sup>[86]</sup>;氮添加 4 年后,低氮和高氮水平分别显著增加和降低了土壤动物总密度和植食性土壤动物密度,均表明氮添加对土壤动物的影响存在阈值作用<sup>[87]</sup>。

另外,氮沉降对不同土壤动物的影响也可能不同。温带人工林的研究表明,施肥改变了两林分不同食性土壤动物的密度,导致腐食性土壤动物数量降低,植食性土壤动物数量增加,但捕食性土壤动物数量变化不明显;这表明不同食性土壤动物对氮沉降的响应也不一致<sup>[88]</sup>。也有研究表明,加氮对植食性线虫密度无显著影响,但可以改变外来生物(如蚯蚓)和植食性线虫之间的相互作用关系,从而潜在影响生态系统的功能<sup>[89]</sup>。

目前关于氮沉降对森林生态系统土壤动物影响的研究报道缺乏,但在农业土壤添加氮素对土壤动物影响的研究中,有观点认为存在氮沉降量的问题。在针叶林内进行氮处理的正效应不仅在处理样地表现出来,而且也明显提高了对照样地土壤动物类群的生物量<sup>[90]</sup>。

**2.2 氮沉降对森林动物多样性的影响** 动物群落对环境的微弱变化能产生灵敏的反应<sup>[91]</sup>。诸多外界因素对研究结果都可能出现一定程度的影响,目前氮沉降对动物影响研究较少,仅在欧美国家和中国的鼎湖山等少数地区,如 NITREX 项目,以及 Huhta 等<sup>[92]</sup>和 Xu 等<sup>[91]</sup>开展的相关研究,大多认为氮沉降增加使土壤动物多样性降低。如在鼎湖山森林生态系统的长期氮研究项目中,Xu 等<sup>[91]</sup>研究发现模拟氮沉降增加显著降低了成熟林土壤动物群落的多样性。然而也有研究表明,低浓度氮沉降在一定程度上增加动物多样性<sup>[93-95]</sup>。如徐国良等<sup>[90]</sup>对马尾松林土壤动物研究发现,为期 16 个月的氮处理促进了动物群落的多样性,所以阈值效应值得关注。此外,Xu 等<sup>[91]</sup>对针阔混交林的研究则认为氮沉降对土壤动物没有明显影响,这可能与氮沉降量有关。所以,森林动物多样性降低很有可能是由过量氮沉降产生的土壤酸化和土壤结构破坏危害造成的。

## 3 氮沉降对森林微生物的影响

土壤微生物适应了一直以来的低氮环境,过量的氮沉降会对土壤微生物造成影响。薛璟花等<sup>[96]</sup>研究发现过量的氮沉降不仅可以改变微生物群落结构组成,具体表现为真菌与细菌生物量比率的减少、土壤真菌细菌的相关丰富度发生改变、真菌生物量的减少、土壤微生物量的减少、微生物群落结构发生改变,甚至改变一些微生物的生物功能,如减少土壤呼吸率、降低土壤酶活性等。在研究哈佛森林氮沉降对其土壤微生物影响的试验中,Wallenstein<sup>[97]</sup>研究也发现,真菌与细菌比率随施氮水平增加而减少。所以施氮对真菌的生长有抑制,真菌在限制因子是碳的生态环境中优势明显,而在

氮的环境中优势不足,说明真菌对氮的利用率不高。

增氮对微生物量的影响还与氮添加的量、类型、季节、微生物种类及森林类型有关。低氮添加[50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]没有显著改变温带油松林土壤微生物生物量,但中氮和高氮添加[>100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]则显著降低了微生物生物量<sup>[98]</sup>,氨态氮添加[20~80 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]增加了亚热带的冷杉种植园细菌生物量,但硝态氮添加[20~80 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]则降低了细菌生物量<sup>[99]</sup>。Wang 等<sup>[100]</sup>研究发现氨态氮添加[120 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]在非生长季显著降低了亚热带冷杉和松树种园真菌生物量,在生长季则对真菌生物量影响不显著,但在2个季节对细菌生物量都没有显著影响。鼎湖山南亚热带森林的研究表明,氮添加降低了季风常绿阔叶林的土壤微生物量,但对针阔混交林和针叶林的土壤微生物量则没有显著影响<sup>[101]</sup>。

**3.1 氮沉降对土壤微生物的影响** 氮添加可以改变土壤微生物组成。第一,氮添加会改变真菌群落(真菌、丛枝菌根真菌和外生菌根真菌)的组成,氮添加[70 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]在春季会增加北方落叶松森林担子菌门的相对丰度,但在夏季则会减少担子菌门的相对丰度<sup>[102]</sup>。氮添加[50~100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]会降低武夷山的亚热带常绿阔叶林丛枝菌根真菌的比例,但氮添加[150 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]增加了鼎湖山季风常绿阔叶林丛枝菌根真菌的相对丰度<sup>[103~104]</sup>。氮添加[50~300 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]能使亚热带湿地松林对氮敏感的外生菌根真菌缺失<sup>[105]</sup>。第二,氮添加会影响细菌组成,基于磷脂脂肪酸分析技术,氮添加会降低革兰氏阴性细菌的相对丰度,增加革兰氏阳性细菌/革兰氏阴性细菌比<sup>[103]</sup>。基于高通量焦磷酸测序的研究也表明,氮添加会影响细菌群落的组成<sup>[102,106~107]</sup>。Nie 等<sup>[107]</sup>研究发现氮添加[105 kg/(hm<sup>2</sup>·a)]在干季会降低鼎湖山南亚热带常绿阔叶林酸杆菌门的相对丰度,但会增加变形菌门和放线菌门的相对丰度。第三,氮添加会影响真菌与细菌之比。如氮添加增加了中国南部亚热带森林真菌的相对丰度,减少细菌的相对丰度,从而提高真菌/细菌比<sup>[103,108]</sup>。然而,氮添加降低了千烟洲的亚热带森林真菌/细菌比<sup>[100,108~110]</sup>。还有研究表明氮添加对真菌/细菌比没有显著影响<sup>[111~112]</sup>。

**3.2 氮沉降对微生物多样性的影响** 过量氮沉降的输入和氮饱和的出现,微生物群落的结构和功能都将会发生改变,过高的氮沉降则会减少微生物量,降低物种多样性<sup>[113~116]</sup>。在氮沉降条件下,由喜氮物种和厌氮物种共同主导的群落,将逐渐演替成以喜氮物种为优势种,而厌氮物种则逐渐沦为衰退种的新的群落结构<sup>[117]</sup>。另外,外生菌根真菌,尽管短期的氮沉降促进了种群数量的增加和子实体的生产,但是长期的氮沉降具有抑制作用,故降低了菌根根系的拓展能力、真菌子实体的产量和物种的丰富度<sup>[118~120]</sup>。氮沉降对土壤细菌的影响通常不如真菌明显,可能与生态系统的氮状态、植被组成以及施肥时间长短有关,一定限度内的氮沉降对生物多样性可能是有利的<sup>[121~122]</sup>。另外大多数研究都表明,氮沉降量的增加降低外生菌根真菌的数量、物种的丰富度和群落的组成<sup>[113,123~124]</sup>。

## 4 结论

目前国际上对氮沉降研究方法还没有形成一套比较完备的标准体系,如收集、保存和测定氮沉降量等。世界各地由于地形、气候、文化和历史等差异,氮沉降量测定的研究方法和仪器设备都不相同,导致研究结果会出现差异,所以对真实生态情况很难进行统一的定论和科学的比较分析。相比国外研究而言,国内研究虽然形成了比较规范的监测网,但研究的技术手段缺乏确凿性和一致性,并且研究对象不全面,树种选择局限,对阔叶树种研究较少。已经得出的研究数据,由于地区不同、时间不同、方法不同以及植物不同,研究结果也存在一定偏差,很难得出氮沉降对森林影响的普适性研究结论。虽然氮沉降研究始于20世纪50年,但是一直到20世纪80年代才逐步开始完善起来,不过短短30年左右时间,国内研究起步较国外更迟。准确了解氮沉降对森林影响还需要持续研究。

## 参考文献

- [1] STEVENS C J. How long do ecosystems take to recover from atmospheric nitrogen deposition? [J]. *Biological conservation*, 2016, 200: 160–167.
- [2] LIU L, ZHANG T, GILLIAM F S, et al. Interactive effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial communities in a tropical forest [J]. *PloS One*, 2013, 8(4): 1–10.
- [3] BERGSTRÖM A K, JANSSEN M. Atmospheric nitrogen deposition has caused nitrogen enrichment and eutrophication of lakes in the Northern Hemisphere [J]. *Glob Change Biol*, 2006, 12(4): 635–643.
- [4] FANG Y T, YOH M, KOBA K, et al. Nitrogen deposition and forest nitrogen cycling along an urban-rural transect in Southern China [J]. *Glob Change Biol*, 2011, 17(2): 872–885.
- [5] JIA Y L, YU G R, HE N P, et al. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity [J]. *Scientific reports*, 2014, 4: 1–7.
- [6] ZHU J X, HE N P, WANG Q F, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. *Science of the total environment*, 2015, 511: 777–785.
- [7] 韩丽君, 朱玉梅, 刘素美, 等. 黄海千里岩岛大气湿沉降营养盐的研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(7): 1174–1184.
- [8] 朱玉梅, 刘素美. 东海大气湿沉降中营养盐的研究 [J]. *环境科学*, 2011, 32(9): 2724–2731.
- [9] 王江飞, 周柯锦, 汪小泉, 等. 杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2754–2763.
- [10] 王欢博, 石光明, 田密, 等. 三峡库区大气活性氮组成及干沉降通量 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(1): 44–50.
- [11] LEBAUER D S, TRESEDER K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed [J]. *Ecology*, 2008, 89(2): 371–379.
- [12] GOULDING K W T, 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.
- [13] 郑世伟, 江洪. 氮沉降对森林生态系统影响的研究进展 [J]. *浙江林业科技*, 2014, 34(2): 56–64.
- [14] DE 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.
- [15] 鲁显楷, 莫江明, 张伟, 等. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(5): 500–522.
- [16] ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems [J]. *BioScience*, 1998, 48(11): 921–934.
- [17] MAGILL A H, ABER J D, CURRIE W S, et al. Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2004, 196(1): 7–28.
- [18] 吴玉凤, 高霄鹏, 桂东伟, 等. 大气氮沉降监测方法研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3605–3614.
- [19] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响 [J]. *应用*

- 生态学报,2006,17(6):1099-1102.
- [20] 周国逸,闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报,2001,21(12):2002-2012.
- [21] 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.
- [22] 刘学军,张福锁. 环境养分及其在生态系统养分资源管理中的作用:以大气氮沉降为例[J]. 干旱区研究,2009,26(3):306-311.
- [23] LU X K, MAO Q G, GILLIAM F S, et al. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems [J]. Global change biology, 2014,20(12):3790-3801.
- [24] LU X K, MAO Q G, MO J M, et al. Divergent responses of soil buffering capacity to long-term N deposition in three typical tropical forests with different land-use history [J]. Environmental science & technology, 2015, 49(7):4072-4080.
- [25] LU X K, VITOUSEK P M, MAO Q G, et al. Plant acclimation to long-term high nitrogen deposition in an N-rich tropical forest [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2018, 115(20):5187-5192.
- [26] ZHU J X, HE N P, WANG Q F, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. Science of the total environment, 2015, 511:777-785.
- [27] FALKOWSKI P, SCHOLERS R J, BOYLE E A, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 2000, 290(5490):291-296.
- [28] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 等. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(7):2997-3009.
- [29] GILLIAM F S, ROBERTS M R. The herbaceous layer in forests of eastern North America [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2003.
- [30] GILLIAM F S. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems [J]. BioScience, 2007, 57(10):845-858.
- [31] STRENGBOM J, NORDIN A, NÄSHOLM T, et al. Slow recovery of boreal forest ecosystem following decreased nitrogen input [J]. Functional ecology, 2001, 15(4):451-457.
- [32] GILLIAM F S. Response of the herbaceous layer of forest ecosystems to excess nitrogen deposition [J]. Journal of ecology, 2006, 94(6):1176-1191.
- [33] HEDWALL P O, NORDIN A, STRENGBOM J, et al. Does background nitrogen deposition affect the response of boreal vegetation to fertilization? [J]. Oecologia, 2013, 173(2):615-624.
- [34] WALTER C A, ADAMS M B, GILLIAM F S, et al. Non-random species loss in a forest herbaceous layer following nitrogen addition [J]. Ecology, 2017, 98(9):2322-2332.
- [35] DU E Z. Integrating species composition and leaf nitrogen content to indicate effects of nitrogen deposition [J]. Environmental pollution, 2017, 221:392-397.
- [36] 胡钧宇, 朱剑霄, 周璋, 等. 氮添加对4种森林类型林下植物多样性的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(5):904-910.
- [37] VAN DOBBEN H F, TER BRAAK C J F, DIRKSE G M. Undergrowth as a biomonitor for deposition of nitrogen and acidity in pine forest [J]. Forest ecology and management, 1999, 114(1):83-95.
- [38] STRENGBOM J, NORDIN A. Physical disturbance determines effects from nitrogen addition on ground vegetation in boreal coniferous forests [J]. Journal of vegetation science, 2012, 23(2):361-371.
- [39] LU X K, MO J M, GILLIAM F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest [J]. Global change biology, 2010, 16(10):2688-2700.
- [40] 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.
- [41] GILLIAM F S, WELCH N T, PHILLIPS A H, et al. Twenty-five-year response of the herbaceous layer of a temperate hardwood forest to elevated nitrogen deposition [J]. Ecosphere, 2016, 7(4):1-16.
- [42] STRENGBOM J, WALHEIM M, NÄSHOLM T, et al. Regional differences in the occurrence of understorey species reflect nitrogen deposition in Swedish forests [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2003, 32(2):91-97.
- [43] NORDIN A, STRENGBOM J, FORSUM Å, et al. Complex biotic interactions drive long-term vegetation change in a nitrogen enriched boreal forest [J]. Ecosystems, 2009, 12(7):1204-1211.
- [44] HE X J, HOU E Q, LIU Y, et al. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China [J]. Sci Rep, 2016, 6:1-9.
- [45] GILLIAM F S, MAY J D, ADAMS M B. Response of foliar nutrients of *Rubus allegheniensis* to nutrient amendments in a central Appalachian hardwood forest [J]. For Ecol Manage, 2018, 411:101-107.
- [46] LU X K, MO J M, GILLIAM F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest [J]. Glob Change Biol, 2010, 16(10):2688-2700.
- [47] LIU X J, DUAN L, MO J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview [J]. Environ Pollut, 2011, 159(10):2251-2264.
- [48] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4):543-549.
- [49] MO J M, LI D J, GUNDERSEN P. Seedling growth response of two tropical tree species to nitrogen deposition in Southern China [J]. Eur J For Res, 2008, 127(4):275-283.
- [50] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption [J]. Ecology, 2015, 96(2):373-380.
- [51] DENG M F, LIU L L, SUN Z Z, et al. Increased phosphate uptake but not resorption alleviates phosphorus deficiency induced by nitrogen deposition in temperate *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. New Phytol, 2016, 212(4):1019-1029.
- [52] 赵琼, 刘兴宇, 胡亚林, 等. 氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(5):14-19.
- [53] TIAN D, DU E Z, JIANG L, et al. Responses of forest ecosystems to increasing N deposition in China: A critical review [J]. Environ Pollut, 2018, 243:75-86.
- [54] YUE K, YANG W Q, PENG Y, et al. Individual and combined effects of multiple global change drivers on terrestrial phosphorus pools: A meta-analysis [J]. Sci Total Environ, 2018, 630:181-188.
- [55] LU X K, VITOUSEK P M, MAO Q G, et al. Plant acclimation to long-term high nitrogen deposition in an N-rich tropical forest [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115(20):5187-5192.
- [56] YUE K, PENG Y, PENG C H, et al. Stimulation of terrestrial ecosystem carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis [J]. Sci Rep, 2016, 6:1-10.
- [57] DENG Q, HUI D F, DENNIS S, et al. Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition: A meta-analysis [J]. Glob Ecol Biogeogr, 2017, 26(6):713-728.
- [58] YUE K, FORNARA D A, YANG W Q, et al. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: A global synthesis [J]. Glob Change Biol, 2017, 23(6):2450-2463.
- [59] MO Q F, ZOU B, LI Y W, et al. Response of plant nutrient stoichiometry to fertilization varied with plant tissues in a tropical forest [J]. Sci Rep, 2015, 5:1-12.
- [60] ZHU F F, YOH M, GILLIAM F S, et al. Nutrient limitation in three lowland tropical forests in Southern China receiving high nitrogen deposition: Insights from fine root responses to nutrient additions [J]. PLoS One, 2013, 8(12):1-8.
- [61] LI W B, JIN C J, GUAN D X, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis [J]. Soil Biol Biochem, 2015, 82:112-118.
- [62] XIA J Y, WAN S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition [J]. New Phytol, 2008, 179(2):428-439.
- [63] WRIGHT S J, TURNER B L, YAVITT J B, et al. Plant responses to fertilization experiments in lowland, species-rich, tropical forests [J]. Ecology, 2018, 99(5):1129-1138.
- [64] SIDDIQUE I, VIEIRA I C G, SCHMIDT S, et al. Nitrogen and phosphorus additions negatively affect tree species diversity in tropical forest regrowth trajectories [J]. Ecology, 2010, 91(7):2121-2131.
- [65] DE VRIES W, DU E Z, BUTTERBACH-BAHL K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems [J]. Current opinion in environmental sustainability, 2014, 9/10:90-104.
- [66] YAN G Y, XING Y J, WANG J Y, et al. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in boreal forest carbon pools in northeastern China: Effects of nitrogen deposition [J]. Agric For Meteorol, 2018, 248:70-81.
- [67] MAGILL A H, ABER J D, BERNTSON G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. Ecosystems, 2000, 3(3):238-253.
- [68] 王鸣玲. 酸雨对森林危害及其对策[J]. 安徽林业科技, 2004(4):42-43.

- [69] 凌大炯,章家恩,欧阳颖. 酸雨对土壤生态系统影响的研究进展[J]. 土壤,2007,39(4):514-521.
- [70] 刘修元,杜恩在,徐龙超,等. 落叶松原始林树木生长对氮添加的响应[J]. 植物生态学报,2015,39(5):433-441.
- [71] TIAN D,LI P,FANG W J,et al. Growth responses of trees and understory plants to nitrogen fertilization in a subtropical forest in China[J]. Biogeosciences,2017,14:3461-3469.
- [72] JIANG L,TIAN D,MA S H,et al. The response of tree growth to nitrogen and phosphorus additions in a tropical montane rainforest[J]. Sci Total Environ,2018,618:1064-1070.
- [73] HUANG Y M,KANG R H,MULDER J,et al. Nitrogen saturation,soil acidification,and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China[J]. J Geophys Res-Bioge,2015,120(11):2457-2472.
- [74] SALA O E,CHAPIN F S III,ARMESTO J J,et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. Science,2000,287(5459):1770-1774.
- [75] DU E Z. Integrating species composition and leaf nitrogen content to indicate effects of nitrogen deposition[J]. Environ Pollut,2017,221:392-397.
- [76] LU X K,MO J M,GILLIAM F S,et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest[J]. Glob Change Biol,2010,16(10):2688-2700.
- [77] WU J P,LIU W F,FAN H B,et al. Asynchronous responses of soil microbial community and understory plant community to simulated nitrogen deposition in a subtropical forest[J]. Ecol Evol,2013,3(11):3895-3905.
- [78] HUANG Y M,KANG R H,MULDER J,et al. Nitrogen saturation,soil acidification,and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China[J]. J Geophys Res Bioge,2015,120(11):2457-2472.
- [79] HUANG L J,ZHU W X,REN H,et al. Impact of atmospheric nitrogen deposition on soil properties and herb-layer diversity in remnant forests along an urban-rural gradient in Guangzhou, Southern China[J]. Plant Ecol,2012,213(7):1187-1202.
- [80] LU X K,MO J M,GILLIAM F S,et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in tropical forests of contrasting disturbance regimes in southern China[J]. Environ Pollut,2011,159(10):2228-2235.
- [81] 李化山,汪金松,刘星,等. 模拟 N 沉降对太岳山油松人工林和天然林草本群落的影响[J]. 生态学报,2015,35(11):3710-3721.
- [82] 徐国良,周小勇,周国逸,等. N 沉降增加对森林生态系统地表土壤动物群落的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版),2005,44(S1):213-221.
- [83] MAGILL A H,ABER J D,BERTSON G M,et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. Ecosystems,2000,3(3):238-253.
- [84] XU G L,MO J M,ZHOU G Y,et al. Preliminary response of soil fauna to simulated N deposition in three typical subtropical forests[J]. Pedosphere,2006,16(5):596-601.
- [85] XU G L,MO J M,FU S L,et al. Response of soil fauna to simulated nitrogen deposition:A nursery experiment in subtropical China[J]. J Environ Sci,2007,19(5):603-609.
- [86] 周丹燕,卜丹蓉,葛之蕤,等. 氮添加对沿海不同林龄杨树人工林土壤动物群落的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(9):2553-2560.
- [87] BIAN H X,GENG Q H,XIAO H R,et al. Fine root biomass mediates soil fauna community in response to nitrogen addition in poplar plantations (*Populus deltoids*) on the east coast of China[J]. Forests,2019,10(2):122-138.
- [88] 庄海峰,孙玥,谷加存,等. 施氮肥对落叶松和水曲柳人工林土壤动物群落的影响[J]. 生物多样性,2010,18(4):390-397.
- [89] SHAO Y H,ZHANG W X,EISENHAUER N,et al. Nitrogen deposition cancels out exotic earthworm effects on plant-feeding nematode communities[J]. J Anim Ecol,2017,86(4):708-717.
- [90] 徐国良,莫江明,周国逸. 氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响[J]. 动物学研究,2005,26(6):609-615.
- [91] XU G L,MO J M,ZHOU G Y,et al. Preliminary response of soil fauna to simulated N deposition in three typical subtropical forests[J]. Pedosphere,2006,16(5):596-601.
- [92] HUHTA V,SETÄLÄ H,HAIMI J. Leaching of N and C from birch leaf litter and raw humus with special emphasis on the influence of soil fauna[J]. Soil Biol Biochem,1988,20(6):875-878.
- [93] BOXMAN A W,BLANCK K,BRANDRUD T E,et al. Vegetation and soil biota response to experimentally changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project[J]. Forest ecology and management,1998,101(1/2/3):65-79.
- [94] 徐国良,周小勇,周国逸,等. N 沉降增加对森林生态系统地表土壤动物群落的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版),2005,44(S1):213-221.
- [95] HEDWALL P O,NORDIN A,STRENGBOM J,et al. Does background nitrogen deposition affect the response of boreal vegetation to fertilization? [J]. Oecologia,2013,173(2):615-624.
- [96] 薛璟花,莫江明,李炯,等. 氮沉降增加对土壤微生物的影响[J]. 生态环境,2005,14(5):777-782.
- [97] WALLENSTEIN M D. Effects of increased nitrogen deposition on forest soil nitrogen cycling and microbial community structure [D]. Durham, NC:Duke University,2004.
- [98] ZHAO B,GENG Y,CAO J,et al. Contrasting responses of soil respiration components in response to five-year nitrogen addition in a *Pinus tabulaeformis* forest in Northern China[J]. Forests,2018,9:544-558.
- [99] LIU C X,DONG Y H,SUN Q W,et al. Soil bacterial community response to short-term manipulation of the nitrogen deposition form and dose in a Chinese fir plantation in southern China[J]. Water Air Soil Pollut,2016,227:447-459.
- [100] WANG Y S,CHENG S L,FANG H J,et al. Contrasting effects of ammonium and nitrate inputs on soil CO<sub>2</sub> emission in a subtropical coniferous plantation of southern China[J]. Biol Fert Soils,2015,51(7):815-825.
- [101] CHEN X M,LI Y L,MO J M,et al. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon fractions in the subtropical forest ecosystems of S China [J]. J Plant Nutr Soil Sci,2012,175(6):947-953.
- [102] YAN G Y,XING Y J,XU L J,et al. Effects of different nitrogen additions on soil microbial communities in different seasons in a boreal forest[J]. Ecosphere,2017,8(7):1-19.
- [103] WANG C,LU X K,MORI T,et al. Responses of soil microbial community to continuous experimental nitrogen additions for 13 years in a nitrogen-rich tropical forest[J]. Soil Biol Biochem,2018,121:103-112.
- [104] 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]. Sci Total Environ,2017,607/608:1367-1375.
- [105] NING C,MUELLER G M,EGERTON-WARBURTON L M,et al. Diversity and enzyme activity of ectomycorrhizal fungal communities following nitrogen fertilization in an urban-adjacent pine plantation[J]. Forests,2018,9(3):99-116.
- [106] CUI J,WANG J J,XU J,et al. Changes in soil bacterial communities in an evergreen broad-leaved forest in east China following 4 years of nitrogen addition[J]. J Soil Sediment,2017,17(8):2156-2164.
- [107] NIE Y X,WANG M C,ZHANG W,et al. Ammonium nitrogen content is a dominant predictor of bacterial community composition in an acidic forest soil with exogenous nitrogen enrichment[J]. Sci Total Environ,2018,624:407-415.
- [108] LIU L,ZHANG T,GILLIAM F S,et al. Interactive effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial communities in a tropical forest[J]. PLoS One,2013,8(4):1-10.
- [109] ZHANG C,ZHANG X Y,ZOU H T,et al. Contrasting effects of ammonium and nitrate additions on the biomass of soil microbial communities and enzyme activities in subtropical China[J]. Biogeosciences,2017,14(20):4815-4827.
- [110] KOU L,ZHANG X Y,WANG H M,et al. Nitrogen additions inhibit nitrification in acidic soils in a subtropical pine plantation:Effects of soil pH and compositional shifts in microbial groups[J]. J For Res,2019,30(2):669-678.
- [111] WU J P,LIU W F,FAN H B,et al. Asynchronous responses of soil microbial community and understory plant community to simulated nitrogen deposition in a subtropical forest[J]. Ecol Evol,2013,3(11):3895-3905.
- [112] 王小云,温腾. 模拟氮沉降对小兴安岭地区人工红松林土壤氮转化的影响[J]. 土壤通报,2017,48(3):604-610.
- [113] LILLESKOV E A,FAHEY T J,LOVETT G M. Ectomycorrhizal fungal aboveground community change over an atmospheric nitrogen deposition gradient[J]. Ecological applications,2001,11(2):397-410.
- [114] JONSSON L,ANDERS D,TOR-ERIK B. Spatiotemporal distribution of an ectomycorrhizal community in an oligotrophic Swedish *Picea abies* forest subjected to experimental nitrogen addition:Above-and below-ground views[J]. For Ecol Manage,2000,132(2/3):143-156.

制备绿色、健康的饲料添加剂产品。

# 参考文献

- [1] 张晓煜,刘静,王连喜. 枸杞品质综合评价体系构建[J]. 中国农业科学,2004,37(3):416-421.
- [2] 王思月. 枸杞多糖对肉鸡肠道微生物区系、免疫功能及相关基因表达的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2019.
- [3] 曹丽萍,马秀花,肖明,等. 青稞枸杞酥性饼干的配方及质构特性[J]. 食品工业,2020,41(5):121-125.
- [4] 张梅,张世林,李晓君,等. 枸杞紫苏复合蛋白固体饮料的研制[J]. 饮料工业,2020,23(2):51-57.
- [5] 王文娟. 南瓜枸杞保健酒的开发研究[J]. 现代食品,2019(11):48-51.
- [6] JIN M L,HUANG Q S,ZHAO K,et al. Biological activities and potential health benefit effects of polysaccharides isolated from *Lycium barbarum* L. [J]. International journal of biological macromolecules,2013,54:16-23.
- [7] 刘源才,孙细珍,许银,等. 枸杞多糖组成及含量测定方法的改进[J]. 食品科学,2013,34(12):292-295.
- [8] 张丽,尤慧芳,黄金龙,等. 新疆乌苏和宁夏银川枸杞子的质量对比分析[J]. 中医药导报,2019,25(14):62-65.
- [9] 史容,周丽,段亨,等. 枸杞提取液的活性成分分析及其抑菌性、抗氧化性[J]. 食品工业科技,2019,40(1):72-76.
- [10] 夏惠,孙桂菊. 枸杞多糖对2型糖尿病人群代谢组学影响研究[C]//中国营养学会,亚太临床营养学会,江苏省科学技术协会,等. 营养研究与临床实践——第十四届全国营养科学大会暨第十一届亚太临床营养大会、第二届全球华人大会论文摘要汇编. 北京:中国营养学会,2019.
- [11] ZHOU Z W, JING L J, CUI G W, et al. Effects of polysaccharide from *Lycium barbarum* in alloxan-induced diabetic mice[J]. African journal of biotechnology,2009,8(23):6634-6637.
- [12] 赵芳芳,杨冬萍,俞洋. 枸杞多糖对兔视网膜色素上皮细胞光损伤凋亡线粒体信号传导途径的影响[J]. 湖北中医杂志,2018,40(10):3-8.
- [13] 郭健,徐国兴,王婷婷,等. 枸杞多糖对糖尿病大鼠视网膜神经细胞氧化损伤的保护作用[J]. 中国临床药理学杂志,2015,31(24):2448-2450.
- [14] 刘慧莲. 枸杞多糖对小鼠精原干细胞增殖作用的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(3):1490-1492.
- [15] 谭秋慧,安长新,萧云,等. 枸杞多糖对热应激大鼠生精细胞凋亡的保护作用及其机制研究[J]. 中华男科学杂志,2012,18(1):88-92.
- [16] 王彩霞. 枸杞多糖对D-半乳糖诱导衰老小鼠皮肤的影响[J]. 中国老年学杂志,2015,35(22):6360-6362.
- [17] 白寿宁. 宁夏枸杞研究:上册[M]. 银川:宁夏人民出版社,1998:552-

- 559.
- [18] 黄红娜,张丹参,郑晓霞,等. 甜菜碱药理作用的研究进展[J]. 医学综述,2009,15(24):3788-3789.
- [19] 张爱君,王秀青,杨凤琴,等. 甜菜碱体外抑菌活性的研究[J]. 宁夏医学杂志,2011,33(12):1146-1147.
- [20] 夏文颖,王珏,金菲,等. 甜菜碱对铜绿假单胞菌生物膜形成与分散及耐药性的影响[J]. 临床检验杂志,2017,35(4):258-260.
- [21] 米佳,禄璐,戴国礼,等. 枸杞色泽与其类胡萝卜素含量和组成的相关性[J]. 食品科学,2018,39(5):81-86.
- [22] 郑坚强,叶豪,司俊玲,等. 响应面优化萃取宁夏枸杞类胡萝卜素工艺研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):197-201.
- [23] 郑志新. 枸杞多糖对雏鸡新城疫免疫效果的影响[J]. 畜牧与饲料科学,2015,36(1):1-3.
- [24] 韩占兵,吕兴东,杨朋坤,等. 日粮添加枸杞渣对蛋鸡生产性能与蛋品质的影响[J]. 中国家禽,2020,42(1):53-56.
- [25] 白乾云. 日粮中添加枸杞粉对蛋鸡生产性能和血清脂类代谢指标的影响[J]. 中国饲料,2012(8):22-23,30.
- [26] 孙甜甜,高云航,周海柱,等. 枸杞多糖对21日龄肉仔鸡生产性能及肌肉氨基酸组成的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2019(20):118-122.
- [27] 王硕,赵家辉,邹一诺,等. 枸杞多糖对17℃负压环境下猪精子保存质量的影响[J]. 中国畜牧杂志,2020,56(5):95-99.
- [28] 黄红卫,杜杰,尹庆宁,等. 枸杞渣对育肥猪生长性能、抗病力及猪肉品质的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2015(17):131-134.
- [29] 王启菊,张玉花,晁生玉,等. 饲料中添加枸杞对藏羊血清免疫球蛋白的影响[J]. 中国草食动物科学,2016,36(6):64-66.
- [30] 阎宏,任万哲,刘红霞. 枸杞生产加工废弃物饲用价值评价[J]. 饲料工业,2009,30(23):45-47.
- [31] 马吉锋,王建东,于洋,等. 饲喂枸杞多糖对架子牛免疫球蛋白水平和细胞因子分泌的影响[J]. 畜牧与兽医,2019,51(3):123-125.
- [32] 王建东,马吉锋,侯鹏霞,等. 枸杞多糖对围产期奶牛抗体水平和细胞因子分泌的影响[J]. 动物医学进展,2018,39(4):68-71.
- [33] 刘亚娟,陈赛娟,陈宝江,等. 枸杞多糖对生长獭兔屠宰性能、免疫器官发育及肉质性状的影响[J]. 动物营养学报,2018,30(2):635-640.
- [34] 谭连杰,林黑着,黄忠,等. 枸杞多糖对卵形鲳鲹生长性能、抗氧化能力及血清免疫、生化指标的影响[J]. 动物营养学报,2019,31(1):418-427.
- [35] 白东清,吴旋,李玉华. 枸杞多糖、灵芝多糖对金丝鱼生化指标的影响[J]. 中国饲料,2011(1):30-32.
- [36] 白东清,吴旋,杨广,等. 枸杞多糖对黄颡鱼免疫细胞活性的影响[J]. 水产科技情报,2011,38(1):6-9.

(上接第24页)

- [115] EGERTON-WARBURTON L M, ALLEN E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient[J]. Ecological applications,2000,10(2):484-496.
- [116] DEFOREST J L, ZAK D R, PREGITZER K S, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest[J]. Soil biology and biochemistry, 2004, 36(6):965-971.
- [117] 薛璟花,莫江明,李炯,等. 氮沉降对外生菌根真菌的影响[J]. 生态学报,2004,24(8):1789-1796.
- [118] LILLESKOV E A, FAHEY T J, HORTON T R, et al. Belowground ectomycorrhizal fungal community change over a nitrogen deposition gradient in Alaska[J]. Ecology, 2002, 83(1):104-115.
- [119] CARFRAE J A, SKENE K R, SHEPPARD L J, et al. Effects of nitrogen with and without acidified sulphur on an ectomycorrhizal community in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* Bong. Carr) forest[J]. Environmental pollution, 2006, 141(1):131-138.

- [120] DIGHTON J, TUININGA A R, GRAY D M, et al. Impacts of atmospheric deposition on New Jersey pine barrens forest soils and communities of ectomycorrhizae[J]. Forest ecology and management, 2004, 201(1):131-144.
- [121] ABER J, MCDOWELL W H, NADELHOFFER K J, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypotheses revisited[J]. BioScience, 1998, 48(11):921-934.
- [122] MAGILL A H, ABER J D, BERNTSON G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. Ecosystems, 2000, 3(3):238-253.
- [123] WALLENTA T, KOTTKE I. Nitrogen deposition and ectomycorrhizas[J]. New phytologist, 1998, 139(1):169-187.
- [124] TAYLOR A F S, MARTIN F, READ D J. Fungal diversity in ectomycorrhizal communities of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] and beech (*Fagus sylvatica* L.) along north-south transects in Europe[M]//SCHULZE F D. Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. Berlin:Springer Verlag, 2000:343-365.