

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2017.04.003

## 长期模拟氮沉降对苦竹林土壤氮组分的影响

吴志乐

(四川省岳池县森林病虫害防治检疫站,四川 岳池 638300)

**摘要:**为了解模拟氮沉降对苦竹(*Pleioblastus amarus*)林土壤氮组分的影响,从2007年10月开始,在华西雨屏区苦竹林中用 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 进行模拟氮沉降处理,设置4个水平:对照(CK,  $0 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、低氮(LN,  $50 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、中氮(MN,  $150 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和高氮(HN,  $300 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。分别于2013年11月,2014年1月、4月、7月取各样方内表层(0~20 cm)土样,测定土壤的全氮、铵态氮、硝态氮、颗粒氮、矿质结合氮含量。结果表明:与氮沉降初期相比,长期氮沉降处理使土壤氮组分总量增加,硝态氮的含量显著上升,其他氮组分变化虽不显著,但仍有所变化。

**关键词:**氮沉降;苦竹;土壤;氮组分

中图分类号:S795.9

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2017)04-0010-05

## Effects of Long-term Simulated Nitrogen Deposition on Soil Nitrogen Components of *Pleioblastus amarus* Plantation

WU Zhi-le

(Forestry Pest Control Station of Yuechi County, Yuechi 638300, China)

**Abstract:** To find how the simulated nitrogen deposition affected the soil nitrogen components of *Pleioblastus amarus* plantation, nitrogen addition was initiated in the bamboo forest of Rainy Area of West China from November 2007, in the form of ammonium nitrate ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). 4 N treatment levels were set: control (CK,  $0 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), low-N (LN,  $50 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), medium-N (MN,  $150 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), and high-N (HN,  $300 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Samples were taken from the topsoil (0~20 cm) in November 2013, January 2014, April 2014, and July 2014. The TN,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N, PON, ION content of soil were determined. Results showed that, compared with the initial nitrogen deposition, the TN content of the soil increased, and the content of  $\text{NO}_3^-$ -N increased significantly under long-term nitrogen deposition treatment, while the other nitrogen components were not significantly changed, but still had some changes.

**Key words:** Nitrogen deposition, *Pleioblastus amarus*, Soil, Nitrogen component

大气氮沉降是指大气中的氮元素以 $\text{NH}_3$ (包括 $\text{NH}_3$ 、 $\text{RNH}_2$ 和 $\text{NH}_4^+$ )和 $\text{NO}_x$ 等化合物的形式降落到陆地和水体的过程<sup>[1]</sup>。20世纪中叶以来,化石燃料的燃烧、化学氮肥的生产和使用以及畜牧业等的迅猛发展,使人类活动向大气中排放的活性氮化合物

量激增,大气氮沉降也呈迅猛增加趋势,并向全球扩展<sup>[2]</sup>。在未受到人类活动影响前,生态系统中的年均氮沉降量约为 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而目前世界许多地区的年均氮沉降量已显著高于 $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远大于自然来源<sup>[3]</sup>。氮沉降已使陆地和水体生态系统

收稿日期:2017-07-12

作者简介:吴志乐(1970-),男,林业工程师,主要从事森林病虫害防治检疫工作。

出现了土壤和水体的富营养化、酸化等方面危害,严重威胁着水体和陆地生态系统的健康发展,甚至会危害到人类健康<sup>[4]</sup>。早在 19 世纪 50 年代科学工作者们就开始了大气氮沉降的监测工作<sup>[5]</sup>。国际上,关于氮沉降对森林结构和功能影响的研究始于 20 世纪 80 年代初,这些研究主要集中在欧洲和北美,而且研究点比较分散。到 90 年代发展为定位研究,并逐渐形成研究网络,研究内容也不断拓宽。

氮素是地球上所有生命不可缺少的组成成分,它存在于许多有机分子中,它更是植物所需的营养成分中必不可少的元素之一,土壤中不同种类的氮组分对植物的生长发育都起着重要作用。如氮能刺激植物根系生长和植物发育,增加蛋白质含量,并能促进植物所需其他营养元素的吸收<sup>[6]</sup>。氮元素作为大多数陆地森林生态系统植物生长的共同限制因子<sup>[7]</sup>,其在陆地生态系统中的循环和土壤中的有效性会影响陆地森林生态系统的初级生产力和植物演替进程<sup>[8,9]</sup>。氮沉降对陆地森林生态系统影响的研究颇多,有关氮沉降对全球氮循环的影响受到了高度的重视,也得出了一些研究结果。如王巧红<sup>[10]</sup>等研究表明大气氮沉降加速了森林土壤酸化和氮淋溶。袁颖红<sup>[11]</sup>等的研究也表明随着氮沉降量的增加,土壤 pH 值逐渐下降;经氮沉降处理后土壤交换性盐基总量下降 6.29% ~ 10.38%,土壤阳离子交换量下降 5.07% ~ 8.83%;土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)和硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)含量随氮沉降量的增加而逐渐增加。氮沉降的持续输入,使森林土壤中氮素富集,土壤酸化,土壤中腐殖质分解受损,土壤中  $\text{NO}_3^-$  的活动性增强,生态系统的氮固持能力减小<sup>[12]</sup>;于济通等<sup>[13]</sup>的研究表明,氮沉降对土壤脲酶和蛋白酶活性具有一定影响,而且随着氮沉降量的升高,两种酶活性均呈先升高后降低的趋势。

如今氮沉降问题已经呈现“全球化”趋势,欧美地区氮沉降研究较为成熟,中国近些年在大气氮沉降研究方面也取得了很大进展<sup>[14-16]</sup>。然而,早期的氮沉降研究主要集中于温带地区,并且研究对象主要为落叶乔木树种,而对竹林这一森林类型的研究缺乏应有的关注。竹林生物量占中国总生物量的 10%<sup>[17]</sup>,且大部分竹林分布于氮沉降相对严重的南方地区,并且这些地区也是预计未来氮沉降增加最多的地区。因此,在中国氮沉降集中区研究氮沉降对竹林生态系统的影响意义深远。课题组从 2007 年起,在华西雨屏区中心地带苦竹(*Pleiblastus amarus*)人工林中开展了模拟氮沉降试验,每月一次的

施氮处理持续至今。初期试验表明,氮沉降显著促进了苦竹林各土壤呼吸速率<sup>[18]</sup>,显著抑制了凋落物氮元素的释放<sup>[19]</sup>,并对土壤养分造成了不同程度的影响<sup>[20]</sup>。因此,外源氮输入可能已经显著影响了该生态系统的氮循环过程。本研究在前期研究基础上,研究连续 6 a 的模拟氮沉降处理对该竹林生态系统土壤氮组分的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于四川省洪雅县柳江镇(29°95' N, 103°38' E),海拔约 600 m。该地区属于中亚热带湿润性山地气候,年平均气温 14℃ ~ 16℃,1 月平均气温 6.6℃,7 月平均气温 25.7℃。1980 年 ~ 2000 年平均降水量为 1 489.8 mm,年内降水分配不均,主要集中于 6 月 ~ 8 月,年平均相对空气湿度为 82%。试验地为 2000 年退耕还林工程建成的苦竹人工林,林分的郁闭度为 0.9,密度为 52 000 株 ·  $\text{hm}^{-2}$ ,胸径平均约 2.3 cm,高平均约 5 m。竹鞭、鞭根主要分布在土层 0 ~ 20 cm 中,根系分布范围主要为土壤表层 0 ~ 40 cm,细根密度较高。土壤为紫色土。

### 1.2 试验设计

2007 年 10 月,在苦竹人工林内选择具有代表性的地块作为氮沉降试验样地。在样地中建立 12 个 3 m × 3 m 的样方,每个样方之间设约 5 m 的缓冲带。每个样方边缘用厚度为 0.5 cm 的 PVC 板进行隔离,插入土壤深度为 20 cm。前期研究表明,试验地大气氮沉降主要成分为  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$ <sup>[21]</sup>,故采用  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  进行氮沉降处理,共设置 4 个水平:对照(CK, 0  $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、低氮(LN, 50  $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、中氮(MN, 150  $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和高氮(HN, 300  $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),每个水平处理 3 个重复。3 个氮沉降处理模拟在目前氮沉降基础上,氮沉降量增加约 50%、150% 和 300%。将年施用量平均分成 12 等份,从 2007 年 11 月开始,每月下旬对各样方进行定量模拟氮沉降处理。具体方法:将各处理所需  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶解至 1 L 水中,用喷雾器在该样方中来回均匀喷洒;对照只喷洒等量清水。模拟氮沉降每月定期进行,一直持续至今。

### 1.3 样品采集与处理

分别于 2013 年 11 月,2014 年 1 月、4 月、7 月用土钻( $\Phi = 5 \text{ cm}$ )取苦竹林样地内表土层(0 ~ 20 cm)

土样。将带回的土壤分为两部分,一部分立即除可见根系、石砾和动物残体后过 2 mm 筛,低温密封保存,用于测定铵态氮和硝态氮;另一部分平铺于室内自然风干后,挑除可见根系、石砾和动物残体后过 2 mm 筛,再用四分法从中分出 100 g 左右的土过 0.25 mm 筛,分别装入密封袋中,编号后低温密封保存,用于测定全氮、颗粒氮和矿质结合氮。

#### 1.4 测定指标及方法

称取过 2 mm 筛的风干土 10 g 于 100 ml 塑料瓶中,加入 30 ml  $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的六偏磷酸钠溶液,振荡 15 h,分散。分散液置于  $53 \mu\text{m}$  筛上,用清水冲洗直至沥滤液澄清,筛上保留的  $53 \mu\text{m} \sim 2000 \mu\text{m}$  土壤的氮即为颗粒氮,将其在  $60^\circ\text{C}$  下烘干至恒量,并计算其占整个土壤样品的百分比。用半微量凯氏法 (LY/T 1228 - 1999) 测定土壤全氮 (Total nitrogen, TN) 和土壤颗粒氮 (Particulate organic nitrogen, PON); TN 与 PON 的差值即为土壤矿质结合氮 (Incorporated organic nitrogen, ION) [22]。

分别用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl 浸提—靛酚蓝比色法 [23] 和双波长紫外分光光度法 [24] 测定土壤铵态氮 (Ammonium nitrogen,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 和土壤硝态氮 (Nitrate nitrogen,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )。

#### 1.5 数据处理

所有数据采用统计分析软件 SPSS 20.0 (IBM SPSS Inc. US) 进行重复测量方差分析 (Repeated measures ANOVA),并用最小显著差数法 (LSD 法) 进行多重比较,其显著水平为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟氮沉降对土壤全氮的影响

该苦竹林土壤全氮的含量在  $0.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 0.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,其含量随季节变化明显,1 月份最高 (图 1)。模拟氮沉降对土壤全氮含量的影响虽在统计上不显著 ( $P = 0.364$ ),但随着氮沉降的增加,土壤全氮含量表现出逐渐上升趋势,其中 HN 处理较 CK 增加 8%。

### 2.2 模拟氮沉降对土壤铵态氮的影响

土壤铵态氮含量波动较大,在  $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 8.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,不同季节的土壤铵态氮含量有极显著差异 ( $P < 0.001$ ) (图 2),11 月含量最高,7 月份含量达到最低。重复测量方差分析表明,模拟氮沉降对土壤铵态氮含量的影响不显著 ( $P = 0.915$ ),但氮沉降处理使得土壤铵态氮的含量表现

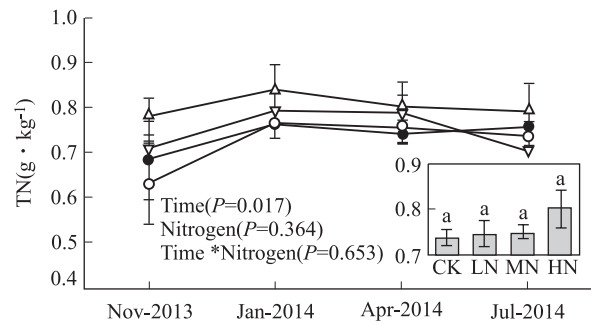


图 1 全氮含量

Fig. 1 The TN content

出一定的变化。与 CK 相比, MN 处理的减少了 3%, HN 处理的增加了 7%。

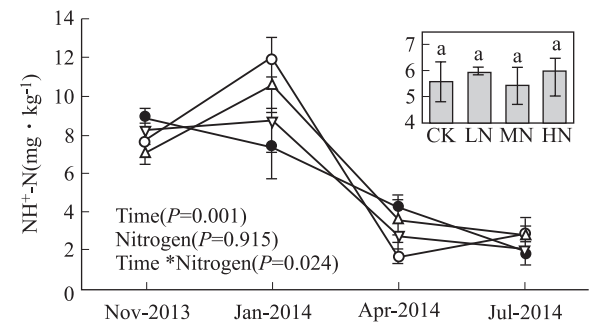


图 2  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量

Fig. 2 The  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  content

### 2.3 模拟氮沉降对土壤矿质结合氮的影响

土壤矿质结合氮含量在全年中含量较稳定,在  $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,分析可以看出季节不同,土壤矿质结合氮含量差异极显著 ( $P < 0.001$ ) (图 3),11 月含量最低,1 月含量最高。重复测量方差分析的结果显示土壤矿质结合氮含量受氮沉降影响不显著 ( $P = 0.854$ ),但与对照组相比,氮沉降处理后的土壤矿质结合氮含量均有所增加,其中经 HN 处理后的土壤矿质结合氮含量最高,较 CK 增加了 8%。

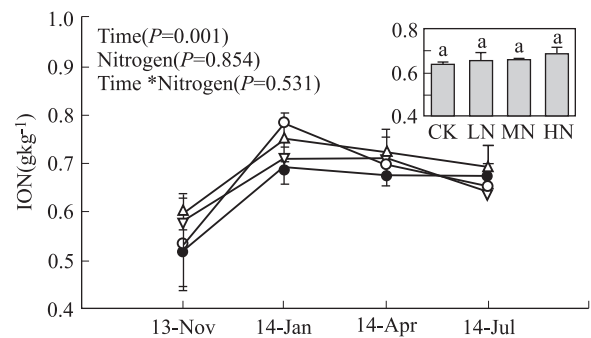


图 3 ION 含量

Fig. 3 The ION content

## 2.4 模拟氮沉降对土壤颗粒氮的影响

土壤颗粒氮含量随季节变化十分明显(图4),2013年11月土壤颗粒氮含量最高,达 $0.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;2014年4月含量最低,为 $0.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。模拟氮沉降对土壤颗粒氮含量的影响在统计上不显著( $P=0.560$ ),但随着氮沉降的增加,土壤颗粒氮的含量表现出一定的变化。较CK的颗粒氮含量,LN处理的颗粒氮含量减少了20%,MN处理的减少了10%,HN处理的增加了10%。

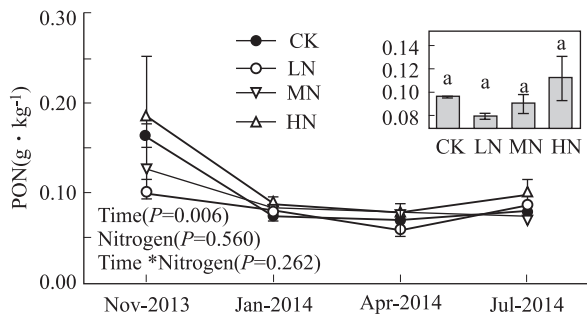


图4 PON含量

Fig. 4 The PON content

## 2.5 模拟氮沉降对土壤硝态氮的影响

数据结果显示,土壤硝态氮含量随季节变化明显( $P<0.001$ )(图5),2014年1月含量达到峰值,为 $19.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;2014年7月含量最低,为 $4.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。经比较分析,模拟氮沉降对土壤硝态氮含量的影响虽在统计上不显著( $P=0.138$ ),但较CK,氮沉降处理后土壤硝态氮含量均有所增加。重复测量方差分析发现,模拟氮沉降与季节的共同作用对土壤硝态氮含量的影响较为显著( $P=0.005$ ),尤其经HN处理后的土壤硝态氮含量与对照组相比变化最为显著,较CK增加21%。

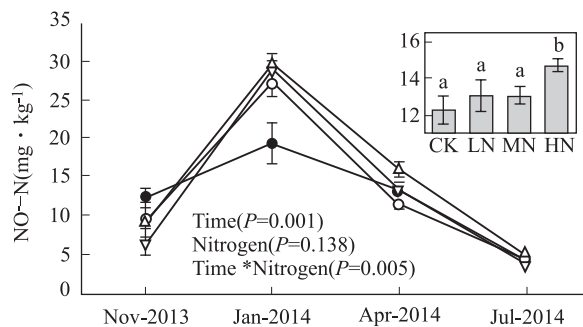


图5  $\text{NO}_3^-$ -N含量

Fig. 5 The  $\text{NO}_3^-$ -N content

## 3 讨论

在之前对苦竹的研究中,了解到苦竹对N素的年需求量约为 $39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,四川华西雨屏区年氮沉降量为 $82.41\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [18],苦竹对N素的需求远小于氮素的年沉降量。植物对N素的需求主要通过吸收 $\text{NO}_3^-$ -N与 $\text{NH}_4^+$ -N进行,苦竹在快速生长期时,对N素的需求量较高。因此施N可促进苦竹的生长,还可增加苦竹的净初级生产力(NPP)。此外,大量的N可通过氨气挥发和反硝化作用损失。所以施氮对 $\text{NO}_3^-$ -N的影响理应不大。本研究中,施N 6 a后,高N组土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的显著增加以及高氮组土壤 $\text{NH}_4^+$ -N的少量增加可能是由于出现了氮饱和现象[25]。

土壤铵态氮与土壤硝态氮之和为土壤无机氮。本研究中, $\text{NH}_4^+$ -N约为无机氮总量的30%。前期的研究中[26],土壤 $\text{NH}_4^+$ -N的含量高出许多,约为土壤无机氮总量的90%。模拟氮沉降可以促进土壤微生物的繁殖[27],增强各种分解者的活动,加上模拟氮沉降的长期性,可能使无机氮各成分含量发生变化。本研究中,无机氮含量占全氮的2.41%。经LN、MN、HN处理后,无机氮占全氮的比例分别为:2.54%、2.47%、2.59%。可以看出经过氮沉降处理后无机氮的含量均有增加,且土壤铵态氮与硝态氮的含量均有所增加,这一结果与蔡玉婷[28]等的研究结果有一定的差别。蔡玉婷的研究发现表层土壤中硝态氮含量增加,但表层土壤的铵态氮含量会减少,铵态氮在底层土壤积累。本研究中表层土壤铵态氮含量增加可能是竹林地表腐殖质造成。

土壤颗粒氮与土壤矿质结合氮之和为全氮。土壤颗粒氮含量为 $0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤矿质结合氮含量为 $0.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。LN、MN、HN处理后,土壤颗粒氮含量分别为 $0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤矿质结合氮含量分别为 $0.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.66\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可以看出颗粒氮和矿质结合氮含量变化不明显,分析结果显示氮处理对颗粒氮和矿质结合氮含量没有显著影响。这与王淑娟[29]等的研究结果不同,王淑娟等的研究中,对冬小麦施氮肥 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后,土壤矿质氮含量增加40.18%,主要由于所施氮肥为尿素,土壤脲酶可使尿素水解生成无机氮化物。但他们的研究显示全氮含量变化不明显,这说明颗粒氮含量在减少。本研究的结果显示土壤颗粒氮和矿质结合氮含量变化不

显著可能是因为施用的是无机氮肥,未对土壤颗粒结构起到显著影响。

综上,长期模拟氮沉降改变着土壤 N 组分含量。这些结果可能对竹林生态系统产生潜在的负面影响。土壤问题与生态环境问题紧密相关,因此,进一步研究土壤其他化学成分对氮沉降的响应情况对解决生态环境问题有着重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Elisabeth A H, Frank J D, Bobby H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/3):7~43.
- [2] Pamela Matson, Kathleen A. Lohse, Sharon J. Hall. 氮沉降的全球化:对于陆地生态系统的意义[J]. *Ambio - 人类环境杂志*, 2002, 31(2):113~119.
- [3] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. *林业科学*, 2012, 48(9):8~14.
- [4] Luca B, Alexandre B, Jonathan H, et al. High nitrogen deposition alters the decomposition of bog plant litter and reduces carbon accumulation[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(3):1163~1172.
- [5] Goulding K W T. Nitrogen deposition to land from the atmosphere[J]. *Soil Use and Management*, 1990, 6:804~818.
- [6] 艾应伟. 土壤生态系统氮素循环[M]. 北京:化学工业出版社, 2008, 4:3~5.
- [7] Vitousek P M, Gosz J R, Grier C C, et al. Comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystem[J]. *Ecological Monographs*, 1982, 52:155~177.
- [8] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, et al. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems[J]. *Bioscience*, 1989, 39:378~386.
- [9] Kronvang B, Andersen H E, Børgesen C, et al. Effects of policy measures implemented in Denmark on nitrogen pollution of the aquatic environment[J]. *Environmental Science & Policy*, 2008, 11:144~152.
- [10] 王巧红, 宫澜波, 张君. 森林生态系统对大气氮沉降的响应[J]. *四川林业科技*, 2006, 27(1):19~25.
- [11] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 等. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4):461~466.
- [12] 方运霆, 莫江明, PER Gundersen 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7):1524~1531.
- [13] 于济通, 陶佳慧, 马小凡, 等. 冻融作用下模拟氮沉降对土壤酶活性与土壤无机氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3):518~523.
- [14] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2):125~136.
- [15] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. *林业科学*, 2001, 37(4):112~115.
- [16] 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.
- [17] Fang Y, Gundersen P, Vogt R D, et al. Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems[J]. *Journal of Forest Research*, 2011, 16:341~350.
- [18] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4):728~738.
- [19] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响[J]. *生态学报*. 2011, 31(6):1547~1557.
- [20] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J]. *植物生态学报*. 2011, 35(2):125~136.
- [21] Fenn M A, Poth M A, Aber J D, et al. Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8:706.
- [22] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦—玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11):2375~2381.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [24] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2):288~293.
- [25] Aber J, Fernandez I. Nitrogen Saturation in Temperate Forest Ecosystems[J]. *Bioscience*, 1998, 48(11):921~934.
- [26] 涂利华, 胡庭兴, 张健等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2):125~136.
- [27] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对土壤氮矿化、固定与激发效应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2):223~229.
- [28] 蔡玉婷, 黄永芳, 张太平, 等. 模拟氮沉降对木荷人工幼林地土壤氮素、碳素、微生物量垂直分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5):755~760.
- [29] 王淑娟, 田霄鸿. 长期地表覆盖及施氮对冬小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):291~299.