

武夷山亚热带常绿阔叶林土壤养分及酶活性对氮沉降的响应

康海军¹, 李春光²

(1. 福州外语外贸学院, 福州 350202; 2. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071001)

摘要:通过原位进行对照[N_0 , 0 kg/($hm^2 \cdot a$)]、低氮[N_1 , 50 kg/($hm^2 \cdot a$)]、中氮[N_2 , 100 kg/($hm^2 \cdot a$)]和高氮[N_3 , 150 kg/($hm^2 \cdot a$)]处理,对武夷山亚热带常绿阔叶林进行了为期 12 个月的模拟氮沉降试验,研究了土壤养分和酶活性及其对模拟氮沉降的响应。结果表明:(1) 氮沉降对常绿阔叶林土壤有机碳、全氮、全钾、有效磷和有效氮含量起到一定的增加作用,对土壤全磷没有显著的影响($p > 0.05$),而高浓度氮沉降会引起土壤养分的降低,其中土壤有效养分(有效磷和有效氮)对氮浓度的响应较大。(2) 土壤微生物量碳和氮随氮浓度的增加呈先增加后降低的趋势,大致表现为: $N_2 > N_1 > N_3 > N_0$,模拟氮沉降处理下土壤微生物量磷差异均不显著($p > 0.05$)。(3) 氮沉降对常绿阔叶林土壤 Bglu 活性、Bxyl 活性、NAG 活性、Phos 活性和 Pero 活性起到一定的增加作用,对 Phox 活性没有显著的影响($p > 0.05$)。(4) 相关性分析表明:土壤养分、酶活性与土壤含水量具有一定的相关性,其中 0—5 cm 土壤含水量相关系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤含水量相关系数;土壤养分、酶活性与土壤温度具有一定的相关性,其中 0—5 cm 土壤温度相关系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤温度相关系数,说明表层(0—5 cm)土壤温度和水分对土壤养分、酶活性的影响较大。

关键词:武夷山; 常绿阔叶林; 土壤养分; 土壤酶活性; 氮沉降

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0093-07

Responses of Soil Nutrients and Enzyme Activities to Nitrogen Deposition in Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest in Wuyishan Mountain

KANG Haijun¹, LI Chunguang²

(1. Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou 350202, China;

2. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: This study was conducted in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Wuyishan Mountain and aimed at measuring soil nutrients and soil enzyme activities and the effects of nitrogen deposition. Nitrogen addition experiments were carried out within the forest selected in 2016. Four N addition treatments with three replicates were established in mature forest: control, no N [N_0 , 0 kg/($hm^2 \cdot a$)], low N [N_1 , 50 kg/($hm^2 \cdot a$)], medium N [N_2 , 100 kg/($hm^2 \cdot a$)] and high N [N_3 , 150 kg/($hm^2 \cdot a$)]. The results showed that: (1) the soil temperature and soil moisture content had the consistent change trend with the highest in January and the lowest in August; (2) there was a significant effect of nitrogen deposition on soil nutrients, and then increased soil nutrients, while there was no significant effect of nitrogen deposition on soil total phosphorus ($p > 0.05$); (3) soil microbial biomass carbon and nitrogen increased first and then decreased with the increase of nitrogen concentration, while there was no significant effect of nitrogen deposition on soil microbial biomass phosphorus ($p > 0.05$); (4) soil Bglu, Bxyl, NAG, Phos, Phox, Pero enzyme activity increased first and then decreased with the increase of nitrogen concentration, and then increased soil enzyme activities, while there was no significant effect of nitrogen deposition on soil Phox enzyme activity ($p >$

收稿日期:2018-04-24

修回日期:2018-05-17

资助项目:福州市科协重点调研课题“福州市生物技术产业应用与开发的对策研究”(SKX2017003)

第一作者:康海军(1987—),男,福建永春人,农学博士,讲师,主要从事森林资源资产评估、森林资源经营管理研究。

E-mail: fjkanghaijun@126.com

0.05); (5) correlation analysis showed that correlation coefficient between soil water content and soil nutrients and soil enzyme activity in 0—5 cm layer was higher than correlation coefficient in 5—10 cm layer; similarly, correlation coefficient between soil temperature and soil nutrients and soil enzyme activity in 0—5 cm layer was higher than correlation coefficient in 5—10 cm layer, suggesting that soil nutrients and soil enzyme are more dependent on soil temperature.

Keywords: Wuyishan Mountain; broad-leaved forest; soil nutrients; soil enzyme activity; nitrogen deposition

近些年来,大气污染、水污染、全球气温上升等已经成为困扰人们生活的现实问题,全球环境问题已经深深影响人们的工作和生活,环境问题日益受到关注,但是全球环境问题的影响因素是多方面的,其中人类的生产生活是最主要的影响因素;近年来大气中的含氮化合物数量大幅增加,主要的原因在于煤炭等矿物燃料的大量使用^[1-3],另外,在农业生产中含氮化肥的大量使用也是主要原因之一,含氮化合物的增加加剧了大气氮沉降,在社会生产生活的影 响之下,大气氮沉降并无明显减弱的趋势,若不加以控制,将会呈现继续上升的发展态势,18 世纪中后期,人们经过一系列的研究发现了氮元素,到 20 世纪后期实现固氮速率控制,氮控制成为日益关注的研究话题,这是人们对氮元素研究的不断转变^[4-6],在这样的转变过程中,活性氮的增加幅度显然已经超过了 10 倍,氮含量的增加主要是人为生产及生活过程中导致的,而自然植被产生的氮含量远低于生产生活导致的氮增加^[7]。自然及人为活动中难以避免地产生活性氮^[8-10],其中的大部分会通过多种方式沉降至陆地,在大气活性氮排放不断增加的情况下,氮沉降将无法有效大量下降^[11]。多种生态系统难以避免地受到了氮沉降的严重制约^[12-13],尤其是对森林土壤的影响较为显著,能够对土壤养分及酶活性产生重要制约作用^[14],就全球来看,我国已经成为第三大氮沉降区,在长期的氮沉降影响之下,森林土壤的矿化速率被提升,进而加剧了土壤酸化,影响森林作物生长及微生物活动^[15]。

在土壤生物化学反应过程中,不仅其活动强度受到酶活性的制约,而且其活动方向也受到酶的制约,此外,微生物活动过程对有机质的存储等也明显受到酶活动的影响^[16],其中酶所含的 β -葡萄糖及木糖苷酶在土壤多糖类物质的水解过程中起着关键作用,其提供的充足碳源利于微生物的活动及新陈代谢,促进土壤碳循环;在氨基酸物质的降解过程中乙酰氨基葡萄糖苷酶 NAG 起到了明显作用^[17-19],对于微生物获取氮源起到了重要促进作用,是土壤碳及氮转化的重要参与者;有机磷的分解离不开酸性磷酸酶 Phos, Phos 活性代表着土壤磷供给的能力^[20];此外,土壤

还会发生氧化还原反应,在此过程中酚氧化酶 Phox、过氧化物酶 Pero 成为主要参与者^[21-22],将直接制约土壤有机质的分解,综合来看,在生态系统中,土壤养分和酶活性成为重要的影响因素。目前对于氮沉降的相关研究主要集中在国外,国内对于氮沉降不断上升造成的森林土壤影响方面的研究较少,氮沉降与土壤养分、酶活性之间的关系研究还较为缺乏,基于此,本研究以武夷山亚热带常绿阔叶林为对象,在测定该地区大气氮沉降背景值的情况下,研究土壤养分及酶活性对模拟大气氮沉降的初期响应,并探讨其响应机制,以期预测该地区在大气氮沉降持续增加的情况下森林土壤的碳动态提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于武夷山森林观测站开展,该观测站所处位置为北纬 27.71°,东经 117.75°,海拔约 630 m,地势不平,有约 31°的坡度,该区域气候具有较明显的亚热带季风特点,夏季年平均温度较高,约为 17.5℃,降雨集中;冬季较为温和,年平均气温 17.5℃,年平均相对湿度 78%~84%,年降水量 1 486~2 150 mm,年雾日平均达 120 d(福建武夷山森林生态定位观测研究站气象观测数据)。试验样地土壤类型为黄壤,平均土层厚度为 60 cm,样地局部区域可达 100 cm 以上,土壤 pH 值 4~5。

试验样地为中亚热带常绿阔叶米槠(*Castanopsis carlesii*)林,这里植被保存相对完好,层次分明,物种丰富。森林垂直结构分为 3 层:第一是乔木层,其高度在 5 m 以上,主要分布植被是米槠、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等;第二是灌木层,高度为 0.3~5 m 分布,主要的植被是树参(*Dendropanax dentiger*)、榕叶冬青(*Ilex ficoidea*)等;第三是草本层,分布在 0.3 m 以下,物种并不多,主要是砂仁(*Amomum villosum*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)^[23]。

1.2 试验设计

武夷山氮沉降试验开始于 2016 年 7 月开始,并设置对照样地,根据氮添加含量的不同,为 3 个梯度:

低氮样地 N_1 , 氮添加为 $50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 中氮样地 N_2 , 氮添加为 $100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 高氮样地 N_3 , 氮添加为 $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。为了保证试验的均一性, 每种氮添加样地设置 3 次重复, 合计 12 块试验样地, 样地长宽均为 20 m, 重复样地之间的间隔要求在 5 m 以上, 而不重复样地的间隔为 10~15 m。在每个月的月初, 根据设置的样地氮添加要求进行释氮处理, 在 30 L 水中溶入 NH_4NO_3 , 通过喷雾器进行均匀喷洒, 同时也在对照样地喷洒等量的蒸馏水。

1.3 土壤养分和酶活性测定方法

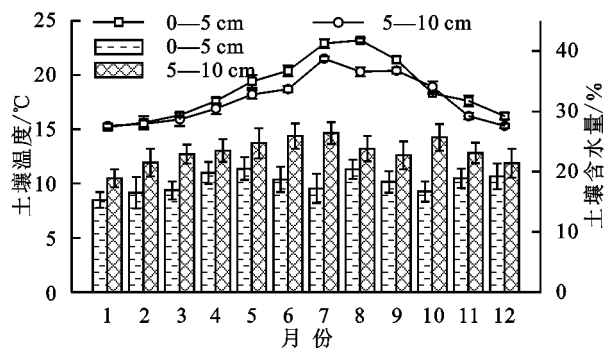
土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的测定分别利用重铬酸钾氧化法、半微量凯式法、比色法; 对于土壤有效氮(AK)进行测定之前首先通过 KCl 溶液进行浸提, 之后方利用流动注射分析仪开展相应的指标测定^[24]; 在本研究过程中主要通过氯仿熏蒸— K_2SO_4 浸提法开展土壤微生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBCP)的相关指标测定。

氧化酶主要包括 Phox 和 Pero, 采取以下方法: 首先称重 1 克样品土壤, 然后置于体积为 125 ml、密度为 50 mmol/L 的乙酸钠缓冲液之中, 经过均匀混合后置于 25℃ 下进行两个小时的培养; 4 种水解酶(Bglu, NAG, Bxyl 和 Phos)通过微孔板荧光法测定, 要求激发光、发射光波长分别达到 365, 450 nm; 对于氧化酶首先加入左旋多巴 DOPA, 然后再加入过氧化氢 H_2O_2 , 之后利用比色法进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 常绿阔叶林土壤温度和含水量动态特征

由于对照样地(N_0)没有进行任何模拟氮沉降处理, 故其在一定程度上反映了本研究森林生态系统内未经处理下的土壤养分及酶活性特征。在试验期内常绿阔叶林土壤温度表现出先增后减的变化趋势; 土壤温度的最小值均出现在 1 月、12 月, 此时 0—5, 5—10 cm 土壤温度分别为 15.1, 15.2℃; 土壤温度最大值则出现在 8 月, 此时 0—5, 5—10 cm 深处的土壤温度分别为 23.5, 19.8℃。土壤含水量与土壤温度呈一致的变化趋势(图 1)。4—7 月, 本试验区土壤温度不断升高, 降雨量也逐渐增多, 良好的水热条件不仅有利于植物的生长发育, 促进植物根系呼吸, 而且可以加快凋落物分解速度, 增强微生物种群数量及其活性, 进而提高土壤养分; 8 月份正好处于伏早期, 降雨量明显减少, 土壤含水量在整个试验期处于最高值, 8 月正好是全年最热月, 此时土壤温度也达到最高。



注: 折线代表土壤含水量, 柱状图代表土壤温度。

图 1 常绿阔叶林土壤温度和含水量动态特征

2.2 氮沉降对常绿阔叶林土壤养分的影响

由表 1 可知, 氮沉降对常绿阔叶林土壤养分具有显著的影响; 与对照 N_0 相比, 随着氮浓度的增加, 土壤养分呈先增加后降低的趋势; 对于土壤有机碳, 其变化范围为 15.32~18.62 g/kg, N_2 显著高于其他处理($p < 0.05$), N_1 和 N_3 差异并不显著($p > 0.05$); 与 N_0 相比, N_1 , N_2 和 N_3 土壤有机碳分别增加了 7.77%, 21.54%, 5.93%。对于土壤全氮, 其变化范围在 1.03~1.45 g/kg, N_2 和 N_3 差异不显著($p > 0.05$), 二者显著高于 N_0 和 N_1 ($p < 0.05$); 与 N_0 相比, N_1 , N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 8.74%, 40.78%, 46.60%。对于土壤全磷, 其变化范围为 1.03~1.15 g/kg, 氮处理与对照之间差异不显著($p > 0.05$); 与 N_0 相比, N_1 , N_2 和 N_3 土壤全磷分别增加了 2.91%, 11.65%, 9.71%。对于土壤全钾、有效磷和有效氮, N_2 显著高于其他处理($p < 0.05$), N_1 和 N_3 差异并不显著($p > 0.05$); 与 N_0 相比, N_1 , N_2 和 N_3 土壤全钾分别增加了 9.87%, 37.38%, 6.39%; 土壤有效磷分别增加了 89.71%, 279.41%, 90.44%; 土壤有效氮分别增加了 14.61%, 63.42%, 12.53%。

双因素方差分析表明(表 2): 氮浓度和氮处理时间对土壤有机碳、全氮、全钾、有效磷和有效氮具有显著的影响($p < 0.05$), 对土壤全磷没有显著的影响($p > 0.05$); 氮处理浓度 × 时间对有机碳、全氮和有效氮具有显著的影响($p < 0.05$), 对土壤全磷、全钾和有效磷没有显著的影响($p > 0.05$)。

2.3 氮沉降对常绿阔叶林土壤微生物量的影响

由表 3 可知, 氮沉降对常绿阔叶林土壤微生物量具有显著的影响, 氮沉降对土壤微生物量起到一定的增加作用; 与对照 N_0 相比, 随着氮浓度的增加, 土壤微生物量呈先增加后降低的趋势; 对于土壤微生物量碳, 其变化范围为 210.36~285.87 mg/kg, N_2 显著高于其他处理($p < 0.05$), N_1 和 N_3 差异并不显著($p > 0.05$); 与 N_0 相比, N_1 , N_2 和 N_3 土壤有机碳分别增加了 12.29%,

35.90%,6.43%。对于土壤微生物量氮,其变化范围为 55.17~105.78 mg/kg,不同浓度处理之间差异均显著($p<0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 24.96%,69.55%,91.73%。对于土壤微生物量磷,其变化范围为 15.03~16.24 mg/kg,氮处理与对照之间差异不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全

磷分别增加了 8.58%,5.72%,8.05%。

双因素方差分析表明(表 4):氮浓度和氮处理时间对土壤微生物量碳和微生物量氮具有显著的影响($p<0.05$),对微生物量磷没有显著的影响($p>0.05$);氮处理浓度 \times 时间对微生物量碳和微生物量氮具有显著的影响($p<0.05$),对微生物量磷没有显著的影响($p>0.05$)。

表 1 氮沉降对常绿阔叶林土壤养分的影响

氮沉降	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效氮/ (mg·kg ⁻¹)
N_0	15.32±2.03c	1.03±0.12b	1.03±0.06a	12.36±2.13c	1.36±0.21c	23.54±2.13c
N_1	16.51±1.65b	1.12±0.16b	1.06±0.08a	13.58±1.69b	2.58±0.16b	26.98±2.65b
N_2	18.62±1.98a	1.45±0.23a	1.15±0.13a	16.98±2.56a	5.16±0.59a	38.47±3.19a
N_3	16.23±1.25b	1.51±0.25a	1.13±0.25a	13.15±1.87b	2.59±0.35b	26.49±2.78b
平均值	16.67±1.67	1.28±0.19	1.09±0.14	11.06±2.06	2.92±0.31	28.87±2.94
p	<0.01	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01	<0.01
F	13.625	158.79	56.32	123.47	116.59	120.47

表 2 时间和氮沉降处理对土壤养分的双因子方差分析

处理	自由度 (n)	有机碳		全氮		全磷		全钾		有效磷		有效氮	
		F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
浓度	4	132.06	<0.01	103.28	<0.05	36.25	>0.05	125.26	<0.05	98.26	<0.05	105.29	<0.05
时间	12	152.17	<0.01	136.47	<0.01	39.27	>0.05	139.18	<0.01	163.24	<0.01	123.17	<0.01
浓度 \times 时间	48	118.92	<0.01	98.26	<0.05	13.58	>0.05	82.03	>0.05	65.79	>0.05	91.06	<0.05

表 3 氮沉降对常绿阔叶林土壤微生物量的影响

氮沉降	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量磷/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量碳/ 微生物量氮	微生物量碳/ 微生物量磷	微生物量氮/ 微生物量磷
N_0	210.36±32.05c	55.17±6.25d	15.03±1.06a	3.81±0.36a	14.00±1.02b	3.67±0.32c
N_1	236.21±23.14b	68.94±6.98c	16.32±0.98a	3.43±0.35ab	14.47±1.38b	4.22±0.16b
N_2	285.87±26.58a	93.54±9.02b	15.89±1.36a	3.06±0.45b	17.99±1.56a	5.89±0.25ab
N_3	223.89±24.15b	105.78±5.47a	16.24±1.58a	2.12±0.24c	13.79±1.04b	6.51±0.29a
平均值	239.08±26.30	80.86±7.65	15.87±1.74	3.10±0.31	15.06±1.29	5.07±0.31
p	<0.01	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01	<0.01
F	158.93	142.26	68.92	135.16	125.89	130.26

表 4 时间和氮沉降处理对土壤微生物量的双因子方差分析

处理	自由度 (n)	微生物量碳		微生物量氮		微生物量磷	
		F	p	F	p	F	p
浓度	4	169.85	<0.01	118.23	<0.05	82.30	>0.05
时间	12	198.32	<0.01	166.92	<0.01	56.21	>0.05
浓度 \times 时间	48	153.02	<0.01	99.24	<0.05	43.14	>0.05

2.4 氮沉降对常绿阔叶林土壤酶活性的影响

由表 5 可知,氮沉降对常绿阔叶林土壤酶活性具有显著的影响,氮沉降对土壤酶活性起到一定的增加作用;与对照 N_0 相比,随着氮浓度的增加,土壤酶活性呈先增加后降低的趋势;对于 Bglu 活性,其变化范围为 5.26~13.02 mol/(h·g), N_2 显著高于其他处理($p<0.05$), N_0 和 N_3 差异并不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤有机碳分别增加了 7.77%,

21.54%和 5.93%。对于 Bxyl 活性,其变化范围为 0.98~3.25 mol/(h·g), N_2 显著高于其他处理($p<0.05$), N_0 、 N_1 和 N_3 差异并不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 8.74%,40.78%,46.60%。对于 NAG 活性,其变化范围为 2.26~6.14 mol/(h·g), N_2 显著高于其他处理($p<0.05$), N_0 、 N_1 和 N_3 差异并不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 8.74%,

40.78%,46.60%。对于 Phos 活性,其变化范围为 13.65~53.14 mol/(h·g),不同氮处理下差异均显著($p<0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 8.74%,40.78%,46.60%。对于 Phox 活性,其变化范围为 0.36~0.49 mol/(h·g),不同氮处理下差异均不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加了 8.74%,40.78%,46.60%。对于 Pero 活性,其变化范围为 0.79~2.56 mol/(h·g), N_2 显著高于其他处理($p<0.05$), N_0 、 N_1 和 N_3 差异并不显著($p>0.05$);与 N_0 相比, N_1 、 N_2 和 N_3 土壤全氮分别增加

了 8.74%,40.78%,46.60%。

双因素方差分析表明(表 6):氮浓度对 Bglu 活性、Bxyl 活性、NAG 活性、Phos 活性和 Pero 活性具有显著的影响($p<0.05$),对 Phox 活性没有显著的影响($p>0.05$);氮处理时间对 Bglu 活性、Phos 活性和 Pero 活性具有显著的影响($p<0.05$),对 Bxyl 活性、NAG 活性和 Phox 活性没有显著的影响($p>0.05$)。氮处理浓度×时间对 Bglu 活性、Phos 活性和 Pero 活性具有显著的影响($p<0.05$),对 Bxyl 活性、NAG 活性和 Phox 活性没有显著的影响($p>0.05$)。

表 5 氮沉降对常绿阔叶林土壤酶活性的影响 mol/(h·g)

氮沉降	Bglu 活性	Bxyl 活性	NAG 活性	Phos 活性	Phox 活性	Pero 活性
N_0	5.26±0.39c	0.98±0.06b	2.26±0.36b	13.65±1.23d	0.36±0.03a	0.79±0.08c
N_1	10.78±0.56b	1.62±0.23b	3.28±0.51b	32.04±2.05b	0.46±0.06a	1.26±0.23b
N_2	13.02±1.54a	3.25±0.35a	6.14±0.42a	53.14±2.14a	0.49±0.05a	2.56±0.24a
N_3	6.25±0.87c	1.02±0.15b	3.05±0.38b	21.79±2.07c	0.38±0.04a	0.81±0.16c
平均值	8.83±0.92	1.72±0.19	3.68±0.49	30.16±2.03	0.42±0.03	1.36±0.19
p	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05	<0.01
F	157.26	135.02	103.69	157.13	72.14	163.27

表 6 时间和氮沉降处理对土壤酶活性的双因子方差分析 mol/(h·g)

处理	自由度 (n)	Bglu 活性		Bxyl 活性		NAG 活性		Phos 活性		Phox 活性		Pero 活性	
		F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
浓度	4	136.03	<0.05	115.03	<0.05	123.47	<0.05	116.98	<0.05	63.18	>0.05	92.03	<0.05
时间	12	174.13	<0.01	75.26	>0.05	69.78	>0.05	135.29	<0.01	62.34	>0.05	132.25	<0.05
浓度×时间	48	105.69	<0.05	61.05	>0.05	58.95	>0.05	92.03	<0.05	43.01	>0.05	83.16	<0.05

3 讨论

本研究表明氮沉降对常绿阔叶林土壤养分具有一定的影响,常绿阔叶林微环境对于氮素的反应较为敏感,土壤含水量受大气降水、地表蒸发、植物吸收蒸腾及土壤特性等影响^[25]。本研究的结果说明了氮沉降在一定程度上增加了常绿阔叶林土壤养分含量,土壤养分循环过程较为复杂,受施氮量、频率、方式、时间、土壤特性以及环境因子等综合影响,本研究保证了相同的土壤基质和环境条件,从氮沉降 1 a 后的试验来看,氮沉降对常绿阔叶林土壤养分起到了一定的增加效应,以中水平的氮沉降[100 g/(m²·a)]对常绿阔叶林土壤养分各指标的增加效应达到最大,促进了土壤养分的吸收和利用,而高水平的氮沉降则导致常绿阔叶林土壤养分的微弱减小,一定程度上降低了土壤养分含量,其中以土壤速效养分对于氮沉降的响应最为明显,也说明了土壤有效养分可以看作不同水平氮沉降处理后土壤养分变化的敏感指标。这可能是由于氮沉降后常绿阔叶林需要吸收较多的土壤养分以供生长繁殖,从而导致常绿阔叶林土壤养分明显增加,同时,植物根系

产生一些有机分泌物和部分腐烂根系,增加土壤中的养分^[26-27]。除了土壤全磷以外,不同水平的氮沉降处理下土壤养分均与 N_0 达到差异显著或极其显著差异水平,说明氮沉降能够增加土壤养分,但对土壤全磷没有显著的增加效应。氮含量增加的情况下[高氮,150 g/(m²·a)],可能会引起植物营养单一而生长受阻,超出了常绿阔叶林吸收养分的阈限,导致土壤养分开始退化。也有可能造成试验区土壤氮素饱和,引起土壤酸化等多种负面效应^[28]。

有学者指出,杨树的林龄不同,其土壤微生物量碳对氮沉降的反应也存在较大差异^[21]。土壤中的微生物能够及时将少量的氮吸收利用,因此低水平的氮沉降并不会显著影响土壤养分,相反,短期内的高氮将使得微生物数量下降^[7-9],多余的氮无法被微生物充分利用,最终导致淋溶至土壤,进而导致土壤发生酸化现象,在这种情况下,一些有毒离子被激发出来,诸如 Al³⁺ 等,这将不可避免地产生铝毒问题,严重制约微生物的生长发育及代谢活动^[22]。在长期氮沉降的影响之下,土壤微生物量碳将会降低,在氮沉降作用之下,植物的生物量分配被改变,土壤的养分及活

性也被改变,较高水平的氮沉降会使得土壤生物量减少,这样会使得土壤微生物的生长发育受限,降低土壤肥力等。在氮沉降的作用之下,植物以及腐殖质等碳氮库会增加,在这种情况下,土壤的碳氮含量会相应提升,从而利于微生物对碳氮的利用,进而利于微生物的生长发育和代谢活动。

对于水解酶来说,在氮浓度不断增加的情况下,其活性先增加,但是当氮含量超过一定限度后酶活性逐渐下降,这说明不同的氮浓度对微生物活动的影响存在较大差距^[29-30];Phox 具有较好的氧化还原能力,能够对有机质和腐殖质产生降解作用,同时形成矿化作用;在水解酶 Pero 的作用之下,过氧化氢和酚类物质经过氧化作用后会形成水、醌,这样能够显著降低其对活细胞的危害。在高氮水平的影响之下,有机质

的积累受到限制,进而影响土壤的物质循环,进而对深层微生物产生影响^[31];

0—5 cm 土壤含水量相关系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤含水量相关系数,这表明土壤养分、酶活性与土壤含水量具有一定的相关性。同样地,0—5 cm 土壤温度决定系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤温度决定系数(表 7),这表明土壤养分、酶活性与土壤温度具有一定的相关性。并且土壤温度的相关系数高于土壤含水量与土壤养分、酶活性的相关系数。其主要原因可能是该区属于亚热带季风湿润性气候特征,降水比较丰富,林地蓄水持水能力较强,从整个试验期来看土壤含水量保持在相对较高的状态,导致水分不是限制土壤养分及酶活性的关键因子,土壤含水量对土壤养分及酶活性的影响远小于土壤温度的影响。

表 7 土壤温度和含水量对土壤养分、酶活性的影响

项目	0—5 cm 土壤含水量		5—10 cm 土壤含水量		0—5 cm 土壤温度		5—10 cm 土壤温度	
	R^2	p	R^2	p	R^2	p	R^2	p
有机碳	0.896	**	0.752	*	0.923	**	0.856	**
全氮	0.823	**	0.763	*	0.913	**	0.812	**
全磷	0.036	ns	0.152	ns	0.136	ns	0.365	ns
全钾	0.536	*	0.436	ns	0.823	**	0.726	*
有效磷	0.156	ns	0.032	ns	0.238	ns	0.132	ns
有效氮	0.614	*	0.563	*	0.654	*	0.562	*
微生物量碳	0.845	**	0.789	*	0.902	**	0.823	**
微生物量氮	0.869	**	0.813	**	0.856	**	0.726	*
微生物量磷	0.163	ns	0.068	ns	0.369	ns	0.214	ns
Bglu 活性	0.823	**	0.725	*	0.563	*	0.321	ns
Bxyl 活性	0.721	*	0.756	*	0.512	*	0.567	*
NAG 活性	0.623	*	0.531	*	0.632	*	0.605	*
Phos 活性	0.521	*	0.326	ns	0.401	ns	0.513	ns
Phox 活性	0.169	ns	0.036	ns	0.235	ns	0.132	ns
Pero 活性	0.423	ns	0.302	ns	0.569	*	0.302	ns

注:ns (no significance),无显著性差异($p>0.05$)。

4 结 论

(1) 氮沉降对常绿阔叶林土壤有机碳、全氮、全钾、有效磷和有效氮含量起到一定的增加作用,对土壤全磷没有显著的影响($p>0.05$),而高浓度氮沉降会引起土壤养分的降低,其中土壤有效养分(有效磷和有效氮)对氮浓度的响应较大;

(2) 土壤微生物量碳和氮随氮浓度的增加呈先增加后降低的趋势,大致表现为: $N_2>N_1>N_3>N_0$,模拟氮沉降处理下土壤微生物量磷差异均不显著($p>0.05$);

(3) 氮沉降对常绿阔叶林土壤 Bglu 活性、Bxyl 活

性、NAG 活性、Phos 活性和 Pero 活性起到一定的增加作用,对对 Phox 活性没有显著的影响($p>0.05$);

(4) 相关性分析表明:土壤养分、酶活性与土壤含水量具有一定的相关性,其中 0—5 cm 土壤含水量相关系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤含水量相关系数;土壤养分、酶活性与土壤温度具有一定的相关性,其中 0—5 cm 土壤温度相关系数 R^2 高于 5—10 cm 土壤温度相关系数,说明表层(0—5 cm)土壤温度和水分对土壤养分、酶活性的影响较大。

参考文献:

[1] 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):111-116.
- [2] 周世兴,邹秤,肖永翔,等.模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响[J].应用生态学报,2017,28(1):12-18.
- [3] 刘彩霞,焦如珍,董玉红,等.应用 PLFA 方法分析氮沉降对土壤微生物群落结构的影响[J].林业科学,2015,51(6):155-162.
- [4] 钟晓兰,李江涛,李小嘉,等.模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(5):1422-1433.
- [5] 刘彩霞,焦如珍,董玉红,等.模拟氮沉降对杉木林土壤氮循环相关微生物的影响[J].林业科学,2015,51(4):96-102.
- [6] 张娇,郝龙飞,王庆成,等.模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响[J].植物研究,2016,36(4):596-604.
- [7] 胡芳,徐美丽,刘婷.模拟氮沉降对华北落叶松人工林土壤氮含量的短期影响[J].山西农业科学,2017,45(4):596-598.
- [8] 汪金松,赵秀海,张春雨,等.模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(10):88-94.
- [9] 向元彬,黄从德,胡庭兴,等.华西雨屏区巨桉人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J].林业科学,2014,50(1):21-26.
- [10] 吴迪,张蕊,高升华,等.模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分的影响[J].生态学报,2015,35(3):717-724.
- [11] 闫钟清,齐玉春,彭琴,等.降水和氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响[J].生态学报,2017,37(9):3019-3027.
- [12] 李英滨,李琪,杨俊杰,等.模拟氮沉降对温带草原凋落物质量的影响[J].生态学杂志,2016,35(10):2732-2737.
- [13] 元晓春,陈岳民,袁硕,等.氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响[J].应用生态学报,2017,28(1):1-11.
- [14] 闫钟清,齐玉春,董云社,等.降水与氮沉降变化对草地关键氮过程的影响研究进展[J].中国环境科学,2016,36(4):1189-1197.
- [15] 顾峰雪,黄玫,张远东,等.1961—2010年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J].生态学报,2016,36(12):3591-3600.
- [16] 彭春菊,李全,顾鸿昊,等.模拟氮沉降及经营方式对毛竹林土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2017,28(2):423-429.
- [17] 梁艳,曹旭娟,张伟娜,等.模拟氮沉降对藏北高寒草甸温室气体排放的影响[J].生态学报,2017,37(2):485-494.
- [18] 向元彬,周世兴,肖永翔,等.模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响[J].生态学报,2017,37(14):4686-4695.
- [19] 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.
- [20] 向元彬,黄从德,胡庭兴,等.模拟氮沉降对常绿阔叶林土壤有效氮形态和含量的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(12):73-80.
- [21] 鲁显楷,莫江明,彭少麟,等.鼎湖山季风常绿阔叶林林下层3种优势树种游离氨基酸和蛋白质对模拟氮沉降的响应[J].生态学报,2006,26(3):118-128.
- [22] 周世兴,邹秤,肖永翔,等.模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响[J].应用生态学报,2017,28(1):12-18.
- [23] 宁凯,于君宝,屈凡柱,等.黄河三角洲滨海地区植物生长季大气氮沉降动态[J].地理科学,2015,35(2):217-222.
- [24] 齐玉春,彭琴,董云社,等.不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应[J].环境科学,2015,36(2):625-635.
- [25] 张蕊,王艺,金国庆,等.模拟氮沉降对低磷胁迫下3个种源木荷幼苗生长及叶片氮磷含量的影响[J].林业科学,2015,51(4):36-43.
- [26] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等.缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J].林业科学,2014,50(1):1-8.
- [27] 宋平,张一,张蕊,等.低磷胁迫下马尾松无性系磷效率性状对氮沉降的响应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):502-511.
- [28] 郑丽丽,郭萍萍,易志刚.鼎湖山典型森林土壤苯系物通量对模拟氮沉降的响应[J].生态环境学报,2015,24(3):396-401.
- [29] 李化山,汪金松,刘星,等.模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应[J].环境科学学报,2014,34(1):238-249.
- [30] 赵晶,闫文德,郑威,等.樟树人工林凋落物养分含量及归还量对氮沉降的响应[J].生态学报,2016,36(2):350-359.
- [31] 刘星,汪金松,赵秀海.模拟氮沉降对太岳山油松林土壤酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(14):4613-4624.