

网络出版时间:2016-10-20 16:36

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.12.011

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161020.1636.022.html>

模拟氮沉降对常绿阔叶林土壤 有效氮形态和含量的影响

向元彬,黄从德,胡庭兴,涂利华,周世兴,肖永翔,唐剑东

(四川农业大学 林学院,四川省林业生态工程省级重点实验室,四川 成都 611130)

[摘要] **【目的】**研究不同氮沉降处理对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分布及其含量的影响。**【方法】**设置对照(CK, 0 g/(m²·年))、低氮(L, 5 g/(m²·年))、中氮(M, 15 g/(m²·年))和高氮(H, 30 g/(m²·年))4个氮沉降水平,从2013年11月开始,每15 d进行1次模拟氮沉降,于2014年5月和11月采集0~20 cm土层土样,并测定土壤铵态氮、硝态氮含量和pH值等理化指标,分析不同氮沉降处理土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 与其他理化指标的相关性。**【结果】**无氮沉降背景下(CK),华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮含量为14.66~16.97 mg/kg, NO_3^--N 占无机氮含量的59.46%。夏季土壤中 NH_4^+-N 含量较高,而冬季土壤中 NO_3^--N 含量较高。模拟氮沉降降低了土壤的pH值,并且随着氮沉降量的增加,pH下降作用更明显。各处理不同土层土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量随着氮沉降量的增加而增大,表现为CK<L<M<H。模拟氮沉降促进了土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的累积,且0~10 cm土层累积作用明显高于10~20 cm土层。各氮沉降处理土壤 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 与全氮、有机质、体积含水量之间均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关性。**【结论】**模拟氮沉降使华西雨屏区常绿阔叶林土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量增加,土壤pH值减小。

[关键词] 常绿阔叶林;华西雨屏区;氮沉降;硝态氮;铵态氮

[中图分类号] S718.55

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)12-0073-08

Effects of simulated nitrogen deposition on forms and contents of soil available nitrogen in an evergreen broad-leaved forest

XIANG Yuanbin, HUANG Congde, HU Tingxing, TU Lihua,
ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, TANG Jiandong

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering,
the Provincial Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: **【Objective】** The aim of this study was to investigate the effects of simulated nitrogen deposition on forms and contents of soil available nitrogen in an evergreen broad-leaved forest in Rainy Area of Western China. **【Method】** Four nitrogen deposition levels including control (CK, 0 g/(m²·year)), low nitrogen (L, 5 g/(m²·year)), medium nitrogen (M, 15 g/(m²·year)) and high nitrogen (H, 30 g/(m²·year)) were set from November 2013 and simulated nitrogen deposition was carried every 15 days. Soil samples of 0—20 cm soil layer were collect in May and November 2014, and the content of soil NH_4^+-N , NO_3^--N , and pH were measured. The correlation coefficients between soil NH_4^+-N , NO_3^--N and other physical-chemical characters were also analyzed in different treatments. **【Result】** The change of soil

[收稿日期] 2015-07-22

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划项目(2010BAC01A11);国家自然科学基金项目(31300522)

[作者简介] 向元彬(1983—),男,四川成都人,在读博士,主要从事森林生态系统经营与管理研究。E-mail: tbrain@163.com

[通信作者] 黄从德(1969—),男,四川内江人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林碳循环、森林资源调查理论与技术研究。E-mail: lyxq100@aliyun.com

inorganic nitrogen was 14.66–16.97 mg/kg under the background of no nitrogen deposition in rainy area of Western China, and NO_3^- -N accounted for 59.46%. The content of NH_4^+ -N was higher in summer, while the content of NO_3^- -N was higher in winter. Simulated nitrogen deposition reduced the soil pH value, and with the increase of the nitrogen deposition rate, the effect was more significant. The contents of NH_4^+ -N and NO_3^- -N increased with the increase of N deposition rate in different soil layers with the order of $\text{CK} < \text{L} < \text{M} < \text{H}$. Simulated nitrogen deposition promoted the accumulation of NH_4^+ -N and NO_3^- -N, and the cumulative effect was significantly higher in 0–10 cm soil layer than in 10–20 cm soil layer. The soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N with total nitrogen (TN), organic matter, and volumetric water content had significant ($P < 0.05$) or very significant relationship ($P < 0.01$) in different nitrogen deposition treatments. 【Conclusion】 The soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N were increased while pH values were decreased by simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest in Rainy Area of Western China.

Key words: evergreen broad-leaved forest; Rainy Area of West China; nitrogen deposition; NO_3^- -N; NH_4^+ -N

氮素是土壤养分的重要组成部分,是森林植物生长发育所必需的重要营养元素之一,其含量是衡量土壤质量、结构、团聚体形成等的主要指标^[1-3]。在森林生态系统中,土壤有效氮主要以铵态氮和硝态氮的无机氮形式存在,是植物从土壤中吸收氮素的主要形态^[4-6],其含量与分布不仅对土壤氮素的循环过程有着重要影响,而且与植物生产力有着紧密联系。

氮沉降问题在全球气候变化中是一个非常严重的问题。目前我国已经成为欧洲、北美之后的第三大氮沉降区,形成了东南、四川盆地、长江中下游平原等高氮沉降中心^[7]。氮沉降的增加已经对各种生态系统的特征和过程产生了重要影响^[8],诸如土壤酸化、土壤营养元素贮存失衡和水体富营养化等一系列生态问题^[7]。而硝态氮与铵态氮是氮沉降的两种主要形态,可直接影响土壤有效氮水平^[9],对森林生态系统产生显著影响。目前,国内外学者模拟氮沉降对森林生态系统的影响研究,主要集中在土壤呼吸^[10-11]、土壤酶^[12-13]、凋落物分解^[14-16]、土壤微生物^[17-18]等方面,并取得了丰硕的成果,但模拟氮沉降对土壤无机氮方面的研究还相当少见。已有的研究表明,模拟氮沉降对土壤氮素分布及其含量具有显著的影响^[19-20],但影响结果却并不一致,其对无机氮形态及含量影响的内在机理还没有得到充分揭示,而且氮沉降对不同森林类型土壤氮素的影响也有待进一步丰富。因此,本研究以四川华西雨屏区常绿阔叶林为对象,进行为期 1 年的模拟氮沉降试验,探讨氮沉降对土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量的影响,旨在为进一步研究氮沉降对森林生态系统氮循环的影响提供基础资料。

1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市雨城区碧峰峡(102°90' E, 29°40' N),海拔高度 977.62 m, $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 5 231 $^\circ\text{C}$, 年均气温为 16.2 $^\circ\text{C}$, 最冷月为 1 月, 平均气温 6.1 $^\circ\text{C}$, 最热月为 7 月, 平均气温 25.4 $^\circ\text{C}$, 全年地面均温 18.1 $^\circ\text{C}$ 。日照长度为 1 039.6 h, 全年太阳辐射总量为 3 640.13 MJ/cm²。无霜期为 304 d, 年平均降水量 1 772.2 mm, 年蒸发量为 1 011.2 mm, 全年相对湿度为 79%, 气候温和湿润, 属亚热带湿润季风型山地气候, 试验区为地带性的偏湿性亚热带常绿阔叶林。试验区内植物种类丰富, 群落结构复杂。主要有木荷(*Schima superba*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、青榨槭(*Acer davidii*)、野漆(*Rhus succedanea*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、深裂中华槭(*Acer sinense*)、利川润楠(*Machilus lichuanensis*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*)、大叶石栎(*Lithocarpus megalophyllus*)、桫欏(*Eurya japonica*)和山茶(*Camellia japonica*)等。土壤类型以黄壤为主, 土壤厚度大于 60 cm, 林地条件基本一致。

2 材料与方法

2.1 试验地设置

2013 年 10 月在四川省雅安市雨城区碧峰峡选择具代表性的天然常绿阔叶林作为研究对象, 在研究对象内建立 12 个 3 m × 3 m 的样方, 随机分为 4 组, 每个样方间设宽度 > 3 m 的缓冲带。试验设置 4 个氮沉降水平, 每个水平 3 个重复, 处理水平分别为

对照(CK,0 g/(m²·年))、低氮(L,5 g/(m²·年))、中氮(M,15 g/(m²·年))和高氮(H,30 g/(m²·年))。将年氮沉降量换算为每 15 d 的氮沉降量,从 2013 年 11 月下旬开始,平均每 15 d 用 NH₄NO₃ 进行模拟氮沉降 1 次。施氮的方法是将每个样方所需 NH₄NO₃ 溶解在 2 L 水中,用手提式喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒,非施氮处理样方喷施 2 L 清水。

2.2 土壤样品采集与处理

模拟氮沉降 0.5 年(2014-05-21、夏季)和 1 年(2014-11-21、冬季)后采集土样。在样方内随机设 5 个土壤采集样点,用 100 cm³ 环刀在 0~10 和 10~20 cm 2 个土层取样,将每个样方内所采集的每一层土样混合均匀,去掉土壤中可见植物根系和残体后分为两份,一份按鲜样保存,用于测定土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量及体积含水量;另一份自然风干后过筛,用于测定土壤全氮、有机质含量和 pH 值等。

2.3 土壤理化指标的测定

土壤 pH 值采用电位法测定;土壤体积含水量采用时域反射仪测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤 NH₄⁺-N 含量采用氧化镁浸提-扩散法测定;土壤 NO₃⁻-N 含量采用酚二磺酸比色法测定;全氮含量采用半微量凯氏法测定。

表 1 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林 0~20 cm 土层土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of simulated nitrogen deposition on soil physical-chemical characters in 0—20 cm soil layer in an evergreen broad-leaved forest

月份 Month	处理 Treatment	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	无机氮/ (mg·kg ⁻¹) Inorganic nitrogen	有机质/ (g·kg ⁻¹) Soil organic matter	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total nitrogen	体积含水量/% Volumetric water content	pH 值 pH value
5	CK	5.53±0.42	9.13±0.96	14.66±1.05	25.55±2.25	1.21±0.55	29.76±1.85	6.32±0.04
	L	7.31±0.33	10.02±0.56	17.32±1.32	25.89±1.86	1.24±.038	30.12±1.32	6.25±0.05
	M	11.99±1.34	11.01±1.24	23.00±1.46	26.29±2.04	1.24±0.65	29.18±1.03	6.07±0.06
	H	15.42±1.08	12.18±0.87	27.60±1.68	26.45±1.94	1.28±0.45	30.24±1.54	5.86±0.05
11	CK	11.98±0.76	4.99±0.56	16.97±1.79	27.31±2.18	1.23±0.36	26.35±1.06	6.34±0.12
	L	14.34±1.21	5.94±0.65	20.28±2.04	27.98±1.46	1.32±0.82	27.06±0.86	6.12±0.07
	M	17.16±1.32	6.67±0.54	23.83±1.75	28.55±1.54	1.28±0.57	26.58±1.74	5.87±0.02
	H	20.64±1.67	8.36±1.02	29.00±2.13	29.34±1.67	1.31±0.61	26.73±1.13	5.75±0.04

3.2 模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林土壤 NH₄⁺-N 的影响

由图 1 可以看出,经过 6 个月的模拟氮沉降后,L、M、H 处理 0~10 cm 土层土壤的 NH₄⁺-N 含量分别比 CK 高 17.00%,29.08%和 37.58%,模拟氮沉降处理与 CK 土壤 NH₄⁺-N 含量的差异均达到显著水平($P<0.05$);各处理 10~20 cm 土层土壤 NH₄⁺-N 含量在 7.91~10.12 mg/kg。经过 12 个月的模拟氮沉降后,CK、L、M 和 H 处理 0~10 cm 土

2.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2003、SPSS 13.0 进行数据处理与分析,并采用 LSD 比较不同处理间土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的差异显著性。

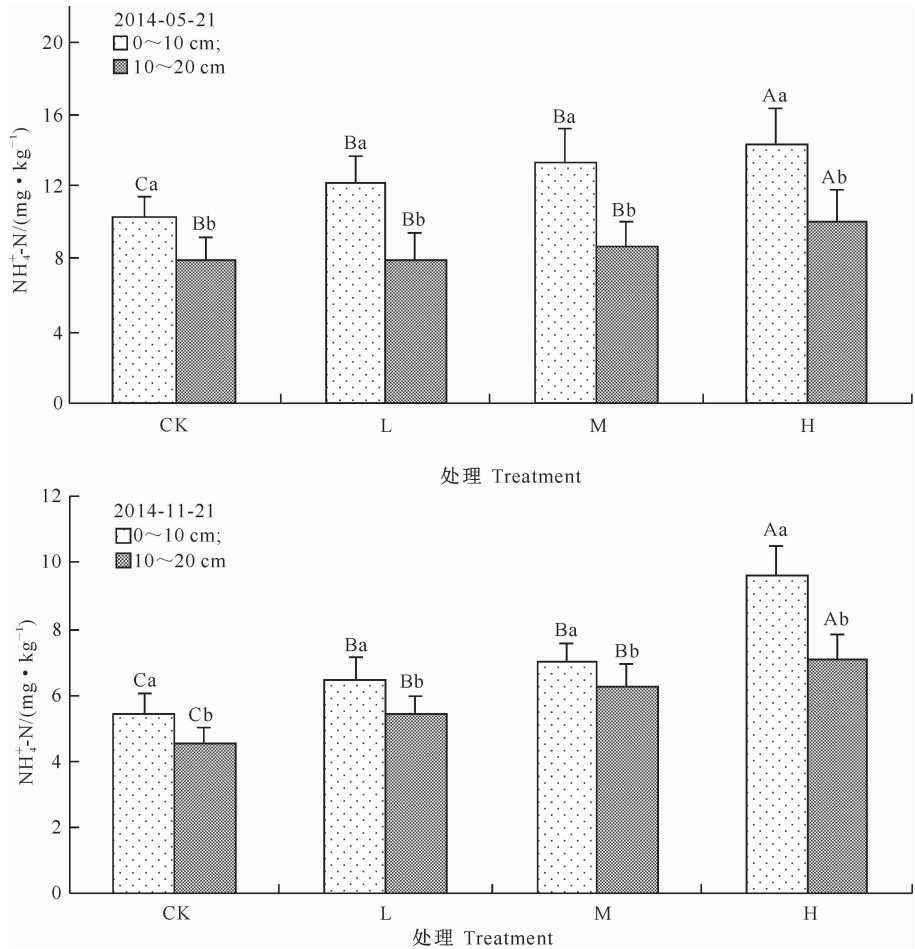
3 结果与分析

3.1 模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林土壤理化性质的影响

由表 1 可以看出,无氮沉降背景下(CK),华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮含量为 14.66~16.97 mg/kg,其中 NO₃⁻-N 含量为 5.53~11.98 mg/kg, NH₄⁺-N 含量为 4.99~9.13 mg/kg, NO₃⁻-N 平均占无机氮含量的 59.46%。华西雨屏区常绿阔叶林夏季土壤 NH₄⁺-N 含量较高,冬季土壤 NO₃⁻-N 含量较高。这说明华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮在夏季主要以 NH₄⁺-N 形式存在,而冬季以 NO₃⁻-N 为主。

由表 1 还可以看出,土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量随着氮沉降量的增加而不断增加。氮沉降使华西雨屏区常绿阔叶林土壤 pH 下降,并且随着氮沉降量的增加,下降幅度更明显。这表明模拟氮沉降促进了华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮的累积,并使土壤 pH 值降低。

层土壤 NH₄⁺-N 含量分别为 5.48,6.47,7.02 和 9.65 mg/kg, 10~20 cm 土层土壤 NH₄⁺-N 含量分别为 4.51,5.41,6.31 和 7.07 mg/kg。总体来看,氮沉降处理土壤 NH₄⁺-N 含量高于 CK,表现为 CK<L<M<H,表明模拟氮沉降促进了土壤 NH₄⁺-N 含量的累积。各处理 0~10 cm 土层土壤 NH₄⁺-N 含量明显高于 10~20 cm 土层,说明 0~10 cm 土层土壤 NH₄⁺-N 含量累积量较高。



图柱上标不同大写字母代表处理间差异显著($P < 0.05, n = 3$),
标不同小写字母代表土层间差异显著($P < 0.05, n = 3$)。下同

Different capital letters denote significantly different among treatments ($P < 0.05, n = 3$), and different lowercase letters denote significantly difference among layers ($P < 0.05, n = 3$). The same below

图 1 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林不同土层土壤铵态氮含量的影响
Fig. 1 Effects of simulated nitrogen deposition on contents of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in different soil layers in an evergreen broad-leaved forest

3.3 模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响

由图 2 可以看出,经过 6 个月的模拟氮沉降后, L、M、H 处理 0~10 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别比 CK 高 35.34%, 115.31% 和 185.34%, 模拟氮沉降处理与 CK 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); 各处理 10~20 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 4.91~13.32 mg/kg 波动。经过 12 个月的模拟氮沉降后, CK、L、M 和 H 处理 0~10 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别为 13.88, 16.02, 19.53 和 22.71 mg/kg, 10~20 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别为 10.07, 12.65, 14.78 和 18.57 mg/kg。总体来看, 氮沉降处理土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于 CK, 表现为 $\text{CK} < \text{L} < \text{M} < \text{H}$, 表明模拟氮沉

降促进了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的累积。各处理 0~10 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于 10~20 cm 土层, 说明 0~10 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量累积量较高。

3.4 不同氮沉降处理土壤无机氮含量与其他理化性质的相关性

由表 2 可以看出, CK 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的相关性不显著 ($P > 0.05$), 其余处理二者之间的相关性达显著或极显著水平。各氮沉降处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与全氮、有机质、体积含水量之间均存在显著或极显著相关性。CK、L 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与土壤 pH 值相关性不显著 ($P > 0.05$), 其余处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与土壤 pH 的相关性达显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P <$

0.01)。

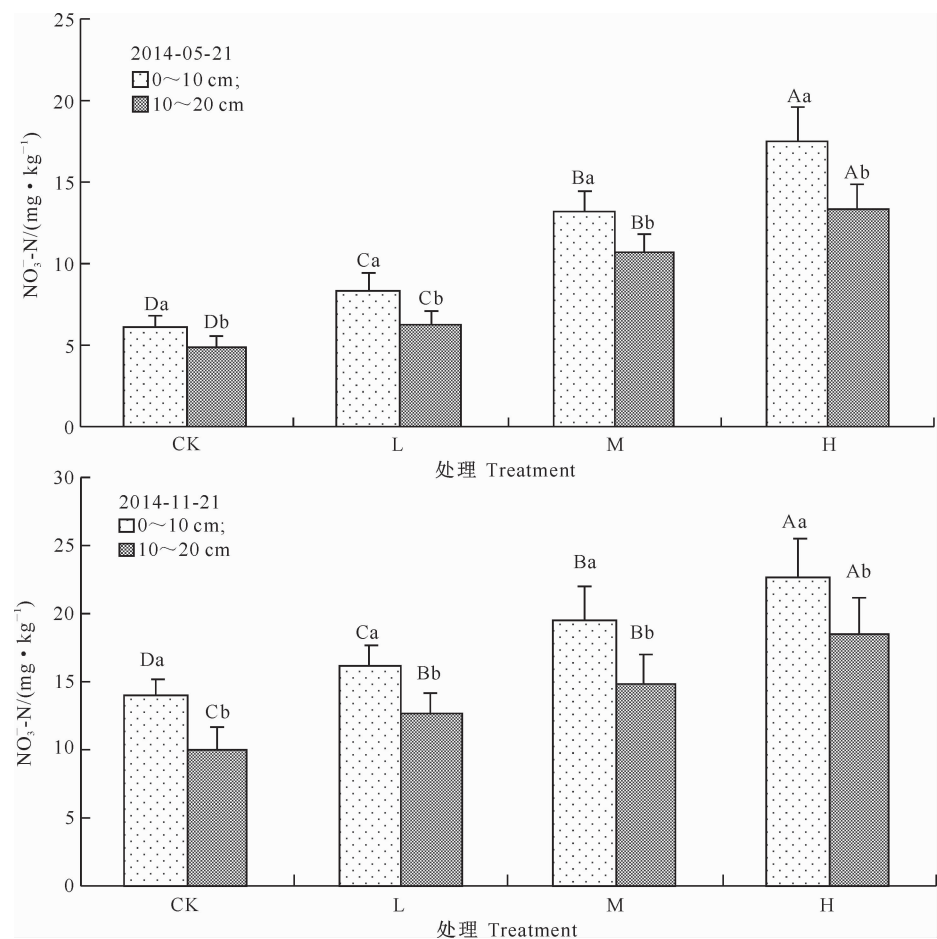


图 2 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林不同土层土壤硝态氮含量的影响
Fig. 2 Effects of simulated nitrogen deposition on contents of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in different soil layers in an evergreen broad-leaved forest

表 2 华西雨屏区天然常绿阔叶林不同氮沉降处理 0~20 cm 土层土壤无机氮与其他理化性质的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between soil available nitrogen and other physical-chemical characters in 0—20 cm soil layer in different nitrogen deposition treatments in an evergreen broad-leaved forest

处理 Treatment	氮形态 Nitrogen form	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	全氮 Total nitrogen	有机质 Soil organic matter	体积含水量 Volumetric water content	pH 值 pH
CK	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1	0.632 5 *	0.883 0 * *	0.736 2 *	0.432 2
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.431 6	0.724 3 * *	0.753 8 * *	0.821 5 * *	0.346 4
L	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1	0.825 1 * *	0.787 4 *	0.753 6 * *	0.475 4
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.742 5 *	0.826 7 * *	0.887 6 * *	0.621 4 *	0.587 1
M	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1	0.723 2 *	0.924 3 * *	0.721 3 *	0.653 2 *
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.921 4 * *	0.657 9 *	0.856 4 * *	0.764 8 *	0.843 1 * *
H	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1	0.874 3 * *	0.758 4 *	0.865 4 * *	0.635 6 *
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.932 6 * *	0.783 6 *	0.885 6 * *	0.713 2 *	0.776 3 * *

注: * 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平相关性显著 ($n=3$)。
Note: * and * * stand for significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively($n=3$).

4 结论与讨论

本研究中,无氮沉降背景下(CK),华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮含量为 14.66~16.97 mg/kg, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量平均占无机氮含量的 59.46%,可见该林地土壤无机氮以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主,这与方运霆等^[19]的研究结果一致。但李贵才等^[21]在研究哀牢山木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*)林

及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征时发现,各种植被下铵态氮占无机氮总量的 95% 以上。高洪翠等^[22]研究了水源涵养林不同植被类型土壤铵态氮和硝态氮的分布特征,发现槭树-蒙古栎(*Acer mono-Quercus*)林、山杨(*Populus davidiana*)林和白桦-山杨(*Betula platyphylla-P. davidiana*)林的铵态氮含量占无机氮总量的 79% 以上。出现差异的原因可能是由于不同树种对土壤不同形态氮的吸收有差异,从而使得不同植被类型下土壤无机氮含量不同。本研究还表明,在华西雨屏区常绿阔叶林夏季土壤中, NH_4^+-N 是土壤无机氮的主要存在形式;而在冬季土壤中, NO_3^--N 是土壤无机氮的主要存在形式。主要原因可能是土壤有机质是土壤铵态氮的主要来源,而夏季水热条件较好,凋落物分解快,微生物和酶活性高,土壤有机质中的有机氮在微生物和酶的作用下转变为铵态氮,导致夏季铵态氮含量较高;冬季降雨量少,而水分含量较低,硝态氮带负电荷,不容易在离子交换中流失,导致冬季硝态氮含量较高^[23]。

本研究结果表明,各处理 0~10 cm 土层土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量明显高于 10~20 cm 土层,与前人的一些研究结果^[20,22] 一致。主要原因可能是:一方面,随着土层深度的增加,微生物数量减少,其活性下降,由微生物主导的土壤矿化速率降低^[22],使得土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量减少;另一方面,林下凋落物分解会直接影响土壤养分含量,凋落物分解后养分停留在土壤表层,导致土壤表层养分含量较高^[23-24]。另外,采用 NH_4NO_3 模拟氮沉降后,其部分保留在土壤表层土中^[25],可直接增加土壤有效氮水平^[19],使模拟氮沉降样方中土壤表层 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量较高。

氮沉降会改变土壤生态化学计量特征,不仅影响土壤碳氮磷循环^[26-29],而且会改变土壤氮矿化的速率。土壤氮矿化速率对氮沉降的响应与施氮强度和施氮时间长短有关。一般而言,土壤氮矿化速率在短期内随施氮量的增加而增大,导致土壤有效氮含量显著增加^[30]。本研究表明,氮沉降使华西雨屏区常绿阔叶林土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量增加,并且随着氮沉降量的增加,其增加效果更为明显。于济通等^[31]对东北松嫩羊草草地土壤酶活性和无机氮含量的研究发现,土壤铵态氮含量随氮沉降量的增加而呈上升趋势,土壤硝态氮含量在秋冬季节随氮沉降量的增加而增大,在冬春季节随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。胡艳玲等^[32]研究了

长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应,结果表明,两种森林类型土壤总有效氮、铵态氮、硝态氮含量随着氮沉降量的增加而增大,且以高氮处理的增加作用更明显。李琛琛等^[20]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的研究发现,短期施氮显著增加了华北落叶松天然成林表层土壤的铵态氮和硝态氮含量,特别是在 0~10 cm 土层中效果更明显。上述这些结果与本研究基本一致,由此可见,短期施氮可以促进华西雨屏区常绿阔叶林土壤无机氮的增加,进而促进地表植物和林木的生长。

氮沉降会导致土壤酸化,改变土壤 pH 值^[33]。本研究表明,氮沉降降低了土壤的 pH 值,并随着氮沉降量的增加,降低作用更明显,这与前人的一些研究结果^[26,34-35] 相一致。也有研究表明,随着氮沉降量的增加,土壤 pH 并未发生显著变化^[20],出现这种现象的主要原因是由于该地区的森林处于氮缺乏状态,所施氮素主要被植物和土壤吸收,并未引起土壤中 NO_3^--N 的淋出。而华西雨屏区全年总 N 沉降量为 8.24 g/m²,氮沉降量较高,已经超出了该地区氮沉降的临界负荷值^[36],并有逐年上升趋势。因此,随着氮沉降量的增加,土壤中 NO_3^--N 的淋溶会随之增加,导致土壤酸度增加,引起土壤 pH 下降。

本研究相关分析结果表明,氮沉降处理土壤 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 的相关性达显著或极显著水平。各处理土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 与全氮、有机质、体积含水量之间均存在显著或极显著相关性。CK、L 处理土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 与土壤 pH 值相关性不显著,其余处理则相关性显著,这与一些研究结果^[2,5,6,23] 相似。有研究表明,在森林土壤中铵态氮转化为硝态氮是比较明显的,二者之间相关性显著^[22]。无机氮的变化与有机质含量的变化趋势一致。而外加氮源可能影响了土壤的物理化学过程,改变了土壤的微环境,从而影响了土壤氮动态,并最终导致铵态氮、硝态氮含量的变化。

由此可见,氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林土壤氮素状况产生了明显的影响,但其影响机制非常复杂,本研究为期 1 年,时间较短,模拟氮沉降仅处于初期阶段,要全面评价氮输入对森林土壤氮素循环的影响还需进一步长期深入地研究。

参考文献

- [1] Deluca T, Nilsson M C, Zackrisson O. Nitrogen mineralization and phenol accumulation along a fire chronosequence in northern Sweden [J]. *Oecologia*, 2002, 133(2): 206-214.

- [2] 肖春艳,贺玉晓,赵同谦,等. 退耕湿地典型植被群落土壤氮分布及储量特征 [J]. 水土保持学报,2014,28(4):138-142,147.
Xiao C Y, He Y X, Zhao T Q, et al. Distribution and storage characteristics of soils nitrogen with different plant communities in the riparian wetland recovered from farmlands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 138-142, 147.
- [3] 陈金泉,赵 忠,李玉新. 不同类型沙棘人工林对土壤氮矿化速率的影响 [J]. 土壤通报,2011,42(3):616-621.
Chen J Q, Zhao Z, Li Y X. The research of nitrogen mineralization rate of different *Hippophae rhamnoides* plantation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 616-621.
- [4] 王春燕,林希昊,李光明,等. 种植年限对胶园土壤剖面有机碳分布特征的影响 [J]. 热带作物学报,2011,32(8):1399-1403.
Wang C Y, Lin X H, Li G M, et al. The vertical characteristics of soil organic carbon in different developing stages of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(8): 1399-1403.
- [5] 莫江明,郁梦德,孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究 [J]. 植物生态学报,1997,21(4):335-341.
Mo J M, Yu M D, Kong G H. The dynamics of soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N in a pine forest of dinghushan, as assessed by ion exchange resin bag method [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1997, 21(4): 335-341.
- [6] 孟 盈,薛敬意,沙丽清,等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究 [J]. 植物生态学报,2001,25(1):99-104.
Meng Y, Xue J Y, Sha L Q, et al. Variations of soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and N mineralization under different forests in Sishuangbanna, southwest China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(1): 99-104.
- [7] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future [J]. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.
- [8] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences [J]. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [9] 王晶苑,张心昱,温学发,等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 [J]. 生态学报,2013,33(5): 1337-1346.
Wang J Y, Zhang X Y, Wen X F, et al. The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [10] 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.
Xiang Y B, Huang C D, Hu T X, et al. Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in an *Eucalyptus grandis* plantation in the Rainy Area of Western China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 21-26.
- [11] 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.
Sun S Q, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Responses of soil respiration to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest in Jinyun Mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 1-8.
- [12] 宋学贵,胡庭兴,鲜骏仁,等. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应 [J]. 生态学报,2009,29(3): 1234-1240.
Song X G, Hu T X, Xian J R, et al. Soil enzyme activities and its response to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest, southern Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1234-1240.
- [13] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, et al. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [J]. Ecology, 2000, 81(9): 2359-2365.
- [14] 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 [J]. 生态学报,2004,24(7):1413-1420.
Mo J M, Xue J H, Fang Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [15] 樊后保,刘文飞,杨跃霖,等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应 [J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):8-13.
Fan H B, Liu W F, Yang Y L, et al. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 8-13.
- [16] Blackwood C B, Waldrop M P, Zak D R, et al. Molecular analysis of fungal communities and laccase genes in decomposing litter reveals differences among forest types but no impact of nitrogen deposition [J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(5): 1306-1316.
- [17] 袁颖红,樊后保,刘文飞,等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响 [J]. 水土保持学报,2012, 26(2): 138-143.
Yuan Y H, Fan H B, Liu W F, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in a Chinese fir plantation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 138-143.
- [18] Wallenstein M D, McNulty S, Fernandez I J, et al. Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1): 459-468.
- [19] 方运霆,莫江明,周国逸,等. 南亚热带林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应 [J]. 生态学报,2004,24(11): 2353-2359.
Fang Y T, Mo J M, Zhou G Y, et al. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2353-2359.
- [20] 李琛琛,刘 宁,郭晋平,等. 氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响 [J]. 生态环境学报,2014,23(12): 1924-1932.
Li C C, Liu N, Guo J P, et al. Short term effect of nitrogen

- deposition on needle of *Larix* and forest soil [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(12): 1924-1932.
- [21] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉. 哀牢山木果柯林及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 210-217.
- Li G C, Han X G, Huang J H. Dry-season dynamics of soil inorganic nitrogen pools in primary *Lithocarpus xylocarpus* forest and degraded vegetations in Ailao Mountain, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(2): 210-217.
- [22] 高洪翠, 范志平, 李法云, 等. 水源涵养林不同植被类型土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1211-1216.
- Gao H C, Fang Z P, Li F Y, et al. Soil NH_4^+ -N and distribution of different vegetation types in water conservation forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1211-1216.
- [23] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems [J]. *Environmental Reviews*, 1997, 5(1): 1-25.
- [24] 薛立, 薛晔, 杨振意, 等. 杉木林改造后的土壤 pH 和养分动态 [J]. *安徽农业大学学报*, 2012, 39(4): 483-488.
- Xue L, Xue Y, Yang Z Y, et al. Seasonal dynamics of pH and soil nutrients of *Cunninghamia lanceolata* forest after reconstruction with broadleaved trees [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2012, 39(4): 483-488.
- [25] 陈立新, 段文标. 模拟氮沉降对温带典型森林土壤有效氮形态和含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2005-2012.
- Chen L X, Duan W B. Effects of simulated nitrogen deposition on soil available nitrogen forms and their contents in typical temperate forest stands [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2005-2012.
- [26] 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 等. 亚热带杉木人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应 [J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4631-4642.
- Fan H B, Liu W F, Li Y Y, et al. Tree growth and soil nutrients in response to nitrogen deposition in a subtropical Chinese fir plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4631-4642.
- [27] 莫江民, 彭少麟, 方运霆, 等. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 492-497.
- Mo J M, Peng S L, Fang Y T, et al. A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soils of pine-broadleaf mixed forest in Dinghuashan biosphere reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 492-497.
- [28] Elser J J, Andersen T, Baron J S, et al. Shifts in lake N:P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition [J]. *Science*, 2009, 326(5954): 835-837.
- [29] Peñuelas J, Sardans J, Rivas-ubach A, et al. The human-induced imbalance between C, N and P in earth's life system [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 3-6.
- [30] Li D, Mo J, Fang Y, et al. Ecophysiological responses of woody plants to elevated nitrogen deposition [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 12(5): 482-488.
- [31] 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.
- Yu J T, Tao J H, Ma X F, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on enzymatic activities and inorganic nitrogen contents in soil during freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 518-523.
- [32] 胡艳玲, 韩士杰, 李雪峰, 等. 长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应 [J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(5): 36-38.
- Hu Y L, Han S J, Li X F, et al. Responses of soil available nitrogen of natural forest and secondary forest to simulated N deposition in Changbai Mountain [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(5): 36-38.
- [33] Turner M M, Henry H A L. Interactive effects of warming and increased nitrogen deposition on ^{15}N tracer retention in a temperate old field: seasonal trends [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(12): 2885-2893.
- [34] 袁颖红, 樊后保, 王强, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响 [J]. *浙江林学院学报*, 2007, 24(4): 437-444.
- Yuan Y H, Fan H B, Wang Q, et al. Available nutrients with increased N deposition in soils of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(4): 437-444.
- [35] 李秋玲, 肖辉林, 曾晓舵, 等. 模拟氮沉降对森林土壤化学性质的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(12): 1872-1878.
- Li Q L, Xiao H L, Zeng X D, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil chemical properties of forests [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, 22(12): 1872-1878.
- [36] 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.
- Tu L H, Hu T X, Huang L H, et al. Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleuroblastus amarus* forest, Rainy Area of Western China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 728-738.