DOI: 10.5846/stxb201506171222
王方超,邹丽群,唐静,方向民,万松泽,吴南生,王辉民,陈伏生.氮沉降对杉木和枫香土壤氮磷转化及碳矿化的影响.生态学报,2016,36(11): - .
Wang F C, Zou L Q, Tang J, Fang X M, Wan S Z, Wu N S, Wang H M, Chen F S.Influence of nitrogen deposition on soil nutrient supply and organic carbon mineralization in *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana*plantations.Acta Ecologica Sinica,2016,36(11): - .

氮沉降对杉木和枫香土壤氮磷转化及碳矿化的影响

王方超[1],邹丽群[1],唐静[2],方向民[1],万松泽[1],吴南生[1,*],王辉民[3],陈伏生[1]
1 江西农业大学林学院 江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心,南昌 330045
2 赣南师范学院生命与环境科学学院,赣州 341000
3 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站,北京 100101

摘要:氮沉降是全球变化的重大环境问题,根际是地下生态过程研究的前沿,但目前氮沉降对亚热带地区不同树种土壤氮、磷供应和碳矿化根际过程的影响及其机制尚不清楚。选取典型红壤区 15a 针叶树杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和阔叶树枫香(*Liquidamba formosana*)为对象,野外原位开展 10 g N m^{-2} a^{-1}氮沉降试验 3a,于 2014 年 8 月收集杉木和枫香根际土壤和非根际土壤,测定其 pH 值、有效氮、速效磷、水溶性有机碳及其 34 d 有机碳矿化动态,并计算根际效应。结果表明:氮沉降显著降低两个树种土壤 pH 值和杉木根际土壤速效磷($P<0.05$);提高枫香非根际土壤 NO_3^--N 和杉木非根际土壤水溶性有机碳含量。同时,氮沉降显著提高杉木土壤有机碳矿化速率,根际和非根际的增幅分别为 71.2%和 41.2%,降低枫香土壤有机碳矿化速率,根际和非根际的降幅分别为 10.6%和 44.1%。此外,氮沉降显著降低枫香土壤 NO_3^--N 和有机碳前期矿化速率的根际效应,增强后期矿化速率的根际效应,而杉木对氮沉降响应不显著。可见,氮沉降可显著改变树木土壤养分供应和有机碳稳定性,且丘陵红壤区针叶树和阔叶树根际过程对氮沉降的响应模式有别。率先报道了亚热带不同树种根际碳、氮、磷耦合过程对氮沉降的响应格局,并较好地揭示了针叶树和阔叶树对氮沉降响应的分异机制。

关键词:根际过程;全球变化;养分供应;有机碳稳定性;丘陵红壤

Influence of nitrogen deposition on soil nutrient supply and organic carbon mineralization in *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana*plantations

WANG Fangchao[1], ZOU Liqun[1], TANG Jing[2], FANG Xiangmin[1], WAN Songze[1], WU Nansheng[1,*], WANG Huimin[3], CHEN Fusheng[1]
1 *College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *China*
2 *College of Life and Environment Sciences, Gannan Normal University, Ganzhou* 341000, *China*
3 *Institute of Geographic Science and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: Nitrogen (N) deposition is a major environmental issue that affects global climate change. Study of the rhizosphere has become a research frontier in underground ecology. However, the effects of N deposition on N and phosphorus (P) supplies, and organic carbon (OC) mineralization in the rhizosphere of trees in subtropical China remains unclear, and whether the underlying mechanisms differ between tree species need to be determined. In the present study, a coniferous tree (*Cunninghamia lanceolata*) and a broadleaf tree (*Liquidambar formosana*) each 15 years of age were selected at the Qianyanzhou Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences to evaluate *in situ* N deposition. Trees were treated with 10 g N m^{-2} $a^{-1}$and compared to the control. After 3 years, rhizosphere and bulk soils for both tree species

基金项目:国家自然科学基金(31160107 & 31360179);江西省研究生创新资金(YC2014-S190);江西省青年科学家培养对象(20122BCB23005)和江西省自然科学基金(2012BAB204005)
收稿日期:2015-06-17; **修订日期**:2015-10-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: rensh111@126.com

were collected to assess pH value, mineral N, available P, water-soluble organic carbon (WSOC), and the dynamic of OC mineralization following 34 days incubation. Rhizosphere effects of all measured variables were assessed using ratios of rhizosphere to bulk soil, and OC mineralization parameters at early (0 - 9 d), middle (9 - 19 d), and late stages (19 - 34 d) were obtained using the traditional dynamics model. N deposition significantly decreased rhizosphere and bulk soil pH, available P in rhizosphere soil of *C. lanceolata*, and OC mineralization intensity in bulk soil of *L. formosana*. N deposition also increased NO_3^--N in bulk soil of *L. formosana* and WSOC in bulk soil of *C. lanceolata* ($P < 0.05$). In contrast, NH_4^+-N, mineral N, and the ratio of mineral N to available P in rhizosphere and bulk soils did not differ significantly between both species. N deposition significantly increased OC mineralization rates in *C. lanceolata* rhizosphere and bulk soil by 71.2% and 41.2%, respectively; but decreased OC mineralization rates in *L. formosana* rhizosphere and bulk soil by 10.6% and 44.1%, respectively. N deposition significantly decreased both the rhizosphere effects of NO_3^--N and the early OC mineralization rate in *L. formosana*, but increased its late OC mineralization rate; whereas the rhizosphere effects of all measured variables in *C. lanceolata* showed no significant differences between control (CK) and N treatments. N deposition significantly altered soil nutrient supply and OC stability, and the synchronicity of responses to N deposition between rhizosphere and bulk soil was stronger for *C. lanceolata* than for *L. formosana*. We concluded that response of rhizosphere processes to N deposition differs between conifer and broadleaf tree species. The response of rhizosphere OC mineralization to N deposition showed a positive effect for *C. lanceolata*, and a negative effect for *L. formosana*, as their rates preferentially increased and decreased, respectively with N deposition. This difference could be attributed to their nutrient requirements and root traits, because *C. lanceolata* prefers fertile soil and are not associated with mycorrhizal fungi, whereas *L. formosana* can tolerate infertile soil with roots that are associated with mycorrhizal fungi. To our knowledge, the present study is the first to report on the effects of N deposition on the interactions between supplies of N and P in soil, and the stability of OC in different tree species of subtropical China, and reports divergent mechanisms in coniferous versus broadleaf tree species.

Key Words: rhizosphere process; global climate change; nutrient supply; organic carbon stability; hilly red soil

氮(N)沉降的持续加重及其生态效应受到科学家的广泛关注[1-2]。20 世纪以来,由于人类活动的影响,N 沉降量不断升高,全球当前 N 沉降速率已超过 10 kg N ha^{-1} a^{-1},预计到 2050 年还将增加一倍,部分地区可达 50 kg N ha^{-1} a^{-1}[3]。随着社会经济的快速发展,中国已是继欧洲和美国之后的第三大 N 沉降区[4]。已有研究表明,N 沉降影响生态系统的养分循环、碳(C)动态、植被动态,凋落物分解和土壤酸化等各个方面[2,5],但这些影响仍存在很大的不确定性。

氮和磷(P)是植物生长所需的两大矿质元素,土壤 N 和 P 供应水平将影响森林生产力和稳定性[6]。研究表明,N 沉降一方面可以降低土壤 C/N,增强微生物的分解作用,提高 N 矿化速率及植物可利用 N,进而增加植物净光合产物和凋落物量[4];另一方面,N 沉降输入过多的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N,大量 NH_4^+-N 通过硝化作用转化为 NO_3^--N,产生 H^+,导致土壤酸化,N 流失加剧[7]。同时,在丘陵红壤区,土壤 P 通常被强烈的吸附固定,有效 P 含量极低[6]。N 沉降可通过影响植物根际碳水化合物分泌,酸化土壤等过程,影响土壤 P 转化与供应,从而影响树木 P 吸收和利用[8]。例如,庞丽等[9]研究表明,模拟 N 沉降提高植株体 N:P 比,可增强异质生境条件下马尾松(*Pinus massoniana*)对 P 的吸收。此外,C 循环是森林最重要的生物地球化学循环过程之一,与森林生产力与全球气候变化密切相关。土壤有机 C 矿化是土壤生物通过自身活动,分解和利用土壤活性有机组分完成自身代谢,释放 CO_2的过程,影响土壤养供给及土壤质量[10-11]。N 沉降可能增加、降低或不影响土壤 C 排放[12-14],相关的机制有待深入研究。

根际被认为是森林生物地球化学循环的关键区域,是物质和能量转化最激烈的区域之一,范围一般为距根表几毫米至数厘米的区域[15]。N 沉降对养分转化和有机 C 矿化的影响效应可能优先作用于根际土壤,因

为植物根产生分泌物和脱落物可为根际区土壤微生物提供有效 C 和 N 源,使根际土壤微生物在数量上显著高于非根际土壤,并随之引起一系列土壤生化过程的变化与连锁效应[16]。此外,由于不同物种对 N 的需求各异,不同树种根际分泌物对 N 沉降的响应不同,这必然影响根际土壤 N 转化和有机 C 矿化。总体来看,N 沉降对树木根际过程及其效应的研究报道较少,对不同树种(如:针叶树和阔叶树)的响应过程及其机制的了解还明显不够[17],不利于确切提出森林应对全球 N 沉降的有效措施。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方主要用材树种,为亚热带常绿针叶林的代表性树种[18]。枫香(*Liquidamba formosana*)为长江中下游次生林的重要冠层树种,是亚热带落叶阔叶树的代表[19]。基于此,结合南方丘陵山区 N 沉降不断加重的生态问题,研究两种代表性树种根际 N、P 养分转化和有机 C 矿化对 N 沉降的响应过程及其异同机制。研究结果有助于更好的剖析和理解针叶树和阔叶树地下根际 N、P 和 C 过程的耦合效应与调控机制,为全球变化背景下亚热带地区森林经营和管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地点位于江西省泰和县灌溪镇中国科学院千烟洲试验站(115°04′13″E,26°44′48″N,海拔多在 100 m 左右,相对高度差 20—50 m),该地为典型红壤丘陵地貌,地势起伏、丘顶浑圆,以 10°—25°坡度居多,由白垩系红色与紫红色砾岩、砂岩和泥岩组成,除少数丘顶和裸露地外,风化层一般厚 30—50 cm。林地土壤为红黄壤,年均气温 18℃,年平均降水量约 1500 mm,年均相对湿度 90%,年日照时数 1400 h,全年降水充沛,但年际变化较大,年内分布不均匀,属典型亚热带季风气候[20]。

1.2　试验设计

试验样地为典型红壤区 15 年杉木和枫香混交林(表 1),其中杉木和枫香的比例为 8:2,在 8 块 20 m ×20 m 混交林地中野外原位开展 10 g N m^{-2} a^{-1} N 沉降模拟试验,其中 N 沉降处理和对照各 4 块,配对设置,施肥自 2012 年春起,每年 4 季各一次,施肥方式为 NH_4NO_3拌少量细沙均匀撒施,对照只撒等量细沙。试验处理之前,在每块样地用 3 cm 土钻随机取表层(0—20 cm)土壤 36 个点混合,预处理后,测定其基本养分特性(表 2)。

表 1　氮沉降处理前杉木和枫香混交林林分基本背景特征

Table 1　General stand properties in mixed forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidamba formosana* before nitrogen deposition treatment

因子 Parameters	处理 Treatments		
	对照 Control	氮沉降 Nitrogen deposition	t-检验 t-test
林分密度 Stand density/ (stem/hm^2)	2250	2150	/
杉木和枫香混交比例 CUL:LIF(2)	8:2	8:2	/
杉木平均胸径 CUL Mean DBH/cm	12.2±0.2	11.9±0.3	ns
杉木平均树高 CUL Mean tree height/m	8.5±0.2	8.7±0.2	ns
枫香平均胸径 LIF Mean DBH/cm	12.8±0.3	13.3±0.4	ns
枫香平均树高 CUL Mean tree height/m	9.8±0.4	10.1±0.4	ns
凋落物厚度 Litter thickness/cm	3.5±0.2	3.7±0.2	ns

平均值±标准误,ns,差异不显著,下同; CUL,杉木 *Cunninghamia lanceolata*;LIF,枫香 *Liquidamba formosana*

1.3　样品采集

2014 年 8 月,在每块样地中选定杉木和枫香标准木各一株,4 次重复,共 16 株。在离树干 0.5—1 m 的位置挖掘 3 个 10 cm×10 cm×15 cm 的土块,将依附在植物根系上 4 mm 之内土壤轻轻抖落出来,并用镊子将细根及其它杂物移除,将抖落下来的土壤定义为根际土;非根际土为未依附于根系上的土壤[10,21]。收集好足量土壤后,将其混匀分装过 2 mm 筛,在 4℃冰箱中保存,并尽快完成土壤相关指标的测定。

1.4　土壤养分特性的测定

土壤养分测定参考鲁如坤[22]的方法,其中 NH_4^+-N 用靛酚蓝比色法测定;NO_3^--N 采用镀铜镉还原-重氮化

耦合比色法;有效 P 采用 NH_4F-HCl 浸提,钼锑抗比色法测定;有机 C 的测定采用重铬酸钾外源加热法;土壤 pH 值采用水浸提酸度计法,其中水:土为 5:1。同时,土壤可溶性有机 C 采用蒸馏水(水土比 2:1)浸提,震荡 0.5 hr,离心,0.45 μm 滤膜抽滤,TOC 分析仪测定滤液中的含量;土壤含水量用 105℃烘干法测定,所有的数据均换算成烘干土质量计算。此外,为衡量 N 转化特征,本研究将 NO_3^--N/矿质 N($NH4^+$-N 和 NO_3^--N 之和)之比定义为相对硝化强度[23]。

1.5 土壤碳矿化估测方法

土壤有机 C 矿化的估测采用碱液密闭吸收法,每个样品各称取 3 份过 2 mm 网筛的新鲜土壤 30 g 于可封闭的广口瓶中,加蒸馏水至饱和持水量的 40%左右,量取 1 mol/L NaOH 溶液 10 ml 于 50 mL 烧杯中,在广口瓶内盖上涂抹凡士林直至密封良好,密闭放入 25℃的恒温箱中进行培养,采用碱液吸收法测定矿化量,测定时间为第 3 d、6 d、9 d、14 d、19 d、24 d 和 34d[23]。为便于描述和分析,本文将 0-9 d、9-19 d 和 19-34 d 划分为前期、中期和后期 3 个矿化阶段。

有机 C 矿化的动力学模型参数计算公式使用 $C_m = C_0(1-e^{-kt})$,C_m和 C_0分别代表在培养期累积的 OC 矿化量(%)和矿化潜力(矿化势%),k 和 t 分别代表矿化常数和培养时间。同时,将培养 34 d C 矿化总量占水溶性有机 C 量之比定义为可矿化强度;将 N 沉降处理有机 C 矿化速率与对照之比定义为对 N 沉降的响应强度。

1.6 根际效应的界定

根际效应是指根际土壤理化与生物学特性不同于非根际土壤的差异性。通常用 R/B 来表示,其中 R 代表根际土壤,B 代表非根际土壤,根际正效应是指根际土壤中某个指标的量高于非根际土壤,因此,用 R/B>1 表示为正效应,R/B<1 为负效应[10]。

1.7 数据处理

采用 SPSS 17.0 统计软件和 Excel 2007 进行统计和数据分析,不同处理间参数的差异采用 Duncan 法进行多重比较(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对土壤氮磷供应的影响

试验处理前 N 沉降和对照处理林地土壤基本理化特性背景值无显著差异(表 2)。试验处理 4a 之后,N 沉降对根际和非根际土壤 pH 值和硝化强度影响显著,对根际速效 P 和非根际 NO_3^--N 含量影响显著(P<0.05);对 NH_4^+-N、矿质 N 和矿质 N/速效 P 等化学特性的影响不显著;不同树种的上述土壤化学特性之间均无显著差异,且 N 沉降处理和不同树种的交互作用不显著。此外,不同树种之间土壤化学特性根际效应差异不显著(图 1)。

表 2 氮沉降处理前杉木和枫香混交林土壤基本养分特征

Table 2 Soil general nutrient properties in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidamba formosana* before nitrogen deposition treatment

变量 Variable	处理 Treatments		
	对照 Control	氮沉降 Nitrogen deposition	t-检验 t-test
容重 Soil density/(g/cm^3)	1.22±0.03	1.25±0.03	ns
pH (H_2O)	4.43±0.04	4.40±0.08	ns
有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	21.20±2.2	22.41±1.62	ns
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	1.29±0.13	1.26±0.09	ns
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.29±0.02	0.31±0.03	ns
C/N	16.60±1.09	17.80±0.78	ns
N/P	4.68±0.66	4.30±0.57	ns
C/P	76.34±9.18	76.78±10.59	ns

进一步分析发现,N 沉降仅显著降低杉木非根际土壤 pH 值,降幅为 3.8%,但同时降低枫香根际和非根际土壤 pH 值,降幅分别为 4.3%和 5.8%(图 1)。N 沉降仅显著提高枫香非根际土壤 NO_3^--N 含量,增幅达 248.8%(图 1)。此外,N 沉降显著降低杉木根际土壤速效 P 含量,降幅为 29.9%(图 1)。

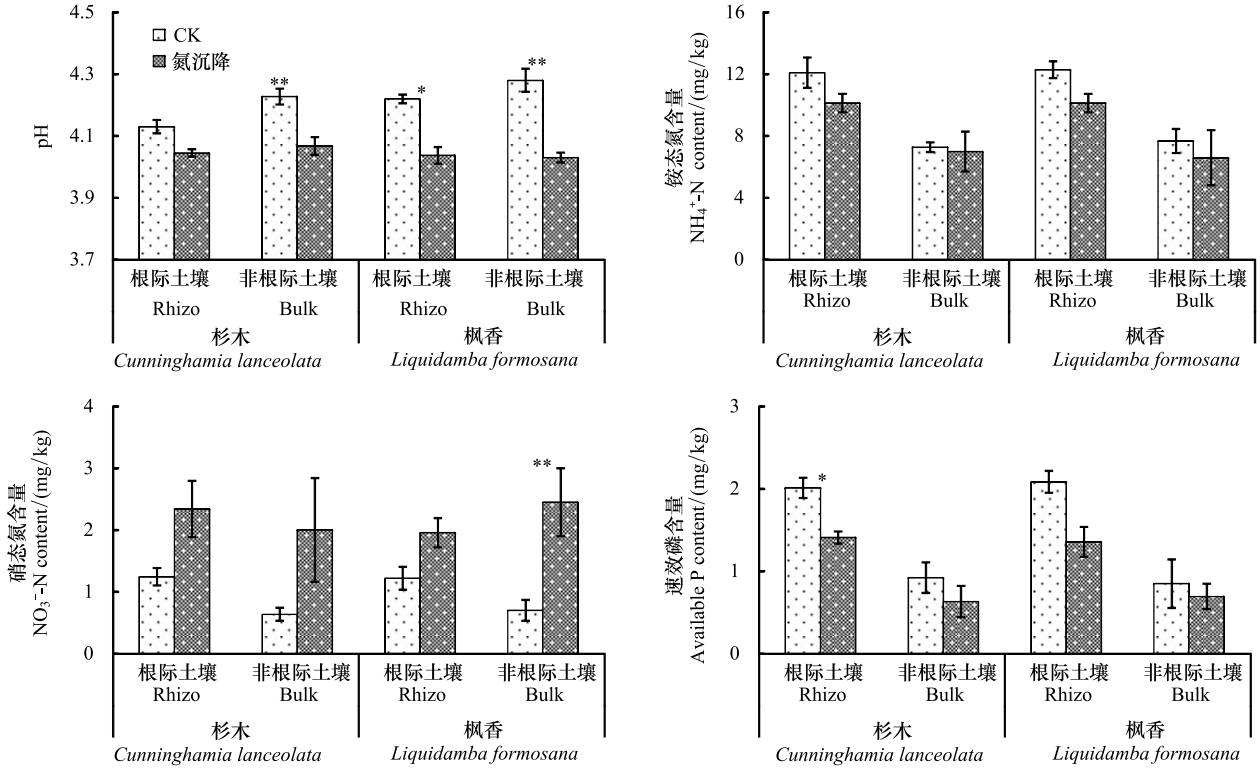

图 1　两种处理条件下杉木和枫香根际和非根际土壤 pH 值和有效养分的变异格局

Fig.1　Rhizosphere and bulk soil pH and available nutrients of two trees with and without N deposition

平均值±标准误; * $P<0.05$, * * $P<0.01$, * * $P<0.001$

2.2　氮沉降对不同树种土壤有机碳矿化的影响

方差分析结果表明,N 沉降对根际和非根际土壤矿化势影响显著,对非根际水溶性有机 C、可矿化强度和前期矿化速率影响显著;对中期、后期矿化速率和平均矿化速率影响均不显著;除矿化势以外,不同树种以上土壤化学指标在根际土壤中均无显著差异。N 沉降处理和不同树种对根际和非根际土壤可矿化强度、前期、中期和平均矿化速率的交互作用显著,仅对非根际土壤后期矿化速率和矿化势交互作用显著。此外,N 沉降仅对前期矿化速率的根际效效应影响显著,N 沉降处理和不同树种的交互作用仅对后期矿化速率具显著影响(图 2)。

进一步对比分析发现,N 沉降仅显著提高了杉木非根际土壤水溶性有机 C 含量,增幅为 23.6%,对杉木根际土壤、枫香根际和非根际土壤水溶性有机 C 含量影响不显著。N 沉降显著降低枫香非根际土壤有机 C 可矿化强度,降幅达 44.2%,但对杉木根际和非根际、枫香根际土壤有机 C 可矿化强度影响不显著(图 2)。

杉木根际和非根际土壤的 34 d 有机 C 矿化量均表现为 N 沉降处理高于对照,增幅分别为 71.2%和 41.2%;枫香根际和非根际土壤的 34 d 矿化量均表现为对照高于 N 沉降处理,降幅分别为 10.6%和 44.1%;其中对照处理枫香非根际土壤矿化量最高((67.13±5.09) mg CO_2 · g OC^{-1}),对照处理杉木根际土壤矿化量最低((33.49±3.01) mg CO_2 · g OC^{-1})(图 3)。同时,杉木土壤有机 C 各个时期的矿化速率对 N 沉降的响应强度均表现为正效应,而枫香则均为负效应(图 4)。

2.3　两个树种各变量根际效应对氮沉降的响应格局

除杉木对照和 N 沉降处理 pH 值、枫香对照处理 pH 值和 N 沉降处理 NO_3^--N 根际效应表现为负效应外,

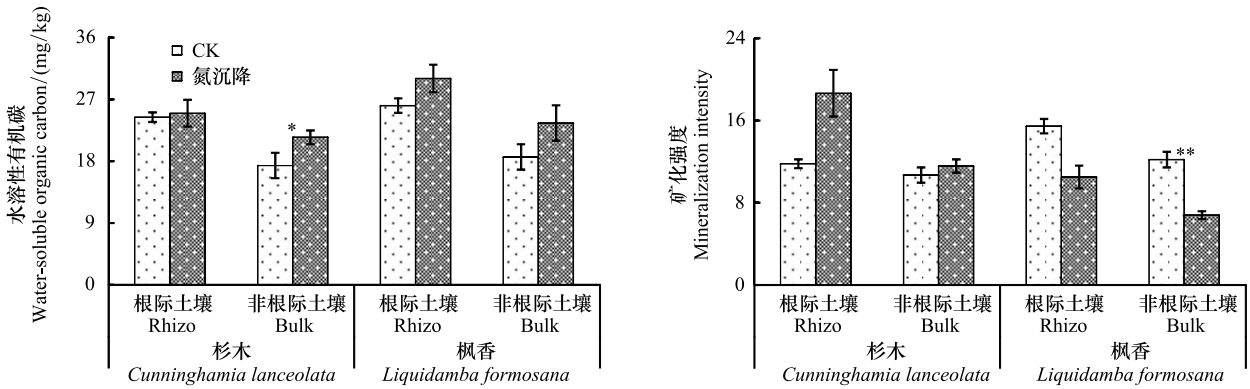

图 2 不同处理杉木和枫香根际和非根际土壤水溶性有机碳和(a)可矿化强度(b)(可矿化碳/水溶性有机碳)的变异格局

Fig.2 Rhizosphere and bulk soil water soluble organic carbon (a) and mineralization intensity (b) of two trees with and without N deposition

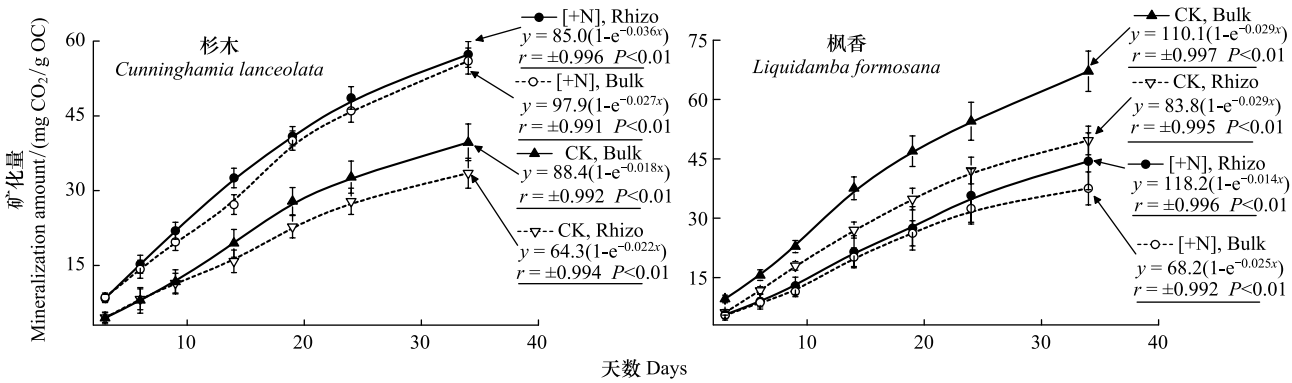

图 3 不同处理杉木和枫香根际和非根际土壤有机碳矿化动态及其模型

Fig.3 The dynamics and their models of rhizosphere and bulk soil organic carbon mineralization under two tree species with and without nitrogen deposition

CK, Rhizo 表示对照处理根际土壤;CK, Bulk 表示对照处理非根际土壤;[+N], Rhizo 表示 N 沉降处理根际土壤;[+N], Bulk 表示 N 沉降处理非根际土壤

杉木和枫香在两种处理下 NH_4^+-N、NO_3^--N、速效 P、水溶性有机 C、前期、中期和后期有机 C 矿化速率均为正效应。其中枫香 NO_3^--N 和有机 C 前期矿化速率根际效应均为对照显著大于 N 沉降处理,后期矿化速率的根际效应则表现为 N 沉降处理显著大于对照,其它土壤化学特性在不同处理下的根际效应无显著差异(图 5)。

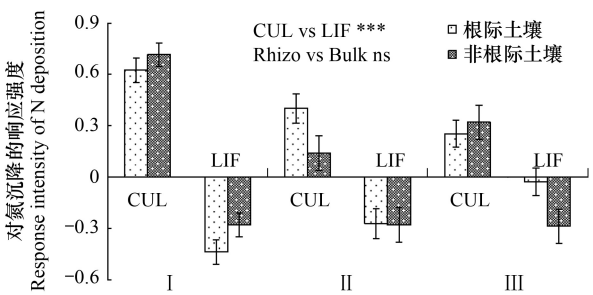

图 4 杉木和枫香根际和非根际土壤有机碳矿化前期(I)、中期(II)、后期(III)对 N 沉降的响应强度(N 沉降/对照)

Fig.4 Response intensity to nitrogen deposition at early (I), middle (II), late (III) organic carbon mineralization rates in rhizosphere and bulk soil under two tree species

I,前期 Early stage;II,中期 Middle stage;III,后期 Late stage;CUL,杉木 *Cunninghamia lanceolata*; LIF,枫香 *Liquidamba formosana*

3 讨论

氮沉降对土壤生态过程的影响已成为近年来森林生态学研究的热点[2,4,7]。N 沉降影响效应的多面性表现为,在缺 N 的某些地区,适量 N 沉降对生态系统将产生正效应,如增加土壤 N 供应,从而提高生态系统生产力;但在大多数地区,过量 N 沉降给养分循环带来负面效应,如过量 N 导致土壤 C:N:P 化学计量比改变,影响

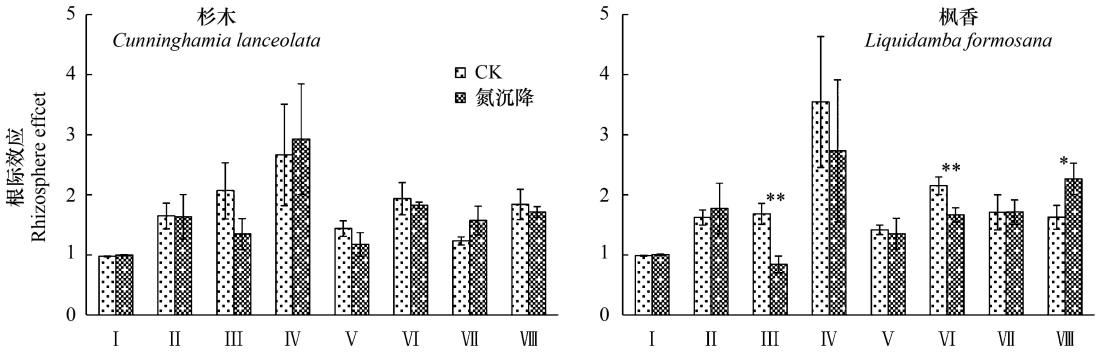

图 5　不同处理条件下杉木(a)和枫香(b)土壤氮磷供应和有机碳稳定性的根际效应

Fig.5　The rhizosphere effects of soil nitrogen and phosphorus supply, and organic carbon stability under two tree species with and without nitrogen deposition

I 表示 pH 值的根际效应;II、III 和 IV 分别表示 NH_4^+-N、NO_3^--N 和速效磷的根际效应根际效;V 表示水溶性有机碳的根际效应;VI、VII 和 VIII 分别表示有机碳前期矿化速率、中期矿化速率和后期矿化速率的根际效应

土壤呼吸,降低土壤 pH,加快养分流失,形成 N 饱和症状等[14, 24-25]。根际是陆地生态系统物质和能量转化最激烈的区域[10, 15],N 沉降对于地下生态过程的影响可能优先作用于根际土壤[17]。

本研究表明,N 沉降显著影响 pH 值、NO_3^--N 和硝化强度的根际效应。N 沉降仅显著降低杉木非根际土壤 pH 值,但同时降低枫香根际和非根际土壤 pH 值,提高了根际和非根际土壤的 NO_3^--N 含量,这些与他人研究结果具有较好的一致性[7-8]。一些模拟 N 沉降实验也表明,随着 NH_4NO_3输入,一方面由于 NO_3^--N 加入,土壤 NO_3^--N 积累;另一方面 NH_4^+-N 输入导致硝化作用加强,而 1 mol NH_4^+-N 被转化为 NO_3^--N 时可产生 2 mol H^+;以上两个过程将加剧过剩的 NO_3^--N 淋失和加快土壤酸化[26]。有意思的是,本研究还发现 N 沉降显著降低 NH_4^+-N 含量,并表现为根际土壤 NH_4^+-N 显著高于非根际土壤。一般来说,N 沉降会提高土壤 NH_4^+-N 含量,造成与预期结果不相符的潜在原因是:过量 N 输入引起硝化细菌群体数量迅速增加,土壤硝化作用增强,大多数 NH_4^+-N 被硝化菌转化成 NO_3^--N[27];因树木通常具有吸收 NH_4^+-N 偏好,根际微生物受到杉木根系分泌物的调控,尽量减少和削弱根际硝化菌的数量和功能,维持根际土壤具有较高 NH_4^+-N,一方面满足树木吸收所需,另一方面,也是减缓 N 流失的机制[17, 28]。另外,N 沉降还会通过改变土壤阴阳离子平衡及酸碱性,对土壤 P 有效性产生较大影响[29]。本研究发现,N 沉降显著降低了两个树种根际和非根际土壤有效 P 含量,但根际土壤的含量高于非根际土壤。袁颖红[27]等对杉木人工林开展了连续 5 年 4 个水平 N 沉降实验也表明,N 沉降造成土壤速效 P 的衰减,且在 N 沉降初期,随 N 沉降水平提高,速效 P 衰减加重;但多年 N 沉降造成土壤强酸化之后,土壤缓效 P 可转化成有效 P,有效 P 衰减速度较为稳定;估计与土壤 pH 值降低导致有效 P 被土壤酸化而活化的 Al^{3+}结合形成低溶性化合物有关。孟范平[28]也认为酸沉降一方面可促进固相磷酸盐分解,分解出的 P 很容易被土壤中因酸雨而活化的 Al^{3+}结合形成低溶性化合物,从而抑制磷酸盐活性;另一方面土壤酸化可增强磷酸酶活性,提高土壤速效 P 的供给。已有研究证实,在南方酸性土壤中,活性三氧化物可将速效 P 吸附于其表面,当土壤 pH 值低于 6 时,主要通过活性三氧化物表面对 PO_4^{3-}吸附作用而固定 P,因此,活性 Al 含量随酸化加重而增高,速效 P 的衰减越快[29]。陈希[30]等也发现,随酸沉降的加重,根际土壤速效 P 含量越低。可见,N 沉降显著改变土壤 N、P 供应的影响,且两个树种的响应模式较为一致,但根际与非根际土壤的响应有明显差异,值得进一步探讨。

碳和 N 的耦合是森林生态过程研究关注的焦点之一[2]。氮沉降改变森林土壤 N 循环,必将影响土壤 C 过程。本研究发现,N 沉降提高杉木非根际土壤水溶性有机 C 含量,增强杉木根际和非根际土壤有机 C 矿化速率,而降低枫香非根际土壤有机 C 可矿化强度,抑制枫香根际和非根际土壤有机 C 矿化速率。袁颖红等[31]于杉木林中开展模拟 N 沉降试验,发现随着 N 沉降量增加,土壤可溶性有机 C 增加。Deforest 等[32]在美国密

歇根开展的 N 沉降试验结果也表明,土壤可溶性有机 C 含量因 N 沉降可导致可溶性酚类物质积累而显著提高。与此同时,胡正华等[33]在北亚热带落叶阔叶林开展了模拟 N 沉降试验,发现 N 沉降显著抑制土壤呼吸。刘博奇等[14]在北方针叶林内开展模拟 N 沉降试验,发现 N 沉降提高了土壤呼吸速率。李凯等[34]开展模拟 N 沉降对石栎(*Lithocarpus glaber*)和苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)幼苗土壤呼吸速率影响的研究,发现土壤呼吸对 N 沉降的响应因施 N 水平和幼苗种类不同而各异,但两树种的土壤呼吸在中、高 N 处理下均表现为抑制。我们的研究结果也表明,针叶树杉木和阔叶树枫香的土壤 C 过程对 N 沉降的响应各异,潜在原因可能是:杉木为喜肥性的速生树种,且根系无内外生菌根[18],N 输入可促进根系的生长发育,提高根系的活性,导致根系分泌物增加,提高可溶性 C 含量及其矿化速率;而枫香为具内外菌根菌的树种[19],高 N 输入不利于菌根菌的生存,抑制根系发育及碳水化合物的分泌,导致土壤有机 C 矿化强度和矿化速率下降。为此,也不难解释杉木矿化速率对 N 沉降的响应表现为正效应,即根际有机 C 矿化速率优先加快;而枫香表现为负效应,即其根际有机 C 矿化速率优先受到抑制。

综上所述,许多他人的研究和本研究都表明 N 沉降效应因树种不同而表现各异,本研究还发现根际和非根际土壤养分转化和 C 稳定性对 N 沉降的响应也存在显著差异。无菌根的喜肥针叶树种杉木根际和非根际土壤过程对 N 沉降响应的同步性显著强于具有菌根的阔叶树种枫香。鉴于 N 沉降效应的复杂性,今后的研究应更多地关注土壤-植物-微生物的耦合机制[15],并力求将地下和地上过程联系起来[16],为森林应对全球 N 沉降提供有益参考。

参考文献(References):

[1] Wei C, Yu Q, Bai E, Lü X, Li Q, Xia J, Kardol P, Liang W, Wang Z, Han X. Nitrogen deposition weakens plant-microbe interactions in grassland ecosystems. Global Change Biology, 2013, 19(12): 3688-3697.

[2] Chen F S, Duncan D S, Hu X F, Liang C. Exogenous nutrient manipulations alter endogenous extractability of carbohydrates in decomposing foliar litters under a typical mixed forest of subtropics. Geoderma, 2014, 214-215: 19-24.

[3] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, V osmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.

[4] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 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. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.

[5] 陈浩, 莫江明, 张炜, 鲁显楷, 黄娟. 氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响. 生态学报, 2012, 32(21): 6864-6879.

[6] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. 生态学报, 2009, 29(9): 4673-4680.

[7] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, Koopmans C J, Tietema A. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1/3): 37-55.

[8] 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 廖迎春, 袁颖红, 徐雷. 亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. 生态学报, 2007, 27(11): 4630-4642.

[9] 庞丽, 张一, 周志春, 丰忠平, 储德裕. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松不同家系根系分泌和磷效率的影响. 植物生态学报, 2014, 38(1): 27-35.

[10] 刘煜, 胡小飞, 陈伏生, 袁平成. 马尾松和苦槠林根际土壤矿化和根系分解 CO_2 释放的温度敏感性. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1501-1508.

[11] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. Environment International, 2009, 35(1): 1-8.

[12] 张炜, 莫江明, 方运霆, 鲁显楷, 王晖. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 2309-2319.

[13] Izauralde R C, Megill W B, Rosenberg N J. Carbon cost of applying nitrogen fertilizer. Science, 2000, 288(5467): 811-812.

[14] 刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 王庆贵. 模拟氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 2012, 25(6): 767-772.

[15] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, van der Putten W H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11(11): 789-799.

[16] Terzano R, Cesco S, Mimmo T. Dynamics, thermodynamics and kinetics of exudates: crucial issues in understanding rhizosphere processes. Plant and Soil, 2015, 386(1/2): 399-406.

[17] Phillips R P, Fahey T J. The influence of soil fertility on rhizosphere effects in northern hardwood forest soils. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2): 453-461.

[18] 盛炜彤, 童书振, 段爱国. 杉木丰产栽培实用技术. 北京: 中国林业出版社, 2011.

[19] 苏琍英, 程爱兴, 喻爱林, 傅卫庆, 郑平谣. 天目山自然保护区林木菌根调查. 浙江林学院学报, 1992, 9(3): 263-276.

[20] 陈永瑞, 林耀明, 李家永, 刘允芬, 杨汝荣. 江西千烟洲试区杉木人工林降雨过程及养分动态研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 74-76.

[21] Phillips R P, Fahey T J. Tree species and mycorrhizal associations influence the magnitude of rhizosphere effects. Ecology, 2006, 87(5): 1302-1313.

[22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 156-183.

[23] 陈伏生. 城乡梯度森林生态过程研究. 北京: 中国林业出版社, 2013: 72-93.

[24] 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. Global Change Biology, 2009, 15(12): 2885-2893.

[25] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.

[26] Bergkvist B, Folkeson L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition. Water, Air, and Soil Pollution, 1992, 65(1/2): 111-133.

[27] 袁颖红, 樊后保, 王强, 裘秀群, 陈秋凤, 李燕燕, 黄玉梓, 廖迎春. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响. 浙江林学院学报, 2007, 24(4): 437-444.

[28] 孟范平, 李桂芳. 酸雨对土壤元素化学行为的影响. 中南林学院学报, 1998, 18(1): 27-34.

[29] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有效性的衰减. 土壤学报, 2000, 37(3): 323-329.

[30] 陈希, 陈伏生, 叶素琼, 喻苏琴, 方向民, 胡小飞. 丘陵红壤茶园根际氮磷转化对不同强度酸雨胁迫的响应. 应用生态学报, 2015, 26(1): 1-8.

[31] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 张子文, 孟庆银, 胡锋, 李辉信. 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. 水土保持学报, 2012, 26(2): 138-143.

[32] DeForesta J L, Zaka D R, Pregitzerc K S, Burtonc A J. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 965-971.

[33] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 陈书涛, 李岑子, 申双和. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响. 环境科学, 2010, 31(8): 1726-1732.

[34] 李凯, 江洪, 由美娜, 曾波. 模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 82-89.