

模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响

涂利华¹, 胡庭兴^{1,*}, 张健¹, 李仁洪^{1,2}, 何远洋¹, 田祥宇¹, 肖银龙¹, 景建飞¹

(1. 四川农业大学林学院林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014; 2. 四川省林业调查规划院, 四川成都 610081)

摘要:从 2008 年 1 月起, 对华西雨屏区慈竹 (*Neosinocalamus affinis*) 人工林进行了模拟氮沉降试验, 氮沉降水平分别为对照 (CK, $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮 ($5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中氮 ($15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和高氮 ($30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。在模拟氮沉降 1.5 a 后, 按土层深度取土样和根样, 测定不同深度土壤活性有机碳含量和根生物量。结果表明, 华西雨屏区慈竹林土壤有机碳、微生物量碳、浸提性溶解有机碳和活性碳含量均随土层深度的增加而减少。氮沉降显著减少了土壤微生物量碳和活性碳含量, 显著增加了浸提性溶解有机碳含量, 并使得土壤碳库管理指数减小。同时, 慈竹林根密度在氮沉降条件下减少了 12%—14%。说明氮沉降的增加减少了土壤有机碳中的活性部分, 增加了土壤有机碳的淋溶流失, 降低了慈竹林土壤碳库质量。同时, 根系生物量的减少, 间接影响了土壤微生物活动和土壤碳周转过程。在未来氮沉降持续增加的背景下, 慈竹林土壤对碳的保持能力可能会下降。

关键词:氮沉降; 活性有机碳; 根生物量; 慈竹; 华西雨屏区

Effects of simulated nitrogen deposition on soil active carbon pool and root biomass in *Neosinocalamus affinis* plantation, Rainy Area of West China

TU Lihua¹, HU Tingxing^{1,*}, ZHANG Jian¹, LI Renhong^{1,2}, HE Yuanyang¹, TIAN Xiangyu¹, XIAO Yinlong¹, JING Jianfei¹

1 Key Laboratory of Ecological Engineering of Sichuan Province, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China

2 Sichuan Forestry Inventory and Plan Institute, Chengdu, Sichuan 610081, China

Abstract: Increasing nitrogen (N) deposition affects the carbon cycle in terrestrial ecosystems largely. In general, the potential carbon accumulation response of aboveground to N deposition is nearly positive in plantations and natural forests, while that of belowground is unclear because there're some difficulties such as quantifying root biomass (RB), detecting soil organic carbon (SOC) and its components. Following the N deposition increasing, complete understanding of belowground carbon accumulation response to N deposition is critical to assess forest soil carbon cycle. The bamboo forest, one of the normal terrestrial ecosystems, plays an important role in balancing the carbon budget. However, the effect of N deposition on soil active carbon pool (SACP) and root biomass in bamboo forest is still poorly understood. Our objectives were to quantify the effect of simulated N deposition on SACP and RB in bamboo plantation within the Rainy Area of West China.

The present study was conducted in the 18a *Neosinocalamus affinis* plantation located in the bamboo plantation of Sichuan Agricultural University, Ya'an City, southwest Sichuan Province ($30^{\circ}08' \text{ N}$, $103^{\circ}00' \text{ E}$, 660 m above sea level), and the natural wet nitrogen deposition was $14.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Twelve plots were established and divided into four N addition treatments (Control, $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Low-N, $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Medium-N, $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; and High-N, $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) with three replicates. Each square plot was 3 m 3 m, and randomly distributed in the plantation, which intervals were more than 3 m. NH_4NO_3 was added to each plots after every 15-day from December 2007. After 1.5 years, soil samples (0

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A11-03); 四川省重点学科建设资助项目(SZD0419)

收稿日期:2009-09-22; **修订日期:**2009-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

—20, 20—40, 40—60, and 60—80 cm) were collected to measure the SACP and RB.

The results indicated concentrations of soil total organic carbon (TC), microbial biomass carbon (MBC), extractable dissolved organic carbon (EDOC) and liable carbon (LC) decreased with soil depth. N deposition decreased soil MBC and LC significantly, while increased EDOC significantly. The soil carbon management index (CMI) was decreased and the fine root density was decreased from 12% to 14%. It is highlighted that nitrogen addition reduced the active components in soil carbon pool, stimulated the leaching of soil carbon in the form of EDOC and reduced the quality of soil carbon pool in *N. affinis* plantation. The reduction of root biomass carbon input might indirectly affect microbial activity and carbon turnover. Our results suggest that the response of SACP and RB of *N. affinis* plantation to atmospheric N deposition demonstrates a decline trend. The chronic increasing N deposition may reduce the retention of C in the soil of *N. affinis* plantation.

Key Words: simulated nitrogen deposition; soil active carbon pool; root biomass; *Neosinocalamus affinis* plantation; Rainy Area of West China

人类活动如化石燃料燃烧、化肥的使用、土地利用方式的改变和固氮作物的种植等,已经使得大气二氧化碳浓度升高并加速了活性氮的生成和沉降速率^[1],人为活动造成的氮沉降已经超过了自然生物固氮量^[2],并且,氮沉降速率在未来还会继续增加^[2-3]。生态系统的碳动态对氮活性增加的响应,决定于生态系统碳输入和碳输出对氮沉降的响应方向和程度。在碳输入方面,许多陆地生态系统的模拟氮沉降试验发现,地上部分净初级生产力对氮增加呈现正响应^[4-5]。然而,由于土壤碳库是陆地生态系统植物碳库的3倍^[6],土壤碳库对氮沉降的响应将显著影响生态系统碳动态。例如,Mack等^[5]对高纬度地区北极苔原生态系统的长达20 a施肥试验表明,虽然氮沉降使得生态系统地上部分生物量增加,但土壤碳的流失使得该生态系统20 a每平方米流失了2 000 g碳。在碳输出方面,以往研究表明氮沉降对凋落物和土壤有机质(SOM)的分解有促进、抑制和无作用3种不同影响^[7-9]。表明生态系统碳动态对氮沉降的不同响应方式可能与各生态系统凋落物和土壤有机质的质量有关,但其调控机理尚不十分明确。

由于土壤碳库基数巨大并且自然分异性大,通常整个碳库的微小变化很难发现^[10]。Blair等^[10]将土壤碳素划分为有效碳和稳态碳两部分,指出有效碳在调节土壤碳平衡和养分流向方面具有重要作用。Biederbeck和Zentner^[11]也通过动力学研究指出,土壤有机碳的短暂波动主要发生在易氧化、易分解部分,并选择了活性碳(或称易氧化碳)、微生物量碳和可矿化碳作为土壤活性有机碳的指示因子。Neff等^[8]研究表明,长期氮沉降显著增加了土壤轻组有机碳的分解,但氮沉降对大部分碳没有影响。窦晶鑫等^[12]研究认为氮沉降增加了湿地生态系统土壤活性碳含量。由于对全球变化的高度敏感性,土壤活性有机碳可作为土壤碳动态对氮沉降的潜在响应较为敏感的指示指标。

华西雨屏区由于其特殊的地理位置和气候条件,年氮湿沉降量达到了8.24—14.75 g·m⁻²^[13-14],超出了该地区的临界负荷值,并有逐渐增加的可能性。高量并持续增加的氮沉降,势必对该地区森林生态系统土壤碳循环过程造成重大影响。本研究以试验性氮沉降1.5 a后的慈竹(*Neosinocalamus affinis*)林为对象,在持续进行模拟氮沉降的基础上,研究不同深度各土壤层次有机碳、活性有机碳以及根生物量对氮沉降增加的响应,以期为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 试验地概况

试验地位于四川省雅安市青衣江流域二级阶地后缘老板山中部的四川农业大学林业试验站内(30°08' N, 103°00' E),海拔660 m。属中亚热带湿润气候,为华西雨屏区的中心地带,是四川省多雨中心区之一。2008年氮湿沉降量为14.75 g·m⁻²^[14]。年均温16.1℃,≥10℃积温5231℃,年均无霜期298 d,年均降雨量1772.2 mm;年均日照时数1019.9 h,全年太阳辐射总量为3640.13 MJ·cm⁻²。该区云雾多,日照时数少,雨量充沛,相对湿度大。土壤系白垩纪灌口组紫色砂页岩风化的坡堆积物形成的紫色土,土层深度约80 cm。各

土层(0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm)土壤容重分别为 1.28、1.40、1.48、1.50 g·cm⁻³,各层土壤中 >2 mm 石砾体积百分比小于 1%。

试验林分为慈竹林,栽植于 1989 年 11 月,每公顷约 500 丛,造林前原为疏林地,面积 1.5 hm²。于 2007 年 11 月对该林分进行了调查、取样和分析,其中土壤养分和 pH 测定土层为 0—5 cm,结果见表 1。

表 1 慈竹林样地林分结构和土壤特征

Table 1 Forest structure and soil properties in the *Neosinocalamus affinis* plantation

林分结构 Forest structure						
郁闭度	密度 /(丛·hm ⁻²)	平均竹高 /m	平均胸径 /cm	林褥厚度 /cm	凋落物蓄积量 /(t·hm ⁻²)	
0.9	500	13.2	5.9	3	13.75	
土壤特征 Soil properties						
pH	总碳 /(mg·g ⁻¹)	总氮 /(mg·g ⁻¹)	铵氮 /(mg·kg ⁻¹)	硝氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	土壤深度 /cm
4.64 ± 0.01	19.6 ± 0.2	0.94 ± 0.01	11.3 ± 2.2	15.2 ± 3.3	30.4 ± 3.4	~ 80

1.2 试验设计

2007 年 11 月在慈竹林内建立模拟氮沉降样地。由于慈竹为丛生竹,丛与丛之间距离大约为 4—5 m,丛内竹子拥挤,无法进行土壤呼吸测定、施氮以及土壤或根生物量取样,故所有样方均设在竹丛之间。共建立 12 个 3 m × 3 m 的样方,每个样方间设 >3 m 宽的缓冲带。用 NH₄NO₃ 进行氮沉降处理,共设 4 个水平,分别为对照 (CK, 0 g·m⁻²·a⁻¹)、低氮 (L, 5 g·m⁻²·a⁻¹)、中氮 (M, 15 g·m⁻²·a⁻¹) 和高氮 (H, 30 g·m⁻²·a⁻¹),每个水平 3 个重复。将年施用量平均分成 24 等分,从 2007 年 12 月开始,每半个月施氮 1 次。具体方法是将各水平所需 NH₄NO₃ 溶解至 1 L 水中,用喷雾器在该水平样方中来回均匀喷洒,对照只喷洒清水。

1.3 样品采集、处理和测定

在进行模拟氮沉降 1.5 a 后,于 2009 年 6 月 30 日和 7 月 30 日,分层采集各样方土样和根样。具体方法为:采用蛇形五点取样法,分别在 0—20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm 各土层取土样(土钻内径 20 mm),并分层混合,用于测定各土壤有机碳指标;同时用内径 60 mm 根钻分层(同上)采集各样方土芯,用于测定根生物量^[15],每样方随机选取 8 点。混合土壤样品部分用于测定自然含水率,其余挑除可见根、过 2 mm 筛,于 4 °C 条件下保存待测。土芯样品用流水冲洗、除去泥土和杂物,于 65 °C 烘 48 h 后称重,计算根生物量。将称重后的同一样方同一土层的根混合、粉碎、过 2 mm 筛,装入编号纸袋待测。

测定项目有土壤有机碳(TC)、土壤微生物量碳(MBC)、土壤可浸提溶解性有机碳(DOC)、土壤活性碳(LC)。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法(LY/T 1237—1999)测定。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄提取^[16](作氯仿熏蒸和未熏蒸 2 种处理),总有机碳分析仪(TOC-V_{cPH+TNM-1}, Shimadzu Inc., Japan)测定总碳(TC)和无机碳(IC)。根据所测得的指标计算微生物生物量碳,计算方法见涂利华等^[13]。土壤溶解性有机碳采用 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄提取^[17],过 0.45 μm 微孔滤膜后用总有机碳分析仪测定。土壤活性碳采用 0.333 mol·L⁻¹ KMnO₄氧化法测定^[10]。

1.4 数据处理

利用 SPSS13.0 (SPSS Inc., USA) 中 ANOVA 方法对各处理各土层各指标进行方差分析,并在 0.05 水平显著的基础上进行 LSD 多重比较。

土壤有机碳密度计算方法参照金峰等^[18]:

$$T = \sum_j^m \frac{(1 - a_j) b_j c_j d_j}{100}$$

式中, T 为 m 层的某土壤剖面,其第 j 层土壤有机碳或活性有机碳密度(kg·m⁻³); $a_j\%$ 为第 j 层砾石(粒径 >2 mm)体积百分数,本研究中各土层砾石含量小于 1%,以 0% 进行计算; b_j 为第 j 层平均土壤容重

($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); c_j 为第 j 层总有机碳或活性有机碳平均含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); d_j 为第 j 层土壤厚度 (cm)。

碳库管理指数计算方法参照 Blair 等^[10]:

$$\text{CMI} = \text{CPI} \times \text{LI} \times 100; \text{CPI} = C_{T \text{ sample}} / C_{T \text{ reference}}; \text{LI} = L_{\text{sample}} / L_{\text{reference}}; L = C_L / C_{NL}$$

CMI 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳库管理指数 (Carbon management index); CPI 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳库指数 (Carbon pool index); LI 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳库活度指数 (Labile index); $C_{T \text{ sample}}$ 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 样品土壤总碳; $C_{T \text{ reference}}$ 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 参考土壤总碳; L_{sample} 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 样品土壤碳库活度; $L_{\text{reference}}$ 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 参考土壤碳库活度; L 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳库活度 (Lability of C); C_L 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 活性碳含量 (Labile C, mg g^{-1}); C_{NL} 为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 非活性碳含量 (Non-labile C, mg g^{-1})。

根密度计算: 以土柱 (直径 6 cm, 高 20 cm) 内根烘干重 (即根生物量) 除以土柱面积, 根密度单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2 结果与分析

2.1 模拟氮沉降对慈竹林土壤活性碳库的影响

试验结果表明, 土壤有机碳、微生物量碳和活性碳均随土壤深度的增加而减少, 而溶解性有机碳在上层土壤 (0—40 cm) 中随深度而减少, 但在下层土壤 (40—80 cm) 中略有增加 (图 1)。微生物量碳、浸提性溶解有机碳和活性碳占总有机碳的 1.9%—5.0%、0.5%—1.9% 和 5.0%—6.0%。

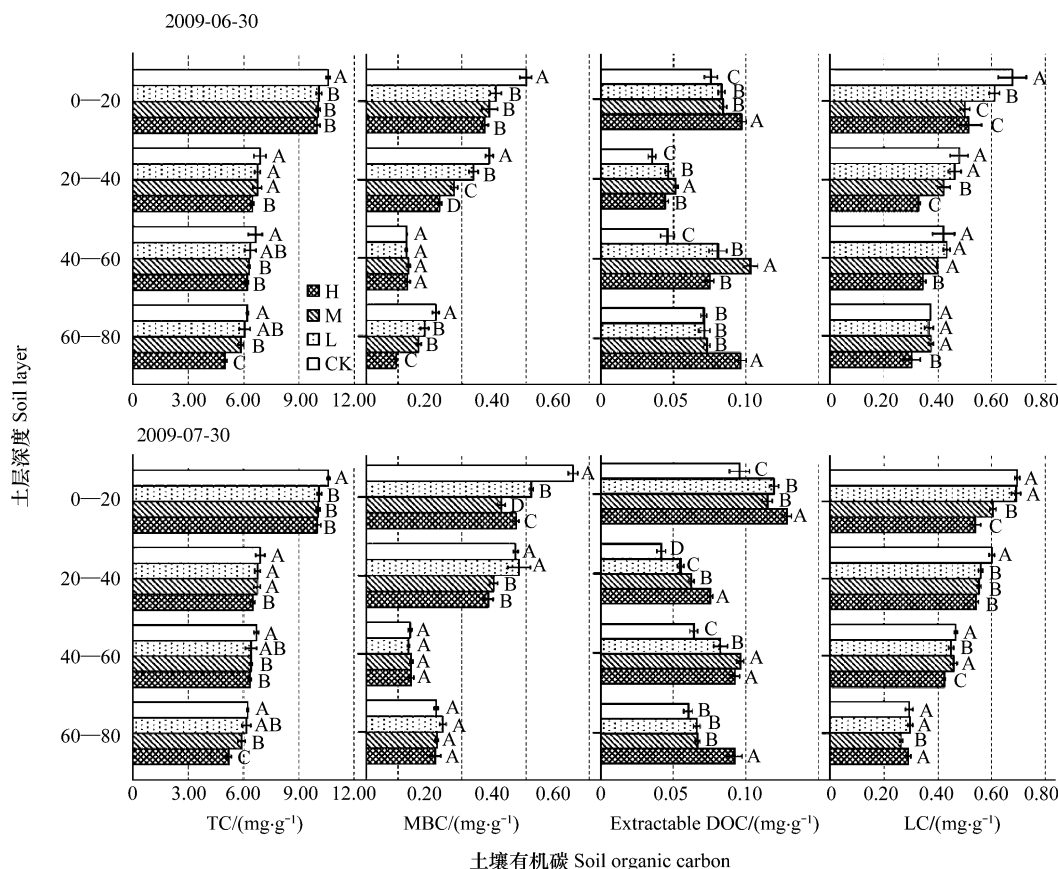


图 1 氮沉降对慈竹林土壤总碳 (TC)、微生物量碳 (MBC)、可浸提溶解性有机碳 (extractable DOC)、活性碳 (LC) 的影响

Fig. 1 Effects of N deposition on soil microbial biomass carbon (MBC), extractable dissolved organic carbon (extractable DOC) and labile carbon (LC) in *Neosinocalamus affinis* plantation

CK、L、M、H 分别表示对照 (CK: $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮 (L: $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中氮 (M: $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和高氮 (H: $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 误差线表示正负 1 标准差, $N = 8$, 不同字母表示各处理间差异显著 (one-way ANOVA and Fisher's LSD test, $P < 0.05$) 模拟氮沉降试验始于 2007 年 12 月 1 日, 每 15d 定期施硝酸铵

在模拟氮沉降 1.5 a 后,土壤各土层深度有机碳和活性有机碳含量均受到不同程度的影响。氮沉降显著降低了各层土壤中有机碳含量(图 1)(one-way ANOVA and Fisher's LSD test, $P < 0.05$,下同),但绝大多数土层有机碳减少幅度只有 2.2%—6.7%。土壤微生物量碳对 N 沉降呈现负效应,且梯度效应较为明显,不同深度土壤微生物量碳对氮沉降的响应程度不一。与微生物量碳类似,土壤活性碳也受到氮的抑制,表层土壤活性碳对氮沉降更为敏感。氮沉降显著增加了各土层中可浸提可溶性有机碳含量。

各处理土壤碳密度值由各土层各碳素指标含量和相应的土壤容重计算(图 2)。结果表明,氮沉降降低了各氮处理样方土壤总有机碳密度,但除 7 月高氮显著低于对照外,其余均未达到显著水平。氮沉降显著降低了土壤微生物量碳和活性碳密度,且梯度效应明显。与此相反,土壤溶解性有机碳密度显著增加。

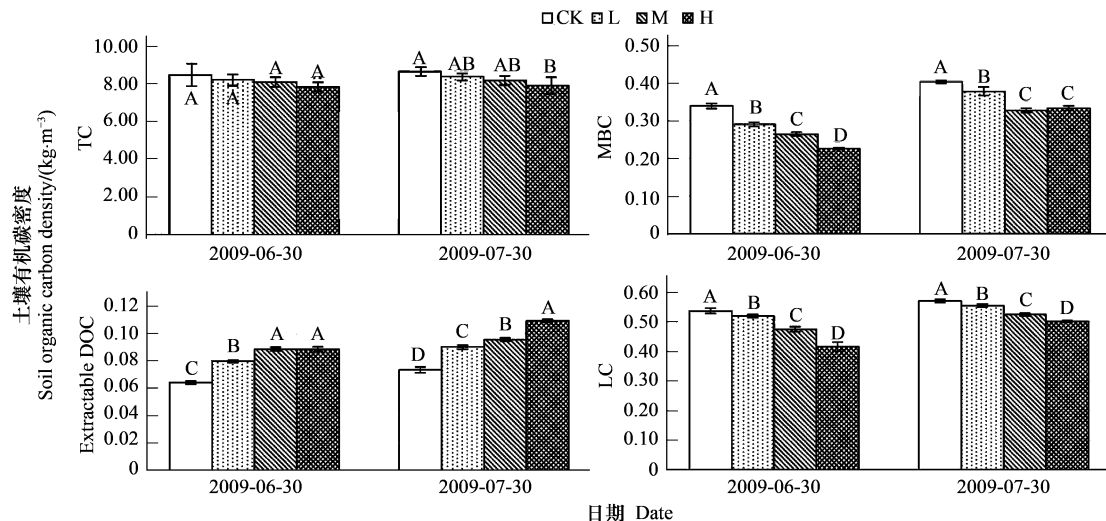


图 2 氮沉降对慈竹林土壤有机碳密度的影响

Fig. 2 Effects of N deposition on soil organic carbon density in *Neosinocalamus affinis* plantation

2.2 模拟氮沉降对慈竹林土壤碳库管理指数的影响

以对照样方各土层土壤为参照土壤,计算出氮沉降影响下慈竹林各层土壤碳库指数(CPI)、碳库活度(L)、碳库活度指数(LI)和碳库管理指数(CMI)(表 2)。各氮处理土壤碳库指数均小于对照,减少幅度为 2%—19%。土壤碳库活度和活度指数对氮沉降的响应因土层的不同而异,0—20 cm 和 20—40 cm 土层碳库活度指数随氮沉降的增加而减小。碳库管理指数为碳库指数和碳库活度指数的乘积,体现了碳库数量大小和活性程度。将各土层数据累加后计算出整个土体碳库管理指数(表 2),氮沉降处理降低了土壤碳库指数和碳库活性指数,导致了土壤碳库管理指数的下降,且碳库管理指数随着氮沉降量的增加而减小。

2.3 模拟氮沉降对慈竹林根生物量的影响

从表 3 可以看出,随着土层深度的增加,根密度(单位面积根生物量)减少。对照样方中 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 和 60—80 cm 土层根生物量分别占 64%、21%、8% 和 7%。氮处理样方土壤上层(0—20 cm, 20—40 cm)根密度显著低于对照,将各土层数据合并后进行方差分析同样表明根密度对氮沉降呈现负响应,且氮沉降梯度效应明显。氮沉降使得慈竹林根密度减少了 12%—14%。

从根生物量分配比例(图 3)可以看出,N 沉降主要通过减少表层根生物量产生影响。CK、L、M 和 H 表层(0—20 cm)根生物量占总生物量的 64%、63%、49% 和 53%。方差分析表明,M 和 H 表层根生物量分配比例显著低于对照。

3 讨论

3.1 氮沉降对土壤活性有机碳库的影响

土壤微生物量碳通常受土壤总有机碳的含量和地被物多少的影响^[19-20],同时也决定于地表凋落物和根

表2 氮沉降对慈竹林土壤碳库管理指数的影响

Table 2 Effects of nitrogen deposition on carbon management index in a *Neosinocalamus affinis* plantation

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	2009-06-30				2009-07-30			
		<i>CPI</i>	<i>L</i>	<i>LI</i>	<i>CMI</i>	<i>CPI</i>	<i>L</i>	<i>LI</i>	<i>CMI</i>
0—20	CK	1.00	0.068	1.00	100	1.00	0.070	1.00	100
	L	0.95	0.065	0.94	90	0.95	0.073	1.05	100
	M	0.95	0.053	0.77	73	0.95	0.064	0.92	87
	H	0.94	0.053	0.77	73	0.94	0.064	0.92	87
20—40	CK	1.00	0.075	1.00	100	1.00	0.095	1.00	100
	L	0.98	0.074	0.98	96	0.98	0.090	0.95	93
	M	0.98	0.067	0.89	87	0.98	0.090	0.94	92
	H	0.94	0.053	0.71	67	0.94	0.091	0.95	90
40—60	CK	1.00	0.068	1.00	100	1.00	0.075	1.00	100
	L	0.96	0.073	1.08	103	0.96	0.075	1.01	96
	M	0.95	0.067	1.00	95	0.96	0.077	1.03	99
	H	0.93	0.059	0.87	81	0.95	0.071	0.96	91
60—80	CK	1.00	0.064	1.00	100	1.00	0.051	1.00	100
	L	0.98	0.064	1.01	98	0.99	0.050	0.98	96
	M	0.94	0.068	1.07	101	0.95	0.048	0.95	90
	H	0.81	0.064	1.01	81	0.83	0.058	1.15	96
0—80	CK	1.00	0.069	1.00	100	1.00	0.073	1.00	100
	L	0.96	0.068	0.96	92	0.97	0.073	0.97	94
	M	0.95	0.062	0.87	83	0.96	0.069	0.96	92
	H	0.91	0.057	0.76	70	0.92	0.069	0.93	85

CK: 对照 ($0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); L: 低氮 ($5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); M: 中氮 ($15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); H: 高氮 ($15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); *CPI*: 碳库指数; *L*: 碳库活度; *LI*: 活度指数; *CMI*: 碳库管理指数

表3 氮沉降对慈竹林细根密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的影响Table 3 Effects of N deposition on fine root density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) in a *Neosinocalamus affinis* plantation

处理 Treatment	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	0—80 cm
对照 Control	0.46 (0.04) A	0.15 (0.02) A	0.06 (0.01) B	0.05 (0.01) A	0.72 (0.08) A
低氮 Low-N	0.39 (0.03) B	0.11 (0.01) B	0.07 (0.01) A	0.05 (0.01) A	0.62 (0.09) B
中氮 Medium-N	0.37 (0.02) B	0.11 (0.01) B	0.07 (0.01) B	0.05 (0.01) A	0.59 (0.06) B
高氮 High-N	0.29 (0.02) C	0.09 (0.01) B	0.04 (0.01) C	0.03 (0.00) B	0.46 (0.06) C

2009年6月30日和7月30日两次所得数据进行 t 测验后差异不显著,将2次数据进行合并;表中数值为6、7月份数据合并后求得的平均值($N = 6$),括号中数值为标准差,不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

系分解诱导形成的微生物区系^[21]。本研究发现氮沉降减少了土壤微生物量碳,与 Bowden 等^[22]和 Mo 等^[15]研究结果类似。同时,氮沉降也使得根系生物量减少(表3)。在氮有效性提高的情况下,植物的光合产物的分配通常会发生改变,使得根系生物量减少,减小根冠比^[23]。根生物量的减少使得根系凋落物和根系分泌物向土壤的输入减少,从而抑制根际微生物的生长并减少由于根系分解诱导形成的微生物区系。另外,由于雅安地区的氮沉降量极高,在此基础上进行的模拟氮沉降可能超过了微生物所需的氮水平,过量的无机氮输入可能对土壤微生物的生长造成了负面影响。微生物量碳是微生物活性的一个重要指标,微生物量碳的降低说明微生物活性受到氮沉降增加的抑制作用。Frey 等^[24]发现,氮沉降通常通过减少真菌生物量、真菌生物多样性及其分泌的胞外酶影响其对底物的分解作用。本研究结果表明,氮沉降抑制了微生物的活性,并且可能相应地减少土壤酶活性,从而降低土壤有机质的分解速率。在本试验地的前期研究^[14]表明,氮沉降促进了慈竹林凋落叶、凋落箨和凋落枝的分解速率,表明氮沉降对慈竹林凋落物层和矿质土壤层微生物活性及酶活性的影响可能是不一致的。

本研究发现氮沉降增加了慈竹林土壤浸提性溶解有机碳含量。DOC 是凋落物和土壤有机质分解和淋溶的产物^[25], N 沉降对 DOC 的影响可能通过影响凋落物输入量和有机质分解速率等方面产生作用。许多研究发现 N 沉降增加了地上部分生物量^[26], 从而增加地上部分凋落物量也即增加了土壤碳输入, 因此慈竹林土壤 DOC 的增加可能是因为氮沉降增加了凋落物量从而导致矿质土层的 DOC 增加。土壤 DOC 是微生物的重要能源, 其含量的增加表明表层凋落物的分解可能受到氮沉降的促进作用, 在本试验地的前期研究^[14] 与此相印证, 氮沉降促进了慈竹林土壤表层凋落物分解速率, 分解产物的淋溶可能使得土壤 DOC 的累积量增加。另外, 氮沉降除了增加 DOC 的来源外, 也可能对土壤原存 SOM 矿质化产生抑制作用, 即增加的氮素保护了粘粒和粉粒中原存的 SOM (Soil Organic Matter)^[27]。土壤中的 DOC 在碳的生物地球化学循环、成土和污染物的转移等过程中扮演着十分重要的角色^[28]。土壤 DOC 的淋溶是土壤有机碳损失的重要途径, 也是陆地生态系统向海岸生态系统主要的碳转移形式^[29]。矿质土层既是 DOC 上层凋落物分解淋溶产物的汇, 也是土壤 DOC 向河流湖泊生态系统流失碳的源^[30]。最近一些研究认为氮沉降增加了全球陆地生态系统 DOC 向海洋生态系统的流失量^[31], 本研究结果与此一致。

土壤活性有机碳如微生物量碳和活性碳(或称易氧化碳)受氮沉降影响而减少, 一方面说明 N 沉降可能通过减少土壤有机质的数量而影响土壤活性有机碳的含量, 另一方面也说明 N 沉降改变了土壤有机质的稳定性和质量, 从而使土壤活性有机碳与非活性有机碳发生转变^[32]。另外, 土壤碳库管理指数作为土壤碳变化较为敏感的监测方法, 能够反映外界条件对有机碳和活性有机碳数量的变化, 能够较全面地反映外界条件对土壤有机碳性质的影响^[33]。本研究发现氮沉降处理导致了土壤碳库管理指数的下降, 且随着氮沉降量的增加而减小, 说明氮沉降降低了慈竹林土壤碳库质量。

3.2 氮沉降对根生物量的影响

本研究发现慈竹根生物量对氮沉降呈现负响应, 且梯度效应明显, 氮沉降使得慈竹林根密度减少了 12%—14%。这与以往众多研究结果一致^[15, 22-23, 34]。森林土壤资源有效性的变化, 通常会导致光合产物地上部分和地下部分分配格局的改变^[23], 氮输入能够减少碳素向根系的分配比例, 从而降低根生物量, 并减少根系凋落物向土壤的输入^[34]。根系生物量的减少一方面减少了根系碳向土壤的输入, 另一方面根系分泌物和根系凋落物作为微生物的重要碳源和营养源, 其量的减少势必降低微生物的活性, 从而影响土壤碳周转过程。

4 结论

华西雨屏区慈竹林土壤有机碳、微生物量碳、浸提性溶解有机碳和活性碳含量均随土层深度的增加而减少。氮沉降显著减少了土壤微生物量碳和活性碳含量, 显著增加了浸提性溶解有机碳含量, 并使得土壤碳库管理指数减小。同时, 慈竹林根密度在氮沉降条件下减少了 12%—14%。结果说明氮沉降的增加减少了土壤有机碳中的活性部分, 增加了土壤有机碳的淋溶流失, 降低了慈竹林土壤碳库质量。同时, 根系生物量的减少, 间接影响了土壤微生物活动和土壤碳周转过程。在未来氮沉降持续增加的背景下, 慈竹林土壤对碳的保持能力可能会下降。

由于大气氮沉降的全球性和长期性, 其对生态系统特征和过程的影响必然具有复杂性和长期性。长期持

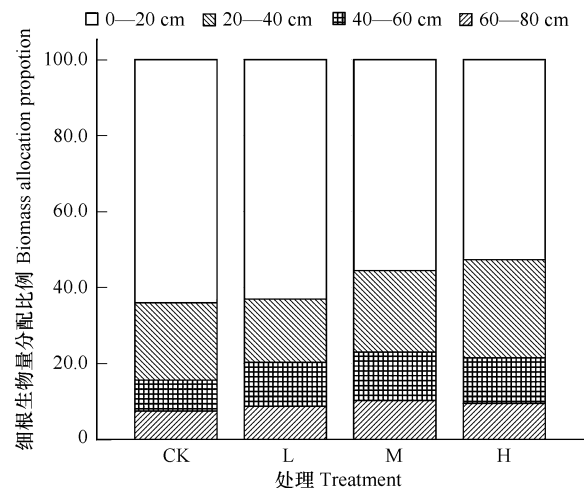


图3 氮沉降对慈竹林根生物量垂直分配的影响

Fig. 3 Effects of N deposition on biomass allocation in *Neosinocalamus affinis* plantation

续增加的大气氮沉降对慈竹林生态系统土壤活性有机碳库以及整个生态系统碳库的影响如何,还需长期的模拟试验验证。

References:

- [1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Clerveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, V r smarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153-226.
- [2] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75: 1861-1876.
- [3] Schimel D S, Melillo J, Tian H, McGuire A D, Kicklighter D, Kittel T, Rosenbloom N, Running S, Thornton P, Ojima D, Parton W, Kelly R, Sykes M, Neilson R, Rizzo. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287: 2004-2006.
- [4] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87-115.
- [5] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, Shaver G R, Chapin III F S. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 2004, 431: 440-443.
- [6] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [7] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest system. *Environment Reviews*, 1997, 5: 1-25.
- [8] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419: 915-917.
- [9] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: implications for litter and soil organic matter decomposition. *Ecosystems*, 2009, 12: 1-15.
- [10] Blair G J, Rod D B L, Leanne L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46 (7): 1459-1466.
- [11] Biederbeck B O, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [12] Dou J X, Liu J S, Wang Y, Zhao G. Effects of simulated nitrogen deposition on biomass of wetland plant and soil active carbon pool. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1714-1720.
- [13] Tu L H, Hu T X, Huang L H, Li R H, Dai H Z, Luo S H, Xiang Y B. Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleioblastus amarus* forest, Rainy Area of West China. *Journal of Plant Ecology*, 33 (4): 728-738.
- [14] Li R H, Hu T X, Tu L H, Luo S H, Xiang Y B, Dai H Z, Huang L H. Effects of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in *Neosinocalamus affinis* stands in rainy area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2588-2593.
- [15] Mo J, Zhang W, Zhu W, Gundersen P, Fang Y, Li D, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1-10.
- [16] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction — an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1167-1169.
- [17] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, Goulding K W T, Fortune S, Gaunt J L, Poulton P R, Wakefield J A, Webster C P, Wilmer W A. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30 (5/6): 374-387.
- [18] Jin F, Yang H, Cai Z C, Zhao Q G. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522-528.
- [19] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soil in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 211-219.
- [20] Gong W, Hu T X, Wang J Y, Gong Y B, Ran H. Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [21] Xu Q F, Jiang P K, Shen Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 18-22.
- [22] Bowden R D, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 43-56.
- [23] Gower S T, Vogt K A, Grier C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain douglas-fir: influence of water and nutrient availability. *Ecological*

Monographs, 1992, 62: 43-65.

- [24] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 159-171.
- [25] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, Monreal C M, Voroney P R, Beyaert R P. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous com in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26: 88-94.
- [26] Leith I D, Hicks W K, Fowler D, Woodin S J. Differential responses of UK upland plants to nitrogen deposition. *New Phytologist*, 1999, 141: 277-289.
- [27] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 1683-1692.
- [28] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [29] Findlay S E G. Increased carbon transport in the Hudson river: unexpected consequence of nitrogen deposition? *Frontiers in Ecology Environment*, 2005, 3(3): 133-137.
- [30] Smemo K A, Zak D R, Pregitzer K S. Chronic experimental NO_3^- deposition reduces the retention of leaf litter DOC in a northern hardwood forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 1340-1347.
- [31] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L, Gallo M, Lauber C. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 1172-1177.
- [32] Six J, Contant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155-176.
- [33] Xu M G, Yu R, Sun X F, Liu H, Wang B R, Li J M. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 459-465.
- [34] Boxman A W, Blanck K, Brandrud T E, Emmett B A, Gundersen P, Hogervorst R F, Kjaer N O, Persson H, Timmermann V. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 65-79.

参考文献:

- [12] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 赵光影. 模拟氮沉降对湿地植物生物量与土壤活性碳库的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1714-1720.
- [13] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 728-738.
- [14] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 雒守华, 向元彬, 戴洪忠, 黄立华. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2588-2593.
- [18] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522-528.
- [20] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. *生态学报*, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [21] 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 18-22.
- [33] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 刘骅, 王伯仁, 李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 459-465.