

# 氮添加对人工油松林土壤碳组分的影响

李志聪<sup>1</sup>, 何莉蓉<sup>1</sup>, 吴阳<sup>1</sup>, 乔磊磊<sup>2</sup>, 薛蕙<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为分析氮沉降对土壤碳库组成及其稳定性的影响,选取了黄土高原植被恢复中的树种油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)作为研究对象,通过氮添加模拟氮沉降,分析了短期氮添加对土壤有机碳(SOC)及其不同活性组分变化规律的影响,结果表明:随着氮添加含量的增大,上层土壤 SOC 及其高活性组分( $C_1$ )、中活性组分( $C_2$ )和稳定性组分( $C_4$ )含量先增加后降低,在  $N_3$  达到最大值,对下层土壤 SOC 及其组分影响较小。氮添加对不同碳组分在总有机碳中的分配比例和土壤碳库活性系数影响较少,4 个组分中  $C_4$  所占比例最大,达 74.3%~87.3%。本研究从土壤碳库稳定性角度分析了氮添加对黄土丘陵区森林土壤的碳库组成的影响,有利于对未来全球变化下的土壤碳库过程影响的认识。

**关键词:**氮添加; 油松人工林; 土壤碳组分; 土壤碳库活性系数

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0054-06

## Effect of Nitrogen Addition on Soil Carbon Components in Planted *Pinus tabulaeformis* Carr. Forest

LI Zhicong<sup>1</sup>, HE Lirong<sup>1</sup>, WU Yang<sup>1</sup>, QIAO Leilei<sup>2</sup>, XUE Sha<sup>2,3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of nitrogen deposition on the composition and stability of soil carbon pool, *Pinus tabulaeformis* Carr. was selected as the research object in this study. Nitrogen addition simulating nitrogen deposition was used to analyze the effects of short-term nitrogen deposition. The results showed that the SOC, the high activity component ( $C_1$ ), the middle activity component ( $C_2$ ) in the upper soil increased with the increase of the nitrogen contents, and the content of stability component ( $C_4$ ) firstly increased and then decreased, reaching to the maximum value at  $N_3$ , and had little effect on the SOC and its components of the deep soil. Nitrogen addition has little effect on the distribution ratio of different carbon components in total organic carbon and the activity coefficient of soil carbon pool, and  $C_4$  has the largest proportion among the four components, reaching to 74.3%~87.3%. From the point of view of the stability of soil carbon pool, this study analyzed the effect of nitrogen addition on the carbon pool composition in the forest soils in the loess hilly region, which is conducive to the understanding of the impact of future global changes on soil carbon pool processes.

**Keywords:** nitrogen addition; *Pinus tabulaeformis* Carr. plantation; soil carbon component; soil carbon pool activity coefficient

土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)是土壤肥力的基本属性和本质特征,在促进土壤结构的形

成、提高土壤保肥能力和缓冲性促进供应养分等方面具有重要作用,同时也与全球气候变化密切相关<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2017-10-28

修回日期:2017-12-07

资助项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0501707);国家科技支撑计划(2015BAC01B03);科技基础性工作专项(2014FY210100);中科院西部青年学者项目(XAB2015A05)

第一作者:李志聪(1992—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,研究方向为土壤微生物生态。E-mail:2437212142@qq.com

通信作者:薛蕙(1978—),男,陕西西安人,博士,副研究员,博士生导师,主要从事恢复生态学研究。E-mail:xuesha100@163.com

作为土壤的重要组成部分,可为植物提供养分来源,也为微生物的生命活动提供能量来源<sup>[2]</sup>,是评价土壤肥力和土壤质量的一个重要指标<sup>[3]</sup>。土壤有机碳作为土壤有机质的一部分,是指存在于土壤有机物质中碳元素的含量,其变化受稳定性的影响。土壤有机碳稳定性是指土壤有机质在当前条件下抵抗干扰和恢复原有水平的能力<sup>[4]</sup>,它是由土壤本身性质与外在的环境因子之间的相互作用决定的<sup>[5]</sup>。土壤有机碳可分为性质不同和分解程度不同的碳组分<sup>[6]</sup>,其含量及组分的变化会影响土壤肥力和土壤与大气之间碳素的交换平衡<sup>[7]</sup>。已有研究根据氧化能力土壤有机碳(SOC)分为4个组分,按照氧化能力分别为 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 和 $C_4$ ,其中 $C_1$ 和 $C_2$ 组分主要包括轻组有机碳,其与土壤有效利用以及大团聚体的形成有密切关系<sup>[8-9]</sup>,属于活性有机碳( $C_{active}$ ); $C_3$ 和 $C_4$ 组分与那些更稳定的化合物有关,很难被微生物的活动影响<sup>[9-10]</sup>,属于惰性有机碳( $C_{passive}$ );进一步根据各组分的氧化性和稳定性,可采用土壤中活性有机碳和惰性有机碳所占比例可用来评价土壤质量<sup>[12-14]</sup>。

氮元素是影响陆地生态系统生产力的主要限制因子之一<sup>[11]</sup>。自工业革命时期以来,人类活动向大气中排放了大量的含氮化合物,导致这些氮化物在大气中不断累积并沉降到陆地和水域生态系统中<sup>[15]</sup>。从18世纪到20世纪后期,人类活动导致的活性氮排放量增加了10倍之多,超过了自然陆地生态系统中制造的活性氮,预计到2050年,全球氮沉降量将增加至200 Tg/a<sup>[16]</sup>。而在中国,2010年平均氮沉降量为2.11 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[17]</sup>。大气氮沉降会在一定程度上缓解土壤氮素含量不足的状况,从而促进植物的生长,提高植物生物量,增加植被对有机碳的输入<sup>[18-19]</sup>,同时降低枯落物分解和土壤呼吸<sup>[18,20]</sup>。然而也有研究表明氮沉降对碳循环的影响是短暂的<sup>[21-22]</sup>,而对土壤碳库贮存的影响是可以忽略的<sup>[23-24]</sup>。此外,过度氮添加也会对生态系统产生不利影响,如土壤酸化、养分不平衡与亏缺、病虫害等<sup>[24-27]</sup>,从而对土壤碳贮存产生负面影响<sup>[28]</sup>。可见,由于研究处理时间、测定指标的差异,所得结论差异较大,特别是氮沉降如何影响土壤碳库贮存及其机制目前还没有一个较为公认的认识。因此,本文选择黄土高原植被恢复中分布最广泛的主要树种之一——油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)作为研究对象,通过氮添加模拟氮沉降,分析土壤有机碳及其不同活性组分的变化规律,为认识黄土高原典型森林生态系统在应对全球变化过程中土壤的响应机制,和评价全球变

化对生态脆弱区碳汇效应以及区域林业经营和生态建设提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与试验设计

研究区位于陕西省延安东南部宜川县铁龙湾林场(110°06'E,35°39'N),试验设在松峪沟阳坡典型油松林,坡度25°,土壤类型为灰褐色森林土。试验区属黄龙山系,海拔1000~1200 m,年平均气温9.8℃,年平均降水量574.4 mm,多集中在7—9月。土壤表层有机质含量丰富,达13.6 mg/g。林下土壤属碱性土,pH值约8.6,每100 g干土阳离子交换量为13.01 mg,全氮质量分数为0.39 mg/g。供试验用油松人工林为1963年植造,现保存1400~1800株/hm<sup>2</sup>,树高9.5~12.5 m,胸径10~12 cm,郁闭度0.70。

在油松人工林地,用铁丝随机围封面积为100 m<sup>2</sup>试验用小区16块,保证各小区之间立地条件一致。共设置4个氮添加处理,分别为对照(CK),低氮沉降量( $N_3$ ),中氮沉降量( $N_6$ ),高氮沉降量( $N_9$ )。年施氮量分别为0,3,6,9 g/(m<sup>2</sup>·a),肥料选用尿素。每年4月、6月、8月、10月份分4次等量喷施。每个处理设置4个样地重复,重复样地间隔为5 m。自2014年4月份开始,采用喷雾器对林下土壤直接喷施来模拟氮沉降,对照样方喷洒等量的水,每次施肥于雨前1天喷施,以尽量减少尿素挥发。

### 1.2 样品采集与分析

2015年10月采集土壤样品。在每个小区采用多点采样法进行样品采集,取样深度为0—20 cm和20—40 cm,每个样地采集的样品先去除凋落物和石粒后,充分混匀,风干,过1 mm和0.25 mm筛,用于土壤活性有机碳组分和土壤基本理化性质的测定,基本化学性质见表1。

土壤总有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化外加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏法测定;硝态氮和铵态氮采用1 mol/L的KCl溶液浸提后,分别采用紫外分光光度计法和全自动流动分析仪测定;土壤pH值采用pH值计测定(水土比为2.5:1)。活性有机碳含量测定采用Loginow等<sup>[29]</sup>的氧化法测定:根据不同浓度(33,167,333 mmol/L)KMnO<sub>4</sub>浓度的变化将土壤总有机碳(SOC)分成高活性组分( $C_1$ )、中活性组分( $C_2$ )、低活性组分( $C_3$ )和稳定性组分( $C_4$ )4个组分, $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 组分之和构成了易氧化有机碳( $C_{OC}$ )。 $C_{active}$ (活性碳组分)= $C_1 + C_2$ , $C_{passive}$ (惰性碳组分)= $C_3 + C_4$ 。土壤活性系数计算:活性系数=( $C_1/C_{OC}$ )×3+( $C_2/C_{OC}$ )×2+( $C_1/C_{OC}$ )×1。

表 1 土壤基本化学性质

土层深度/cm	氮添加处理	全氮/(g · kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/(mg · kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/(mg · kg <sup>-1</sup> )	pH 值
0—20	CK	1.19±0.07b	7.06±1.21a	13.67±0.80ab	8.22±0.03a
	N <sub>3</sub>	1.27±0.05b	5.75±0.22b	14.07±0.77a	8.20±0.03a
	N <sub>6</sub>	1.43±0.09a	3.27±0.32c	12.02±1.05b	8.18±0.03a
	N <sub>9</sub>	1.37±0.05a	3.31±0.44c	12.86±1.86ab	8.23±0.04a
20—40	CK	0.50±0.05b	3.47±0.49a	7.36±0.65a	8.40±0.03a
	N <sub>3</sub>	0.51±0.03ab	3.03±0.25a	7.16±0.31a	8.39±0.04a
	N <sub>6</sub>	0.53±0.03ab	3.25±0.06a	6.79±0.63a	8.39±0.04a
	N <sub>9</sub>	0.56±0.04a	3.43±0.24a	7.59±1.27a	8.44±0.04a

注：同列不同字母表示处理间差异显著 ( $p<0.05$ )，下表同。

1.3 数据分析

数据统计整理以及做图基于 Excel 2016;不同施氮处理的土壤之间各指标的差异性检验采用 SPSS 23.0 中的 ANOVA 进行方差分析;多重比较采用 Duncan, LSD 方法 ( $p<0.05$ )。利用 Canoco 4.5 软件对不同活性有机碳组分与土壤 pH 值、土壤总有机碳 (SOC)、土壤全氮 (TN)、硝态氮和铵态氮之间的关系进行冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA)。

2 结果与分析

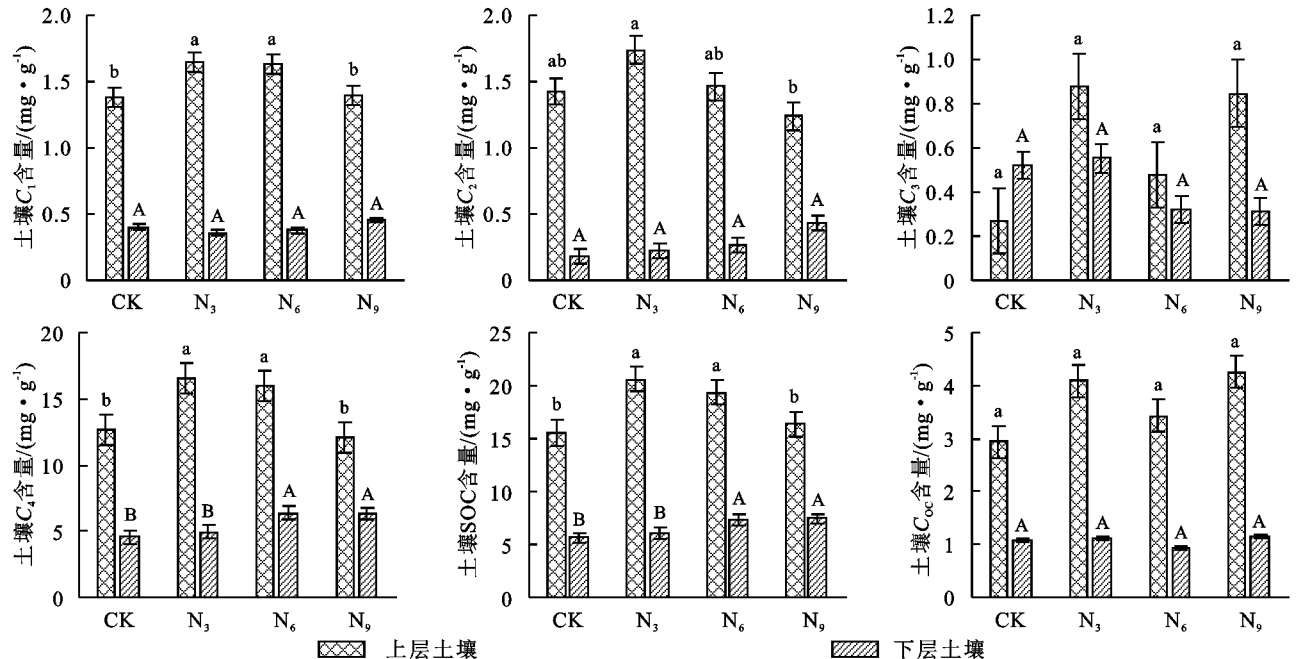
2.1 氮添加对土壤 SOC 及其活性组分的影响

不同氮添加水平对土壤有机碳及其组分具有显著影响,但是不同组分和土层深度表现不一(图 1)。在表层, SOC, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 和 C<sub>4</sub> 变化规律相似,整体随氮添加量增加呈先增加后降低的趋势,在 N<sub>3</sub> 达到最大值,除 C<sub>3</sub> 外均达到显著水平,随后逐渐降低在 N<sub>9</sub> 达到最低值,和 CK 没有显著性差异;氮添加对 C<sub>3</sub> 没有显著影响。氮添加对下层土

壤 SOC 及其组分影响较小,仅对 SOC 和 C<sub>4</sub> 的影响达到显著水平, N<sub>6</sub> 和 N<sub>9</sub> 显著高于 CK 和 N<sub>3</sub> 处理。

2.2 氮添加对土壤碳组分的分配及土壤活性系数的影响

相对于各组分含量,氮添加对不同组分在总有机碳的分配影响较小(表 2),在表层仅 C<sub>1</sub>/SOC 达到显著水平,其中在 N<sub>3</sub> 显著降低,随后逐渐升高,和 CK 没有显著差异。在下层 C<sub>1</sub>/SOC, C<sub>4</sub>/SOC 和 C<sub>OC</sub>/SOC 影响达到显著水平,其中 C<sub>1</sub>/SOC 和 C<sub>OC</sub>/SOC 先降低后升高, N<sub>6</sub> 达到最低值,除 C<sub>2</sub>/SOC, C<sub>4</sub>/SOC 外显著低于 CK; C<sub>4</sub>/SOC 则先升高后降低, N<sub>6</sub> 时达到最高值且显著高于 CK。4 个组分中 C<sub>4</sub> 占 SOC 比率最高,达 74.3%~87.3%,其中下层土壤略高于上层土壤。C<sub>active</sub> 占 SOC 的 8.4%~17.1%,上层土壤高于下层土壤,氮添加降低了上层土壤 C<sub>active</sub>/SOC, 但降幅未达到显著水平; C<sub>passive</sub> 占 SOC 的 82.9%~91.6%,下层土壤高于上层土壤。



注：不同字母表示氮添加处理在各土层存在显著差异 ( $p<0.05$ )。

图 1 氮添加对油松林土壤不同有机碳组分的影响

表 2 不同碳组分在 SOC 的分配规律

土层深度/cm	氮添加处理	C <sub>1</sub> /SOC	C <sub>2</sub> /SOC	C <sub>3</sub> /SOC	C <sub>4</sub> /SOC	C <sub>OC</sub> /SOC	C <sub>active</sub> /SOC	C <sub>passive</sub> /SOC
0—20	CK	0.089a	0.082a	0.018a	0.811a	0.189a	0.171a	0.829a
	N <sub>3</sub>	0.080b	0.076a	0.043a	0.801a	0.199a	0.156a	0.844a
	N <sub>6</sub>	0.084ab	0.068a	0.025a	0.824a	0.176a	0.152a	0.848a
	N <sub>9</sub>	0.085ab	0.068a	0.104a	0.743a	0.257a	0.153a	0.847a
20—40	CK	0.071a	0.029a	0.091a	0.809b	0.191a	0.100a	0.900a
	N <sub>3</sub>	0.059ab	0.033a	0.091a	0.817ab	0.183ab	0.092a	0.908a
	N <sub>6</sub>	0.051b	0.033a	0.043a	0.873a	0.127b	0.084a	0.916a
	N <sub>9</sub>	0.061ab	0.051a	0.043a	0.846ab	0.154ab	0.112a	0.888a

注:0—20 cm 为上层土壤,20—40 cm 为下层土壤。同列不同字母表示处理间差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 土壤碳组分与其他因子之间的冗余分析

冗余分析(RDA)表明不同土层深度影响土壤碳库组分的因子存在差异(图 2)。在上层土壤,SOC 和 C<sub>1</sub>,C<sub>4</sub> 显著正相关,TN 和 C<sub>3</sub>,C<sub>OC</sub>关系最为密切,pH

值、硝态氮和铵态氮与除过 C<sub>2</sub> 组分外的其他组分呈负相关。在下层土壤,pH 值、硝态氮和铵态氮与 C<sub>1</sub>,C<sub>OC</sub>关系密切,TN 和 SOC 是影响 C<sub>2</sub> 和 C<sub>4</sub> 的主要影响因子。

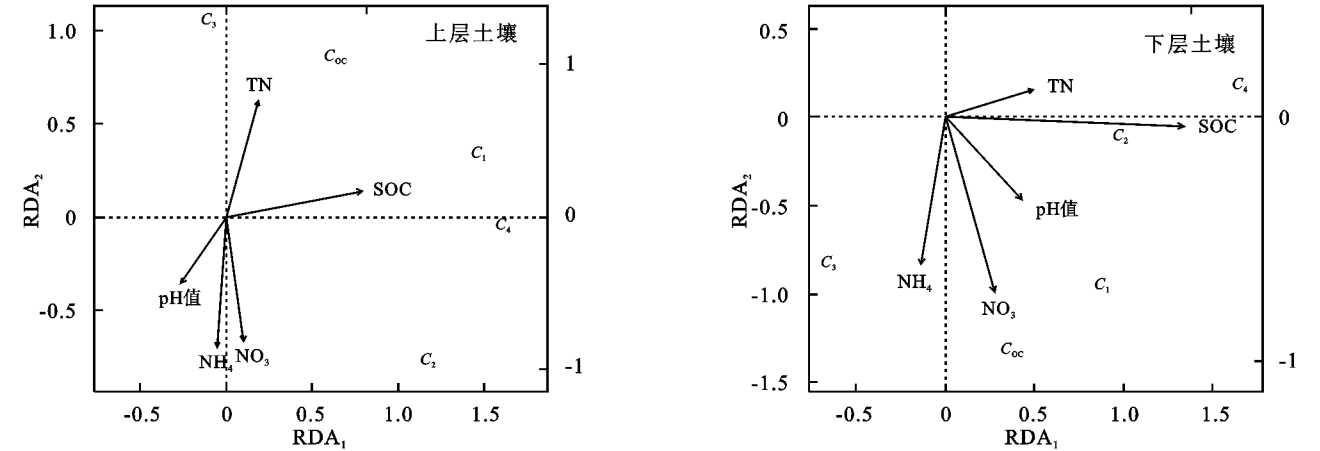


图 2 土壤有机碳组分与环境因子的冗余分析

3 讨论

土壤有机碳(SOC)含量是输入土壤的生物残体等有机物质的输入和微生物分解作用为主的有机质损失之间的一个动态平衡结果<sup>[30-31]</sup>,氮添加通过影响碳素输入与输出的过程从而对 SOC 产生影响,但是由于气候、施氮量、植被类型、土壤立地等因素,目前有关氮添加对 SOC 影响的结论还有较大差异。本研究表明氮添加会导致 SOC 先升高后降低,这主要由于土壤氮素在黄土丘陵区相对匮乏,随着氮添加数量的增大,土壤中可利用的氮素增大,促进了植物光合作用和根系的生长,进入土壤总的碳素来源增多,从而 SOC 逐渐增加。但是随着氮素继续增大,氮素出现饱和,对植物的生长影响从促进逐渐改为抑制,因此相对于 N<sub>6</sub> 处理,N<sub>9</sub> 处理的 SOC 显著降低,这与 Zhang 等<sup>[32]</sup>的研究结果相似,他们认为在氮添加为 6 g/(m<sup>2</sup>·a)时达到拐点,如果再升高就会对土壤系统产生抑制作用。研究还发现下层土壤 SOC 在显著增

大,这个主要和氮添加方式和养分淋溶有关,由于表层喷施氮素,对下层影响相对较少,而随着氮素的向下淋溶过程,下层土壤氮素逐渐增加,从而 SOC 得到提高。

活性碳移动快,稳定性差,易氧化、矿化可作为养分被植物吸收利用,尽管其占全碳的比例很小,但在调节土壤碳素转化和养分流方面起着重要作用,较有机质能更准确、灵敏地反映土壤理化性状的变化和碳库平衡<sup>[33]</sup>。本研究中氮添加虽然增加了 C<sub>OC</sub> 组分的含量,但并未达到显著水平,这可能主要和施氮时间较短有关。而相对于 C<sub>OC</sub> 组分,氮添加却显著改变了 C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub> 和 C<sub>4</sub> 组分含量,对 C<sub>3</sub> 含量没有显著影响,表明 C<sub>1</sub> 组分可以更加灵敏地反映氮素添加对土壤碳库平衡的影响,这和姚旭等<sup>[34]</sup>的研究结果相似,他们研究认为短期氮添加主要是通过影响不同团聚体粒径中土壤中活性碳组分来影响土壤碳素过程,在短时期内氮素添加会更容易导致植物根系分泌物、微生物代谢物产生变化,从而使土壤活性碳组分得到变化。理

论上随着氮添加,土壤 C/N 降低,氮素的限制作用降低,促进了微生物生长,对有机物的降解能力增强,另一方面改变了土壤和凋落物的元素构成,土壤质量提高,有利于有机物分解,土壤活性系数增大。但是我们的研究却并未发现氮添加增大土壤活性指数,相反在表层土壤中各处理均存在一定程度的降低,其中  $N_0$  显著低于 CK,下层没有显著差异,这可能由于油松中单宁等难降解物质较多,对氮添加后的碳素分解响应较弱,而高浓度的氮添加抑制了植物和微生物的作用,导致土壤活性系数降低。

土壤活性碳组分占有机碳的比例是反映土壤碳活性的一个重要指标,其值越大,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差,有机碳越容易被微生物和植物吸收利用,土壤碳库质量越高<sup>[35-37]</sup>。在本研究中  $C_{oc}/SOC$  在 12.7%~25.7%,整体维持在一个较低比例,略低于韩新辉<sup>[37]</sup>和 Zhang 等<sup>[32]</sup>的研究结果,表明在该区域 SOC 整体含量较低,而活性有机碳含量较低,微生物的分解作用相对较弱,土壤质量整体不高。氮添加并未改变上层  $C_{oc}$  的比例,下层则呈现不同程度的降低,这主要和氮添加的方式与时间有关。研究进一步表明在上层  $C_{oc}$  组分中,  $C_1$  和  $C_2$  组分为主要组分,氮添加降低了二者在  $C_{oc}$  中所占比例,说明随着氮添加, C/N 降低, SOC 分解能力降低,高和中等活性的有机碳逐渐转化为低等活性的有机碳。而下层氮添加增大了  $C_1$  和  $C_2$  在  $C_{oc}$  中所占比例,这主要和植物根系生长有关。同时上述结果表明采用不同活性组分在反应土壤碳活跃程度上比  $C_{oc}$  更具有灵敏性。

RDA 分析表明不同土层影响活性有机碳组分的因素不同,其中上层土壤中 TN 和 SOC 与各组分关系最为密切,是影响活性有机碳组分的主要因素,证明了氮添加会通过影响土壤全氮和有机质含量来对各组分产生影响。下层土壤 pH 值、铵态氮、硝态氮和  $C_{oc}$ ,  $C_1$  等组分关系密切,而与 TN 的关系较弱,说明氮添加后随着淋溶等作用,改变了下层土壤属性从而影响活性碳组分。

## 4 结论

黄土丘陵区油松人工林短期氮添加后,随着氮添加含量的增大,上层土壤 SOC 及其  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_4$  组分含量先增加后降低,在  $N_3$  达到最大值,对下层土壤 SOC 及其组分影响较小。氮添加对不同碳组分在总有机碳中的分配比例影响较小,4 个组分中  $C_4$  所占比例最大,达 74.3%~87.3%,其中下层土壤略高于上层土壤。氮添

加对土壤碳库活性系数影响相对较小,仅在表层  $N_0$  处理下影响达到显著水平。研究表明短期氮添加可以改变土壤碳库构成,但是并未增加土壤碳库活性,其中  $C_1$  和  $C_2$  组分可以更灵敏地反映氮添加对土壤碳库的影响。但是由于本研究涉及碳库代谢机理方面的研究较少,因此今后需要加强相关方面的工作,比如微生物、根系等在土壤碳库转化过程中的作用。

### 参考文献:

- [1] 肖胜生,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1138-1148.
- [2] 李卫,张树锋,向成高,等. 云南文山烟区土壤有机质的时空分布特征[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(6): 44-47.
- [3] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 74: 50-60.
- [4] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 743-747.
- [5] 陈小红,段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 765-772.
- [6] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Climatic influences on active fractions of soil organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(7/8): 1103-1111.
- [7] 朱培立,黄东迈,余晓鹤,等.  $^{14}C$  标记秸秆和根茬在淹水及旱地土壤中的矿化特征[J]. 土壤通报, 1994, 25(7): 67-70.
- [8] Maia S M F, Xauier F A S, Oliveira T S, et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceara, Brazil[J]. Agroforestry Systems, 2007, 71(2): 127-138.
- [9] Chan K Y, Bowman A, Oates A, et al. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys[J]. Soil Science, 2001, 166(1): 61-67.
- [10] Sherrod L, Peterson G, Westfall D, et al. Soil organic carbon pools after 12 years in no-till dryland agroecosystems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5): 1600-1608.
- [11] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur[J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.
- [12] Blair G J, Lefroy R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agriculture

- systems[J]. Crop and Pasture Science, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [13] Janzen H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1987, 67(4): 845-856.
- [14] Rangel O J P, Silva C A, Guimaraes P T G, et al. Oxidizable organic carbon fractions in a latosol cultivated with coffee at different planting spacings [J]. Ciencia E Agrotecnologia, 2008, 32(2): 429-437.
- [15] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Technical report: Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [16] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [17] 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.
- [18] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle [J]. Nature, 2008, 451(7176): 293-296.
- [19] Schlesinger W H. On the fate of anthropogenic nitrogen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(1): 203-208.
- [20] Hobbie S E, Eddy W C, Buyarski C R, et al. Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment [J]. Ecological Monographs, 2012, 82(3): 389-405.
- [21] Bowden R D, Davidson E, Savage K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. Forest Ecology & Management, 2004, 196(1): 43-56.
- [22] Hagedorn F, Kammer A, Schmidt M W I, et al. Nitrogen addition alters mineralization dynamics of  $^{13}\text{C}$ -depleted leaf and twig litter and reduces leaching of older DOC from mineral soil[J]. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1412-1427.
- [23] Lovett G M, Arthur M A, Weathers K C, et al. Nitrogen addition increases carbon storage in soils, but not in trees, in an eastern U. S. deciduous forest[J]. Ecosystems, 2013, 16(6): 980-1001.
- [24] Zeng D H, Li L J, Fahey T J, et al. Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland. [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 185-193.
- [25] Fenn M E, 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(3): 706-733.
- [26] Nadelhoffer K J, Downs M R, Fry B. Sinks for  $^{15}\text{N}$ -enriched additions to an oak forest and a red pine plantation [J]. Ecological Applications, 1999, 9(1): 72-86.
- [27] Andersson P, Dan B, Johnsson L. 30 years of N fertilisation in a forest ecosystem/the fate of added N and effects on N fluxes[J]. Water Air & Soil Pollution, 2001, 130(1/4): 637-642.
- [28] Song C, Liu D, Song Y, et al. Effect of nitrogen addition on soil organic carbon in freshwater marsh of Northeast China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1653-1659.
- [29] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1): 47-52.
- [30] Cusack D F. Soil nitrogen levels are linked to decomposition enzyme activities along an urban-remote tropical forest gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57(57): 192-203.
- [31] 肖胜生. 温带半干旱草地生态系统碳固定及土壤有机碳库对外源氮输入的响应[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- [32] Zhang J, Ai Z, Liang C, et al. Response of soil microbial communities and nitrogen thresholds of *Bothriochloa ischaemum* to short-term nitrogen addition on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2017, 308: 112-119.
- [33] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 206-211.
- [34] 姚旭, 景航, 梁楚涛, 等. 人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 1-8.
- [35] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [36] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民, 等. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 84-89.
- [37] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.