

# 黄土高原人工油松林土壤碳氮对短期氮添加的响应

陈磊, 朱广宇, 刘玉林, 上官周平, 邓蕾

(西北农林科技大学, 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:** 为了更好地理解土壤碳氮元素对氮添加的响应, 通过短期原位模拟氮沉降试验, 揭示黄土高原子午岭人工油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)林土壤碳氮对外源氮添加的响应过程和机制。从 2015—2016 年设置 4 个氮添加水平, 分别为对照(0 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N0)、低氮(50 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N50)、中氮(100 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N100)和高氮(200 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N200), 研究人工油松林地不同深度土层土壤有机碳和全氮以及土壤碳氮储量对模拟氮添加的响应。结果表明: 土层对土壤有机碳、全氮和碳氮储量有显著影响, 上层土壤有机碳、全氮和碳氮储量显著高于下层土壤; 氮添加水平对土壤有机碳、土壤碳储量影响不显著, 但可显著影响土壤全氮和氮储量。此外, 土壤有机碳、全氮和碳氮储量和土壤碳氮储量比受地下生物量碳氮比的影响显著。因此, 短期氮添加对人工油松林地土壤碳的影响不显著, 但可显著影响土壤氮, 地下生物量碳氮比是影响土壤碳氮的重要因素。

**关键词:** 氮添加; 有机碳; 全氮; 地下生物量; 凋落物

中图分类号: S153; S791.254

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0346-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.055

## Responses of Soil Carbon and Nitrogen to Short Term Nitrogen Addition in *Pinus tabulaeformis* Carrière Forest on the Loess Plateau

CHEN Lei, ZHU Guangyu, LIU Yulin, SHANGGUAN Zhouping, DENG Lei

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** To better understand the responses of soil carbon and nitrogen to the nitrogen addition, this paper revealed the response processes and mechanisms of soil carbon and nitrogen to exogenous nitrogen addition through a short-term simulated nitrogen deposition experiment in artificial *Pinus tabulaeformis* Carrière plantation in Ziwuling Mountain of the Loess Plateau. From 2015 to 2016, four nitrogen addition levels, including control (0 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N0), low nitrogen (50 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N50), medium nitrogen (100 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N100), and high nitrogen (200 kg/(hm<sup>2</sup>·a), N200), were set up to study the responses of soil organic carbon(SOC), total nitrogen (TN) and soil carbon and nitrogen storage (C<sub>s</sub> and N<sub>s</sub>) in different soil depths to the simulated addition nitrogen. The results showed that soil layer had significantly influence on SOC, TN, C<sub>s</sub> and N<sub>s</sub>. SOC, TN, C<sub>s</sub> and N<sub>s</sub> in the surface layer were significantly higher than those in the deeper soil layers. Nitrogen addition level had no significant impact on the SOC and C<sub>s</sub>, while significantly affected the TN and N<sub>s</sub>. In addition, SOC, TN, C<sub>s</sub> and N<sub>s</sub>, and C<sub>s</sub>/N<sub>s</sub> were significantly affected by the carbon nitrogen ratio (C/N) of belowground biomass. Therefore, short-term nitrogen addition had no significant influence on soil carbon, but it could significantly affect soil nitrogen, and C/N of belowground biomass was the important factor affecting soil carbon and nitrogen.

**Keywords:** nitrogen addition; organic carbon; total nitrogen; belowground biomass; litter

自工业革命以来, 由于化肥生产及使用的增加、化石燃料燃烧和畜牧业的快速发展等因素, 人类活动向大气中排放了大量活性氮化合物, 造成大气氮沉降量迅速增加, 氮沉降已经成为一个全球性的问题<sup>[1]</sup>。

森林生态系统是陆地生态系统的主体, 森林土壤碳储量约占全球地下碳库的 40%。森林土壤碳库的库容巨大, 且与大气碳库有着直接和间接的联系, 其轻微变化将对整个大气碳循环产生重要的影响<sup>[2]</sup>。因此,

收稿日期: 2018-01-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41730638); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAC01B03)

第一作者: 陈磊(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事全球变化与森林土壤生态学研究。E-mail: chenlei\_nwsuaf@163.com

通信作者: 邓蕾(1986—), 副研究员, 主要从事生态恢复及其环境效应研究。E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

全球氮沉降背景下,加强氮沉降对森林土壤碳氮循环的研究对应对全球气候变化具有重要的意义。氮素原位添加试验是人工模拟氮沉降的主要形式,氮沉降主要通过改变森林生态系统凋落物量、凋落物分解、土壤呼吸和土壤有机碳的稳定性影响着土壤有机碳库<sup>[2]</sup>。关于大气氮沉降增加对土壤碳库影响的研究虽然近些年来逐渐受到关注,但不同的研究对象和地点获得的结论存在较大的差异。氮添加造成土壤有机碳的增加、减少和无显著影响<sup>[3]</sup>。目前,Ai等<sup>[4]</sup>研究了氮添加对黄土高原草地碳氮的影响,而氮添加对黄土高原森林土壤碳氮影响尚缺乏充分的研究。由于黄土高原森林生态系统土壤中存储了大量的碳,且在全球碳循环中起重要的作用,有必要加强对不同氮添加水平下黄土高原森林土壤碳对氮添加的响应动态的研究。另外,土壤氮素含量是影响植物生长和土壤微生物群落组成的重要元素之一,氮沉降对土壤氮素含量影响的研究结论也不一致。有研究<sup>[5]</sup>发现,在热带和温带森林中,氮输入改变了林分中土壤氮的形态,增加了土壤有效氮含量;而另一些研究<sup>[6]</sup>表明氮沉降并未引起土壤氮素含量增加。我国黄土高原地区氮沉降量逐年增加,氮添加对土壤氮循环的响应机制缺乏系统的研究<sup>[7]</sup>。因此,加强对不同氮添加水平下森林土壤碳氮对氮添加的响应动态方面的研究,有助于理解黄土高原森林土壤碳氮变化和碳氮储量对氮添加的响应情况及机制。

子午岭森林是黄土高原重要的生态屏障,其功能的正常发挥对维持黄土高原区域及全球生态系统平衡有及其重要的作用。油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)是中国暖温带森林最主要的建群种,由于我国在黄土高原地区实施了大规模的退耕还林工程,使

得子午岭林区有超过 53 000 hm<sup>2</sup> 的人工油松纯林<sup>[8]</sup>。因此,本研究以子午岭人工油松林为对象,通过模拟氮沉降(氮添加)试验,研究人工油松林土壤碳氮含量及储量对氮添加的响应动态和响应机制,为了解氮添加对土壤碳氮相关的生态过程的影响以及为评估该地区在氮添加增加的背景下生态系统碳氮固持能力提供基础数据及理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地选择在子午岭林区,该区位于黄土高原中部半湿润半干旱过渡带,总面积 23 000 km<sup>2</sup>,是黄土高原保存较为完整的天然次生林区。本研究所在区域甘肃省合水县连家砭林场(35°03′—36°37′N, 108°10′—109°18′E),海拔 1 211~1 453 m,为典型的黄土高原丘陵沟壑区,属中温带大陆性季风气候区。年均降水量 587.6 mm,主要集中在 7—9 月,年均气温 10 °C,年均大气氮沉降水平为 25 kg/hm<sup>2</sup>。土壤为原生或次生黄土,一般为 50~100 cm 厚,土壤 pH 7.92~8.31。

### 1.2 试验设计

试验开始于 2015 年,试验采用单因素完全随机设计法,选择 30 年人工油松林为永久试验样地,样地面积约 3 hm<sup>2</sup>,在试验样地中间设置 4 个氮添加水平,分别为对照(N0,0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、N50(N50,50 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、N100(N100,100 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、N200(N200,200 kg/(hm<sup>2</sup>·a))。每一水平设置水平 3 个重复,每个重复样方大小 10 m×20 m。施氮的方法是将每个样方的所需的尿素人工撒施,对照不做任何处理,每年 9 月雨天时施一次尿素。不同氮添加水平土壤及植物的本底情况见表 1。

表 1 不同氮添加水平下人工油松林土壤和植物本底情况

氮添加水平	土层深度/cm	项目	N0	N50	N100	N200
凋落物		现存量/(g·m <sup>-2</sup> )	463.83±141.54a	636.28±230.74a	615.01±26.51a	439.43±107.08ab
		有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	381.65±79.64a	352.97±72.57a	416.90±25.29a	346.37±26.45ab
		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.56±0.02c	1.91±0.18a	1.40±0.10d	1.74±0.10b
		碳氮比	245.01±49.77b	188.71±52.03cd	298.01±26.65a	199.80±19.41c
0—10		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	132.08±4.50a	109.23±15.24a	38.85±23.99b	145.39±65.74ab
		有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	306.04±3.21b	368.71±25.03b	358.78±13.62a	369.47±21.28ab
		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.41±0.15a	1.76±0.26bc	1.26±0.19bc	1.25±0.21b
		碳氮比	219.25±24.49d	213.66±35.50bc	291.20±44.22a	304.01±56.12b
地下生物量	10—20	生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	182.24±58.04a	121.49±3.85a	91.42±34.30b	132.08±4.50ab
		有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	346.39±20.25b	339.65±3.92b	388.06±36.46a	315.52±41.55ab
		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.82±0.04a	0.98±0.13bc	1.75±0.53bc	1.03±0.13b
		碳氮比	190.56±15.08d	352.71±47.84bc	240.74±77.30a	311.84±59.44b
20—30		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	152.55±27.47a	175.60±75.17a	148.79±5.79b	83.73±28.46ab
		有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	337.32±34.10b	289.52±89.54b	365.06±4.75a	370.14±18.75ab
		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.82±0.04a	1.18±0.14bc	0.71±0.02bc	1.80±0.59b
		碳氮比	190.56±15.08d	249.05±82.35bc	513.95±14.49a	220.21±54.65b

注:表中数据为均值±标准差;同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

### 1.3 样品采集

2016 年 9 月施肥之前进行土壤样品采集,在每块氮添加处理样地内随机选取 3 个点,清除地表凋落物,使用直径 9 cm 的土钻取 0—30 cm 土样,将该土样放入编号的自封袋中。土样带回野外实验站后,将小于 2 mm 细根放入塑料袋内,低温冷冻保存,带回实验室后将样品烘干(60 °C),测定生物量干重,即为地下生物量。将各采集点土壤样品混匀,待土样自然风干后,用四分法研磨后分别测定土壤有机碳和土壤全氮。在每个处理的小样方内随机选取 3 个地方选择 1 m×1 m 收集地上凋落物现存量,用档案袋收集带回实验室在 60 °C 烘干称重。

### 1.4 样品的测定

土壤 pH 采用水土比 2.5 : 1 的 pH 计测定;土壤容重采用环刀法进行测定;土壤、凋落物和地下生物量有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤、凋落物和地下生物量全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定。

### 1.5 土壤碳氮储量的计算

土壤有机碳储量( $C_s$ )的计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$C_s = \frac{SOC \times BD \times D}{10} \quad (1)$$

式中: $C_s$  为 SOC 储量(Mg/hm<sup>2</sup>);BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);D 为土层厚度(cm)。

土壤全氮储量( $N_s$ )的计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$N_s = \frac{TN \times BD \times D}{10} \quad (2)$$

式中: $N_s$  为 TN 储量(Mg/hm<sup>2</sup>);BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);TN 为土壤全氮含量(g/kg);D 为土层厚度(cm)。

### 1.6 数据处理

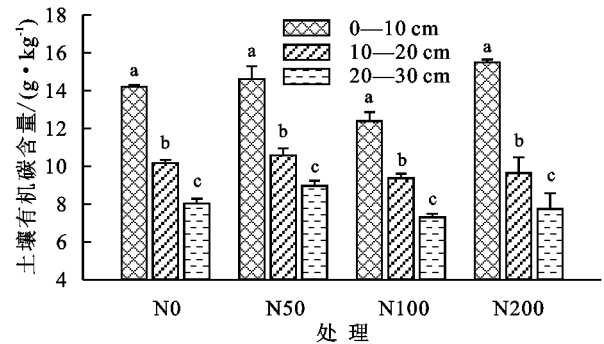
采用双因素方差分析法(Two-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据间的差异( $\alpha = 0.05$ ),应用 Pearson 相关性分析法分析土壤有机碳及储量、土壤全氮及储量、土壤碳氮比和土壤碳氮储量比与 pH、凋落物生物量及碳氮、地下生物量及碳氮的相关系数;在逐步回归的基础上,确定地下生物量碳氮比是主要的影响因子以后,采用一元线性分析了地下生物量碳氮比与土壤有机碳及储量、土壤全氮及储量、土壤碳氮比和土壤碳氮储量比的回归系数。采用 SPSS 17.0(SPSS Inc., Illinois, USA)软件进行数据处理与统计分析,采用 Sigmaplot 12.5 (Systat Software, San Jose, CA)进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 短期氮添加对土壤有机碳含量及储量的影响

相同氮添加水平,土壤有机碳的含量随着土层深

度的增加呈下降的趋势,土壤有机碳含量显著减少( $P < 0.05$ )(图 1)。不同氮添加水平,相同土层土壤有机碳含量无显著影响( $P > 0.05$ )。



注:不同小写字母表示不同土层间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 不同处理对人工油松林不同土层土壤有机碳含量的影响

短期氮添加下,土壤碳储量与有机碳表现出相似的变化规律(图 2),总体上相同氮添加水平下,土壤有机碳储量随着土层深度的增加呈下降趋势,土层变化对土壤有机碳储量存在显著影响( $P < 0.05$ )。在对照和中氮添加水平下,上层土壤碳储量显著高于下层,而在低氮和高氮添加水平下,表层土壤碳储量显著高于中层和下层土壤碳储量( $P < 0.05$ )。

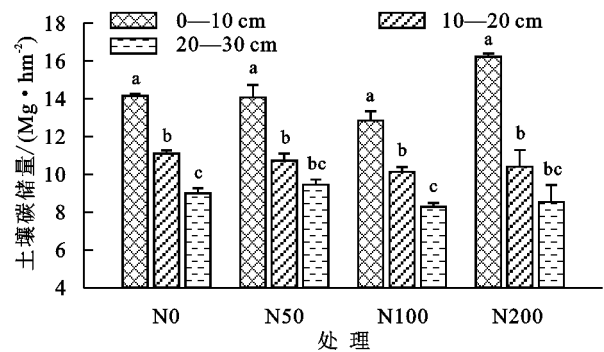
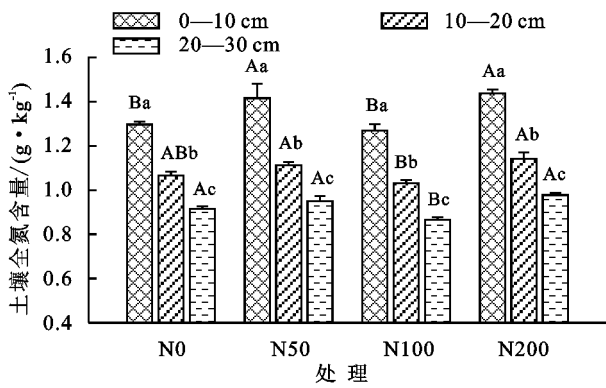


图 2 不同处理对人工油松林土壤碳储量的影响

### 2.2 短期不同氮添加水平下土壤全氮含量及储量的变化

相同氮添加水平,土壤全氮含量随土层深度的增加而减少(图 3)。随着氮添加水平的增加,表层、中层和下层土壤全氮含量呈现先增加后减少再增加的趋势,在中氮时含量最低,高氮时含量最高。表层土壤低氮和高氮水平土壤全氮含量显著高于对照和中氮( $P < 0.01$ );中层土壤低氮和高氮显著高于中氮水平( $P < 0.01$ );下层对照、低氮和高氮水平土壤全氮显著高于中氮处理( $P < 0.01$ )。

与土壤全氮含量类似,相同氮添加水平,土壤全氮储量也随着土层深度的增加而显著减少( $P < 0.05$ )(图 4)。不同氮添加水平下,表层土壤高氮水平土壤氮储量显著高于对照、低氮和中氮水平( $P < 0.05$ )。



注:不同大写字母(A,B,C)表示不同氮添加水平相同土层显著差异( $P<0.05$ );不同小写字母(a,b,c)表示相同氮添加水平不同土层显著差异( $P<0.05$ )。下同。

图 3 人工油松林不同处理平对土壤全氮含量的影响

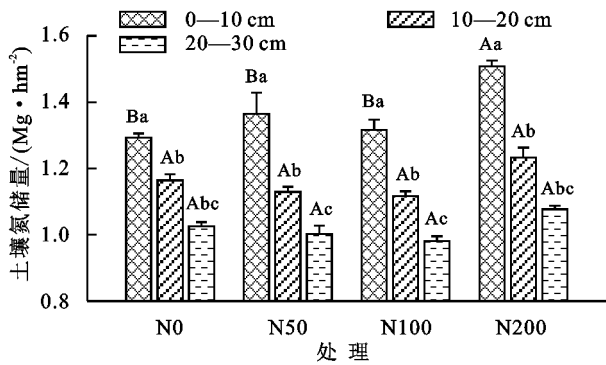


图 4 人工油松林不同处理对土壤氮储量的影响

2.3 不同氮添加处理对土壤碳氮比的影响

相同氮添加水平下,土壤碳氮比随着土层深度的加深而逐渐下降(图 5),表层土壤碳氮比显著高于中层和下层土壤碳氮比( $P<0.05$ ),中氮水平中层土壤碳氮比显著高于下层土壤碳氮比( $P<0.05$ )。而不同氮添加水平下,表层土壤对照和高氮水平土壤碳氮比显著高于低氮和中氮水平( $P<0.05$ ),下层土壤低氮水平土壤碳氮比显著高于高氮水平土壤碳氮比( $P<0.05$ )。

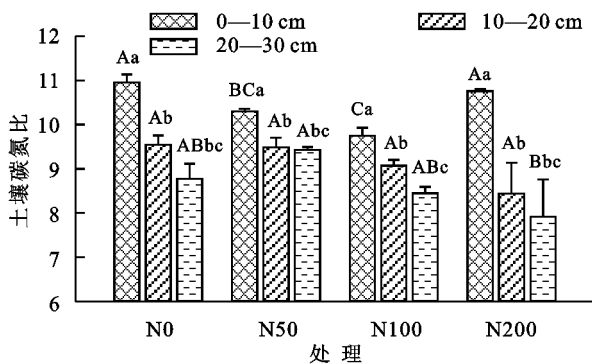


图 5 人工油松林不同处理对土壤碳氮比的影响

与土壤碳氮比不同,虽然氮添加水平对土壤碳氮比影响显著,但氮添加水平对土壤碳氮储量比影响不显著(图 6)( $P>0.05$ )。相同氮添加水平表层土壤碳氮储量比显著高于中层和下层土壤碳氮储量比( $P<0.05$ ),中层土壤碳氮储量比显著高于下层土壤碳氮储量比( $P<0.05$ )。

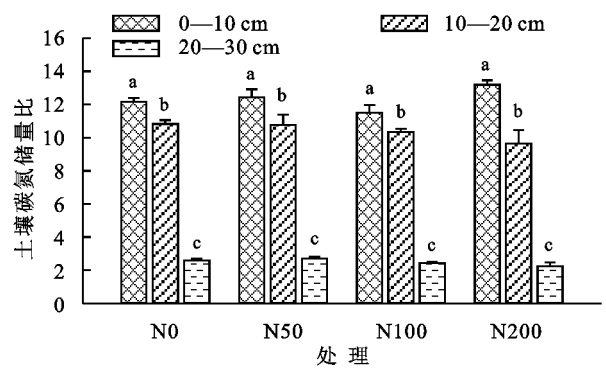


图 6 人工油松林不同处理对土壤碳氮储量比的影响

2.4 土壤碳氮影响因子分析

双因素分析表明(表 2),氮添加水平对土壤有机碳及储量影响不显著( $P>0.05$ ),而土层变化对土壤有机碳及储量存在极显著影响( $P<0.01$ );短期氮添加对土壤全氮含量存在极显著影响( $P<0.01$ ),氮添加水平对土壤氮储量存在显著影响( $P<0.05$ );土层变化对土壤全氮含量及氮储量存在极显著影响( $P<0.01$ ),但氮添加水平和土层变化的交互作用对土壤全氮及氮储量影响不显著( $P>0.05$ );氮添加水平对土壤碳氮比存在显著影响( $P<0.05$ );土层变化对土壤碳氮比和土壤碳氮储量比存在极显著影响( $P<0.01$ )。

表 2 土壤碳氮影响因子的双因素方差分析

影响因素	方差分析	氮添加水平	土层变化	氮添加×土层
SOC	F	3.421	86.997	2.199
	Sig	0.093	0.000**	0.055
TN	F	19.665	339.398	0.829
	Sig	0.002**	0.000**	0.552
C <sub>s</sub>	F	3.421	86.997	2.199
	Sig	0.093	0.000**	0.055
N <sub>s</sub>	F	7.512	85.916	2.118
	Sig	0.019*	0.000**	0.064
C/N	F	3.726	27.455	1.874
	Sig	0.016*	0.000	0.100
C <sub>s</sub> /N <sub>s</sub>	F	1.142	727.588	2.165
	Sig	0.339	0.000**	0.059

注: SOC 为土壤有机碳; TN 为土壤全氮; C<sub>s</sub> 为土壤碳储量; N<sub>s</sub> 为土壤氮储量; C/N 为土壤碳氮比; C<sub>s</sub>/N<sub>s</sub> 为土壤碳氮储量比。  
\*表示在 0.05 水平上差异显著( $P<0.05$ ); \*\*表示在 0.01 水平上差异显著( $P<0.01$ )。

相关分析表明(表 3),表层土壤有机碳与凋落物全氮显著正相关( $P<0.05$ ),中层土壤有机碳与地下生物量有机碳极显著负相关( $P<0.01$ );表层土壤碳储量与地下生物量显著负相关( $P<0.05$ ),中层土壤碳储量与地下有机碳显著负相关( $P<0.05$ );中层土壤全氮与凋落物全氮显著正相关( $P<0.05$ ),下层土壤全氮与地下全氮显著正相关( $P<0.05$ ),与凋落物全氮、地下生物量有机碳极显著正相关( $P<0.05$ ),与凋落物有机碳显著负相关( $P<0.05$ ),与凋落物碳氮比极显著负相关( $P<0.01$ );下层土壤氮储量与地

下有机碳显著正相关( $P < 0.05$ ),与凋落物现存量极显著负相关( $P < 0.01$ );表层土壤碳氮比与地下生物量碳氮比显著正相关( $P < 0.05$ ),与地下全氮极显著正相关( $P < 0.01$ ),中层与地下有机碳极显著负相关( $P < 0.01$ );中层土壤碳氮储量比与地下生物量有机

碳极显著负相关( $P < 0.01$ )。回归分析表明(图 7),地下生物量碳氮比能够解释土壤有机碳、土壤碳储量、土壤全氮、土壤氮储量、土壤碳氮比、土壤碳氮储量比变化的 25.5%,22.01%,29.80%,24.21%,9.55%和 23.40%,是影响土壤碳氮的重要因素。

表 3 土壤碳氮与凋落物和地下生物量属性之间的相关关系

影响因素	土层深度/cm	凋落物				地下生物量			
		现存量/ ( $g \cdot m^{-2}$ )	有机碳/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	碳氮比	现存量/ ( $g \cdot m^{-2}$ )	有机碳/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	碳氮比
土壤有机碳	0—10	-0.150	-0.091	0.414*	-0.382	-0.262	0.165	-0.193	0.135
	10—20	0.235	-0.010	0.107	-0.072	0.189	-0.541**	-0.067	0.235
	20—30	0.095	-0.271	0.323	-0.327	-0.061	0.368	0.234	-0.079
土壤全氮	0—10	-0.002	0.035	0.373	-0.25	-0.136	0.188	0.099	-0.114
	10—20	-0.102	-0.141	0.499*	-0.367	0.271	-0.042	0.071	0.201
	20—30	-0.392	-0.446*	0.654**	-0.605*	-0.202	0.607**	0.413*	-0.279
土壤碳储量	0—10	-0.235	-0.066	0.267	-0.291	-0.414*	0.261	-0.154	0.171
	10—20	0.144	-0.047	0.072	0.048	0.046	-0.421*	-0.050	-0.149
	20—30	0.061	-0.222	0.176	-0.223	-0.078	0.311	0.195	-0.023
土壤氮储量	0—10	-0.107	0.072	0.165	-0.119	-0.341	0.310	0.145	-0.061
	10—20	0.364	0.169	-0.170	0.170	0.015	-0.690**	-0.120	-0.276
	20—30	-0.542**	-0.354	0.331	-0.380	-0.274	0.482*	0.332	-0.173
土壤碳氮比	0—10	-0.311	-0.249	0.274	-0.399	-0.300	0.002	-0.562**	0.449*
	10—20	0.294	0.052	-0.136	0.102	0.073	-0.551**	-0.094	-0.155
	20—30	0.259	-0.107	0.072	-0.103	0.021	0.147	0.069	0.048
土壤碳氮储量比	0—10	-0.112	-0.043	0.245	-0.272	-0.232	0.240	-0.196	0.163
	10—20	0.364	0.169	-0.170	0.170	0.015	-0.690**	-0.120	-0.276
	20—30	0.162	-0.214	0.104	-0.159	0.068	0.162	0.025	0.099

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关( $P < 0.05$ ); \*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关( $P < 0.01$ )。

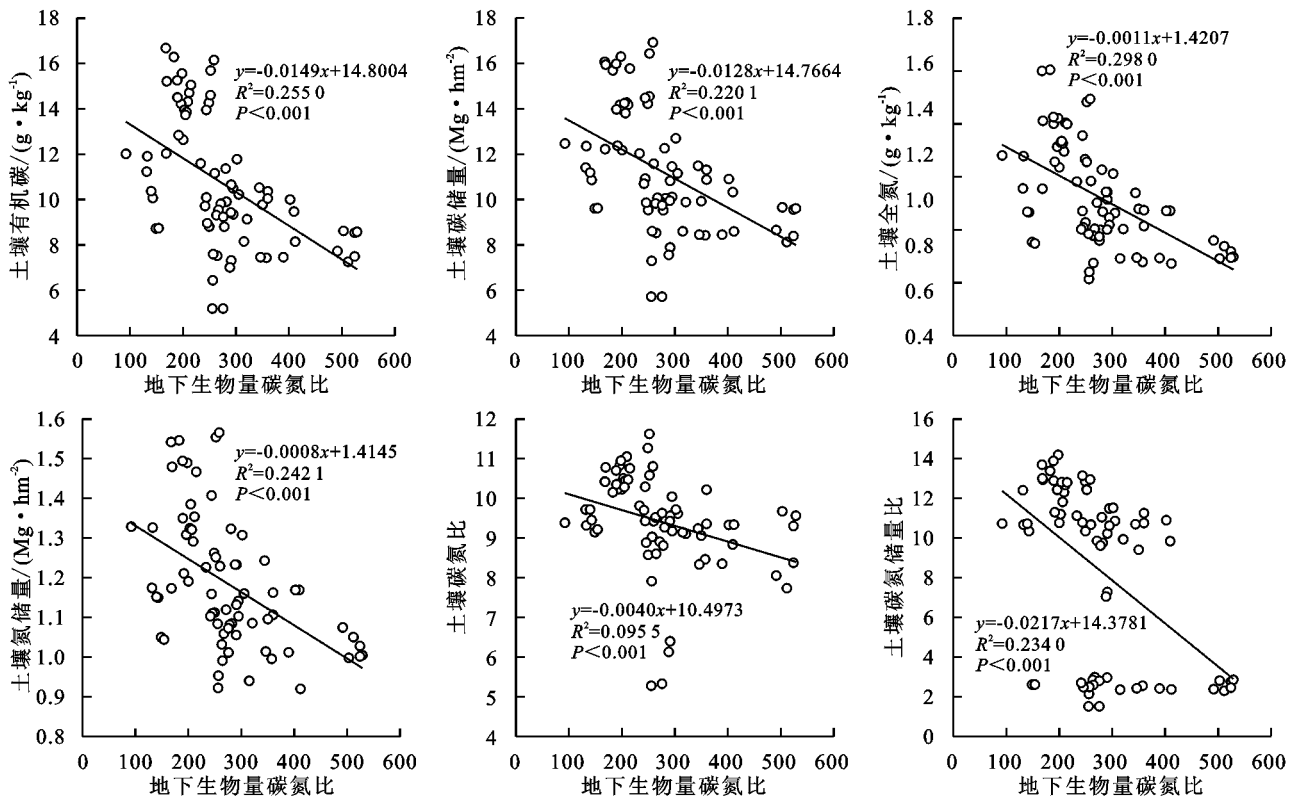


图 7 地下生物量碳氮比与土壤有机碳、全氮、有机碳储量、全氮储量、土壤碳氮比和土壤碳氮储量比之间的关系

## 3 讨论

### 3.1 短期氮添加对人工油松林土壤碳的影响

短期氮添加对土壤有机碳和碳储量的影响存在很大的不确定性,依赖于净初级生产所带来的土壤碳输入和土壤有机质分解引起的碳输出之间的平衡<sup>[11]</sup>。森林生态系统土壤有机碳输入主要以凋落物形式进入土壤,而微生物的分解矿化作用是土壤碳输出的主要形式<sup>[12]</sup>。本研究发现,在同一氮添加水平下,土层对土壤有机碳和有机碳储量有显著影响;在同一土层中,氮添加对土壤有机碳和碳储量影响整体上不显著。已有研究<sup>[13]</sup>发现,土壤有机碳取决于有机碳输入与输出之间的平衡,短期氮添加下,土层变化是影响黄土高原子午岭人工油松林表层土壤有机碳的分布主要因素之一,上层土壤有机碳显著高于中层和下层土壤,原因是上层土壤凋落物输入量大,氮添加增加了表层土壤有效氮供给,植物根系短期内大量吸收有效氮,细根周转速率快,输入到土壤中的有机质增加,导致表层土壤有机碳短期内显著增加<sup>[2]</sup>。本研究同时发现地下生物量有机碳和凋落物全氮对土壤有机碳影响显著,可能的原因是氮添加促进细根周转,为土壤微生物提供了更多的碳源,导致土壤有机碳含量增加,而凋落物全氮含量决定凋落物的质量(碳氮比),凋落物碳氮比越低,凋落物越容易分解,输入到土壤中的有机碳越多<sup>[2]</sup>。此外,氮添加对土壤有机碳积累的不显著影响与绝大多数研究结果不一致,一方面原因可能是氮添加增加土壤凋落物输入促进土壤有机碳积累<sup>[14]</sup>;另一方面,短期氮添加会提高土壤有机物的质量(低碳氮比)和土壤微生物利用率,导致较多土壤有机碳矿化<sup>[15]</sup>,从而使土壤有机碳对氮添加的短期影响不明显。虽然氮添加对土壤有机碳的影响不显著,但是仍然有提高土壤有机碳含量和储量的趋势。

### 3.2 短期氮添加对人工油松林土壤氮的影响

本研究发现,氮添加水平对土壤全氮及土壤氮储量无显著影响。而土层是影响土壤全氮和土壤氮储量分布的重要因素之一。本试验中,氮添加显著提高了人工油松林土壤表层全氮的含量,且高氮水平促进作用最为明显,这可能由于高氮水平下人工油松林处于“氮饱和”状态,土壤氮淋溶作用明显。涂丽华等<sup>[16]</sup>研究华西雨屏区苦竹林发现,氮沉降增加了苦竹林土壤有效氮,特别是硝态氮的含量。李贵才等<sup>[17]</sup>研究杉木人工林发现,氮沉降对土壤有效氮的影响存在累积效应。氮添加下,土壤通过 $N_2O$ 排放、 $NO_3^-$ 淋溶等途径产生的氮损失不足以抵消氮输入的增加,而表现出氮素的累积效应,引起氮素富

集<sup>[18]</sup>。从表3可知,短期氮添加对土壤全氮的影响主要通过影响凋落物有机碳、全氮和碳氮比以及地下生物量、地下生物量有机碳和地下生物量全氮来实现的。高氮添加下层土壤氮储量增加,这与其他学者<sup>[19]</sup>随氮添加水平增加导致土壤酸化从而大幅降低土壤氮储量的研究结果不同,可能的原因是高氮添加下土壤氮含量增加且细根周转加快,细根吸收大量的氮导致细根全氮含量上升,氮添加对氮储量的影响是通过影响地下生物量和地下生物量有机碳的含量来实现的。

### 3.3 氮添加对人工油松林土壤碳氮比的影响

氮添加水平和土层显著影响土壤碳氮比。本研究中,中层和下层土壤碳氮比随氮添加水平增加而降低,而表层土壤碳氮比随氮添加水平的增加先下降后上升。其中,中氮添加水平土壤碳氮比最小,但并没有显著低于高氮水平,这与许多研究<sup>[20]</sup>发现土壤碳氮比随氮添加水平的增加而下降的结果一致。土壤氮是调控土壤有机碳多少的一个关键限制因子,较高的土壤氮含量通常会加速土壤微生物对土壤有机碳的分解,促进土壤呼吸<sup>[2]</sup>,进而造成土壤有机碳积累相对较慢,从而造成较低的土壤碳氮比。从图7和表3中看出,土壤碳氮比主要受地下生物量有机碳、全氮及碳氮比的影响,而且地下生物量碳氮比是影响土壤碳氮比的主要因素,这与地下生物量是土壤碳氮的主要来源有关<sup>[2]</sup>。地下生物量是土壤中碳氮含量的直接供给者,其枯死以后通过微生物参与的土壤碳氮矿化作用进入土壤中,从而直接决定土壤碳氮的大小。此外,在氮添加条件下,土壤氮的积累速度明显高于土壤有机碳的积累速度,也是造成土壤碳氮比较低的一个原因。本研究发现短期氮添加对中层和下层土壤碳氮比影响不显著,这与其他关于氮添加试验的研究结果一致<sup>[21]</sup>,原因可能是短期氮添加使表层土壤具有较高的碳氮含量,由于时间较短,淋溶作用不明显,从而对下层土壤碳氮没有造成显著的影响。本试验中凋落物生物量及其碳氮含量对土壤碳氮比和土壤碳氮储量比无显著影响。可能原因是与其他物种(如杉木、樟木、白羊草等)相比,油松是典型硬针叶树种,短期氮添加内,其松针具有难分解特性,凋落物碳氮输入到土壤中较少<sup>[22]</sup>,从而对土壤碳氮比影响不显著。

## 4 结论

(1)短期氮添加下,土层变化显著影响土壤有机碳、全氮和碳氮储量,上层土壤有机碳显著高于下层土壤,但氮添加水平对土壤有机碳、土壤碳储量影响

不显著。

(2) 氮添加和土层对土壤碳氮比有显著影响, 主要受地下生物量有机碳、全氮含量和地下生物量碳氮比的影响, 土壤有机碳、全氮和碳氮储量受地下生物量碳氮比的影响显著, 而氮添加对土壤碳氮储量比无显著影响且凋落物生物量及其碳氮含量对土壤碳氮比和土壤碳氮储量无显著影响。

(3) 地下生物量碳氮比对土壤有机碳、全氮、土壤碳氮储量、土壤碳氮比和土壤碳氮储量比都有显著影响, 是影响土壤碳氮的重要因素。由于试验周期相对较短, 这种趋势与前人研究有差异, 已有研究表明在氮添加时间足够长时 (>10 年) 才能表现出规律性和显著差异。氮沉降是一个长期的过程, 其对森林土壤碳氮的影响还需在多时间点、多地点及多个森林生态系统中进行长期监测研究。

参考文献:

- [1] Zhang R, Zhang Y, Song L, et al. Biochar enhances nut quality of *Torreya grandis*, and soil fertility under simulated nitrogen deposition[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 321-329.
- [2] Deng L, Peng C H, Zhu G Y, et al. Positive responses of belowground C dynamics to nitrogen enrichment in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 616/617: 1035-1044.
- [3] 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.
- [4] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Bothriochloa ischaemum* to nitrogen addition on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2017, 36(3): 714-722.
- [5] Xu X K, Lin H, Luo X B, et al. Effects of nitrogen addition on dissolved  $N_2O$  and  $CO_2$ , dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest [J]. *Geoderma*, 2009, 151 (3): 370-377.
- [6] 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.
- [7] Fang C, Ye J S, Gong Y, et al. Seasonal responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a semi-arid alfalfa-pasture of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590-591: 729.
- [8] 邓娟, 上官周平. 子午岭林区人工与天然油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 养分库和碳库特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3231-3240.
- [9] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [10] Rytter R M. Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stocks [J]. *Catena*, 2012, 95(3): 153-159.
- [11] Margit V L, Ingrid K. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition: What do we know[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 46(1): 1-15.
- [12] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [13] Wang G, Zhang W, Sun W, et al. Modeling soil organic carbon dynamics and their driving factors in the main global cereal cropping systems[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(19): 11849-11859.
- [14] 李嵘, 常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(10): 1012-1020.
- [15] Song C, Liu D, Yang G, et al. Effect of nitrogen addition on decomposition of *Calamagrostis angustifolia*, litters from freshwater marshes of Northeast China [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1578-1582.
- [16] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西南屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 125-136.
- [17] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展 [J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187-1195.
- [18] Chen D, Lan Z, Hu S, et al. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 99-108.
- [19] Lu M, Zhou X, Luo Y, et al. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1): 234-244.
- [20] Callesen I, Raulund-Rasmussen K, Westman C J, et al. Nitrogen pools and C : N ratios in well-drained Nordic forest soils related to climate change and soil texture [J]. *Boreal Environment Research*, 2007, 12: 681-692.
- [21] Manning P, Saunders M, Bardgett R D, et al. Direct and indirect effects of nitrogen deposition on litter decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 688-698.
- [22] Zhang L, Song C, Wang D, et al. Effects of exogenous nitrogen on freshwater marsh plant growth and  $N_2O$  fluxes in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(5): 1080-1090.