

# 氮沉降对长白山森林土壤团聚体内 碳、氮含量的影响

周学雅<sup>1</sup> 陈志杰<sup>2,3,4</sup> 耿世聪<sup>4</sup> 张军辉<sup>4</sup> 韩士杰<sup>3\*</sup>

(<sup>1</sup>河南大学环境与规划学院, 教育部黄河中下游数字地理重点实验室, 河南开封 475001; <sup>2</sup>厦门大学嘉庚学院, 福建漳州 363105; <sup>3</sup>河南大学生命科学学院, 河南开封 475001; <sup>4</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要** 氮沉降是影响陆地生态系统碳、氮循环的最重要因素之一。为了解土壤团聚体碳、氮组分对氮沉降的响应,本研究在长白山选取次生杨桦林(YHL)与原始阔叶红松林(HSL)两种林型进行为期6年的氮添加试验,采集土壤样品并分析氮沉降对不同粒径土壤团聚体中可溶性有机碳、氮(DOC和DON)、微生物生物量碳、氮(MBC和MBN)、颗粒有机碳、氮(POC和PON)的影响。结果表明:除POC和PON外,两林分土壤团聚体碳、氮组分含量均随团聚体粒径的减小而增加;氮添加处理显著降低了HSL土壤团聚体中POC和PON含量,降幅分别达20.7%和22.6%,显著增加了DOC含量,增幅达11.6%;氮添加处理对YHL土壤团聚体的碳、氮组分均无显著影响,其中,对DOC和MBC的影响接近于显著( $0.05 < P < 0.1$ )。皮尔森相关分析结果表明,土壤团聚体中总碳或总氮与碳、氮活性组分之间有良好的相关性,其中,HSL土壤的POC与DOC之间呈极显著负相关( $r = -0.503$ ),DOC又与MBC呈显著正相关关系( $r = 0.462$ )。氮添加处理降低阔叶红松林土壤团聚体中POC和PON含量、增加DOC含量的主要原因是其促进了微生物对POM的分解,进而导致DOC的释放。阔叶红松林土壤碳、氮库对氮沉降的响应比次生杨桦林更加敏感。

**关键词** 氮沉降; 土壤团聚体; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮; 微生物生物量碳; 微生物生物量氮; 颗粒有机碳; 颗粒有机氮

**Effects of nitrogen deposition on carbon and nitrogen contents in soil aggregates in temperate forests of Changbai Mountain, Northeast China.** ZHOU Xue-ya<sup>1</sup>, CHEN Zhi-jie<sup>2,3,4</sup>, GENG Shi-cong<sup>4</sup>, ZHANG Jun-hui<sup>4</sup>, HAN Shi-jie<sup>3\*</sup> (<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China; <sup>2</sup>Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, Fujian, China; <sup>3</sup>College of Life Science, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China; <sup>4</sup>Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China).

**Abstract:** Nitrogen deposition is one of the most important factors affecting carbon (C) and nitrogen (N) cycling in terrestrial ecosystem. A six-year N addition experiment was carried out to explore how N deposition affected C and N fractions in soil aggregates in the secondary aspen forest (YHL) and primary Korean pine broad-leaved forest (HSL). We investigated the effects of N addition on dissolved organic carbon and nitrogen (DOC and DON), microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN), particulate organic carbon and nitrogen (POC and PON) in soil aggregates with different particle sizes. The results showed that the contents of carbon and nitrogen frac-

本文由福建省教育厅科技项目(JAT170832)、国家自然科学基金项目(41330530, 41430639, 41575153, 41807330, 31800413)和中原学者项目(182101510005)资助 This work was supported by the Science-technology Project of Education Department of Fujian Province, China (JAT170832), the National Natural Science Foundation of China (41330530, 41430639, 41575153, 41807330, 31800413) and the Zhongyuan Scholarship Program, China (182101510005).

2019-01-21 Received, 2019-03-21 Accepted.

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: hansj@iae.ac.cn

tions generally increased with the decrease of particle sizes of soil aggregates except for POC and PON. In soil aggregates of HSL, POC and PON significantly decreased by 20.7% and 22.6% in N treatment, respectively, but DOC increased by 11.6%. In YHL, N addition treatment had no significant effect on C and N fractions in soil aggregates. Total carbon or nitrogen correlated well with the active C and N fractions in soil aggregates, with a great significant negative correlation between POC and DOC in HSL ( $r = -0.503$ ) and a significant positive correlation between DOC and MBC ( $r = 0.462$ ). In HSL, the negative effect of N treatment on POC and PON and the positive effect on DOC was mainly attributed to the accelerated decomposition of POM by stimulating microbial activity. Soil C and N pools in HSL were more vulnerable to N deposition than that in YHL.

**Key words:** nitrogen deposition; soil aggregates; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; microbial organic carbon; microbial organic nitrogen; particulate organic carbon; particulate organic nitrogen.

工业化以来,人类活动加剧了化石燃料和含氮化肥的使用,进而增加了陆地生态系统的活性氮输入<sup>[1]</sup>,影响了陆地生态系统的碳、氮循环过程(地上过程和地下过程).1980—2010年,中国的氮湿沉降水平增加了近25%,此后以 $0.41 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加<sup>[2]</sup>.升高的氮沉降使森林生态系统的植物生产力和生物量积累增加<sup>[1]</sup>,促进了其碳汇(C sink)功能.土壤碳、氮库作为森林生态系统的重要组成部分,其库容量远高于植被和大气碳、氮库,因此其微小的变动都将导致大气碳、氮库的巨大变化,从而加剧或者缓解氮沉降等.尽管关于氮沉降对土壤物理和生化过程的影响进行了广泛研究,但人们对其认识仍然很少,尤其是氮沉降对土壤碳、氮汇影响的研究,这对理解土壤在气候变化上的作用至关重要.氮沉降通过改变生态系统净初级生产力(NPP)、植物组成、微生物活动等许多方式对土壤有机质稳定性产生影响<sup>[3]</sup>.Wilson等<sup>[4]</sup>研究发现,氮添加增加了土壤C、N储量,而Lu等<sup>[5]</sup>和Wang等<sup>[6]</sup>的研究表明,氮沉降对土壤C、N储量无影响.由于土壤介质的高度复杂性以及不同土壤有机质组分有不同分解能力<sup>[7]</sup>,土壤C、N储量对氮添加的响应机理仍不确定.

土壤是C、N元素的源和汇,对陆地生态系统各元素化学循环过程具有重要作用<sup>[8]</sup>.土壤碳、氮是全球碳、氮循环过程的重要环节,其分解、转化和积累过程将在很大程度上影响植物的生长和全球碳、氮平衡<sup>[9]</sup>.土壤有机质作为土壤中碳、氮元素的主要载体,是土壤养分转化的核心,其含量的高低决定着供给植物生长的碳、氮量的多少,影响着土壤的肥力状况,进而影响作物的产量和质量<sup>[8]</sup>.土壤有机质在生态系统中周转速率的快慢和化学特性,常被划分为活性和惰性有机质组分,而这些组分对环境因子的

响应存在差异<sup>[10]</sup>.土壤活性有机质主要包括游离度较高的有机质,如植物残体、微生物量和可溶性碳水化合物、蛋白质等,其虽在土壤中的含量较低,但被植物利用的有效性高,周转快,易被土壤微生物分解矿化;相反地,惰性有机质含量相对较高,周转速度慢,在土壤碳、氮长期固存中起到重要作用<sup>[11]</sup>.研究表明,土壤活性有机碳比土壤总有机碳更容易受到外界因素的影响,其变化情况将会指示土壤有机质总量的变化情况,从而影响植物营养与碳、氮循环过程<sup>[8]</sup>.因此在当今氮沉降增加的背景下,研究土壤活性和惰性有机质对氮沉降的响应情况及其内在机理将会比全量分析更能反映土壤碳、氮库的动态变化情况,是深入研究全球变化对生态系统影响的重要基础.

团聚体储存着超过90%的土壤碳、氮,调节着土壤中许多物理、化学和生物过程,特别是能够调节土壤中养分可利用性和土壤碳、氮动态,是当前研究土壤碳、氮固存的重要方面<sup>[12]</sup>.土壤团聚体对土壤碳、氮的固存机制主要包括减少了有机质(SOM)和胞外酶的接触、限制了氧气扩散、限制微生物与底物的接触<sup>[12-13]</sup>.这些重要的性质使得土壤团聚体在土壤碳、氮研究中显得尤为重要,是评价土壤碳、氮稳定性的重要指标.因此,近年来许多研究关注土壤团聚体分布及其包裹的总有机碳含量对环境因子变化的响应趋势,对于活性碳、氮组分的研究相对较少,然而这部分有机质的研究可揭示团聚体固存碳、氮能力变化.如李秋嘉等<sup>[14]</sup>研究发现,不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机质含量具有显著差异;马建辉等<sup>[15]</sup>研究发现,适当灌水处理促进了土壤团聚体稳性及土壤养分的改善.这些研究均集中在土地利用变化、管理方式等对土壤团聚体碳、氮组分的影响,而对于当前氮沉降增加的影响效应仍相

对较少。然而,全球范围内的氮沉降增加对土壤碳、氮的影响效应将会影响全球变化过程。如姚旭等<sup>[16]</sup>研究发现,随着氮沉降量的增加,土壤团聚体中活性有机质含量呈现先升高后降低的变化规律,而且相比于全土其变化幅度更大,说明团聚体活性有机质对氮沉降的响应更为敏感。研究森林生态系统氮沉降对土壤团聚体中有机碳、氮组分的影响,对了解土壤碳、氮稳定性具有重要意义。

本试验选取长白山阔叶红松林和次生杨桦林土壤为研究对象,该两种林分类型是东北森林的典型地带性植被,阔叶红松林为该地区的顶极群落,杨桦林是该地区的先锋群落类型,选择该两种林分作为研究对象具有很好的代表性和可比性。在6年的氮添加处理试验后,采集样品测定土壤团聚体中总碳(TC)、总氮(TN),以及活性有机碳、氮组分的变化情况,以期揭示氮沉降增加对温带森林土壤碳、氮稳定性的影响,并为科学预测土壤碳、氮库动态变化及其对全球变化的响应提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况和试验设计

研究区位于吉林省长白山自然保护区内,地理坐标为 $42^{\circ}21' - 42^{\circ}82' \text{ N}$ 、 $127^{\circ}59' - 128^{\circ}82' \text{ E}$ ,海拔720~1100 m,属于受季风影响的温带大陆性山地气候,冬季漫长寒冷,夏季温暖多雨,年平均温度 $-7 \sim 3^{\circ} \text{ C}$ ,严冬时最低气温可达 $-40^{\circ} \text{ C}$ ,该区降水丰富,年降水量700~1400 mm,土壤为山地暗棕色森林土。

为综合研究氮添加对土壤团聚体中碳、氮组分的影响,选取两种具有代表性的林分类型,原始阔叶红松林(HSL)和次生杨桦林(YHL)。原始阔叶红松林位于二道河镇附近( $42^{\circ}24' \text{ N}$ 、 $128^{\circ}24' \text{ E}$ ,海拔738 m),年均降水和年均温分别为695 mm和 $3.6^{\circ} \text{ C}$ 。主要乔木树种有红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等,平均林龄达到200年以上。天然次生杨桦林位于露水河镇红松种子园附近( $42^{\circ}49'12'' \text{ N}$ 、 $128^{\circ}49'12'' \text{ E}$ ,海拔922.5 m),林龄30年,乔木树种以白桦(*Betula platyphylloides*)和山杨(*Populus davidiana*)为主,年均降水量和气温分别为871.6 mm和 $2.7^{\circ} \text{ C}$ 。两样地土壤均为典型的暗棕色森林土,土壤表层有机质含量高。

为实施模拟氮沉降试验,采用随机区组设计,在两种林型样地内各随机选取3个试验区组,每个区组内分两个试验小区,每个试验小区间隔在10 m以

上,区组间间隔20 m以上,以避免相互间处理的影响。原始阔叶红松林中选取的小区面积为 $25 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,次生杨桦林每个小区面积为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,分别于2009和2007年在两林分中共12块试验小区内实施试验处理(对照, $0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,氮添加, $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。试验时将所需用量氮素(以 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 为氮素源)溶于40 L蒸馏水中,利用喷雾器均匀喷洒到氮添加试验小区各部位,各区组内对照处理小区喷洒等量的蒸馏水以去除水分增加对土壤的影响。根据试验区降雨年内分布情况,氮添加处理于每年5—10月分6次喷施以达到模拟 $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的氮沉降量。

### 1.2 样品采集和团聚体分离

两样地土壤样品采集时的试验处理均已达6年。在各试验小区中利用铁锹随机采集4份表层(0~10 cm)原状土样,采集间隔5 m以上,并将其混合成一份样品以代表该试验小区的土壤团聚体样品。随后,将采集的样品带回实验室,置于牛皮纸上,挑出可见的小石子、植物残体、大型土壤动物和细根等,并将土壤全部通过8 mm土壤筛,然后置于室内风干至含水量在15%~20%。土壤团聚体分离采用湿筛法<sup>[12]</sup>,将100 g风干土壤样品置于4 mm土壤筛上,下接2、1、0.25、0.053 mm套筛,置于盛有蒸馏水的分析桶中,润湿10 min,振荡10 min,振幅38 cm,每分钟振荡30次(DM200-II,上海德玛)。结束后,将留在各筛网上的团聚体用蒸馏水回洗入烧杯中,于 $60^{\circ} \text{ C}$ 烘箱中烘干后称量,从而得到的团聚体分别为4~8、2~4、1~2、0.25~1和0.053~0.25 mm的5个粒径。

### 1.3 土壤团聚体中碳、氮组分的分离与测定

将各粒径土壤团聚体进行研磨过100目筛,利用元素分析仪(Elementar vario MAX CNS,德国)测定团聚体内总碳(TC)和总氮(TN)含量。团聚体内铵态氮、硝态氮以及微生物生物量碳、氮在测定之前需将团聚体进行培养,调节水分条件为80%田间持水量,于 $20^{\circ} \text{ C}$ 下培养2 h后进行提取测定。其中,铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )含量采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl浸提,提取液采用流动分析仪(SAN++, SKALAR,荷兰)测定。土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)的测定采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$ 提取法,提取液中的总碳和总氮采用TOC-5000A(岛津)测定,然后利用转换系数 $K_c(0.45)$ 计算MBC和MBN,未熏蒸土样提取的有机碳、氮作为可溶性有机碳、氮值。



$MBC(MBN) = (A_1 - A_2) / Kc$

式中: MBC (MBN) 表示土壤微生物生物量碳 (氮) ( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $A_2$ 、 $A_1$  分别表示熏蒸前后提取液中碳、氮含量 ( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $Kc$  为 0.45.

团聚体颗粒组分的分离采用 Cambardella 等<sup>[17]</sup>提出的方法,具体如下:称取各粒径团聚体样 10 g,加入 30 mL  $5 g \cdot L^{-1}$  六偏磷酸钠溶液,在振荡器上低速 (120 rpm) 振荡 15 h,分散.分散溶液置于  $53 \mu m$  筛上,用清水润洗至滤液澄清,利用蒸馏水将筛上保留物回洗入烧杯中,该部分为颗粒有机质 (POM),而通过筛 ( $<53 \mu m$ ) 的土壤样品经过蒸馏水润洗、离心后收集,该部分为矿质组分 (MOM).最后将收集回来的各组分在  $60 \text{ }^{\circ}C$  下烘干称量,计算百分比,并用元素分析仪测定颗粒组分和矿质组分中的碳、氮含量,得到颗粒有机碳 (POC)、颗粒有机氮 (PON)、矿质有机碳 (MOC) 和矿质有机氮 (MON) 含量.

1.4 数据处理

所有的数据处理均在 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件上进行,用 Excel 2010 和 PAST3 软件作图.对所有数据采用广义线性混合模型 (general linear mixed model, GLMM) 进行分析,其中,团聚体粒径 (size) 和氮添加处理 (N) 及其交互作用 ( $N \times size$ ) 作固定因子,区组 (block) 作随机因子.当某固定因子对碳、氮组分具有显著影响,采用 Tukey 显著性检验方法进行检验,显著性水平设为  $\alpha = 0.05$ .用 Pearson 相关分析 (双尾检验) 分析团聚体有机碳、氮组分之间的相关性,显著性水平设为  $\alpha = 0.05$ .

2 结果与分析

2.1 氮添加对两样地土壤团聚体中 TC 和 TN 的影响

由图 1 可知,在 YHL 样地,土壤团聚体的 TC 含量在  $91.93 \sim 181.98 g \cdot kg^{-1}$ ,均值为  $124.03 g \cdot kg^{-1}$ ,低于 HSL 样地 ( $140.09 g \cdot kg^{-1}$ ).在 YHL 样地,TC 含量在粒径间差异较小,但在 HSL 样地中随着粒径的降低而显著增加 (表 1).氮添加处理对两林分土壤团聚体各粒径 TC 含量的影响均不显著,但氮添加处理总体上能稍增加 HSL 样地土壤团聚体内 TC 含量 (N0 和 N50 分别  $130.11$  和  $150.06 g \cdot kg^{-1}$ ).

团聚体 TN 含量的总体趋势与 TC 类似,两种林分土壤团聚体内包裹的 TN 含量较相似,分别为  $9.65 g \cdot kg^{-1}$  (YHL) 和  $9.37 g \cdot kg^{-1}$  (HSL).YHL 不同粒径土壤团聚体中 TN 含量在粒径较小的团聚体中相对

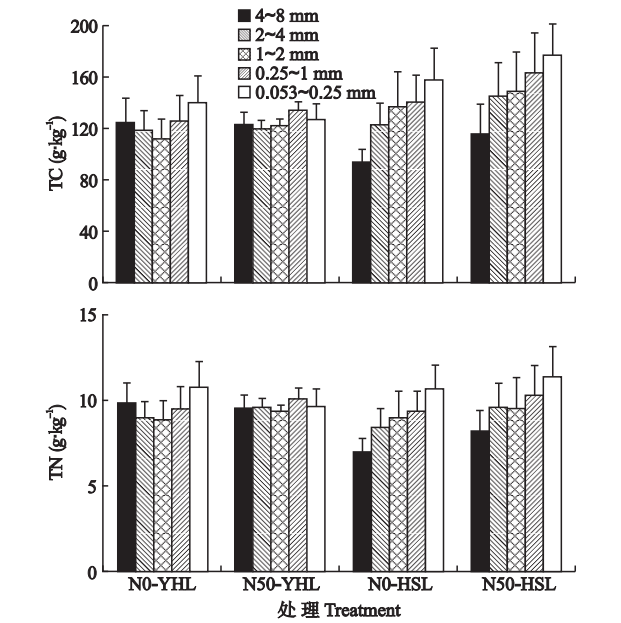


图 1 两种林型中氮添加对不同粒径团聚体中 TC 和 TN 浓度的影响

Fig.1 Effects of N additions on TC and TN concentrations in different soil aggregate classes of two forest types (mean±SE). N0:  $0 kg N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ; N50:  $50 kg N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$  YHL: 次生杨桦林 The secondary aspen forest; HSL: 原始阔叶红松林 The primary Korean pine broad-leaved forest. TC: 全碳 Total carbon; TN: 全氮 Total nitrogen.下同 The same below.

表 1 氮添加 (N) 与团聚体粒径 (size) 对团聚体内碳、氮组分的影响 (F 值)

Table 1 Effect of N addition (N) and aggregate sizes (size) on carbon and nitrogen compositions in aggregates (F value)

参数 Parameter	YHL			HSL		
	size	N	N×size	size	N	N×size
TC	1.769	0.042	0.709	4.899 *	0.781	0.150
TN	0.985	0.012	0.860	4.718 *	3.440	0.261
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3.286	0.579	0.701	2.721	1.659	0.094
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	25.414 *	1.229	2.336	2.070	0.639	0.207
POC	3.729	0.038	0.233	3.299	4.720 *	0.166
MOC	4.831 *	0.263	0.727	2.273	2.088	1.237
PON	13.672 *	0.023	0.568	2.827	7.633 *	0.237
MON	2.044	0.075	1.566	3.061	2.187	2.162
DOC	2.924	3.632	0.248	38.659 *	8.645 *	0.331
DON	3.718	0.034	0.194	3.726	0.085	0.427
MBC	16.613 *	4.336	6.593 *	11.841 *	0.574	1.481
MBN	60.705 *	7.735	2.633	35.757 *	2.365	1.631

\*  $P < 0.05$ . TC: 全碳 Total carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; PON: 颗粒有机氮 Particulate organic nitrogen; MOC: 矿质有机碳 Mineral organic carbon; MON: 矿质有机氮 Mineral organic nitrogen; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; MBC: 微生物生物量碳 Microbial organic carbon; MBN: 微生物生物量氮 Microbial organic nitrogen. YHL: 次生杨桦林 The secondary aspen forest; HSL: 原始阔叶红松林 The primary Korean pine broad-leaved forest.

较高,但无显著差异;HSL 土壤微团聚体中 TN 含量达到 ( $11.02 \pm 1.60$ )  $g \cdot kg^{-1}$ ,显著高于大团聚体 (4~

8 mm) TN 含量 ( $7.62 \pm 0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 增幅为 44.6%. 氮添加处理对两种林分土壤团聚体中 TN 含量并无显著影响, 其中, HSL 土壤团聚体中 TN 含量有略微增加趋势, 氮添加前后分别为 9.85 和  $12.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

2.2 氮添加对两样地土壤团聚体中碳组分的影响

由图 2 可知, HSL 土壤团聚体 POC 含量达 ( $54.50 \pm 9.36$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 显著高于 YHL ( $34.21 \pm 5.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 在 YHL 土壤中, 团聚体粒径对 POC 含量的影响接近于显著 ( $P=0.054$ , 表 1), 其中, 0.25~1 mm 粒径团聚体中的 POC 含量达 ( $44.06 \pm 3.45$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于其他 4 种粒径中的 POC 含量(约  $32.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 而 HSL 中不同粒径土壤团聚体的 POC 含量无显著差异. 在 HSL 土壤中, N50 处理的 POC 含量为 ( $43.20 \pm 9.96$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 低于 N0 处理的 ( $54.50 \pm 9.36$ )  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $P=0.055$ ), 降幅约为 20.7%. 氮添加与团聚体粒径交互作用 ( $\text{size} \times \text{N}$ ) 对 POC 含量的影响在两林分中均无显著差异.

YHL 土壤团聚体中 MOC 含量 ( $90.03 \pm 12.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 高于 HSL ( $77.62 \pm 6.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 两种林分土壤团聚体中的 MOC 含量均在粒径  $>0.25 \text{ mm}$  的团聚体中随着粒径的降低而降低, 而在微团聚体中又有所升高, 特别是在 YHL 土壤中, 微团聚体中 MOC 含量显著高于大团聚体. 与 N0 相比, 两林分土壤团聚体中 MOC 含量在 N50 处理中虽略微升高, 但并未达显著水平.

YHL 中团聚体 MBC 含量为 ( $2369.40 \pm 204.10$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与 HSL 土壤团聚体中 MBC 接近 ( $2366.42 \pm 494.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 两种林分中 MBC 均随着团聚体粒径的降低而升高, 在微团聚体中含量达到最高. 氮添加处理对 MBC 并无显著影响, 但  $\text{size} \times \text{N}$  交互作用在 YHL 中对 MBC 具有显著影响; 主要差异在于 N50 中微团聚体的 MBC ( $3403.48 \pm 138.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 显著高于 N0 处理 ( $2849.60 \pm 114.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

两种林分 DOC 含量并无显著差异. 团聚体粒径对 YHL 样地 DOC 含量的影响不显著, 在 HSL 样地该影响达极显著水平, 其中, YHL 的微团聚体中 DOC 含量为 ( $1210.11 \pm 48.88$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于其余粒径 14.2%~48.6%; 在 HSL 中, 微团聚体中 DOC 含量可达到  $1425.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较其他粒径中的 DOC 含量高 30.0%~89.3%. 氮添加处理降低了 YHL 土壤团聚体中 DOC 含量, 而在 HSL 土壤中相反, N50 处理的团聚体 DOC 含量较 N0 处理高 11.6%. 氮添加与团聚体粒径 ( $\text{N} \times \text{size}$ ) 的交互作用对 DOC 含量无显著影响.

2.3 氮添加对两样地土壤团聚体中氮组分的影响

YHL 土壤团聚体中硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 含量仅有  $22.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 处于较低水平, 显著低于 HSL ( $363.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 图 3). YHL 微团聚体中  $\text{NO}_3^-$  含量 ( $35.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 显著高于大团聚体, 而 4 个粒

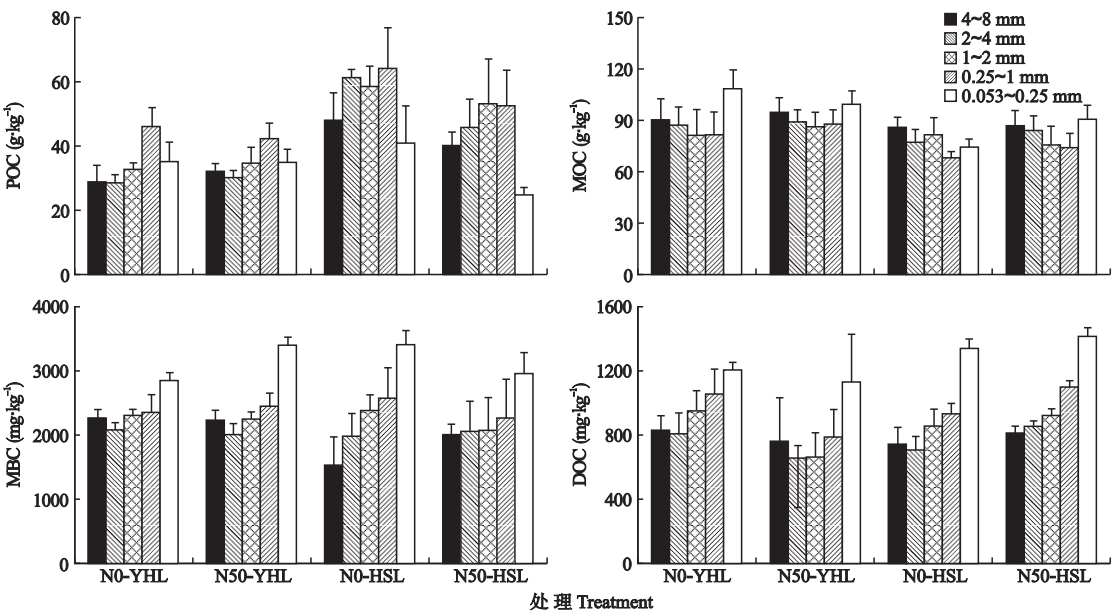


图 2 两种林型中氮添加对不同粒径团聚体中碳组分浓度的影响  
**Fig.2** Effects of N additions on carbon component concentrations in different soil aggregate classes of two forest types (mean±SE).  
POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; MOC: 矿质有机碳 Mineral organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial organic carbon. 下同 The same below.

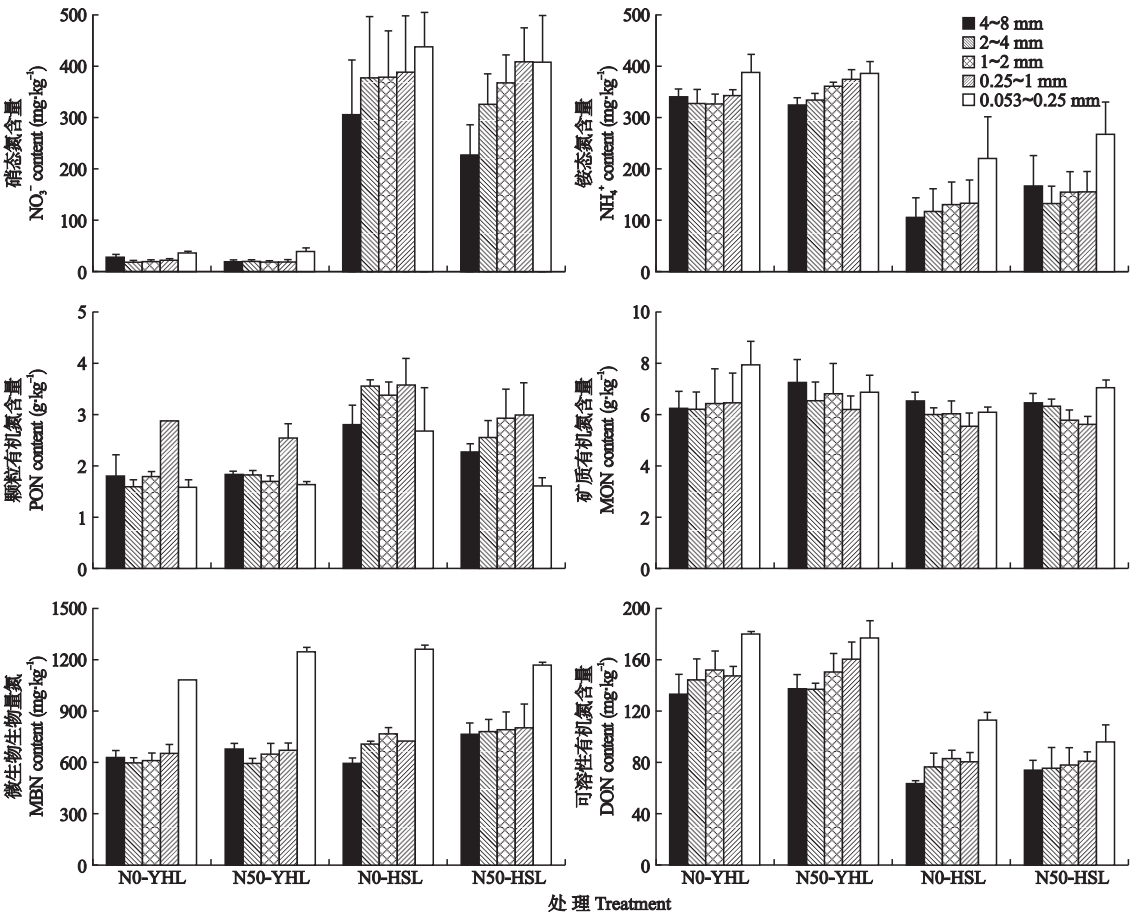


图3 两种林型中氮添加对不同粒径团聚体中氮组分浓度的影响  
**Fig.3** Effects of N additions on nitrogen component concentrations in different soil aggregate classes of two forest types (mean±SE).  
PON: 颗粒有机氮 Particulate organic nitrogen; MON: 矿质有机氮 Mineral organic nitrogen; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; MBN: 微生物生物量氮 Microbial organic nitrogen. 下同 The same below.

径大团聚体之间的  $\text{NO}_3^-$  含量无显著差异, HSL 土壤团聚体粒径对  $\text{NO}_3^-$  含量无影响. 氮添加处理对两样地团聚体  $\text{NO}_3^-$  含量均无显著影响(表1).

团聚体中  $\text{NH}_4^+$  含量在 YHL 土壤中高达  $350.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 显著高于 HSL 的  $158.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 氮添加处理对两林分土壤团聚体中  $\text{NH}_4^+$  含量均无影响,  $\text{NH}_4^+$  含量在团聚体各粒径中分布趋势与  $\text{NO}_3^-$  一致, 但不存在显著差异. 氮添加与团聚体粒径交互作用未发现对  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  有明显影响.

团聚体中 PON 含量对林分类型、氮添加与团聚体粒径的响应情况与 POC 的趋势相似. YHL 土壤中的 PON 含量为  $1.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低于 HSL 土壤( $2.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 两种林分土壤大团聚体中 PON 含量相对高于微团聚体, 特别是 YHL 土壤  $0.25\sim1\text{ mm}$  团聚体的 PON 含量显著高于其余粒径的 PON 含量. 氮添加处理仅显著降低 HSL 土壤团聚体中 PON 含量( $-22.6\%$ ). 两种林分土壤团聚体中 MON 含量分别

为  $4.73\sim9.71$  和  $4.58\sim7.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其在样地间、氮添加和团聚体粒径间均无显著差异.

两林分团聚体 MBN 接近, 在  $500\sim1300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均与团聚体粒径呈负相关, 即随粒径降低而增加. 对于 DON 而言, 其在 YHL 土壤团聚体中含量( $152.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 显著高于 HSL ( $82.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 氮添加处理及其与粒径的交互作用对 DON 和 MBN 均无影响.

2.4 土壤团聚体中碳、氮组分的相关关系

由图4可知, 团聚体中 TC 和 TN 与碳、氮组分之间有显著的相关性(数据未显示,  $n=60$ ), 说明碳、氮组分的变化能够代表总量的变化. 在 YHL 土壤团聚体中, 各项指标均呈正相关关系, 其中, TC 与 DOC、MBC 和 MOC 显著相关, 特别是与 MOC 的相关系数( $r$ )达  $0.857$ ; TN 与 MON 呈极显著相关( $r=0.825$ ). 在 HSL 土壤团聚体中, TC 与 POC、MOC 和 MBC 显著相关, TN 与 MBN 显著相关. 此外, 各组分之间的碳、氮相关性均达显著水平(如 POC 与 PON、



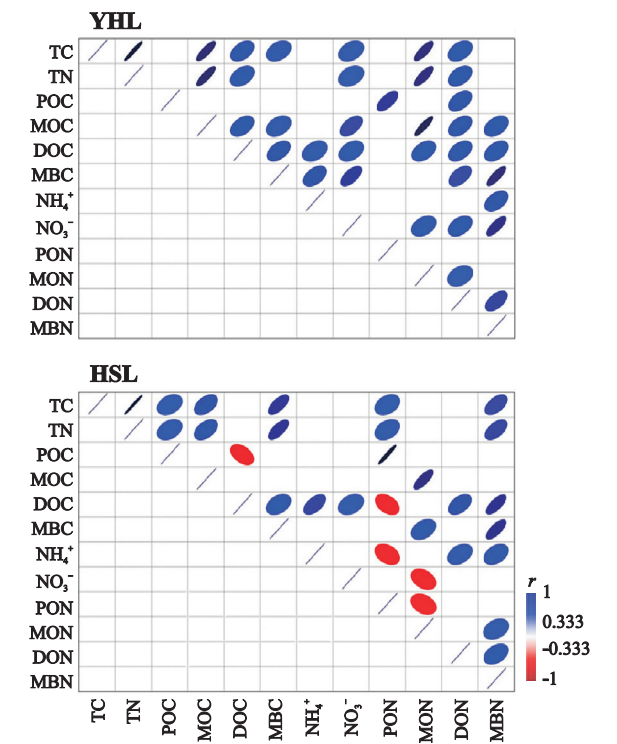


图 4 两种林分 (YHL 和 HSL) 团聚体中碳、氮组分之间的 Pearson 相关分析

**Fig.4** Pearson correlation analysis between carbon and nitrogen fractions in soil aggregates under two forest types ( $n=30$ ).

$r$ : 相关系数 Correlation coefficient.

MBC 与 MBN 等).在 HSL 土壤团聚体中,POC、PON 与 DOC 之间存在显著负相关关系.

### 3 讨 论

#### 3.1 氮沉降对两林分土壤团聚体 TC 和 TN 含量的影响

土壤团聚体对土壤有机碳的保护作用是土壤固存有机碳的一个重要方面<sup>[12-13]</sup>.本研究发现,对照组次生杨桦林土壤团聚体中 TC 含量为  $124.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阔叶红松林为  $130.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而土壤团聚体中 TN 含量在两林分中的含量相当,约为  $9.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,这与孙颖等<sup>[18]</sup>在同一地区的研究结果相似,其测定团聚体 TC 含量在  $105.37\sim 141.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .岳琳艳等<sup>[19]</sup>研究发现,林龄较大的杨桦林土壤中碳、氮含量与阔叶红松林无显著差异.本研究还发现,团聚体粒径越小其 TC 和 TN 含量越高,这主要因为较小的团聚体对有机质的吸附能力比大的团聚体强,且有机碳在微团聚体中比在大团聚体中的周转时间长<sup>[20]</sup>.本研究中两种林型土壤质地均为黏壤土,而黏粒颗粒吸附力较大,且较小粒径的团聚体具有较高的比表面积,会吸附更多的土壤有机

质<sup>[21]</sup>.Mangalassery 等<sup>[20]</sup>对不同质地土壤有机碳浓度的研究发现,黏壤土质地的土壤团聚体的有机碳浓度较高,这恰好验证了本结果的解释.氮沉降下土壤生物化学过程发生变化,改变了土壤团聚体的胶结物质含量,从而导致其中有机质含量的差异<sup>[22]</sup>.本研究氮添加处理对土壤团聚体中 TC 和 TN 含量均无显著影响,主要由于氮添加使得 NPP 增加、地下生物量减少,两者间相互抵消导致团聚体中 TC 和 TN 含量几乎不变<sup>[23]</sup>.氮沉降导致地下生物量降低已经被很多报道所阐述<sup>[24]</sup>,如 Wang 等<sup>[25]</sup>在本样地的研究发现氮添加处理减少了细根的生物量.综上所述,由于氮添加产生的地上与地下生物量的抵消效应导致团聚体中 TC 和 TN 含量未发生显著改变.

#### 3.2 氮沉降对土壤团聚体中碳、氮组分的影响

土壤有机质是土壤肥力的物质基础,其含量水平在一定程度上决定了土壤肥力状况,然而土壤中有有机质背景值较高,变化的趋势在短期内难以监测.短期内土壤碳、氮库的动态主要通过其活性组分表现出来<sup>[14-15]</sup>.本研究发现,除 POC 和 PON (颗粒有机质 POM) 外,其余组分均随团聚体粒径的降低而增加 (图 2,3),而 POM 组分在微团聚体中含量相对较低主要是由于其是大团聚体形成的重要胶结物质,在大团聚体中包裹的 POM 除了细 POM 之外还能包裹粗颗粒有机质,根据有机质在团聚体中的转变过程可知,粗颗粒有机质比细颗粒有机质的质量高<sup>[23,26]</sup>,另外,其余组分则因较细颗粒具有较强的吸附性能而在微团聚体中含量最高.本研究表明,与土壤团聚体中 TC 和 TN 相比,其活性组分对氮添加的响应更加敏感 (表 1).氮沉降作为重要的全球变化变量之一,其对两种林分土壤团聚体中 POC 的影响各不相同,在阔叶红松林中降低了 POC 含量 ( $P=0.055$ ,图 2),而在次生杨桦林中无显著影响.这主要是因为次生杨桦林中氮添加处理促进了微生物对 POM 的分解 (MBC 有所增加,  $P=0.064$ ),同时也增加了凋落物量,两者平衡导致 POM 几乎不变;然而, HSL 土壤 POC 的质量相对 YHL 较差,导致氮添加促进的新鲜有机质分解进入到土壤中的速度不能超过原有在土壤中因激发效应而加快的分解速度<sup>[27]</sup>,从而导致 HSL 土壤团聚体中 POC 含量降低幅度相对较大.Guo 等<sup>[28]</sup>研究发现,氮添加促进凋落物分解,但提高的幅度在阔叶凋落物中更大.Li 等<sup>[29]</sup>研究发现,2000—2010 年,长白山的凋落物量逐年增加,而这段时间该地区的氮沉降量也从  $13.2\text{ kg N}\cdot$

$\text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  增长到  $21.1 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  [1], 这些均能验证本研究结果。另外, 氮添加处理显著增加了阔叶红松林土壤团聚体中 DOC 含量, 主要是由于氮添加促进了凋落物的分解 [33], 尽管本研究并未发现 MBC 发生显著变化, 甚至也有研究表明氮添加会抑制微生物酶的活性, 如 Deforest 等 [30] 研究表明, 氮沉降会降低多酚氧化酶、过氧化氢酶和葡萄糖苷酶的活性, 但团聚体中 DOC 含量与 MBC 具有极显著的相关性 ( $r = 0.413$ ), 说明阔叶红松林土壤团聚体中 DOC 含量的增加主要是由于微生物对 POC 的分解导致其释放出更多的 DOC。相反, 矿质结合有机质 (MOM) 被认为是土壤中的稳定性组分, 氮添加处理对两林分土壤团聚体中 MOM 的影响均不显著。综上, 尽管氮添加对 HSL 的总碳氮无显著影响, 但可通过减少 POC 含量而减少团聚体保护的碳含量。

活性有机氮、无机氮是参与土壤氮循环的活跃组分, 对土壤生态系统氮素循环有着重要作用, 但特别易受气候变化的干扰 [31]。铵态氮和硝态氮是植物直接利用土壤 N 的主要形式, 也是氮在土壤转化过程中的最重要形态。氮沉降是影响土壤氮素转化的关键因素, 能够直接增加土壤 N 素底物的含量。本研究发现, 氮添加均未能影响两林分团聚体中铵态氮和硝态氮的含量 (图 3), 同样地, 马红亮等 [32] 研究发现, 3 个月后的氮添加处理未能影响土壤铵态氮和硝态氮含量。本研究中颗粒有机氮是团聚体中有机氮的主要成分, 阔叶红松林土壤团聚体中 PON 在氮添加之后显著下降 (图 3), 其变化趋势与 POC 接近, 可能是氮添加通过促进微生物活性来加速 PON 分解所致 [33]。相关分析结果表明, PON 与 DON 呈显著负相关, 也进一步证明了氮添加后微生物的作用导致 PON 含量降低。与 DOC 和 MBC 不同, 团聚体中 DON 和 MBN 均对氮添加不敏感, 这可能是多种过程综合作用的结果, 其一是氮添加之后微生物不再受 N 素限制, 增加了 N 素的转化速度 [34], 其二是铵态氮的添加抑制了微生物的硝化与反硝化作用 [35], 从而抑制有机氮的分解过程 [36]。

## 4 结 论

土壤团聚体中总有机碳和总氮含量的背景值相对较高, 对环境变化响应不敏感, 但其活性组分则变化较快, 因此更能及时准确地反映土壤 TC 和 TN 含量的变化趋势。氮添加处理对土壤团聚体中 TC 和 TN 含量的影响并不显著, 但对其组分影响较大且存在林分差异, 其中, 尽管对次生杨桦林土壤团聚体中

碳、氮组分的影响并不明显, 但显著降低了阔叶红松林的 POC 和 PON 含量, 增加了 DOC 含量。相关分析结果表明, 团聚体中 TC 和 TN 与其组分之间存在显著的相关性, 而组分的变化均能有效反映总量的变化, 说明氮沉降背景下, 阔叶红松林土壤碳、氮的变化将比杨桦林更加迅速, 其土壤碳、氮库的变动也先于次生杨桦林。因此, 合理评估氮沉降背景下阔叶红松林土壤碳、氮库的变化趋势, 可为准确预测我国东北地区碳、氮收支提供可靠的科学依据。

## 参考文献

- [1] Liu XJ, Zhang Y, Han WX, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, **494**: 459–462
- [2] Jia YL, Yu GR, He NP, *et al.* Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 1–7
- [3] Waldrop MP, Zak DR, Sinsabaugh RL. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**: 1443–1451
- [4] Wilson GW, Rice CW, Rillig MC, *et al.* Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long term field experiments. *Ecology Letters*, 2009, **12**: 452–461
- [5] Lu FM, Lu XT, Liu W, *et al.* Carbon and nitrogen storage in plant and soil as related to nitrogen and water amendment in a temperate steppe of northern China. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**: 187–196
- [6] Wang RZ, Filley TR, Xu ZW, *et al.* Coupled response of soil carbon and nitrogen pools and enzyme activities to nitrogen and water addition in a semi-arid grassland of Inner Mongolia. *Plant and Soil*, 2014, **381**: 323–336
- [7] Neff JC, Townsend AR, Gleixner G, *et al.* Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, **419**: 915–917
- [8] Belay-Tedla A, Zhou XH, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tall-grass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 110–116
- [9] Zhang G-S (张国盛), Huang G-B (黄高宝). Soil organic carbon sequestration potential in cropland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(2): 351–357 (in Chinese)
- [10] McLauchlan KK, Hobbie SE. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**: 1616–1625
- [11] Rovira P, Vallejo VR. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils. *Soil Biology*



- & *Biochemistry*, 2007, **39**: 202–215
- [12] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 2099–2103
- [13] Jastrow JD, Amonette JE, Bailey VL. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, **80**: 5–23
- [14] Li Q-J (李秋嘉), Xue Z-J (薛志婧), Zhou Z-C (周正朝). Effects of vegetation restoration on nutrient and microbial biomass of soil aggregates with different particle sizes in the loess hilly regions of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2019, **30**(1): 137–145 (in Chinese).
- [15] Ma J-H (马建辉), Ye X-H (叶旭红), Han C-D (韩昌东), et al. Effects of different low limits of irrigation on nutrients, enzyme activity and glomalin-related soil protein in soil aggregates of drip irrigation under plastic film. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2018, **29**(8): 2713–2720 (in Chinese).
- [16] Yao X (姚旭), Jing H (景航), Liang C-T (梁楚涛), et al. Response of labile organic carbon content in surface soil aggregates to short-term nitrogen addition in artificial *Pinus tabulaeformis* forests. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2017, **37**(20): 6724–6731 (in Chinese)
- [17] Cambardella CA, Elliott ET. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 777–783
- [18] Sun Y (孙颖), Xu J-H (徐嘉晖), Gao F (高菲), et al. Organic carbon content and its distribution in aggregate-density fractions of forest soils in Changbai Mountain. *Forest Engineering (森林工程)*, 2018, **34**(2): 1–5 (in Chinese)
- [19] Yue L-Y (岳琳艳), Zheng J-Q (郑俊强), Han S-J (韩士杰), et al. Soil chemical properties and microbial community structure at different succession stages of temperate forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2015, **34**(9): 2590–2597 (in Chinese)
- [20] Mangalassery S, Sjogersten S, Sparkes DL, et al. The effect of soil aggregate size on pore structure and its consequence on emission of greenhouse gases. *Soil and Tillage Research*, 2013, **132**: 39–46
- [21] von Lutzow M, Kogel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **39**: 2183–2207
- [22] Khalili B, Ogunseitan OA, Goulden ML, et al. Interactive effects of precipitation manipulation and nitrogen addition on soil properties in California grassland and shrubland. *Applied Soil Ecology*, 2016, **107**: 144–153
- [23] Chen ZJ, Geng SC, Zhang JH, et al. Addition of nitrogen enhances stability of soil organic matter in a temperate forest. *European Journal of Soil Science*, 2017, **68**: 189–199
- [24] Li WB, Jin CJ, Guan DX, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, **82**: 112–118
- [25] Wang CG, Geng ZZ, Chen Z, et al. Six-year nitrogen-water interaction shifts the frequency distribution and size inequality of the first-order roots of *Fraxinus mandshurica* in a mixed mature *Pinus koraiensis* forest. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 1691, doi: org/10.3389/fpls.2017.01691
- [26] Gunina A, Kuzyakov Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from  $^{13}\text{C}$  natural abundance. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, **71**: 95–104
- [27] Madritch MD, Hunter MD. Intraspecific litter diversity and nitrogen deposition affect nutrient dynamics and soil respiration. *Oecologia*, 2003, **136**: 124–128
- [28] Guo RH, Zheng JQ, Han SJ, et al. Carbon and nitrogen turnover in response to warming and nitrogen addition during early stages of forest litter decomposition: An incubation experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**: 312–324
- [29] Li XF, Hu YL, Han SJ, et al. Litterfall and litter chemistry change over time in an old-growth temperate forest, northeastern China. *Annals of Forest Science*, 2010, **67**: 1–8
- [30] DeForest JL, Zak DR, Pregitzer KS, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**: 965–971
- [31] Luce MS, Whalen JK, Ziadi N, et al. Labile organic nitrogen transformations in clay and sandy-loam soils amended with  $^{15}\text{N}$ -labelled faba bean and wheat residues. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, **68**: 208–218
- [32] Ma H-L (马红亮), Yan C-W (闫聪微), Gao R (高人), et al. Effects of litter removal and nitrogen addition on nitrogen dynamics in Chinese fir and broad-leaved forest soil. *Research of Environmental Sciences (环境科学研究)*, 2013, **26**(12): 1316–1324 (in Chinese)
- [33] Gundersen P, Emmett BA, Kjonaas OJ, et al. Impacts of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**: 37–55
- [34] Lin W (林伟), Ma H-L (马红亮), Pei G-T (裴广廷), et al. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen pools in mid-subtropical forest. *Research of Environmental Sciences (环境科学研究)*, 2016, **29**(1): 67–76 (in Chinese)

[35] Huang L (黄 丽), Zhang X-Y (张心昱), Sun X-M (孙晓敏), *et al.* Effects of different types of nitrogen addition on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in soil aggregates under broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2015, **46**(2): 464–470 (in Chinese)

[36] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest sys-

tems. *Environmental Reviews*, 1997, **5**: 1–25

**作者简介** 周学雅,女,1988 年生,博士.主要从事全球变化下土壤碳、氮和水文循环研究. E-mail: zhouxueya123@sina.com

**责任编辑** 杨 弘