

氮添加和凋落物增减对华西雨屏区常绿阔叶林 土壤团聚体及其碳氮的影响

吕思扬^{1,2}, 宋思意^{1,3}, 黎蕴洁¹, 仲琦¹, 马炜¹, 涂利华¹

(1.四川农业大学林学院,长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室,

长江上游林业生态工程四川省重点实验室,成都 611130;

2.四川省眉山市东坡区岷江现代农业示范园区管理委员会,四川 眉山 620039;3.中共青神县委组织部,四川 眉山 620400)

摘要: 大气氮沉降可通过改变土壤氮素可利用性(直接影响)和改变凋落物输入量(间接影响)对森林土壤碳氮动态产生影响。土壤团聚体是森林表层土壤最具代表性的基本结构单元,对于稳定贮存有机碳氮具有重要意义。通过氮添加和凋落物增减试验设计,探索氮添加和凋落物增减对土壤团聚体及其碳氮组分的影响。结果表明:(1)凋落物增加(+L)和减少(-L)都使A层土壤(0-10 cm)以及各粒径团聚体的TOC(有机碳)、TN(全氮)含量显著提高,使pH显著降低。氮添加使B层土壤(10-30 cm)pH显著降低,表现为高氮(HN)<低氮(LN)<对照(CK),其中HN还使A层土壤pH显著降低,使B层土壤以及各粒径团聚体的TOC含量显著提高。氮添加和凋落物增减并未显著影响土壤团聚体的稳定性。(2)A、B层土壤均以水稳性大团聚体(>0.25 mm)为优势粒径,粉黏粒组分(<0.053 mm)占比最低。TOC和TN的分布规律在A、B层土壤中相同,>2 mm团聚体的TOC和TN含量最高,0.25~2 mm团聚体的TOC和TN含量最低,A层高于B层,TOC和TN含量随着土壤团聚体粒径的减小呈“V”形分布。(3)土壤团聚体的稳定性与TOC、TN、AN、AP含量呈显著正相关,与pH显著负相关。研究结果可为森林可持续经营提供参考。

关键词: 氮添加;凋落物输入;土壤团聚体;有机碳;全氮

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0277-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.036

Effects of Nitrogen Addition and Litter Increase or Decrease on Soil Aggregates and Their C and N in Evergreen Broad-leaved Forest in Rain Screen Area of West China

LÜ Siyang^{1,2}, SONG Siyi^{1,3}, LI Yunjie¹, ZHONG Qi¹, MA Wei¹, TU Lihua¹

(1.National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and

Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River & Sichuan Province Key Laboratory of Ecological

Forestry Engineering on the Upper Reaches of the Yangtze River, College of Forestry, Sichuan Agricultural University,

Chengdu 611130; 2.Management Committee of Minjiang Modern Agriculture Demonstration Park, Dongpo District,

Meishan, Sichuan 620039; 3.Organization Department of Qingshen County Committee of CPC, Meishan, Sichuan 620400)

Abstract: Atmospheric nitrogen deposition can affect soil carbon and nitrogen dynamics by changing soil nitrogen availability (direct effect) and litter input (indirect effect). Soil aggregate is the most representative basic structural unit of forest topsoil, which is of great significance for the stable storage of organic carbon and nitrogen. The results showed that: (1) The contents of TOC (total organic carbon) and TN (total nitrogen) in layer A soil and aggregates with different particle sizes were significantly increased, and soil pH was significantly decreased by increasing (+L) and decreasing (-L) litter. Nitrogen addition significantly reduced the soil pH in layer B, which showed high nitrogen (HN) < low nitrogen (LN) < control (CK), and HN also significantly reduced the soil pH in layer A, and significantly increased the TOC content in layer B and aggregates. The addition of nitrogen and litter increase or decrease did not significantly affect the stability of soil aggregates. (2) Water stable macro aggregates (> 0.25 mm) was the dominant particle size in soil A

收稿日期:2021-07-19

资助项目:国家自然科学基金项目(32071591)

第一作者:吕思扬(1997-),男,硕士研究生,主要从事森林土壤生态研究。E-mail:414918837@qq.com

通信作者:涂利华(1983-),男,教授,博士生导师,主要从事森林土壤生态研究。E-mail:tulhsicau@163.com

and B, and the proportion of silt and clay (< 0.053 mm) was the lowest. The distribution of TOC and TN was the same in layer A and B, the contents of TOC and TN in > 2 mm aggregates were the highest, while those in $0.25 \sim 2$ mm aggregates were the lowest. The contents of TOC and TN in layer A were higher than those in layer B, the contents of TOC and TN showed a V-shaped distribution with the decrease of soil aggregate size. (3) The stability of soil aggregates was positively correlated with the contents of TOC, TN, AN and AP, and negatively correlated with pH. The research results can provide reference for sustainable forest management.

Keywords: nitrogen addition; litter input; soil aggregates; organic carbon; total nitrogen

大气 N 沉降是指大气中的活性 N 通过湿沉降和干沉降的方式返回陆地或海洋生态系统的过程,是生物地球化学循环过程的重要环节^[1]。从工业革命开始,人类大量燃烧化石燃料、施用化学氮肥等排放含氮化合物的行为,使全球范围内的氮沉降显著增加。中国是全球三大氮沉降区之一,年氮沉降量远高于全球平均水平。据估计^[2],中国 2011—2015 年的平均氮沉降量为 (19.6 ± 2.5) Tg N/a,从 1980 年到 2010 年 30 年间增幅达 60%,并仍将保持较高水平。华西雨屏区由于地处四川盆地西部边缘,属于大气降水和氮沉降的集中区,2008—2010 年年均 N 湿沉降量已经达到 9.5 g/m^2 ,处于中国最高水平^[3],并有逐年上升的趋势,由于大气 N 沉降具有很强的空间变异性,目前 N 沉降最为严重的地区往往也是未来 N 沉降增加最多的地区^[1]。因此,在高背景 N 沉降区进行模拟 N 沉降研究具有重要的现实意义。

碳、氮作为森林土壤中的重要元素,在土壤过程和特征中起着核心作用。森林土壤碳氮循环密不可分,受到氮沉降直接和间接 2 个方面的影响。首先,直接影响方面,已有研究^[4]表明,沉降进入土壤的氮素往往可通过抑制凋落物分解促进土壤有机碳氮的积累。但过量氮沉降会使森林土壤 N 超过临界值甚至达到饱和,外源 N 的输入会加速土壤中 N 素的硝化作用,从而导致硝酸盐的淋失, N 损失的过程会加速钙镁等盐基离子的流失,造成土壤酸化,最终通过多种途径抑制树木和林下植物的生长^[5],导致土壤有机碳氮输入和积累量减少。其次,间接影响方面,外源 N 的输入可改变森林植被生长和凋落物输入量,而凋落物输入是土壤有机质的主要来源,新鲜有机质的增加或减少对土壤原有 C 的分解转化过程具有强烈影响^[6]。且凋落物与植物根系、根系分泌物以及共生菌根真菌的菌丝等有机质是形成土壤团聚体的重要胶结物质。凋落物输入的改变势必影响土壤 C 循环、土壤养分状况,对土壤有机碳的稳定性具有潜在影响。因此,长期接受氮沉降的森林,其土壤碳氮状态受到氮沉降的直接(N 素添加的影响)和间接(长期 N 沉降导致土壤的 C 输入如凋落物量改变造成的间接影响)2 种影响。

土壤团聚体是矿物颗粒与有机无机物结合形成的土壤结构基本单元,它在土壤物质传输与保持中起着重要的作用,对土壤肥力有着显著的影响,同时在侵蚀过程中也扮演着关键的角色。土壤有机碳和全氮是影响土壤团聚形成和稳定性最重要的因素,同时,土壤团聚体又是土壤碳氮的主要储存场所,表土中近 90% 的土壤碳氮都包含在团聚体中^[7]。土壤作为氮沉降的最大承受者,氮沉降将直接或间接地影响土壤物理、生物和化学性质。氮添加背景下土壤团聚体的增加可以抑制微生物介导的土壤有机质分解^[8],这从一个方面也解释了已有研究^[9]中观察到的土壤呼吸抑制现象。但是,氮添加对土壤团聚体的影响程度可能因生态系统类型、N 添加量、N 添加方式等而异。同时,由 N 添加或 N 沉降带来的凋落物增减作用的叠加可能会带来进一步的不确定性。

因此,为了回答 N 添加和凋落物量改变促进土壤有机 C 增加的现象中,土壤重要的结构基本单元—团聚体及其内部的碳氮分配是否发挥了重要作用,以华西雨屏区雅安碧峰峡千家山典型中亚热带湿性常绿阔叶为对象,通过持续多年(N 处理 6 年,凋落物处理 4 年)的双因素试验进行研究,以期探索 N 添加和潜在的凋落物输入量变化是否会显著影响富 N 森林土壤团聚体及其碳氮组分,为进一步揭示长期 N 沉降对森林土壤 C、N 贮存和稳定性的影响提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省雅安市雨城区碧峰峡自然保护区千家山林班($30^{\circ}04'00''\text{N}$, $103^{\circ}00'00''\text{E}$),海拔 1 168 m,土壤类型为山地黄壤,土壤厚度大于 60 cm,属亚热带湿润季风型山地气候, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 $5\,231^{\circ}\text{C}$,年均气温 16.2°C ,年日照时间 1 040 h,全年太阳辐射总量为 $3\,640 \text{ MJ/cm}^2$,无霜期 304 天,年均降水量 1 772 mm,年蒸发量为 1 011 mm。植被类型为亚热带湿性常绿阔叶次生林,研究区内林地条件基本一致。主要树种有木荷(*Schima superba*)、红淡比(*Cleyera japonica*)、木姜子(*Litsea cubeba*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、四川山矾(*Symplocos*

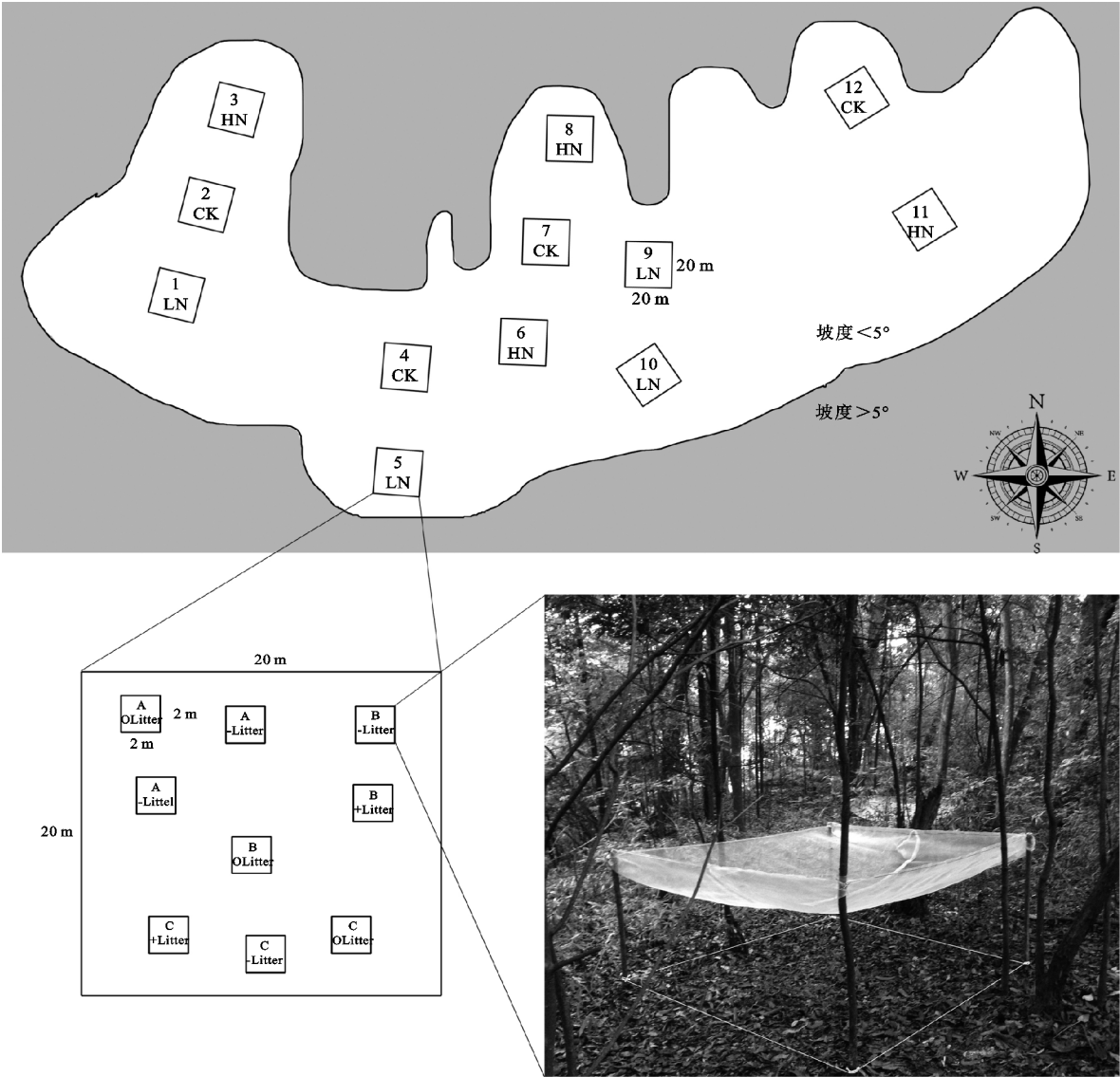
setchuensis)、栲(*Castanopsis fargesii*)、细枝桫(*Eurya loquaiana*)、白栎(*Quercus fabri*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、冬青(*Ilex chinensis*)等。乔木层平均树高 16.7 m,平均胸径 22.7 cm,郁闭度为 0.8,林下植被稀疏,除灌木幼苗外,多蕨类等常绿草本植物。样地基本土壤理化性质见参考文献[9]。

1.2 试验设计

2013 年 11 月,根据典型性和代表性原则在四川碧峰峡自然保护区千家山林班设置 12 块 20 m×20 m 的样地,所有样地相互距离不超过 1 000 m,样地之间至少有 20 m 的缓冲带。各样地均位于山中段,较平坦,坡度<5°。用 NH₄NO₃ 进行 N 沉降处理,共设 3 个水平:对照(CK,0 g/(m²·a)),低 N(LN,5 g/(m²·a)),高 N(HN,15 g/(m²·a)),各处理 4 个重复。将年施 N 平均分成 12 等份,即 LN 和 HN 处理

每样地每月施用 NH₄NO₃ 的量分别为 476.19,1 428.57 g。从 2014 年 1 月开始,每月下旬或月初对各样地定量施 N,方法是各处理所需的 NH₄NO₃ 溶解于 10 L 水中,用喷雾器在相应水平样方中来回均匀喷洒,CK 只喷洒等量清水。

2015 年 7 月底 8 月初(施氮 1.5 年),在每个样地内设置 9 个 2 m×2 m 的样方,分为 3 个处理,分别为原凋(0 L,不改变凋落物输入量)、增凋(+L,增加 50%凋落物输入量)和减凋(-L,减少 50%凋落物输入量),每个处理 3 个重复样方(图 1)。2015 年 8 月底开始,每月将每个样地中每个网兜内凋落物现场称重后记录,并分别平分为 2 份,一份均匀撒于该尼龙网兜下地表(即减凋处理),另一份均匀撒于同一小组内凋落物增加处理样方内地表(即增凋处理),对照样方不做处理(即原凋)。



注:CK、LN 和 HN 分别为氮处理的对照(CK,0 g N/(m²·a))、低 N(LN,5 g N/(m²·a))和高 N(HN,15 g N/(m²·a));0 Litter、+Litter 和一 Litter 分别为凋落物处理的原凋(不改变凋落物输入量)、增凋(增加 50%凋落物输入量)和减凋(减少 50%凋落物输入量)。

图 1 试验设计

1.3 样品采集与测定方法

2019 年 11 月,在每个样地每个小样方中,选取 1 个采样点,清除地面枯枝落叶后,进行土壤取样。用铁锹挖出土壤剖面,分别在土壤 0—10 cm(腐殖质层厚度基本一致,以下称为 A 层土壤)和 10—30 cm(矿质层,以下称为 B 层土壤)处使用环刀采取原状土样,将每个样地中相同凋落物处理小样方的同一土层样品合并为 1 个样品,装入铝盒中并编号。整个采样、运输过程密封平放,尽量避免挤压,以保持土壤结构。

将采集的土样在室内自然风干,根据土壤的塑性大小(含水率在 22%~25% 的时候),沿着土壤的自然结构轻轻剥成直径约为 10~20 mm 的小土块,同时剔去粗根和小石块。风干后取一部分用于测定土壤有机碳、全氮。剩下的部分继续过 10 mm 筛,用湿筛法进行团聚体分级,获取 >2, 0.25~2, 0.053~0.25, <0.053 mm 共 4 个粒级的团聚体。本文以下部分将这 4 个粒级的团聚体依次称为大团聚体(>2 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)。

土壤化学指标测定参照国家林业行业标准^[10]。土壤 pH 采用电位法测定;有机质含量采用重铬酸钾—硫酸溶液氧化法测定;土壤全氮含量按照采用凯氏定氮法测定;土壤水解氮采用碱解—扩散法测定;有效磷含量采用盐酸—硫酸浸提法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度计法测定。

1.4 数据处理与分析

>0.25 mm 粒径团聚体的质量百分含量($\omega_{r>0.25}$)、土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、粒径分形维数(APD)的计算公式分别为:

$$\omega_{r>0.25} = M_{r>0.25} / M \tag{1}$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \omega_i \tag{2}$$

$$GMD = \exp(\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{X}_i) \tag{3}$$

$$(3-APD) \lg(\bar{X}_i / X_{\max}) = \lg(M_{r<\bar{X}_i} / M) \tag{4}$$

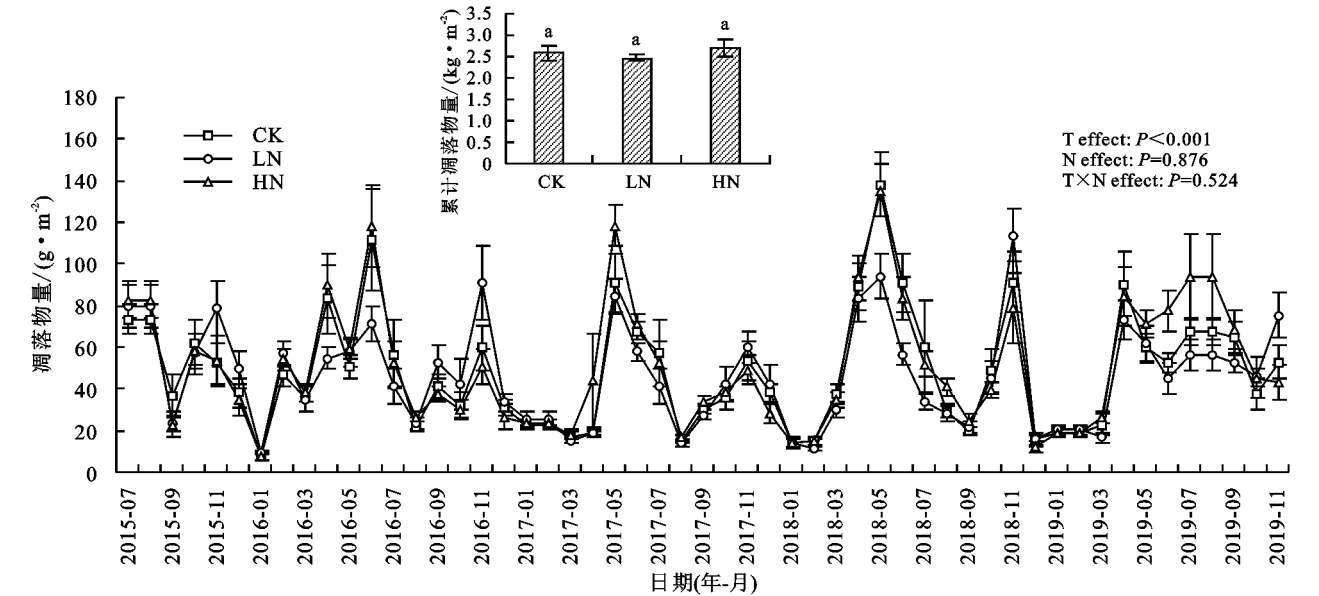
式中: ω_i 为第*i*个粒径团聚体的质量百分含量(%); $\omega_{r>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 的团聚体的质量百分含量(%); $M_{r>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 的团聚体的质量(g);*M*为各土壤样品总质量(g); $\bar{X}_i$ 为第*i*个粒径土壤团聚体的平均直径(mm); $X_{\max}$ 为最大筛子孔径(mm); $M_{r<\bar{X}_i}$ 为粒径小于 $\bar{X}_i$ 的团聚体的质量(g)。

使用 WPS Office 2020 软件对试验数据进行记录、整理和处理,主要完成各种指标的计算;使用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行分析,采用双因素方差法,以氮添加为主效应,凋落物增减为副效应,0.05 为差异显著水平,分析不同处理水平对试验材料各个指标的影响;采用 Person 相关分析探究团聚体稳定性和土壤化学性质之间的关系;使用 Origin 2019 软件制图。

2 结果与分析

2.1 氮添加对凋落物输入量的影响

2015 年 7 月至 2019 年 12 月,该湿性常绿阔叶林各处理凋落物量月动态和累计总凋落物量见图 2,重复测量方差分析表明,氮添加对凋落量无显著影响。CK、LN、HN 每月平均凋落物量 48.8,46.5,51.1 g/m²;CK、LN、HN 累计总凋落物量分别为 2.59,2.46,2.71 kg/m²,季节变化明显,呈双峰模型,凋落高峰期为 5—7,9—11 月,占全年的 65% 以上,凋落量具有一定的年际差异。



注:重复测量方差分析结果在图中用文字表示;T effect 为时间效应;N effect 为 N 效应;T×N effect 为时间与 N 处理交互效应;柱图中不同小写字母表示处理间差异显著(单因素方差分析,LSD 多重比较 $\alpha=0.05$)。

图 2 华西南屏区湿性常绿阔叶林凋落物量季节变化

2.2 不同氮添加和凋落物处理下土壤的化学性质

氮添加和凋落物增减对土壤化学性质的双因素方差分析结果(表 1)显示,A 层土壤中,氮添加对土壤的 pH 和 AK 有显著或极显著影响,HN 处理极显著降低了土壤的 pH,HN 和 LN 都显著提高了 AK 含量。凋落物增减对土壤的 pH、TOC、TN、AN、AK 有显著或极显著影响,+L 和 -L 处理都显著降低了土壤 pH,提高了 TN 含量,极显著提高了 TOC 含量,+L 处理显著提高了土壤的 AN 和 AK 含量;B 层土壤中,氮添加对土壤的

pH、TOC、AN 有显著或极显著影响,pH 呈现出 HN<LN<CK 的极显著差异,说明随着施氮的增加土壤酸性增强,HN 极显著提高了土壤 TOC 的含量,也显著提高了 AN 的含量。凋落物增减对土壤的 TOC 和 AP 有显著或极显著影响,+L 处理显著降低了土壤 TOC 的含量,且+L 处理的 AP 含量极显著低于-L 的 AP 含量。氮添加和凋落物增减的交互效应仅对 B 层土壤的 AN 有显著性影响。B 层土壤除 pH 高于 A 层,其余化学指标含量均低于 A 层。

表 1 各处理下土壤的基本化学性质

土层 深度/ cm	氮添加 处理	凋落物 处理	pH	有机碳 TOC/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	水解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)
0-10 (A 层)	CK	0L	4.17±0.03Aa	28.84±3.74b	1.83±0.24b	260.17±51.57b	48.61±4.13Bb	1.18±0.06Aa
		-L	4.12±0.04Ab	35.80±4.79a	2.17±0.37a	286.17±51.57ab	55.54±6.83Bab	1.56±0.25Aa
		+L	4.11±0.03Ab	34.70±1.09a	2.20±0.29a	285.80±34.35a	53.77±7.50Ba	1.41±0.13Aa
	LN	0L	4.21±0.12Aa	25.68±1.87b	1.70±0.12b	194.21±10.19b	53.58±4.04Ab	1.28±0.10Aa
		-L	4.01±0.02Ab	34.42±4.14a	2.22±0.24a	287.68±45.19ab	74.33±10.37Aab	2.10±0.50Aa
		+L	4.16±0.07Ab	37.93±6.22a	2.37±0.29a	311.37±54.72a	77.85±5.77Aa	1.63±0.19Aa
	HN	0L	4.02±0.04Ba	31.07±4.55b	1.88±0.24b	238.50±31.50b	59.07±7.56Ab	1.52±0.35Aa
		-L	3.94±0.03Bb	35.12±1.82a	2.12±0.09a	275.43±8.78ab	64.49±7.27Aab	1.50±0.17Aa
		+L	3.79±0.06Bb	41.56±2.99a	2.42±0.23a	335.22±22.63a	74.00±8.89Aa	1.73±0.25Aa
	P	N effect	<0.010	0.162	0.938	0.806	<0.050	0.388
		L effect	<0.050	<0.010	<0.050	<0.050	<0.050	0.178
		N×L effect	0.131	0.365	0.951	0.606	0.648	0.535
10-30 (B 层)	CK	0L	4.40±0.06A	17.50±4.05Ba	1.13±0.21	108.55±17.21B	46.83±8.98	0.79±0.03ab
		-L	4.34±0.02A	16.94±2.54Bab	1.17±0.21	127.37±18.84B	35.38±5.21	0.92±0.05a
		+L	4.34±0.04A	12.19±1.74Bb	0.88±0.17	83.02±9.44B	41.59±8.63	0.65±0.11b
	LN	0L	4.22±0.03B	16.63±1.47Ba	1.21±0.06	129.75±4.73B	41.93±3.14	0.83±0.03ab
		-L	4.29±0.04B	12.66±2.68Bab	0.93±0.17	88.55±18.02B	49.79±4.32	1.18±0.20a
		+L	4.34±0.05B	12.53±1.11Bb	0.91±0.09	108.20±15.16B	48.74±4.62	0.67±0.04b
	HN	0L	4.19±0.03C	17.96±0.64Aa	1.03±0.16	125.66±8.69A	43.12±4.12	0.86±0.04ab
		-L	4.13±0.06C	17.04±4.03Aab	1.07±0.19	130.43±24.19A	45.04±5.61	0.77±0.09a
		+L	4.13±0.05C	20.24±1.85Ab	1.32±0.19	179.28±26.78A	47.61±2.40	0.70±0.10b
	P	N effect	<0.010	<0.010	0.655	<0.050	0.471	0.227
		L effect	0.865	<0.050	0.805	0.842	0.842	<0.010
		N×L effect	0.240	0.062	0.299	<0.050	0.539	0.136

注:同列不同大写字母表示氮处理的显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表示凋落物处理的显著性差异($P<0.05$);N effect 为氮添加效应;L effect 为凋落物增减效应;N×L effect 为氮添加与凋落物增减的交互效应。下同。

2.3 不同氮添加和凋落物处理下土壤团聚体的粒径组成与分布

由图 3 可知,A 层土壤中不同粒径团聚体间的质量百分含量差异性显著,团聚体的质量百分含量随着粒径的减小而减小。B 层土壤中除大团聚体和微团聚体的质量百分含量差异不显著外,其余各组之间有显著性差异,小团聚体的质量百分含量最高,其次为微团聚体,团聚体的质量百分含量随着粒径的减小呈现先增后减的趋势。A、B 层土壤均以>0.25 mm 为优势粒径,粉黏粒组分占比最低。除大团聚体的质量百分含量随土层加深而降低以外,其余粒径团聚体的质量百分含量均呈增加趋势。由表 2 可知,氮添加和

凋落物增减对土壤团聚体的粒径组成无显著影响。LN 使 B 层的粉黏粒组分含量提高,凋落物增减处理下 A 层微团聚体的质量百分含量降低,但均未达到显著性水平。

2.4 不同氮添加和凋落物处理下土壤团聚体的稳定性

由表 3 可知,氮添加或凋落物处理对土壤团聚体的各项稳定性指标均无显著影响。虽未达到显著水平,但氮添加使 A、B 层土壤团聚体的 APD(粒径分形维数)有所提高。除了一 LLN 处理,其他凋落物增减处理都提高了 A 层土壤团聚体的 $\omega_{r>0.25}$ (>0.25 mm 粒径团聚体的质量百分含量)、MWD(平均质量直径)和 GMD(几何平均直径)。

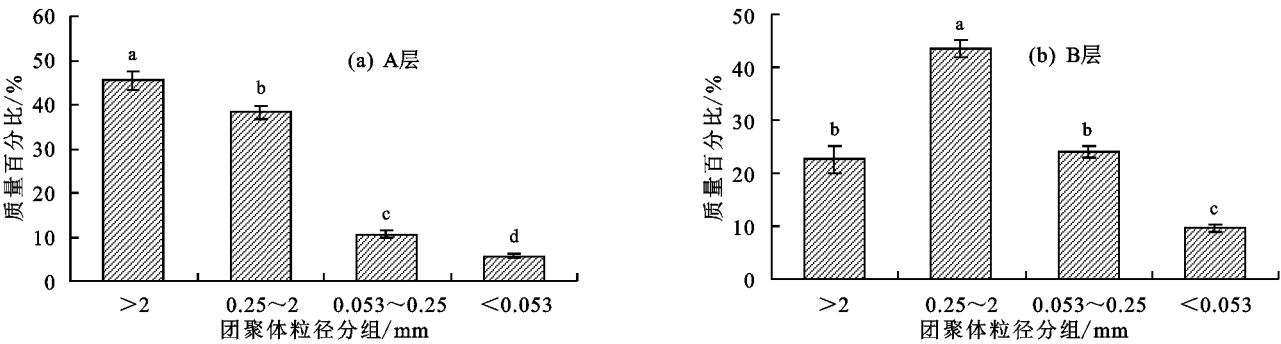


图 3 不同粒径团聚体的质量百分比

注：图柱上方不同小写字母表示团聚体不同粒径的组间显著性差异($P<0.05$)。

表 2 各级团聚体的质量百分含量团聚体质量百分含量

土层深度/cm	氮处理	凋落物处理	团聚体质量百分含量/%			
			>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0—10(A 层)	CK	0L	39.38±8.21	42.73±4.43	11.81±2.42	6.08±2.78
		—L	50.60±7.46	34.75±5.92	10.31±1.76	4.34±0.49
		+L	46.76±5.67	38.63±5.51	10.70±1.78	3.92±0.20
	LN	0L	43.73±4.22	39.28±2.26	11.39±1.15	5.60±1.22
		—L	40.55±3.66	41.42±3.47	9.84±2.05	8.20±2.03
		+L	44.32±10.00	40.50±7.73	8.95±2.24	6.24±1.20
	HN	0L	34.37±5.81	42.53±2.27	16.00±3.31	7.10±1.42
		—L	58.92±5.37	30.30±2.75	6.46±2.89	4.33±0.44
		+L	50.89±2.46	35.10±0.65	8.93±2.56	5.10±0.58
	P	N effect	0.605	0.473	0.898	0.262
L effect		0.107	0.261	0.076	0.595	
N×L effect		0.320	0.592	0.398	0.396	
10—30(B 层)	CK	0L	26.04±8.08	44.60±5.60	22.70±3.58	6.67±0.44
		—L	21.93±8.41	45.64±5.91	24.01±3.63	8.42±1.94
		+L	12.30±5.92	48.60±1.87	28.79±3.42	10.31±2.34
	LN	0L	27.59±6.89	35.25±5.54	25.92±4.09	11.25±1.81
		—L	14.64±4.98	44.64±2.53	28.22±5.07	12.50±1.18
		+L	17.47±6.68	46.53±9.19	24.51±3.84	11.49±3.14
	HN	0L	25.20±9.85	43.43±4.51	22.71±4.04	8.67±1.46
		—L	20.94±7.55	47.33±2.64	21.30±4.45	10.44±1.68
		+L	38.02±9.83	35.88±7.28	18.96±2.58	7.15±0.26
	P	N effect	0.352	0.579	0.241	0.063
L effect		0.539	0.573	0.974	0.561	
N×L effect		0.356	0.449	0.697	0.592	

A 层土壤中, $\omega_{r>0.25}$ 的范围在 76.9%~89.21%, 各处理均值为 83.86%; MWD 的范围为 1.194~1.531, 均值为 1.361; GMD 的范围为 0.822~1.232, 均值为 1.020; APD 的范围为 2.107~2.290, 均值为 2.186。B 层土壤中, $\omega_{r>0.25}$ 范围为 59.28%~73.90%, 各处理均值为 66.22%; MWD 范围为 0.8418~1.1966, 均值是 0.9851; GMD 范围为 0.4888~0.7848, 均值是 0.6158; APD 范围为 2.252~2.424, 均值是 2.336。随着土层的加深, $\omega_{r>0.25}$ 、MWD、GMD 减小, APD 增大, 即 A 层土壤的稳定性强于 B 层土壤。

2.5 土壤化学性质与团聚体稳定性的相关性

土壤化学指标与团聚体稳定性指标的 Person 相

关性分析结果(表 4)显示,除 AK 与 APD 和 MWD 没有显著相关关系外,其余各指标之间均有显著或极显著相关性。土壤 TOC、TN、AN 与 APD 呈极显著负相关,土壤 AP 与 APD 显著负相关,土壤 TOC、TN、AN、AP 与 $\omega_{r>0.25}$ 、MWD 和 GMD 呈极显著正相关,土壤 AK 与 $\omega_{r>0.25}$ 和 GMD 显著正相关,土壤 pH 与 APD 显著正相关,与 $\omega_{r>0.25}$ 、MWD 和 GMD 极显著负相关,即土壤团聚体稳定性与元素含量正相关,与土壤酸度负相关。

2.6 不同氮添加和凋落物增减处理下土壤团聚体的有机碳、全氮分布

2.6.1 各处理下土壤团聚体有机碳的分布 由图 4

可知,A 层土壤中,氮添加对各粒径团聚体的 TOC 含量无显著性影响,但 HN 下小团聚体的 TOC 含量有一定程度的降低。+L 和 -L 处理都极显著提高了大团聚体、小团聚体、微团聚体和粉黏粒组分 TOC 含量。氮添加和凋落物增减的交互作用使粉黏粒组分的 TOC 含量显著性提高。TOC 含量随着土壤粒径的减小,总体呈现出先减后增的“V”形趋势,在大团聚体中最高,其次是粉黏粒组分,微团聚体最低。

表 3 团聚体的稳定性指标

土层深度/cm	氮处理	凋落物处理	$\omega_{r>0.25}/\%$	MWD	GMD	APD
0—10(A 层)	CK	0L	82.11±4.59	1.29±0.12	0.96±0.16	2.13±0.15
		—L	85.35±1.87	1.42±0.08	1.08±0.09	2.13±0.04
		+L	85.39±1.78	1.39±0.06	1.06±0.06	2.11±0.01
	LN	0L	83.01±2.18	1.34±0.06	0.98±0.08	2.18±0.07
		—L	81.96±3.81	1.30±0.06	0.92±0.09	2.29±0.06
		+L	84.82±3.06	1.36±0.11	1.03±0.14	2.28±0.02
	HN	0L	76.91±4.21	1.19±0.09	0.82±0.11	2.26±0.05
		—L	89.21±3.19	1.53±0.08	1.23±0.12	2.13±0.03
		+L	85.99±2.83	1.43±0.05	1.09±0.08	2.18±0.03
	P	N effect	0.921	0.717	0.702	0.066
		L effect	0.128	0.093	0.173	0.997
		N×L effect	0.356	0.279	0.335	0.490
10—30(B 层)	CK	0L	70.64±3.53	1.06±0.10	0.69±0.08	2.25±0.02
		—L	67.57±5.25	0.99±0.12	0.64±0.11	2.29±0.07
		+L	60.90±5.55	0.84±0.11	0.52±0.09	2.35±0.07
	LN	0L	62.84±5.73	0.99±0.11	0.58±0.10	2.39±0.05
		—L	59.28±5.63	0.84±0.10	0.49±0.07	2.42±0.03
		+L	64.00±5.97	0.92±0.08	0.55±0.08	2.37±0.08
	HN	0L	68.63±5.49	1.03±0.14	0.67±0.12	2.31±0.05
		—L	68.27±5.56	0.99±0.12	0.63±0.11	2.36±0.05
		+L	73.90±2.69	1.20±0.11	0.78±0.09	2.27±0.01
	P	N effect	0.167	0.231	0.171	0.082
		L effect	0.805	0.636	0.744	0.626
		N×L effect	0.659	0.420	0.559	0.594

表 4 土壤各指标的 Person 相关性分析

指标	APD	$\omega_{r>0.25}$	MWD	GMD	TOC	TN	pH	AN	AK
$\omega_{r>0.25}$	−0.805**								
MWD	−0.772**	0.953**							
GMD	−0.819**	0.960**	0.977**						
TOC	−0.571**	0.819**	0.816**	0.823**					
TN	−0.524**	0.783**	0.774**	0.774**	0.955**				
pH	0.300*	−0.454**	−0.513**	−0.485**	−0.630**	−0.588**			
AN	−0.508**	0.769**	0.749**	0.764**	0.940**	0.935**	−0.636**		
AK	−0.022	0.279*	0.228	0.260*	0.530**	0.589**	−0.455**	0.613**	
AP	−0.263*	0.458**	0.437**	0.447**	0.655**	0.663**	−0.544**	0.657**	0.690**

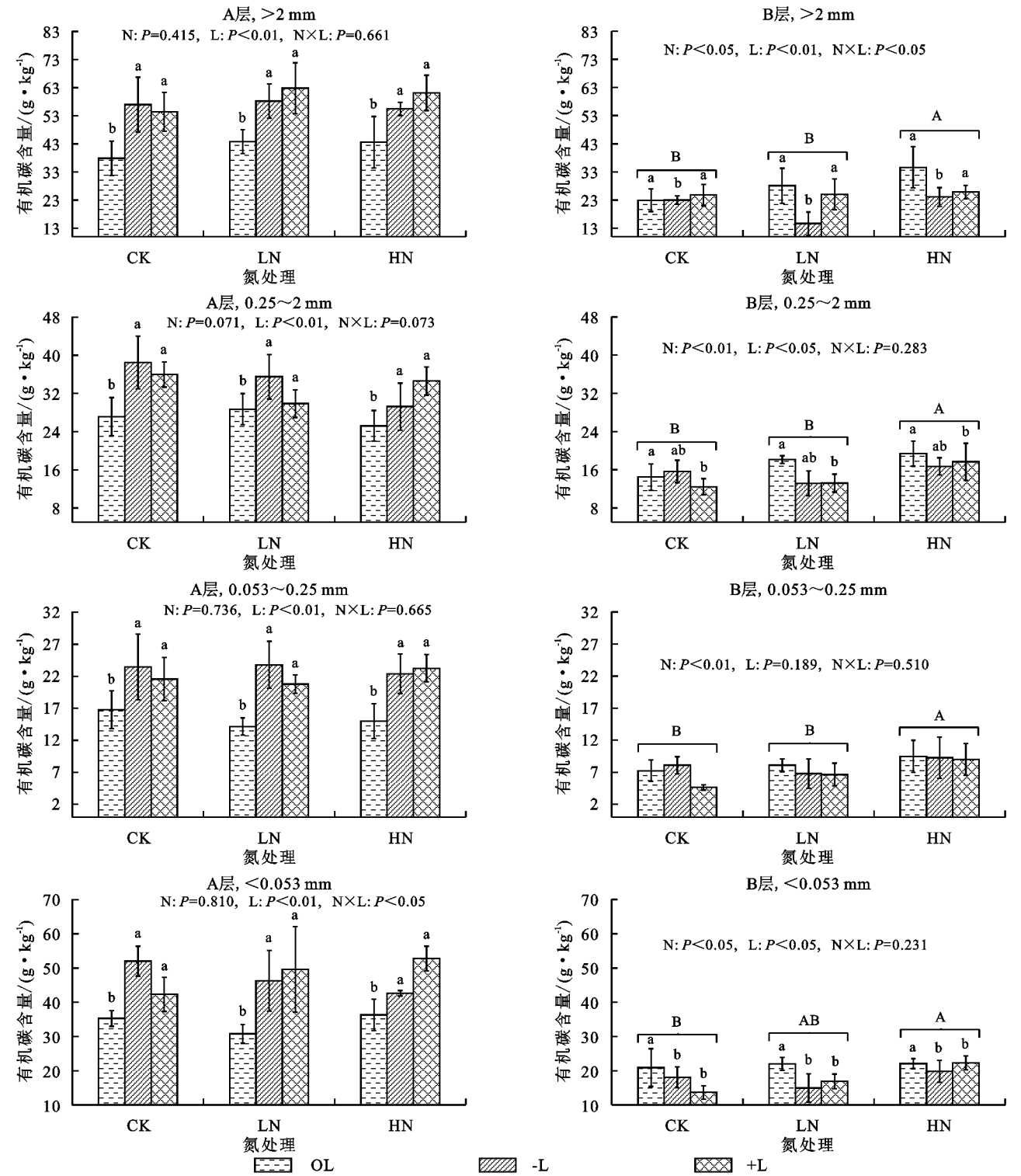
注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; APD 为团聚体粒径分形维数; $\omega_{r>0.25}$ 为 >0.25 mm 团聚体的质量百分含量; MWD 为平均质量直径; GMD 为几何平均直径; TOC 为有机碳; TN 为全氮; pH 为土壤酸碱度; AN 为水解氮; AK 为速效钾; AP 为有效磷。

B 层土壤中,HN 显著提高了大团聚体、微团聚体和粉黏粒组分的 TOC 含量,极显著提高了小团聚体的 TOC 含量。-L 处理极显著降低了大团聚体的 TOC 含量,显著降低了粉黏粒组分的 TOC 含量,+L 处理使小团聚体及粉黏粒组分的 TOC 含量显著性降低。氮添加和凋落物增减的交互作用显著提高了大团聚体的 TOC 含量。土壤有机碳在团聚体中的分布和 A 层土壤中类似,TOC 含量随着团聚体粒径的减小呈现出先减后增的“V”形趋势,在大团聚体时最高,其次是粉黏粒组分,微团聚体最低。

2.6.2 各处理下土壤团聚体全氮的分布 由图 5 可知,A 层土壤中,氮添加对各个粒径团聚体的 TN 含量影响不显著。凋落物增减处理对各粒径团聚体的 TN 含量都有提高,但有些未达显著水平。-L 和 +L

处理都极显著提高了小团聚体和粉黏粒组分的 TN 含量，-L 处理还显著提高了微团聚体的 TN 含量。氮添加和凋落物增减的交互作用对各粒径团聚体的 TN 含量都没有显著影响。TN 含量随着土壤粒径的减小，总体呈现出先减后增的“V”形分布趋势，在大团聚体中最高，其次是粉黏粒组分，微团聚体中最低。

B 层土壤中，氮添加效应、凋落物增减效应及两者的交互效应对各粒径团聚体的全氮含量并无显著影响。但 HN 处理一定程度地提高了小团聚体的 TN 含量，-L 处理使大团聚体的全氮 TN 有所降低。TN 含量随着土壤团聚体粒径的减小，呈现出先减后增的“V”形分布，大团聚体最高，其次是粉黏粒组分，在微团聚体中最低。



注:图柱上方不同大写字母表示氮处理的显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表示凋落物处理的显著性差异($P<0.05$);N为氮添加效应;L为凋落物增减效应;N×L为氮添加与凋落物增减的交互效应。下同。

图 4 土壤各粒径团聚体的有机碳含量

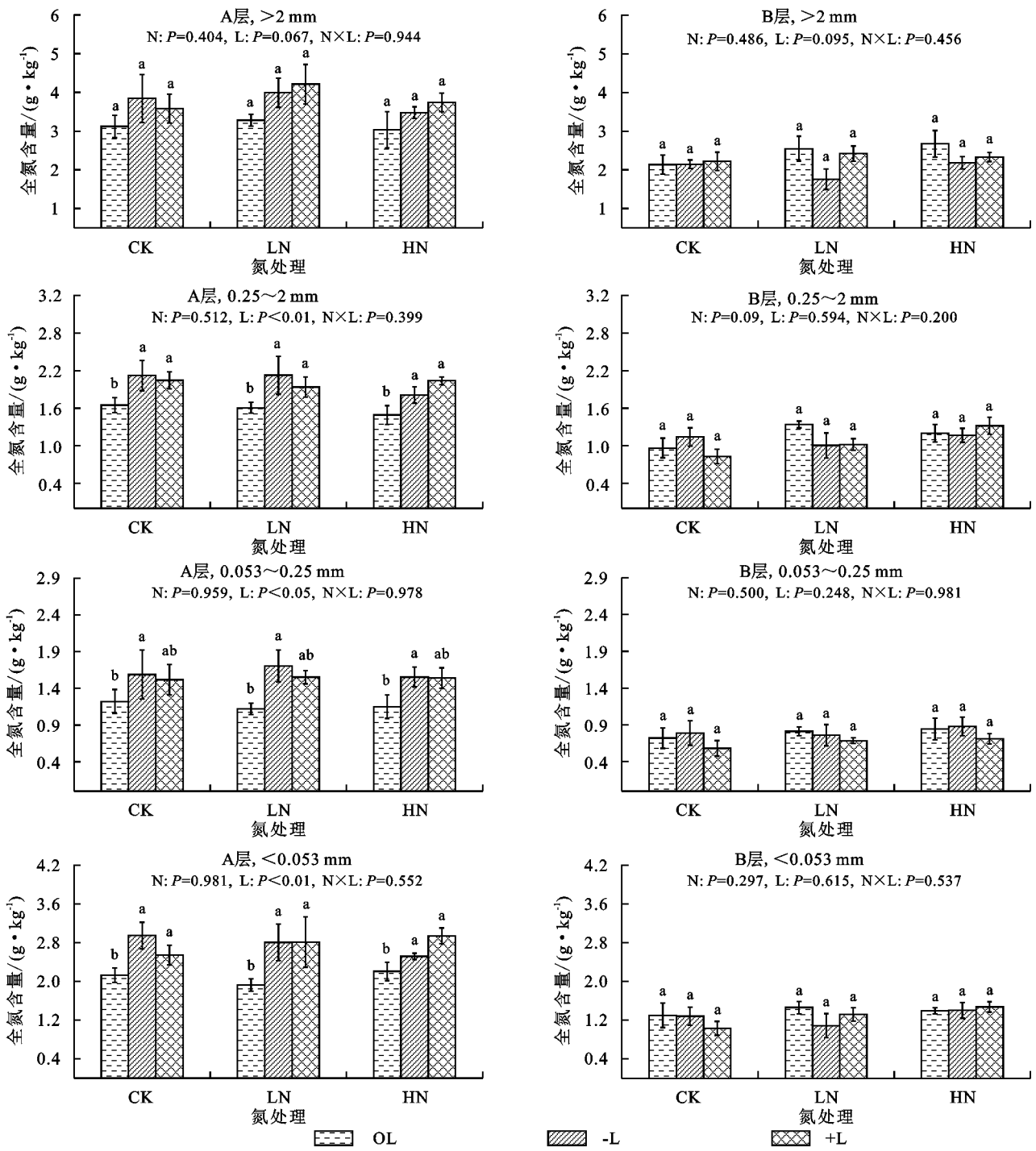


图 5 土壤各粒径团聚体的全氮含量

3 讨论

3.1 氮添加和凋落物增减对土壤化学性质的影响

本研究中,随着土层深度的增加,TOC、TN、AN、AK、AP 含量均降低,这是由于 A 层土壤中植物与土壤交换多,有机质含量高,微生物活性较强,B 层的营养成分由上层传递下来,因此土壤养分含量相对较低,符合营养成分递减规律^[11]。氮添加极显著降低了 A 层和 B 层的土壤 pH,凋落物增减使 A 层土壤 pH 显著降低。这与前人^[12]研究结果一致,土壤中氮素的输入会增加土壤中 NH₄⁺、NO₃⁻ 含量,植物吸收 NH₄⁺ 后根际会向土壤溶液中释放 H⁺ 导致

土壤酸化,NO₃⁻ 在淋失的过程中由于电荷平衡会导致土壤中的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 等盐基离子流失,使可交换阳基离子 Al³⁺、Mn²⁺ 的浓度大量增加,同样会导致土壤的酸化。本研究发现,凋落物增减提高了表层土壤的有机质含量,而有机质的积累也是导致土壤酸化的因素。有机质能与 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等非酸性阳离子形成水溶性复合物,加速了土壤中这些阳离子的流失,且有机质含有大量的酸性官能团可以解离出 H⁺,从而使土壤 pH 降低。

HN 显著提高了 B 层土壤团聚体的 TOC 和 AN 含量,可能是因为氮添加提高了地下根系分泌物的

量,进而丰富了土壤有机质^[13],而碱解氮含量又与有机质含量以及氮素输入量成正比。相较于 A 层,B 层由于较弱的淋溶作用, NO_3^- 淋失损失的氮素量低于土壤氮素的输入量,导致了有效氮的积累,而有效氮含量的增加导致木质素分解酶合成受到抑制,并且无机态氮还可能与酚类化合物或者木质素结合,形成更加难以被分解的稳定性碳^[14]。

已有研究^[15]发现,凋落物增加使土壤有机碳含量提高,在更多凋落物输入的情况下,尽管土壤碳释放和转化速率增加,土壤碳汇也同时增加。少有凋落物减少提高土壤有机碳含量的报道,付淑月等^[16]在黄土丘陵区的研究发现,凋落物去除显著提高了土壤有机碳的含量,而地上凋落物加倍处理则无显著变化,推测这是由于凋落物去除处理与对照和凋落物添加相比,更低的激发效应和更高的微生物量碳导致了有机碳含量的增加。本研究发现,+L 和 -L 都显著提高了 A 层土壤 TOC 的含量,与本研究同一试验设计的试验结果显示,+L 处理增加了土壤呼吸速率,-L 处理降低了土壤呼吸速率^[17]。+L 处理虽然土壤呼吸强,但其凋落物输入多,-L 处理虽然凋落物输入少但土壤呼吸弱,两者土壤中因凋落物输入而增加的碳量都大于土壤呼吸释放的碳量,因此有机质含量都有所提高。而有机质的积累可间接增加土壤全氮含量,这是因为土壤中的氮素绝大部分来自于有机质,所以凋落物增减处理还显著提高了 A 层土壤 TN 的含量。B 层土壤相较于 A 层土壤,受凋落物输入影响更小,+L 和 -L 处理下调落物输入的碳量都小于土壤呼吸释放的碳量,所以使土壤有机碳含量降低。而 B 层土壤 TOC 在氮添加和凋落物增减两因素作用下最终呈现出增加趋势(氮添加使其增加,凋落物增减使其降低),说明 B 层 TOC 主要受氮添加效应的影响。

3.2 氮添加和凋落物增减对土壤团聚体粒径组成及稳定性的影响

本研究中,A 层(腐殖质层,0—10 cm)团聚体以 >2 mm 为优势粒径,B 层(矿质层,10—30 cm)以 0.25~2 mm 团聚体占主导地位,两者均以粉黏粒组分含量最少,这一结论符合 Tisdall 等^[18]提出的土壤中根系、菌丝和动物粪便等颗粒有机物质通过蚯蚓和其他土壤动物的作用相互结合在一起形成大团聚体的研究结果。森林土壤中有丰富的凋落物、根系和菌丝,这些都是利于 >0.25 mm 团聚体形成的有机胶结物质。且从 A 层到 B 层,大团聚体含量降低,更小粒径团聚体含量增加,与唐晓红等^[19]研究结果一致,认为土壤团聚体随着土层加深,大团聚体向微团聚体转化,表层水稳性大团聚体含量明显高于底层。

氮添加和凋落物增减对团聚体的粒径组成及各项稳定性指标均无显著影响,这可能是由于土壤团聚

体的形成是一个长期过程,且土壤应对环境变化有自我调节机制,因此其稳定性变化不明显。虽未达显著水平,但凋落物增减使 $\omega_{r>0.25}$ (>0.25 mm 团聚体的质量百分含量)、MWD(平均重量直径)、GMD(几何平均直径)都有提高,这是由于 +L 和 -L 显著提高了 A 层土壤 TOC 的含量,而有机质是团聚体形成的重要胶结物质,它能增加团聚体的疏水性,减慢其被湿润的速度,从而降低土粒中填充空气对团聚体的破坏作用^[20],另外,有机物吸收水的容量远大于土壤矿物,增强了团聚体间的黏结力和抗张强度,使得团聚体稳定性提高^[21]。A 层土壤团聚体稳定性高于 B 层,是因为有机物质的胶结作用、植物根系和菌丝缠绕作用对团聚体的形成与稳定极为重要,随着土层深度逐渐增大,土壤有机质、根系和菌丝含量降低,导致团聚体稳定性随之降低。

3.3 土壤化学性质与团聚体稳定性的相关性

团聚体稳定性与土壤养分关系密切,有机质是土壤养分的来源,亦是团聚体形成过程中重要的胶结物质^[22],本研究土壤 TOC 与 $\omega_{r>0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著正相关,与 APD 呈极显著负相关,土壤中 TN、AN 和 AP 含量与团聚体稳定性也有类似相关性,意味着土壤有机质含量越高,土壤水稳性大团聚体含量越高,土壤结构越稳定,这与前人^[23]的研究结果一致。虽然氮添加和凋落物增减显著影响了土壤 TOC 的含量,但它们对于团聚体稳定性的影响却不显著,Sun 等^[6]研究也发现,短期的氮素添加对平均重量直径无显著影响,这种有机质的增加在短期内并不会提高团聚体的稳定性。土壤团聚体稳定性的提高可能取决于试验处理的时间、森林植被类型、土壤类型等因素,本试验处理时间为 6 年,植物群落成熟稳定,土壤发育良好,可能是处理时间不够长难以对这种成熟森林土壤的团聚体稳定性造成显著影响。

3.4 氮添加和凋落物增减对土壤团聚体碳氮的影响

本研究发现,大团聚体的 TOC 和 TN 含量最高,微团聚体的 TOC 和 TN 含量最低,A 层高于 B 层,TOC 和 TN 含量随着土壤团聚体粒径的减小呈现出“V”形分布。TOC 和 TN 的分布规律在 A、B 层土壤中相同,可能是因为在凋落物的分解和土壤有机质的形成过程中,微生物分解有机物所需的 C、N 含量是成一定比例的。大团聚体 TOC 含量高是因为它含有较多的根系和菌丝,而处于分解状态的根系和菌丝可以提高大团聚中有机碳的浓度^[24],而粉黏粒组分的 TOC 和 TN 含量仅次于大团聚体,可能是因为它比表面积大,具有较强的吸附能力。李恋卿等^[25]研究也发现, <0.002 、 >2 mm 的团聚体中有机碳的含量都较高,有机碳在团聚体中呈“V”形分布;高海龙^[26]研究表明,土壤团聚体各粒径团聚体有机碳含量在表层土壤中最大;刘栋^[27]研究发现,土壤团

聚体全氮含量与土壤团聚体有机碳含量在不同土层和不同粒径呈相似的变化规律。这些研究结果都与本研究结果一致。

本研究发现,HN 使 B 层各粒径团聚体的 TOC 显著提高,凋落物增减使 A 层各粒径团聚体的 TOC 和 TN 显著提高,使 B 层大团聚体、小团聚体、粉黏粒组分的 TOC 含量显著降低,这些都与全土的变化规律一致,说明土壤 C、N 的变化是由各个粒径团聚体共同承担的。

4 结 论

A、B 层土壤均以水稳性大团聚体($>0.25\text{ mm}$)为优势粒径,粉黏粒组分($<0.053\text{ mm}$)占比最低。团聚体内 TOC 和 TN 分布规律在 A、B 土层中相同,均为大团聚体最高,小团聚体最低。氮添加和凋落物增减对土壤有机 C、N 的积累具有促进作用,虽然并未改变团聚体的粒径组成,但提高了团聚体内的 C、N 含量,长远来看会对土壤稳定性造成影响。

参考文献:

[1] Galloway J N. Nitrogen cycles: Past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153-226.

[2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.

[3] Xu Z F, Tu L H, Hu T X, et al. Implications of greater than average increases in nitrogen deposition on the western edge of the Szechwan Basin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 177: 201-202.

[4] Tian J, Dungait J A J, Lu X K, et al. Long-term nitrogen addition modifies microbial composition and functions for slow carbon cycling and increased sequestration in tropical forest soil [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3267-3281.

[5] Binkley D, Hogberg P, Fan H B, et al. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 489-499.

[6] Sun L P, Jing H, Wang G L, et al. Nitrogen addition increases the contents of glomalin-related soil protein and soil organic carbon but retains aggregate stability in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Peer J*, 2018, 6: e5039.

[7] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biological Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.

[8] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780-2792.

[9] Peng Y, Song S Y, Li Z Y, et al. Influences of nitrogen addition and aboveground litter-input manipulations on

soil respiration and biochemical properties in a subtropical forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: e107694.

[10] 国家林业局. LY/T 1213-1239—1999 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[11] 张荣, 李婷婷, 金锁, 等. 不同海拔高度对周公山柳杉人工林植物多样性及土壤养分的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(5): 38-46.

[12] 陈向峰, 刘娟, 姜培坤, 等. 模拟氮沉降对毛竹林土壤生化特性和酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 277-284.

[13] 张海芳. 贝加尔针茅草原植物与土壤微生物群落对氮素和水分添加的响应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.

[14] 李明. 氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体碳氮磷和微生物特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.

[15] 陈静文. 丹江口库区侧柏人工林凋落物输入调控对土壤不同组分有机碳氮的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2018.

[16] 付淑月, 王天秀, 张清月, 等. 刺槐林凋落物输入量变化对土壤有机碳的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 2-10.

[17] 李顺. 施氮和凋落物增减对湿性常绿阔叶林土壤呼吸和土壤碳、氮的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.

[18] Tisdall J, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.

[19] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 13(5): 1029-1034.

[20] 李越, 李航. 土壤团聚体稳定性的研究概述[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(11): 3245-3247.

[21] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.

[22] 颜雄. 长期施肥对水稻土和旱地红壤的肥力质量、有机碳库与团聚体形成机制的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.

[23] 胡琛, 贺云龙, 崔鸿侠, 等. 神农架 4 种典型人工林对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(12): 125-133.

[24] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.

[25] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. *土壤通报*, 2000, 34(5): 193-195.

[26] 高海龙. 黄土高原西部典型林地土壤碳氮分布特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.

[27] 刘栋. 黄土高原小叶杨人工林土壤碳氮分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(6): 8-14.