

氮添加对华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体稳定性及养分含量的影响*

司 澳¹ 肖永翔² 陈 俊¹ 杜美霖¹ 胡峻嶒¹ 邹星丞¹ 万仁平¹ 蒋明朱¹ 李 哲¹
周世兴¹ 黄从德^{1*}

(1.四川农业大学林学院 成都 611130; 2.四川省林业和草原调查规划院 成都 610081)

摘 要:【目的】大气氮沉降显著影响了森林生态系统的土壤养分循环。土壤团聚体是森林土壤最具代表性的基本结构单元,对保护和稳定储存土壤养分具有重要意义。然而,氮沉降对森林土壤团聚体稳定性及养分含量的影响还不明确。【方法】基于此,在华西雨屏区常绿阔叶林中进行了为期5年的野外氮添加试验,设置了对照(CK, 0 kg hm⁻² a⁻¹)、低氮添加(LN, 50 kg hm⁻² a⁻¹)和高氮添加(HN, 100 kg hm⁻² a⁻¹)3个处理,测定了4种粒级土壤团聚体(> 5 mm、2-5 mm、0.25-2 mm和< 0.25 mm)的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)以及团聚体中有机碳(SOC)、全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、全磷(TP)和有效磷(AP)含量。【结果】N添加显著提高了> 5 mm土壤团聚体质量占比,且HN处理的促进作用更明显;N添加显著增加了土壤团聚体MWD和GMD,增幅分别介于16%-20%和18%-27%之间,显著促进了小粒级土壤团聚体向大粒级土壤团聚体的转化;HN添加显著提高了土壤团聚体内SOC含量,增幅介于26.7%-47.9%之间;N添加显著提高了土壤团聚体内TN和NO₃⁻-N含量,增幅分别介于8.4%-46.4%和36.0%-102.4%之间,显著降低了土壤团聚体内TP含量;N添加显著提高了土壤团聚体C/P和N/P。【结论】N添加提高了华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体的稳定性和固碳能力,加剧了土壤磷限制。

关键词: 氮添加; 土壤团聚体; 常绿阔叶林; 土壤养分; 团聚体稳定性

中图分类号 Q958.15; S154.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 () -0000-00

Effects of nitrogen addition on soil aggregate stability and nutrient contents in an evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of Western China

Si Ao¹, Xiao Yongxiang², Chen Jun¹, Du Meilin¹, Hu Junxi¹, Zou Xingcheng¹, Wan Renping¹, Jiang Mingzhu¹, Li Zhe¹, Zhou Shixing¹ & Huang Congde^{1*}

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University Chengdu 611130, China; 2. Sichuan Provincial Institute of Forestry and Grassland Inventory and Planning, Chengdu 610081, China)

Abstract: 【Objectives】 Atmospheric nitrogen deposition significantly affects soil nutrient cycling in forest

收稿日期 Received: 2023-12-18 接受日期 Accepted: 2024-04-02

四川省自然科学基金青年基金(2022NSFSC1134)和世行贷款长江上游森林生态系统恢复项目科研课题项目子专题-多功能混交林营建技术研究与示范(510201202038467)资助 Supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC1134) and the Research and Demonstration of Multi-functional Mixed Plantation Establishment Technology as a Sub-topic of the Scientific Research Project of the Upper Yangtze River Forest Ecosystem Restoration Project under the World Bank Loan (510201202038467)

*通讯作者 Corresponding author (E-mail: lyxq100@aliyun.com)

ecosystems. Soil aggregates are the most representative basic structural units of forest soils, which are of great significance for the protection and stable storage of soil nutrients. However, the effects of nitrogen (N) deposition on the stability and nutrient contents of forest soil aggregates are still unclear. **【Methods】** Based on this, a 5-year field N addition experiment was executed in an evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of Western China. Three treatments were set as follows: control (CK, 0 kg hm⁻² a⁻¹), low N addition (LN, 50 kg hm⁻² a⁻¹), and high N addition (HN, 100 kg hm⁻² a⁻¹). The mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D) and the contents of soil organic carbon (SOC), total N (TN), ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP) of four soil aggregates grain size (> 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm, and < 0.25 mm) were determined. **【Results】** The results showed that N addition significantly enhanced the quality of the soil aggregate > 5 mm proportion, and the enhancement in HN was stronger than that in LN treatment. N addition significantly increased the soil aggregates MWD and GMD by 16%-20% and 18%-27%, respectively. N addition significantly facilitated the transformation of small-grained soil aggregates to large-grained soil aggregates. HN addition significantly increased the contents of SOC in soil aggregates by 26.7%-47.9%. N addition significantly increased the contents of TN and NO₃⁻-N in soil aggregates by 8.4%-46.4% and 36.0%-102.4%, respectively, with significantly decreasing TP contents in soil aggregates. N addition significantly increased soil aggregate C/P and N/P. **【Conclusions】** The above results indicated that N addition can improve the stability of soil aggregates and enhance the C pool in soil aggregates while aggravating the soil P limitation in this evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of Western China.

Key words: N addition; soil aggregate; evergreen broad-leaved forest; soil nutrients ; aggregate stability

自工业革命以来,随着人类对能源需求的持续增长、化石燃料和化肥的消耗持续攀升以及采矿活动的日益频繁,导致全球范围大气氮(N)沉降速率快速增加¹。据统计,全球平均N沉降速率已超过 10 kg hm⁻² a⁻¹,预期到 2050 年一些区域的 N 沉降量将达到 50 kg hm⁻² a⁻¹²。而我国所在东亚地区作为全球 N 沉降的 3 大热点地区之一,目前平均大气 N 沉降通量达 21.1 kg hm⁻² a⁻¹,在我国南方部分地区的 N 沉降量甚至已超过 50 kg hm⁻² a⁻¹³。随着大气 N 沉降的持续增加,将会对森林生态系统结构和功能造成重要影响⁴。因此,N 沉降对森林生态系统的影响受到诸多学者的关注。

土壤团聚体稳定性是反映土壤结构好坏的重要指标,也是影响土壤碳(C)固存和养分保持的关键因素⁵。N 添加改变了土壤养分平衡,而土壤 C 和 N 又影响着土壤团聚体的形成和稳定⁶。土壤有机碳(SOC)是土壤团聚体胶结剂之一,其浓度直接影响着土壤团聚体形成和稳定⁷。如:Lu 等⁸通过整合 76 项研究的 1462 对数据发现 N 添加显著增加了土壤 C 和大团聚体 C,显著增加了土壤团聚体的平均重量直径(MWD),有利于土壤团聚体的形成和稳定。而吕思扬等⁹发现 N 添加对常绿阔叶林土壤团聚体粒径组成和各项稳定性指标均无显著影响。但也有研究表明,N 添加会降低土壤团聚体稳定性,如郭海云等¹⁰发现在施 N 水平超过一定值后,会抑制针叶林土壤中大粒径土壤团聚体的形成,降低土壤团聚体的稳定性。出现差异的原因可能是 N 添加水平、N 添加时间、森林类型和土壤团聚体分级方法等不同有关。可见,目前 N 添加对土壤团聚体稳定性的影响尚未有统一结论,仍需要进一步研究。

土壤团聚体作为土壤的基本结构单元,是土壤养分的主要载体¹¹。表土中的土壤团聚体包含了近 90%的土壤 C、N 等养分元素,同时土壤中 C、N 等养分的积累也受到团聚体粒级分布的影响¹²。土壤作为 N 沉降的最大承受者,N 的持续输入会直接导致土壤 TN 和有效 N 含量增加,这将会影响森林生态系统养分平衡进而改变土壤 C、N、P 等养分的化学计量¹³,进而影响土壤团聚体养分含量。然而,N 添加对森林土壤团聚体养分含量的影响还没有形成共识。如:有研究发现 N 添加可提高土壤团聚体内 C、N 等养分含量^{9,14},也有研究发现 N 添加没有显著影响土壤团聚体内 C、N 含量¹⁵。这可能是由于受到不同地理环境、森林类型和实验处理条件等因素的影响,导致 N 添加对森林土壤团聚体养分含量的影响并不一致。因此,森林土壤团聚体养分含量对 N 添加的响应仍需要进一步研究。

华西雨屏区由于地处四川盆地西部边缘,是 N 沉降和大气降水的集中区,2008-2010 年年均 N 湿沉降量

已经达到 $36.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 是我国 N 沉降最高水平地区之一¹⁶, 使其成为大气 N 沉降对森林生态系统影响的天然实验室。但是, 目前该区域有关森林土壤团聚体稳定性及养分含量对 N 添加的响应还不清楚。因此, 以华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体为研究对象, 研究 N 添加对土壤团聚体稳定性及养分含量的影响, 进而为常绿阔叶林可持续经营提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地点位于华西雨屏区中心区域的雅安市雨城区碧峰峡 ($103^{\circ}0'25'' \text{ E}$, $30^{\circ}4' 6'' \text{ N}$), 海拔高度 977.6 m, 年积温 5231°C , 年均气温为 16.2°C , 全年地面均温 18.1°C 。日照长度为 1039.6 h, 全年太阳辐射总量为 $3640.1 \text{ MJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。无霜期为 304 d, 年平均降水量 1772.2 mm, 年蒸发量为 1011.2 mm, 全年相对湿度为 79 %。气候温和湿润, 属亚热带湿润季风型山地气候。研究区域大气 N 沉降以湿沉降为主, N 沉降量为 $36.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。试验地植被种类丰富, 群落结构复杂。地带性森林群落为亚热带常绿阔叶林, 乔木以南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、中华木荷 (*Schima sinensis*) 和大头茶 (*Gordonia axillaris*) 为优势树种, 少量分布有四川山矾 (*Symplocos setchuensis*)、枹栎 (*Quercus serrata*)、交让木 (*Daphniphyllum macropodum*)、川莓 (*Rubus setchuensis*) 等树种。草本主要有: 水竹叶 (*Murdannia triquetra*)、肉穗草 (*Sarcopyramis bodinieri*) 以及蕨类等植物。试验地位于中坡, 坡度较小, 土壤类型为亚热带地区典型的黄壤, 厚度大于 60 cm, 立地条件基本一致, pH 在 4.0 左右^[17]。

1.2 研究方法

1.2.1 样方的设置与氮添加处理

2017 年 10 月在四川省雅安市雨城区碧峰峡景区选取具有代表性的常绿阔叶林作为研究对象, 在林内建立立地条件基本一致的 9 个 $5 \text{ m}\times 5 \text{ m}$ 的小样方, 每个样方内设置 $> 2 \text{ m}$ 的缓冲带。根据同类研究和本研究区域氮沉降背景值 $36.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ¹⁶, 试验共设置 3 个 N 添加处理, 分别为对照 (CK, $0 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、低氮添加 (LN, $50 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和高氮添加 (HN, $100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 每个处理 3 个重复, 随机布设于 9 个样方内。以硝酸铵 (NH_4NO_3) 为 N 源进行 N 添加试验¹⁸, 将每年的 N 添加量平均分成 12 等份, 每隔 30 d 将各处理所需的 N 添加量溶于 2 L 水中, 用喷雾器在样地内来回均匀喷洒, CK 处理每次喷 2 L 清水。

1.2.2 样品采集与处理

于 2022 年 6 月上旬进行土壤样品采集, 采样时先清除地面枯枝落叶后, 在每个样方中随机选择 5 个土壤样品采集点, 再用土钻钻取 0-20 cm 土层的土样, 并将其均匀混合成一袋, 共计 9 个土壤样品, 随后立即运回实验室去除土壤中的杂物和细根。在阴凉处自然风干后, 采用干筛法分离土壤团聚体¹⁹, 沿其自然结构面掰开并过 10 mm 的标准筛, 同时进一步去除小石块和细小根须。每次取 100 g 土于电动振筛机 (TTF-100) 套筛中, 分离出 $> 5 \text{ mm}$ 、 $2-5 \text{ mm}$ 、 $0.25-2 \text{ mm}$ 和 $< 0.25 \text{ mm}$ 4 种粒级土壤团聚体样品, 用于后期土壤化学分析。

1.2.3 测定指标与方法

土壤团聚体的稳定性用团聚体平均重量直径 (Mean weight diameter, MWD)、几何平均直径 (Geometric mean diameter, GMD) 和分形维数 (Fractal dimension, D) 来表示, 计算公式如下¹⁹:

$$\text{团聚体平均质量直径 (MWD)} = \sum \frac{X_i \times M_i}{M_t} \quad (1)$$

$$Xi = r_{i-1} + r_i \quad (2)$$

$$\text{几何平均直径 (GMD)} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln X_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

$$\text{分形维数 (D)} = 3 - \lg \left(\frac{M(r \leq X_i)}{M_t} \right) / \lg \left(\frac{X_i}{X_{\max}} \right) \quad (4)$$

式中: X_i 为任一粒级范围内团聚体的平均直径 (mm), r_i 为第 i 孔径土筛的孔径大小, r_{i-1} 为比第

i 孔径小 1 级级的孔径大小, M_i 为土壤团聚体总质量 (g), M_i 为对应于 X_i 的团聚体质量 (g); W_i 为不同粒级土壤团聚体占总团聚体的比例; $M_{(r \leq x_i)}$ 为直径小于等于 X_i 的土壤团聚体质量 (g), $X_{\max}$ 为土壤团聚体的最大直径。

土壤团聚体化学指标测定参照国家林业行业标准²⁰。SOC 采用 $K_2Cr_2O_7$ -氧化外加热法测定; TN 采用半微量凯氏法测定; NH_4^+-N 采用靛酚蓝比色法; NO_3^--N 采用酚二磺酸比色法; TP 采用碱熔-钼锑抗比色法测定; AP 采用 $NaHCO_3$ 浸提法。

1.3 数据统计与分析

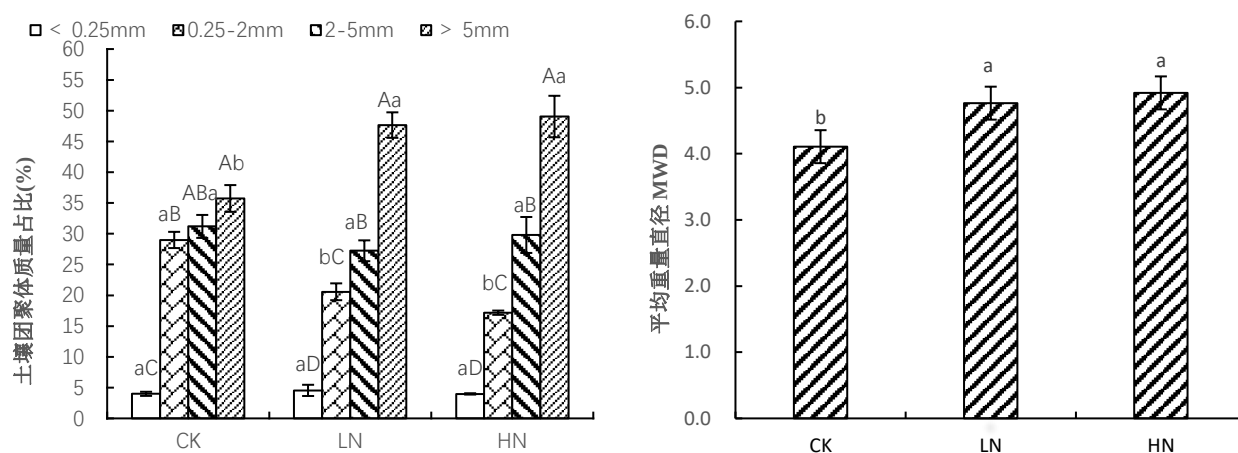
使用 Excel 2019 进行数据统计。运用 SPSS 22.0 软件对数据进行整理和分析, 使用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同 N 添加处理下土壤团聚体稳定性及养分含量的差异显著性以及养分含量在土壤团聚体不同粒径间的差异显著性。方差分析时, 先进行齐性检验 (Homogeneity tests), 当方差齐时, 利用最小显著性差异法 (LSD) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$); 当方差不齐时, 利用邓尼肯 T3 (Dunnett's T3) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。使用 Pearson's correlation 分析确定土壤团聚体稳定性指标与各粒级质量占比、C、N 和 P 含量之间的相关关系。利用 Origin 2022 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 氮添加对土壤团聚体粒径分布及稳定性的影响

氮添加处理 5 年后, 各处理的 < 0.25 mm、0.25-2 mm、2-5 mm 和 > 5 mm 粒级土壤团聚体质量占比分别介于 3.98-4.55%、17.17-28.99%、27.23-31.19%和 35.73-49.04%之间 (图 1)。与 CK 相比, LN 和 HN 处理下 0.25-2 mm 粒级土壤团聚体质量占比分别显著降低了 29.04%和 40.77%, > 5 mm 土壤团聚体质量占比分别显著提高了 33.36%和 37.25%。

各处理的土壤团聚体 MWD、GMD 和 D 值分别介于 3.92-5.12、2.76-3.83 和 2.44-2.58 之间 (图 1)。与 CK 相比, LN 和 HN 处理下土壤团聚体的 MWD 显著增大, 增幅分别为 16%和 20%; LN 和 HN 处理也显著增大了 GMD, 增幅分别为 18%和 27%; N 添加处理下土壤团聚体的 D 值差异不显著。表明 N 添加处理总体上增强了土壤团聚体的稳定性。



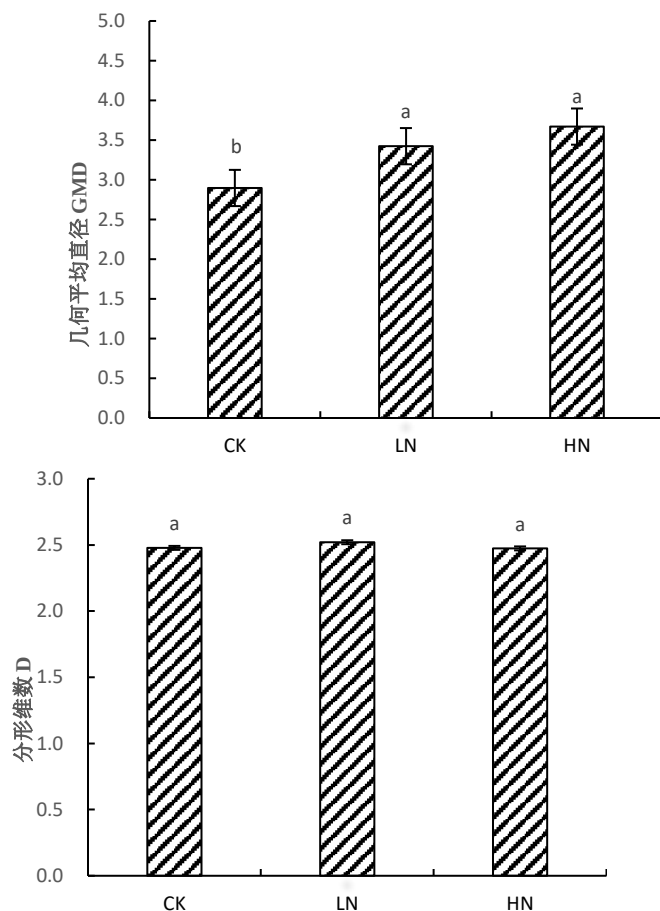


图1 不同氮添加处理土壤团聚体的粒径分布及稳定性

Fig.1 Particle size distribution and stability of soil aggregates under different nitrogen treatments

不同大写字母表示团聚体粒径之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$, 不同小写字母表示团聚体处理之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$ 。误差线表示标准误差。Different uppercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$; different lowercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$. Vertical bars represent standard errors.

2.2 氮添加对土壤团聚体碳氮磷含量的影响

2.2.1 对有机碳和全氮含量的影响

各处理的土壤团聚体 SOC 含量介于 15.96-35.39 g/kg 之间 (图 2)。与 CK 相比, HN 处理下 < 0.25 mm、0.25-2 mm 和 2-5 mm 土壤团聚体 SOC 含量显著提高, 增幅分别为 26.7%、31.9%和 47.9%, 而 LN 处理下各粒级 SOC 含量差异不显著。表明 HN 处理整体上提高了土壤团聚体的固 C 能力。此外, 各处理下均表现出 < 0.25 mm 粒级 SOC 含量最高。

由图 2 可知, 各处理的土壤团聚体 TN 含量介于 1.30-2.99 g/kg 之间。与 CK 相比, LN 处理显著提高了 < 0.25 mm 和 0.25 mm-2 mm 土壤团聚体 TN 含量, 增幅分别为 8.4%和 28.7%; HN 处理显著提高了 0.25 mm-2 mm 和 2-5 mm 的土壤团聚体 TN 含量, 增幅分别为 46.4%和 44.5%, 而 < 0.25 mm 和 > 5 mm 土壤团聚体 TN 含量差异不显著。表明 N 添加处理总体上提高了土壤团聚体的固 N 能力。各处理下土壤团聚体内 TN 含量在各粒级间的分布差异不明显。

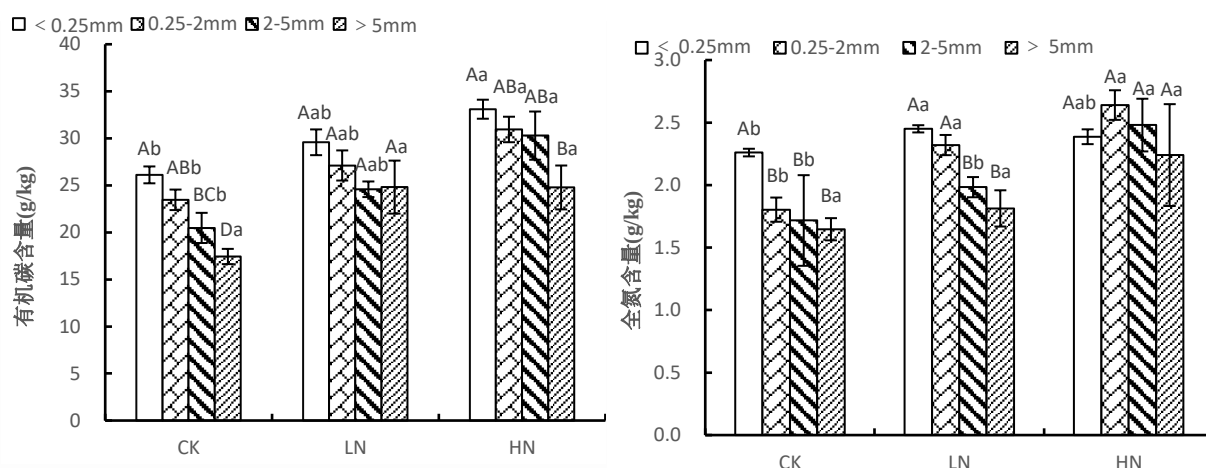


图2 土壤团聚体中有机碳和全氮含量

Fig.2 Organic carbon and total nitrogen contents in soil aggregates

不同大写字母表示团聚体粒径之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$, 不同小写字母表示团聚体处理之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$. 误差线表示标准误差。 Different uppercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$; different lowercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$. Vertical bars represent standard errors.

2.2.2 对铵态氮和硝态氮含量的影响

各处理的土壤团聚体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量介于 13.43-21.17 mg/kg 之间 (图 3)。与 CK 相比, HN 处理下 > 5 mm 土壤团聚体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增大, 而 LN 处理下各粒级土壤团聚体内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量差异不显著。各处理均表现出 < 0.25 mm 土壤团聚体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高。各处理的土壤团聚体内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在粒级间的分布差异不明显。

各处理的土壤团聚体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量介于 7.33-20.16 mg/kg 之间 (图 3)。与 CK 相比, LN 和 HN 处理下各粒级土壤团聚体内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著增大, 增幅分别介于 36.0%-58.2%和 75.3%-102.4%之间。表明 N 添加处理总体上提高土壤团聚体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。同土壤团聚体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量一样, 各处理均表现出 < 0.25 mm 土壤团聚体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高。各处理的土壤团聚体内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在粒级间的分布差异不明显。

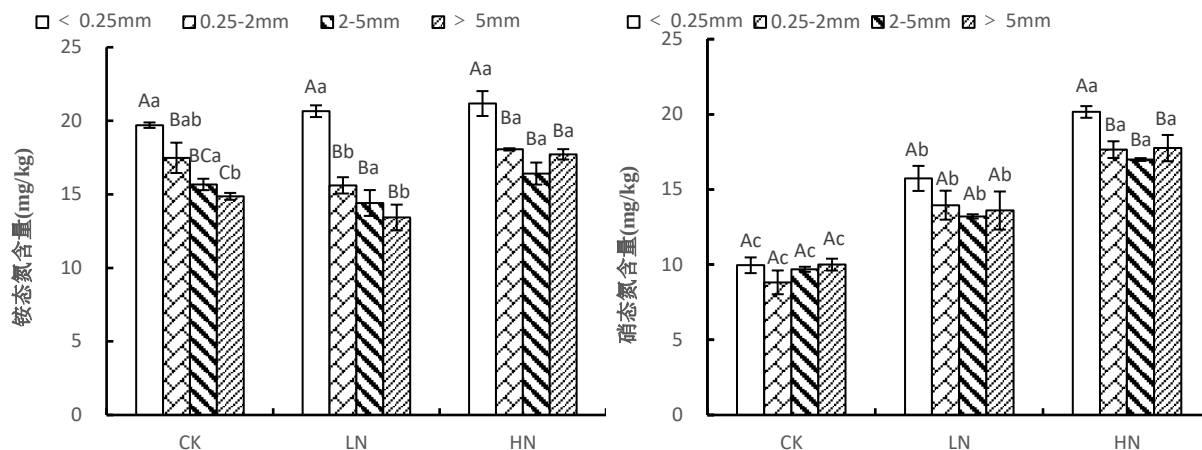


图3 土壤团聚体中铵态氮和硝态氮含量

Fig.3 Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents in soil aggregates

不同大写字母表示团聚体粒径之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$, 不同小写字母表示团聚体处理之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$ 。误差线表示标准误差。 Different uppercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$; different lowercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$. Vertical bars represent standard errors.

2.2.3 对全磷和有效磷含量的影响

各处理的土壤团聚体 TP 含量介于 0.24-0.35 g/kg 之间 (图 4)。与 CK 相比, LN 处理下 0.25-2 mm 和 > 5 mm 土壤团聚体内 TP 含量显著降低, HN 处理下各粒级土壤团聚体内 TP 含量显著降低。表明 N 添加处理总体上降低了土壤团聚体内 TP 含量。

各处理的土壤团聚体 AP 含量介于 1.66-3.09 mg/kg 之间 (图 4)。与 CK 相比, HN 处理下 < 0.25 mm 土壤团聚体 AP 含量显著降低, 而 LN 和 HN 处理下 < 0.25 mm、0.25-2 mm 和 2-5 mm AP 含量无显著差异。各处理的土壤团聚体内 AP 含量在粒级间的分布差异也不明显。

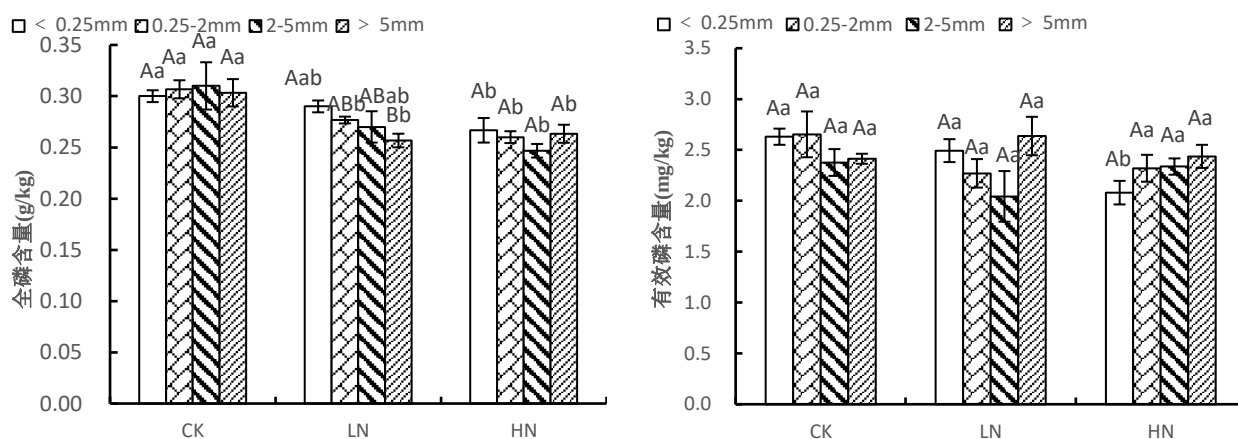


图4 土壤团聚体中全磷和有效磷含量

Fig.4 Total and available phosphorus contents in soil aggregates

不同大写字母表示团聚体粒径之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$, 不同小写字母表示团聚体处理之间差异显著 $P < 0.05$, 差异极显著 $P < 0.01$ 。误差线表示标准误差。 Different uppercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$; different lowercase letters indicated significant difference in aggregate particle size $P < 0.05$ and extremely significant difference $P < 0.01$. Vertical bars represent standard errors.

2.3 氮添加对土壤团聚体 C/N、C/P 和 N/P 的影响

各处理的土壤团聚体 C/N 介于 10.7-14.09 之间（表 1）。与 CK 相比，HN 处理下 < 0.25 mm 土壤团聚体 C/N 显著增大，而 LN 和 HN 处理下 0.25-2 mm、2-5 mm 和 > 5 mm 土壤团聚体 C/N 无显著差异。

各处理的土壤团聚体 C/P 介于 57.79-124.27 之间（表 1）。与 CK 相比，LN 处理下 0.25-2 mm 和 > 5 mm 土壤团聚体 C/P 显著增大；HN 处理下各粒级土壤团聚体 C/P 也显著增大。表明 N 添加处理总体上增大了土壤团聚体 C/P，且 HN 处理下作用最明显。

各处理的土壤团聚体 N/P 介于 5.49-10.18 之间（表 1）。与 CK 相比，LN 处理下 0.25-2 mm 和 2-5 mm 土壤团聚体 N/P 显著增大；HN 处理下 < 0.25 mm、0.25-2 mm 和 2-5 mm 土壤团聚体 N/P 也显著增大。表明 N 添加处理总体上增大了土壤团聚体 N/P，且 HN 处理下作用最明显。各处理的土壤团聚体 C/N、C/P 和 N/P 在各粒级间的分布无明显规律。

表 1 不同氮添加水平处理土壤团聚体碳、氮、磷化学计量学特征（均值±标准差）

Table 1 Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil aggregates treated with different nitrogen supplemental levels (mean ± standard deviation)

项目 It em	处理 Treatment	土壤团聚体 Soil aggregates			
		< 0.25mm	0.25-2mm	2-5mm	> 5mm
碳氮比 C/N	CK	11.57 ± 0.45Ab	13.01 ± 0.10Aa	12.42 ± 2.13Aa	10.7 ± 1.05Aa
	LN	12.09 ± 0.70Aab	11.74 ± 0.88Aa	12.42 ± 0.66Aa	14.09 ± 2.79Aa
	HN	13.88 ± 0.55Aa	11.75 ± 0.35Aa	12.19 ± 0.66Aa	11.46 ± 1.1Aa
碳磷比 C/P	CK	87.18 ± 3.20Ab	76.27 ± 5.28ABc	67.23 ± 8.59BCb	57.79 ± 2.12Cb
	LN	102.15 ± 6.78Ab	97.73 ± 3.93Ab	90.91 ± 2.50Ab	96.97 ± 8.23Aa
	HN	124.27 ± 7.40Aa	119.40 ± 7.70Aa	123.74 ± 12.27Aa	95.39 ± 10.43Aa
氮磷比 N/P	CK	7.54 ± 0.06Ab	5.87 ± 0.45Bb	5.51 ± 0.48Bc	5.49 ± 0.50Ba
	LN	8.44 ± 0.07Aab	8.38 ± 0.40Aa	7.36 ± 0.46Ab	7.17 ± 0.73Aa
	HN	8.97 ± 0.60Aa	10.18 ± 0.71Aa	10.11 ± 0.54Aa	8.64 ± 1.70Aa

同行不同大写字母表示团聚体粒径之间差异显著 $P < 0.05$ ，差异极显著 $P < 0.01$ ，同列不同小写字母表示团聚体处理之间差异显著 $P < 0.05$ ，差异极显著 $P < 0.01$ 。Different uppercase letters in the same row indicate significant $P < 0.05$ and extremely significant $P < 0.01$ differences in aggregate particle size; different lowercase letters in the same row indicate significant $P < 0.05$ and extremely significant $P < 0.01$ differences in aggregate particle size.

2.4 土壤团聚体稳定性指标与各粒级质量占比及养分含量的相关性分析

由 Pearson 相关分析可知（表 2），MWD 和 GMD 与 $WSA_{0.25-2\text{ mm}}$ 呈极显著负相关，与 $WSA_{>5\text{ mm}}$ 呈极显著正相关。MWD 与 $SOC_{AS>5\text{ mm}}$ 、 $SOC_{AS\ 2-5\text{ mm}}$ 和 $SOC_{AS\ 0.25-2\text{ mm}}$ 呈显著正相关，GMD 与各粒级土壤团聚体内 SOC 含量呈显著正相关。MWD 和 GMD 与 $TN_{AS\ 0.25-2\text{ mm}}$ 呈极显著正相关，与 $TN_{AS<0.25\text{ mm}}$ 呈显著正相关。MWD 和 GMD 与各粒级土壤团聚体内 NO_3^-N 含量呈显著正相关，与 $NO_3^-N_{AS\ 2-5\text{ mm}}$ 、 $NO_3^-N_{AS\ 0.25-2\text{ mm}}$ 和 $NO_3^-N_{AS<0.25\text{ mm}}$ 呈极显著正相关。MWD 和 GMD 与 $TP_{AS>5\text{ mm}}$ 呈显著负相关，与 $TP_{AS\ 2-5\text{ mm}}$ 和 $TP_{AS\ 0.25-2\text{ mm}}$ 呈极显著负相关。MWD 和 GMD 与 $AP_{AS<0.25\text{ mm}}$ 呈显著负相关。

表 2 土壤团聚体稳定性指标与各粒级质量占比及养分含量之间的相关性

Table 2 The correlation between the stability index of soil aggregates and the mass proportion of each grain grade and the nutrient content

因子 Factor	平均重量直径 MWD	几何平均直径 GMD	分形维数 D
WSA >5 mm	0.986**	0.931**	0.378
WSA 2-5 mm	- 0.577	- 0.424	- 0.664
WSA 0.25-2 mm	- 0.951**	- 0.947**	- 0.206
WSA < 0.25 mm	0.149	-0.054	0.924**
SOC _{AS} > 5 mm	0.689*	0.671*	0.278
SOC _{AS} 2-5 mm	0.770*	0.821**	- 0.081
SOC _{AS} 0.25-2mm	0.717*	0.813**	- 0.292
SOC _{AS} < 0.25 mm	0.627	0.758*	- 0.397
TN _{AS} > 5 mm	0.403	0.478	- 0.159
TN _{AS} 2-5 mm	0.536	0.584	- 0.003
TN _{AS} 0.25-2 mm	0.907**	0.931**	0.087
TN _{AS} <0.25 mm	0.791*	0.695*	0.468
NH ₄ ⁺ -N _{AS} > 5 mm	0.206	0.39	- 0.682*
NH ₄ ⁺ -N _{AS} 2-5 mm	- 0.217	- 0.024	- 0.823**
NH ₄ ⁺ -N _{AS} 0.25-2 mm	0.027	0.139	- 0.560
NH ₄ ⁺ -N _{AS} < 0.25 mm	0.381	0.359	0.215
NO ₃ ⁻ -N _{AS} > 5 mm	0.747*	0.755*	0.171
NO ₃ ⁻ -N _{AS} 2-5 mm	0.855**	0.908**	- 0.007
NO ₃ ⁻ -N _{AS} 0.25-2 mm	0.902**	0.904**	0.660
NO ₃ ⁻ -N _{AS} < 0.25 mm	0.873**	0.890**	0.152
TP _{AS} >5 mm	- 0.704*	- 0.681*	- 0.168
TP _{AS} 2-5 mm	- 0.888**	- 0.858**	- 0.268
TP _{AS} 0.25-2 mm	- 0.887**	- 0.874**	- 0.218
TP _{AS} < 0.25 mm	- 0.471	- 0.570	0.318
AP _{AS} >5 mm	0.265	0.122	0.677*
AP _{AS} 2-5 mm	- 0.234	- 0.254	0.088
AP _{AS} 0.25-2 mm	- 0.601	- 0.684*	0.167
AP _{AS} < 0.25 mm	- 0.767*	- 0.774*	- 0.119

*在 0.05 水平上差异显著, **在 0.01 水平上差异极显著。WSA > 5 mm, WSA 2-5 mm, WSA 0.25-2 mm 和 WSA < 0.25 mm 分别为 > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm 和 < 0.25 mm 粒级土壤团聚体质量占比; SOC_{AS} > 5 mm, SOC_{AS} 2-5 mm, SOC_{AS} 0.25-2 mm 和 SOC_{AS} < 0.25 mm 分别为 > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm 和 < 0.25 mm 粒级土壤团聚体内的 SOC 含量; TN_{AS} > 5 mm, TN_{AS} 2-5 mm, TN_{AS} 0.25-2 mm 和 TN_{AS} < 0.25 mm 分别为 > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm 和 < 0.25 mm 粒级土壤团聚体内的 TN 含量, 团聚体内 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 和 AP 含量同理。The difference was significant at the 0.05 level and the difference was extremely significant at the 0.01 level. WSA > 5 mm, WSA 2-5 mm, WSA 0.25-2 mm and WSA < 0.25 mm were the percentage of soil aggregate mass for > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm and < 0.25 mm grain size, respectively. SOC content within soil aggregates of > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm and < 0.25 mm grain size for SOC_{AS} > 5 mm, SOC_{AS} 2-5 mm, SOC_{AS} 0.25-2mm and SOC_{AS} < 0.25 mm respectively. TN_{AS} > 5 mm, TN_{AS} 2-5 mm, TN_{AS} 0.25-2 mm and TN_{AS} < 0.25 mm were the TN contents within soil aggregates of > 5 mm, 2-5 mm, 0.25-2 mm and < 0.25 mm grain size, respectively, and the same was true for the contents of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP and AP within the aggregates.

3 讨论

3.1 氮添加对常绿阔叶林土壤团聚体稳定性的影响

基于团聚体质量百分比计算的 MWD、GMD 和 D 是衡量土壤团聚体稳定性的重要指标^[19]。本研究显示, N 添加处理下的 MWD 和 GMD 显著增大, 表明 N 添加处理增强了土壤团聚体的稳定性, 这与 Riggs 等^[21]的研究一致。原因可能有以下三个方面。第一, 一般而言, 土壤大团聚体越多, 土壤就具备越高的稳定性和越强的抗侵蚀能力^[22]。本研究结果表明, N 添加处理显著提高了 $> 5\text{ mm}$ 土壤大团聚体质量占比, 且 Pearson 相关性分析表明, MWD 和 GMD 与 $> 5\text{ mm}$ 土壤大团聚体质量占比呈极显著正相关。这表明 N 添加通过提高 $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体质量占比来提高了土壤团聚体的稳定性。第二, 土壤 SOC 作为土壤团聚体的胶结剂, 土壤团聚体稳定性随 SOC 浓度的增加而增强^[7]。本研究显示, HN 添加总体上显著提高了土壤团聚体内 SOC 含量, 且 Pearson 相关性分析表明, MWD 和 GMD 与土壤团聚体内 SOC 含量呈显著正相关。这表明 N 添加通过提高土壤团聚体内有机 C 含量来增强土壤团聚体的稳定性。第三, 可能是因为土壤 N 能促进微团聚体粘合成大团聚体的粘液积累, 同时在根际中充当额外的粘合剂, 从而增加土壤团聚体的稳定性^[23]。本研究显示, N 添加总体上提高了土壤团聚体内 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量, 且 Pearson 相关性分析表明, MWD 和 GMD 与土壤团聚体内 $\text{TN}_{\text{AS } 0.25-2\text{mm}}$ 和 $\text{TN}_{\text{AS } < 0.25\text{ mm}}$ 呈显著正相关, 与土壤团聚体内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量呈显著正相关。这表明 N 添加通过提高土壤团聚体内 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量来增强土壤团聚体的稳定性。但有研究表明, N 添加对土壤团聚体稳定性无显著影响。如 Sun 等^[24]研究发现, N 添加对土壤团聚体 MWD 无显著影响。出现差异的原因可能是, 第一, N 添加处理的时间不同。本实验 N 添加处理的时间为 5a, 而 Sun 等^[24]的处理时间只有 2a, 导致 N 添加对土壤团聚体稳定性的影响可能未完全表现出来。第二, N 源不同。本试验使用 NH_4NO_3 为 N 源, 而 Sun 等^[24]的试验以 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为 N 源。第三, 试验的森林类型不同。本研究对象为常绿阔叶林, 而 Sun 等^[24]的研究对象为油松。第四, N 添加量不同。本研究 N 添加量为 0、50 和 $100\text{ kg h m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 而 Sun 等^[24]的 N 添加量为 0、30、60 和 $90\text{ kg h m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。综上所述, N 添加时间、N 源、N 添加量和试验对象会影响土壤团聚体稳定性对 N 添加的响应, 这也意味着需进一步控制试验条件以揭示 N 添加对土壤团聚体稳定性的影响。

3.2 氮添加对常绿阔叶林土壤团聚体碳氮磷养分含量的影响

土壤团聚体对土壤有机碳的保护作用是土壤固存 SOC 的一个重要方面^[23]。本研究结果显示, HN 处理总体上提高了土壤团聚体 SOC 含量, 这与郭虎波等^[24]的结果一致。本研究结果还显示, HN 处理下, 与其余粒级相比, $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体 SOC 含量较低。根据土壤 SOC 等级饱和理论, 土壤 SOC 优先在小粒级土壤团聚体中饱和, 然后在大粒级土壤团聚体中饱和^[26], $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体只能固持其余粒级饱和后剩余的土壤 SOC, 因而 $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体固持 SOC 含量相对降低。

本研究发现, 与 CK 相比, N 添加处理总体上提高了各粒级土壤团聚体 TN 含量, 这与 Wang^[27]等研究结果一致。其原因可能是, 一方面 N 添加会直接导致土壤 TN 和有效 N 含量增加^[14]。另一方面长期 N 添加导致植物地上生物量及凋落物量增加, 促进植物生长和凋落物的积累, 进而丰富了土壤有机质, 使 SOC 和 TN 含量都升高^[28]。但 N 添加未显著增加 $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体内 TN 含量, 其主要原因可能是小团聚体比大团聚体对有机质具有更强的吸附能力, 有机质在小粒级团聚体中有更长时间的周转^[29]。本研究结果还显示, N 添加处理下各粒级土壤团聚体内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量显著提高, 而各粒级土壤团聚体内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化不明显, 这与陈天等^[30]的研究结果一致。N 添加未明显提高土壤团聚体内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量, 可能与微生物活动有关。因为微生物会优先同化 NH_4^+ 作为 N 源用于自身生长需要, 消耗了土壤中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量^[31]。

磷被认为是林木生长的重要限制性元素^[32]。本研究结果显示, N 添加对各粒级土壤团聚体 TP 及 AP 含量的影响较小, 总体上呈现出下降趋势, 这与郑慧等^[33]的研究结果一致。这主要是因为 P 元素在土壤中以沉积类矿物的形式存在, 其迁移率很低, 因此土壤团聚体 P 含量受土壤母质的影响较大^[34]。

本研究结果还显示, N 添加处理下, $< 0.25\text{ mm}$ 和 $0.25-2\text{ mm}$ 土壤团聚体中 SOC、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量高于 $2-5\text{ mm}$ 和 $> 5\text{ mm}$ 土壤团聚体, 这与 Mangalassery 等^[35]的研究结果一致。这可能是由于不同粒级土壤团聚体物理结构特性的不同导致的, $< 0.25\text{ mm}$ 和 $0.25-2\text{ mm}$ 的土壤团聚体由于黏粒颗粒的吸附力强, 且尺寸较小的团聚体表面积比更大^[15], 所以可以固持更多的 SOC 和 N。

3.3 氮添加对常绿阔叶林土壤团聚体化学计量比的影响

土壤 C/N 是土壤 N 素矿化能力的标志,也是反映土壤有机质组成和质量的重要指标^[36]。本研究结果显示, N 添加有降低土壤团聚体 C/N 的趋势。这可能主要是由于 N 添加总体上增加了土壤团聚体 TN 含量和 SOC 含量,但 TN 含量增幅高于有机碳,致使土壤 C/N 下降。土壤 C/P 是衡量 P 有效性的指标之一^[32]。本研究结果显示, N 添加处理下各粒级土壤团聚体 C/P 显著提高,表明 N 添加降低了土壤团聚体 P 的有效性,这与 Wei 等^[17]所做的研究一致。土壤 N/P 对土壤养分供给性水平与限制性水平均具有一定的间接预测作用^[32]。本研究结果显示, N 添加处理下 < 0.25 mm、0.25-2 mm 和 2-5 mm 土壤团聚体 N/P 显著增大,表明 N 添加可能加剧了土壤的 P 限制。这与 Tie 等^[37]的研究结果一致。一方面可能是因为 N 添加直接导致土壤中的有机 N 和无机 N 含量增加,另一方面可能是 N 添加促进了植物的生长,增加了对土壤 AP 的吸收,进而降低了土壤团聚体 AP 含量,导致各粒级土壤团聚体 N/P 增大。

4 结论

总体来说, N 添加增强了华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体的稳定性,提高了土壤团聚体的固碳和固氮能力,加剧了土壤 P 限制。因此,在氮沉降持续增加的背景下可增施磷肥来缓解土壤磷限制。但由于土壤团聚体稳定性及养分含量还受到土壤团聚体内酶活性和微生物的影响,在今后的研究中还应开展团聚体内酶活性和微生物等方面的研究,以更全面的了解 N 添加对华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体的影响。

参 考 文 献

- 1 Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Eco Appl*, 1997, 7 (3): 737-750
- 2 Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai Z, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions[J]. *Science*, 2008, 320 (5878): 889-892
- 3 Yu GR, Jia YL, He NP, Zhu JX, Chen Z, Wang QF, Piao SL, Liu XJ, He HL, Guo XB, Wen Z, Li P, Ding GA, Goulding K. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. *Nat Geosci*, 2019, 12 (6): 424-429
- 4 Zhang SX, Li Q, Zhang XP, Wei K, Chen LJ, Liang WJ. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China[J]. *Soil Till Res*, 2012, 124:196-202
- 5 陆琪, 马红彬, 俞鸿千, 王丽, 沈艳, 许冬梅, 谢应忠. 轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3028-3038 [Lu Q, Ma HB, Yu HQ, Wang L, Shen Y, Xu DM, Xie YZ. Effects of rotational grazing on soil aggregates and organic carbon characteristics in desert grassland[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30 (9): 3028-3038]
- 6 Jastrow JD. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28 (4-5): 665-676
- 7 Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1-2): 3-22
- 8 Lu XF, Hou EQ, Guo JY, Gilliam FS., Li JL, Tang SB, Kuang YW. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. *Glob Change Biol*, 2021, 27 (12): 2780-2792
- 9 吕思扬, 宋思意, 黎蕴洁, 仲琦, 马炜, 涂利华. 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[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 277-287 [Lü SY, Song SY, Li YJ, Zhong Q, Ma W, Tu LH. Effects of Nitrogen Addition and Litter Increase and Decrease on Soil Aggregates and Carbon and Nitrogen in Evergreen Broad-leaved Forest in Rainscreen Area of West China[J]. *J Soil Water Conserv*, 2022, 36 (1): 277-287]
- 10 郭海云, 王根绪, 孙守琴. 氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37 (1): 238-245 [Guo HY, Wang GX, Sun SQ. Effects of Nitrogen Addition on Soil Structure and Water Infiltration Performance of Subalpine Coniferous Forest[J]. *J Soil Water Conserv*, 2023, 37 (1): 238-245]
- 11 霍琳, 杨思存, 王成宝, 姜万礼, 温美娟. 耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (10): 3463-3472 [Huo L, Yang SC, Wang CB, Jiang WL, Wen MJ. Influence of tillage practices on the distribution and

- stability of ash-calcium soil aggregates in irrigated tillage of Gansu's Huanghuang Irrigation District[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30** (10): 3463-3472]
- 12 刘玮, 蒋先军. 耕作方式对土壤不同粒径团聚体氮素矿化的影响[J]. 土壤, 2013, **45** (3): 464-469 [Liu W, Jiang XJ. Effects of tillage practices on nitrogen mineralization in soil aggregates with different grain sizes[J]. *Soils*, 2013, **45** (3): 464-469]
- 13 Holland EA, Braswell BH, Sulzman J, Lamarque J-F. Nitrogen deposition onto the United States and Western Europe: Synthesis of observations and models[J]. *Eco Appl*, 2005, **15** (1): 38-57
- 14 陈天, 程瑞梅, 沈雅飞, 肖文发, 王丽君, 孙鹏飞, 张萌, 李璟. 氮添加对三峡库区马尾松人工林土壤团聚体有机氮组分和氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2023, **34** (10):2601-2609 [Chen T, Cheng RM, Shen YF, Xiao WF, Wang LJ, Sun PF, Zhang M, Li J. Effects of nitrogen addition on organic nitrogen fractions and nitrogen mineralization of Soil aggregates in a ponytail pine plantation forest in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2023, **34** (10):2601-2609]
- 15 周学雅, 陈志杰, 耿世聪, 张军辉, 韩士杰. 氮沉降对长白山森林土壤团聚体内碳, 氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30** (5): 1543-1552 [Zhou XY, Chen ZJ, Geng SC, Zhang JH, Han SJ. Effects of nitrogen deposition on carbon and nitrogen contents in forest soil aggregates in Changbai Mountain[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30** (5): 1543-1552]
- 16 Yang KJ, Yang YL, Xu ZF, Wu QG. Soil respiration in a subtropical forest of southwestern China: Components, patterns and controls[J]. *Plos One*, 2018, **13** (9): e0204341
- 17 Wei SZ, Tie LH, Liao J, Liu X, Du ML, Lan SX, Li XR, Li CS, Zhan HC, Huang CD. Nitrogen and phosphorus co-addition stimulates soil respiration in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. *Plant Soil*, 2020, **450** (10): 171-182
- 18 魏圣钊, 赵倩, 廖泯权, 周世兴, 何聪, 王雷, 黄从德. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程微生物生物量的影响[J]. 生态学报, 2018, **38** (22): 8001-8007 [Wei SZ., Zhao Q., Liao MQ., Zhou SX., He C, Wang L, Huang CD. Effects of simulated nitrogen deposition on microbial biomass during decomposition of natural evergreen broadleaf forests in the West China rain screen area[J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (22): 8001-8007]
- 19 Le Bissonnais Y, Prieto I, Roumet C, Nespoulous J, Metayer J, Huon S, Villatoro M, Stokes A. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics[J]. *Plant Soil*, 2018, **424** (1-2): 303-317
- 20 国家林业局. LY/T1213-1239—1999, 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999 [State Forestry Administration. LY/T1213-1239-1999, Forest soil analysis methods [S]. Beijing: China Standard Press, 1999]
- 21 Riggs CE, Hobbie SE. Mechanisms driving the soil organic matter decomposition response to nitrogen enrichment in grassland soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 2016, **99**: 54-65
- 22 Liu DD, Ju WL, Jin XL, Li MD, Shen GT, Duan CJ, Guo L, Liu YY, Zhao W, Fang LC. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition timeframes[J]. *Sci. Total Environ*, 2021, **777**: 146104
- 23 李杨, 仲波, 陈冬明, 张楠楠, 孙庚. 不同浓度和多样性的根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (5): 1061-1067 [Li Y, Zhong B, Chen DM, Zhang NN, Sun G. Effects of different concentrations and diversity of root secretions on the stability of soil aggregates [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (5): 1061-1067]
- 24 Sun LP, Jing H, Wang GL, Liu GB. 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
- 25 郭虎波, 袁颖红, 吴建平, 樊后保, 刘文飞, 黄荣珍, 房焕英. 氮沉降对杉木人工林土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27** (4): 268-272 [Guo HB, Yuan YH, Wu JP, Fan HB, Liu WF, Huang RZ, Fang HY. Effects of nitrogen deposition on soil aggregates and organic carbon distribution in cedar plantation forest[J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27** (4): 268-272]
- 26 Kool DM, Chung H, Tate KR, Ross DJ, Newton PCD, Six J. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring[J]. *Glob Change Biol*, 2007, **13** (6):1282-1293
- 27 Wang Y, Wang ZL, Zhang Q, Hu N, Li Z, Lou Y, Li Y, Xue D, Chen Y, Wu C, Zou CB, Kuzyakov Y. Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil.[J]. *Sci. Total Environ*, 2018, **624**: 1131-1139
- 28 刁励玮, 李平, 刘卫星, 徐姗, 乔春连, 曾辉, 刘玲莉. 草地生态系统生物量在不同气候及多时间尺度上对氮添加和增雨处

- 理的响应[J]. 植物生态学报, 2018, **42** (8): 818-830 [Diao LW, Li P, Liu WX, Xu S, Qiao CL, Zeng H, Liu LL. Response of grassland ecosystem biomass to nitrogen addition and rain enhancement treatments in different climates and at multiple time scales[J]. *Chin J Plant Ecol*, 2018, **42** (8): 818-830]
- 29 Luce MS, Whalen JK, Ziadi N, Zebarth BJ, Chantigny MH. Labile organic nitrogen transformations in clay and sandy-loam soils amended with ^{15}N -labelled faba bean and wheat residues[J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **68**: 208-218
- 30 陈天, 程瑞梅, 王丽君, 肖文发, 沈雅飞, 孙鹏飞, 张萌, 曾立雄. 氮添加对马尾松人工林土壤团聚体氮矿化及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2023, **43** (16): 6528-6538 [Chen T, Cheng RM, Wang LJ, Xiao WF, Shen YF, Sun PF, Zhang M, Zeng LX. Effects of nitrogen addition on nitrogen mineralization in soil aggregates and soil enzyme activities in a plantation forest of *Pinus sylvestris*[J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, **43** (16): 6528-6538]
- 31 Azam F, Ifzal M. Microbial populations immobilizing $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ differ in their sensitivity to sodium chloride salinity in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (8): 2491-2494
- 32 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, **26** (1): 9-16 [Li W, Zheng Z, Li TX. Ecological stoichiometric characterization of carbon, nitrogen and phosphorus in soil aggregates with different years of tea planting[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26** (1): 9-16]
- 33 郑慧, 薛江博, 郝杰, 刁华杰, 陈晓鹏, 王常慧, 董宽虎. 短期不同水平氮添加对华北盐渍化草地土壤磷组分的影响[J]. 草地学报, 2022, **30** (3): 712-720 [Zheng H, Xue JB, Hao J, Diao HJ, Chen XP, Wang CH, Dong KH. Effects of short-term nitrogen additions on soil phosphorus fractions in salinized grasslands in North China[J]. *Acta Pratac Sin*, 2022, **30** (3): 712-720]
- 34 刘红梅, 李洁, 王丽丽, 赵建宁, 王慧, 杨殿林. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响[J]. 草业学报, 2018, **27** (7): 25-35 [Liu HM, Li J, Wang LL, Zhao JN, Wang H, Yang DL. Effects of nitrogen addition on plant and soil stoichiometric characteristics of Baikal needlegrass grassland[J]. *Acta Pratac Sin*, 2018, **27** (7): 25-35]
- 35 Mangalassery S, Sjögersten S, Sparkes DL, Sturrock CJ, Mooney SJ. The effect of soil aggregate size on pore structure and its consequence on emission of greenhouse gases[J]. *Soil Till Res*, 2013, **132** (8): 39-46
- 36 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. 土壤学报, 2011, **48** (2): 412-418 [Dou S, Li K, Guan S. Progress in the study of organic matter in soil aggregates [J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, **48** (2): 412-418]
- 37 Tie LH, Zhang SB, Peñuelas J, Sardans J, Zhou SX, Hu JX, Huang CD. Responses of soil C, N, and P stoichiometric ratios to N and S additions in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. *Geoderma*, 2020, **379**: 114633