

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.023

贺凌云, 陈伏生, 郑志宇, 等. 氮磷添加对常绿阔叶林土壤团聚体有机碳及其与磷组分相关的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2).

HE Lingyun, CHEN Fusheng, ZHENG Zhiyu, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on aggregate-associated soil carbon and interactions with phosphorus fractions in evergreen broad-leaved forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2).

氮磷添加对常绿阔叶林土壤团聚体 有机碳及其与磷组分相关的影响

贺凌云¹, 陈伏生¹, 郑志宇², 刘俏¹, 王晟楠¹, 王方超¹

(1. 江西农业大学国家林业和草原局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室, 南昌 330045;

2. 江西省林业资源监测中心, 南昌 330046)

摘要: [目的] 为探究磷输入如何调节大气氮沉降对土壤团聚体有机碳含量及碳与磷关系的影响。

[方法] 在常绿阔叶林土壤建立长达 6 年(2015—2021 年)的养分添加长期监测试验平台, 包括 4 个处理: 对照[P0+N0, P0 kg/(hm²·a)+N0 kg/(hm²·a)], 氮添加[P0+N100, P0 kg/(hm²·a)+N100 kg/(hm²·a)], 磷输入[P50+N0, P50 kg/(hm²·a)+N0 kg/(hm²·a)]以及氮磷同时输入[P50+N100, P50 kg/(hm²·a)+N100 kg/(hm²·a)], 各处理设 3 次重复, 共计 12 个样地。于 2021 年 8 月采集样地 0—10 cm 土层土壤样品, 测定基础理化性质、土壤粒径分布规律、不同粒径土壤团聚体磷组分及有机碳(SOC)含量。[结果](1)P0 处理下, 氮添加显著增加大团聚体占比, 减少黏粒和粉粒含量, 提高各团聚体粒径中 SOC 含量; 氮添加分别显著降低和增加团聚体黏粒、粉粒中易分解态磷组分(LP)和难分解态磷组分(RP)含量。(2)P50 处理下, 氮添加显著提高土壤团聚体平均几何直径(GMD), 对各粒径团聚体中磷组分和 SOC 含量均无显著影响。(3)P0 处理下, 土壤团聚体 SOC 与难分解态磷呈正相关关系; P50 处理下, 土壤团聚体 SOC 与各功能磷组分无显著相关。由此推断, P0 处理下, 氮添加通过提高常绿阔叶林土壤团聚体黏粒、粉粒中难分解态磷而增加土壤有机碳的固持; P50 处理下, 氮添加对各粒径中有机碳的影响可能受到生物因素的调节, 与磷的有效性无关。[结论] 氮沉降对常绿阔叶林土壤团聚体中碳磷内在关系的影响受到磷的调控, 研究结果为森林土壤碳循环应对全球气候变化提供数据支撑。

关键词: 磷输入; 氮沉降; 土壤团聚体; 磷组分; 土壤有机碳; 常绿阔叶林

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Aggregate-associated Soil Carbon and Interactions with Phosphorus Fractions in Evergreen Broad-leaved Forest

HE Lingyun¹, CHEN Fusheng¹, ZHENG Zhiyu², LIU Qiao¹, WANG Shengnan¹, WANG Fangchao¹

(1. Laboratory of Poyang Lake Basin Forest Ecosystem Protection and Restoration, National Forestry and Grassland Administration, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. Jiangxi Forestry Resources Monitoring Center, Nanchang 330046, China)

Abstract: [Objective] To explore how phosphorus input regulates the effects of atmospheric nitrogen deposition on soil aggregate organic carbon content and the relationship between carbon and phosphorus.

[Methods] A long-term monitoring test platform for nutrient addition was established in evergreen broad-leaved forest soil for 6 years (2015—2021), including 4 treatments: Control [P0+N0, P 0 kg/(hm²·a)+N 0 kg/(hm²·a)], nitrogen addition [P0+N100, P 0 kg/(hm²·a)+N 100 kg/(hm²·a)], phosphorus input [P50+N0, P 50 kg/(hm²·a)+N 0 kg/(hm²·a)] and nitrogen and phosphorus were simultaneously input (P50+N100, P 50 kg/(hm²·a)+N 100 kg/(hm²·a)], and each treatment was repeated 3 times, and a

收稿日期: 2023-08-23

修回日期: 2023-10-09

录用日期: 2023-11-23

网络首发日期: 2023-00-00

资助项目: 国家自然科学基金项目(31930070, 32171759, 32201533)

第一作者: 贺凌云(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林培育与生态恢复研究。E-mail: helingyun1999@163.com

通信作者: 王方超(1992—), 男, 讲师, 主要从事森林养分循环过程研究。E-mail: wfangchao@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

total of 12 plots were obtained. 0—10 cm soil samples were collected from the sample site in August 2021 to determine the basic physical and chemical properties, soil particle size distribution, phosphorus components of soil aggregates of different particle sizes, and organic carbon (SOC) content. [Results] (1) Under P0 treatment, nitrogen addition significantly increased the proportion of large aggregates, decreased the clay and powder contents, and increased the SOC content in each aggregate particle size. Nitrogen addition significantly decreased and increased the content of labile phosphorus (LP) and residual phosphorus (RP) in aggregate clay and powder, respectively. (2) Under P50 treatment, nitrogen addition significantly increased the geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates, but had no significant effects on phosphorus components and SOC contents in aggregates of different particle sizes. (3) Under P0 treatment, soil aggregate SOC was positively correlated with refractory phosphorus. There was no significant correlation between SOC of soil aggregates and functional phosphorus components under P50 treatment. It was concluded that under P0 treatment, nitrogen addition could increase soil organic carbon retention by increasing the refractory phosphorus in soil aggregate clay and powder particle size of evergreen broad-leaved forest. Under P50 treatment, the effect of nitrogen addition on organic carbon in each particle size may be regulated by biological factors and has nothing to do with the availability of phosphorus. [Conclusion] The effect of nitrogen deposition on the internal relationship of carbon and phosphorus in soil aggregates in evergreen broad-leaved forests was regulated by phosphorus. The results of this study provide data supported for forest soil carbon cycling in response to global climate change.

Keywords: phosphorus input; nitrogen deposition; soil aggregate; phosphorus component; soil organic carbon; evergreen broad-leaved forest

Received: 2023-08-23

Revised: 2023-10-09

Accepted: 2023-11-23

Online: 2023-00-00

氮(N)和磷(P)被认为是限制植物生长和生态系统生产力的 2 种重要元素^[1]。在森林土壤养分循环过程中起着核心作用,土壤作为氮沉降的最大承受者,N 沉降和 P 输入将直接或间接影响土壤物理、生物和化学性质。近年来,由于人为排放的活性氮含量增加,大气氮沉降加剧^[2],且中国亚热带地区是氮沉降较为严重的地区之一,在过去 30 年间增幅达 60.0%,并仍将保持较高水平^[3]。与 N 不同,P 属于生物地球化学循环的沉积型循环,森林 P 主要来源不是生物作用,而通常是源于缓慢的矿物岩风化,受母岩类型、组成等地球化学因素控制。亚热带地区土壤发育年代久,因此 P 被认为是亚热带森林生态系统中决定植被净初级生产力的限制元素^[4]。全球有机碳库储量约为大气碳库的 2.0 倍,是陆地生物量碳库的 2.5 倍^[5],土壤中储存着最大的陆地有机碳库,在全世界碳循环中发挥着重要作用^[6]。因此,探究氮磷添加对土壤有机碳动态的影响对于理解碳与养分之间的耦合作用,为准确预测陆地生态系统碳循环动态及其与气候变化之间的反馈起到至关重要的作用。

由于土壤团聚体在物理上保护土壤有机碳不受微生物降解,因此土壤团聚体的稳定性在很大程度上影响土壤碳固存。土壤团聚体是矿物颗粒与有机、无机物结合形成的土壤基本结构单元^[7],是衡量土壤质

量和环境健康的重要指标。土壤团聚体是土壤固 C 功能的载体,能够为有机质提供物理保护,调节养分有效性^[8]。氮磷输入以改变土壤理化性质、碳输入量和微生物组成等因素来影响土壤团聚体粒级组成、粒径分布及其稳定性,进而影响土壤固 C 潜力^[9]。而增加土壤固 C 潜力的主要途径之一就是改善和提高土壤团聚体稳定性^[10]。一方面,土壤团聚体粒径分布及其稳定性可通过影响土壤结构组成、通气状况等方面间接地影响土壤 SOC 的固存^[11];另一方面,不同粒径团聚体可通过抑制微生物活动、降低胞外酶有效性等方式在物理上保护 SOC 免受矿化,从而积累 SOC^[12]。因此,探究氮磷输入下团聚体粒径分布和稳定性的变化规律,对了解亚热带森林生态系统中碳循环过程具有重要意义。

由于土壤的有机质中含有较高的有机碳和磷,因此有机碳在矿质土壤中的储存伴随着大量有机磷的固存。在热带和亚热带地区森林土壤中磷有效性较低,主要是由于土壤磷来源于岩石风化,易与铁铝氧化物结合形成难以被植物吸收的难溶性 P^[13-14]。有研究^[15]发现,在森林 0—5 cm 土壤黏土粒级中有机碳与有机磷的比值是 1 000 : 60.2,即储存 1 000 kg 碳,可固存 60.2 kg 的磷。根据全球陆地生态系统野外磷添加试验整合分析可知,外源磷输入可增加

5.4%的森林生态系统有机碳储量^[16]。同时,磷输入抑制土壤碳的分解,在 0—5,5—10 cm 土层土壤碳排放量分别减少 9.0%和 11.0%^[17],所以土壤磷与有机碳之间存在相关关系,但森林生态系统中土壤有机碳是受到何种土壤磷组分调控尚不可知,有待进一步研究。

亚热带常绿阔叶林主要分布在中国,以中亚热带低海拔地区分布的常绿阔叶林最为典型,是世界上主要的森林植被类型之一^[18],中国土壤碳库的固存中有重要地位,且随着全球气候变化背景下土壤有机碳的变化机制如何尚不清楚。在江西省九连山自然保护区常绿阔叶林内开展长达 6 年的氮磷添加试验,研究氮磷输入对常绿阔叶林土壤团聚体粒径分布规律、P 组分和 SOC 的含量的影响,进而探讨在氮磷添加下土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护机制,揭示土壤磷组分与有机碳之间内在关系的影响,研究结果为进一步揭示亚热带常绿阔叶林生态系统土壤碳循环提供重要的理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省龙南县九连山国家级自然保护区内(24°29′18″—24°38′55″N,114°22′50″—114°31′32″E),该区总面积约 13 411.6 hm²,年平均气温为 16.4 °C,年降水量约为 2 156 mm,年平均蒸发量约为 790 mm。该区域是中亚热带湿润常绿阔叶林与南亚热带季风常绿阔叶林的过渡地带,主要的土壤类型有山地黄壤、山地黄红壤、山地红壤及山地草甸土,试验样地内森林植物种类丰富,优势种主要有壳斗科(*Fagaceae*)、山茶科(*Theaceae*)和樟科(*Lauraceae*),乔木层主要优势种为丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)和木荷(*Schima superba*),其重要值共占群落的 40.5%,显著度占 58.3%^[16]。本试验土壤为山地黄红壤,平均树高为 12 m,平均胸径为 12 cm,郁闭度达到 85.0%,乔木平均密度约为 1 200 株/hm²。

1.2 试验设计

于 2015 年 8 月开始在九连山常绿阔叶林布置随机区组试验。本试验设计为 4 种施肥处理:对照[P0+N0,0 kg/(hm²·a) P+0 kg/(hm²·a) N]、氮添加([P0+N100,0 kg/(hm²·a) P+100 kg/(hm²·a) N]、磷输入[P50+N0,50 kg/(hm²·a) P+0 kg/(hm²·a) N]及氮磷同时输入[P50+N100,50 kg/(hm²·a) P+100 kg/(hm²·a) N],每个处理 3 次重复(即 3 个区组),每个样方 20 m×20 m,共 12 个样方,样方之间相隔 20 m 以上作为缓冲带。在每年 3 月和 9 月,用 CO(NH₂)₂和 NaH₂PO₄拌细沙均匀撒施,对对照样地仅撒施细沙。

1.3 土壤样品采集

在 2021 年 8 月,根据五点取样法用直径 5 cm 的土钻采集各样方中 0—10 cm 的土壤样品,将同一样方内采集的 5 份土混合均匀成 1 份复合样品以减少土壤异质性,经过 2 mm 的筛网过筛以后测定速效养分;使用直径 5 cm、高 5 cm 的环刀采集得到的环刀土均匀混合标记装袋带回实验室自然风干过筛供后续测定土壤物理性质使用;使用铝盒采集原状土自然风干筛分团聚体,用于测定全量养分、P 组分和 SOC 含量。

1.4 指标测定

1.4.1 基本理化性质测定 土壤的基本物理性质采用环刀法测定;土壤 pH 指数采用电位法测定;土壤的有机碳含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定^[19];土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定^[20];土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定^[7]。

1.4.2 团聚体分级 本研究中根据 NY/T 1121.19—2008 对土壤团聚体进行分级,团聚体的分离采用沙维诺夫干筛法^[21]。将 500 g(精确到 0.01 g)的风干土掰成小块挑除杂质后依次通过孔径顺序为 2,0.25,0.053 mm 的土壤筛中,均匀过筛 5 min 后得到大团聚体(>2 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)及未被团聚保护的黏粒、粉粒(<0.053 mm),称重并计算其百分比含量(精确到 2 位小数)。

1.4.3 团聚体磷组分测定 本研究中采用改进的 Hedley 分级法对 P 进行分级提取^[15],该方法采用一系列越来越强的萃取剂去除不同组分的 P。具有操作提取步骤为:

(1)取过 100 目孔径筛子的 0.5 g(精确到 0.01 g)风干土;

(2)加入 2 根树脂条(20 mm×6 mm)和 30 mL 去离子水振荡 16 h 后用 20 mL 0.5 mol/L 的 HCl 溶液萃取得到树脂磷(Resin-P);

(3)加入 30 mL 0.5 mol/L 的 NaHCO₃调节 pH 到 8.5,振荡 16 h 后放入离心机离心,再添加 9 mol/L 的浓硫酸(H₂SO₄)和 0.5 g 过硫酸钾(K₂S₂O₈)萃取得到碳酸氢钠无机磷(NaHCO₃-Pi)与碳酸氢钠有机磷(NaHCO₃-Po);

(4)分 2 次加入 30 mL 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液,一份直接振荡 16 h 离心后添加 9 mol/L 的浓硫酸和 0.5 g 过硫酸钾(K₂S₂O₈)萃取,得到氢氧化钠无机磷(NaOH-Pi)和氢氧化钠有机磷(NaOH-Po);另一份经过超声波处理加工后同样振荡 16 h 后,再滴入浓硫酸与过硫酸钾溶液萃取得到氢氧化钠超声波无机磷(NaOHs-Pi)与氢氧化钠超声波有机磷(NaOHs-Po);

(5)继续加入 30 mL 1 mol/L 的 HCl 溶液振荡 16 h 离心后滴入浓硫酸与过硫酸钾溶液萃取得到盐

酸磷(HCl—P₀);

(6)最后的“残余”组分,加入 5 mL 高氯酸—硫酸(HClO₄—H₂SO₄)在 360 °C 下消煮得到残余磷(Residual—P)。

1.5 数据处理与分析

土壤团聚体平均质量直径(MWD, mm)、土壤团聚体平均几何直径(GMD, mm)及土壤分形维数(D)以表征土壤团聚体稳定性^[10],计算公式为:

$$NWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times W_i \quad (1)$$

$$GMD = \text{Exp} \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \ln \bar{X}_i}{m} \quad (2)$$

$$\lg \frac{m(r \leq \bar{R}_i)}{M_i} = (3 - D) \lg \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \quad (3)$$

式中: \bar{X}_i 为*i*级(土壤任意 1 个粒径范围内)团聚体的平均直径(mm); W_i 为对应的 X_i 的土壤团聚体重量百分含量; m 为土壤的样品总质量。 \bar{R}_i 为某粒径土壤团聚体的平均直径; $m(r \leq \bar{R}_i)$ 为粒径小于 \bar{R}_i 的土壤团

聚体质量,采用线性回归方程计算得到 D 的指数。

在本次试验数据处理中,使用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件对所得数据进行统计分析;采用单因素方差分析对同粒径不同处理和同处理不同粒径下差异进行显著性检验,显著水平为 0.05,用 LSD 法进行多重比较;用 Person 相关分析土壤磷组分与有机碳之间的相关性;利用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质与土壤团聚体分布及其稳定性变化

由表 1 可知,不同氮磷添加处理对常绿阔叶林的土壤基本理化性质影响显著性不同。其中 P₀ 处理下,N 添加显著提高分形维数(D)及全氮含量,显著降低土壤 pH,同时 N 添加还显著提高大团聚体的占比,减少小团聚体的占比($p < 0.05$)。

P₅₀ 处理下,N 添加对显著提高土壤含水率与 GMD($p < 0.05$),同时显著增加大团聚体占比,减少小团聚体占比(表 1)。在 P₅₀ 处理下,氮添加同样也对土壤微团聚体和黏、粉粒含量及 MWD 无显著影响($p > 0.05$)。

表 1 不同氮磷添加处理下常绿阔叶林的土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil in evergreen broad-leaved forests under different nitrogen and phosphorus addition treatments

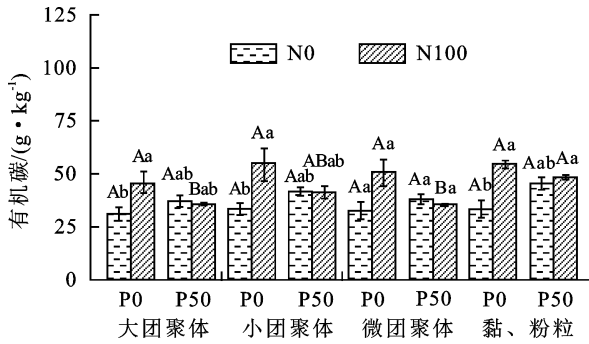
变量	P ₀		P ₅₀	
	N ₀	N ₁₀₀	N ₀	N ₁₀₀
含水率/%	0.42±0.01b	0.44±0.04ab	0.40±0.03b	0.54±0.01a
容重/(g·cm ⁻³)	0.96±0.14a	0.88±0.13a	1.00±0.16a	0.90±0.13a
总孔隙度/%	0.59±0.05a	0.63±0.05a	0.62±0.05a	0.68±0.06a
毛孔孔隙度/%	0.56±0.06a	0.60±0.05a	0.58±0.06a	0.57±0.08a
非毛孔孔隙/%	0.03±0.01a	0.03±0a	0.04±0.01a	0.11±0.04a
大团聚体占比/%	64.19±3.16c	75.28±1.64ab	69.14±1.56bc	80.81±0.43a
小团聚体占比/%	30.00±2.12a	20.28±2.25bc	25.62±1.35ab	15.68±0.36c
微团聚体占比/%	5.09±0.94a	3.62±0.83a	4.71±0.70a	3.09±0.04a
黏、粉粒占比/%	0.72±0.27a	0.82±0.36a	0.53±0.09a	0.43±0.11a
MWD/mm	1.69±0.03a	1.71±0.02a	1.17±0.03a	1.79±0.01a
GMD/mm	1.50±0.01b	1.52±0.02b	1.54±0.03b	1.64±0.01a
D	36.57±0.29b	55.17±5.31a	42.95±0.24ab	51.12±5.22ab
酸碱度	4.48±0.05ab	4.26±0.06b	4.65±0.09a	4.32±0.11ab
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.31±0.06a	0.35±0.09a	0.68±0.15a	0.61±0.05a
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.10±0.07b	1.44±0.07a	1.16±0.05ab	1.21±0.07ab

注:表中数据为平均值±标准差;MWD 为土壤团聚体平均重量直径;GMD 为土壤团聚体平均几何直径; D 为分形维数。不同的小写字母代表同粒径团聚体中不同养分处理之间的差异($p < 0.05$)。下同。

2.2 土壤团聚体有机碳与磷组分

2.2.1 土壤团聚体有机碳含量 不同氮磷添加处理对常绿阔叶林不同粒径土壤团聚体有机碳(SOC)含量的影响显著性不同(图 1)。P₀ 处理下,N 添加显著增加大团聚体、小团聚体及黏、粉粒的 SOC 含量($p < 0.05$),但在微团聚体(0.053~0.25 mm)中,外源氮磷输

入对 SOC 含量无显著影响($p > 0.05$)。P₅₀ 处理下,N 添加显著降低黏、粉粒中 SOC 含量($p < 0.05$),对大团聚体、小团聚体和微团聚体中 SOC 含量无显著影响($p > 0.05$)。由此可见,氮磷添加显著提高土壤团聚体 SOC 含量,N 添加处理对提升土壤肥力效果最佳,说明养分添加对 SOC 的固定有着促进作用。



注:不同小写字母表示同一粒径下不同养分添加之间的差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示同一养分添加下不同粒径之间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 氮磷添加对不同粒径中土壤团聚体有机碳含量的影响
Fig. 1 The effect of nitrogen and phosphorus addition on the organic carbon content of soil aggregates in different particle sizes

2.2.2 不同粒径团聚体中磷组分含量与碳磷比 不同氮磷添加和粒径对土壤团聚体磷组分含量、团聚体

有机碳及碳磷比有显著影响(表 2)。

磷输入显著影响土壤团聚体磷组分含量及碳磷比,但对难分解态磷组分无显著影响($p > 0.05$);氮添加显著影响 SOC 与碳磷比,但对全磷和中等易分解态磷组分无显著影响($p > 0.05$);粒径显著影响 SOC 和磷组分含量,但对易分解态磷和碳磷比无显著影响($p > 0.05$);三者交互作用对土壤团聚体磷组分、SOC 以碳磷比无显著影响($p > 0.05$)。

P0 处理下,N 添加显著降低团聚体易分解态磷含量,其中在黏、粉粒中降幅最大(图 2b);土壤团聚体难分解态磷含量较为稳定不受氮磷添加影响($p > 0.05$)(图 2d);P50 处理下,N 添加显著提高全磷、易分解态磷及土壤中易分解态磷含量(图 2b-c);土壤团聚体难分解态磷含量较为稳定,不受氮磷添加影响($p > 0.05$)(图 2d)。

表 2 磷输入、氮添加和团聚体粒径对土壤有机碳、磷组分和碳氮比影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance on the effects of phosphorus input, nitrogen addition, and aggregate particle size on soil organic carbon, phosphorus components, and carbon nitrogen ratio

变量	磷输入	氮添加	粒径	磷输入×氮添加	磷输入×粒径	氮添加×粒径	磷输入×氮添加×粒径
SOC	0.75 ^{ns}	24.85 ^{***}	3.75 [*]	26.99 ^{***}	0.81 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.09 ^{ns}
TP	153.23 ^{***}	0.19 ^{ns}	5.73 ^{**}	0.43 ^{ns}	1.42 ^{ns}	0.36 ^{ns}	1.22 ^{ns}
LP	109.14 ^{***}	10.21 ^{**}	2.47 ^{ns}	0.51 ^{ns}	1.16 ^{ns}	4.59 ^{**}	2.44 ^{ns}
MLP	139.36 ^{***}	0.01 ^{ns}	3.34 [*]	0.53 ^{ns}	1.03 ^{ns}	0.53 ^{ns}	1.32 ^{ns}
RP	2.30 ^{ns}	7.64 ^{**}	7.02 ^{***}	0.07 ^{ns}	0.67 ^{ns}	1.12 ^{ns}	0.19 ^{ns}
SOC/TP	69.67 ^{***}	22.29 ^{***}	0.81 ^{ns}	31.67 ^{***}	0.63 ^{ns}	0.45 ^{ns}	0.44 ^{ns}
SOC/LP	74.25 ^{***}	41.59 ^{***}	1.63 ^{ns}	35.95 ^{***}	1.39 ^{ns}	3.68 [*]	1.50 ^{ns}
SOC/MLP	91.04 ^{***}	18.93 ^{***}	0.23 ^{ns}	28.11 ^{***}	0.88 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.58 ^{ns}
SOC/RP	1.44 ^{ns}	6.06 [*]	3.61 [*]	17.60 ^{***}	0.32 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.42 ^{ns}

注:SOC 为有机碳(g/kg);TP 为全磷(mg/kg);LP 为易分解态磷(mg/kg);MLP 为中等易分解态磷(mg/kg);RP 为难分解态磷(mg/kg);ns 表示 $p > 0.05$; * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; *** 表示 $p < 0.001$ 。

2.2.3 不同粒径团聚体碳磷比 不同氮磷添加处理对各粒径团聚体碳磷比影响显著(图 3)。P0 处理下,N 添加均显著提高大、小和微团聚体中有机碳与各磷组分的碳磷比和黏、粉粒中有机碳与难分解态磷的碳磷比($p < 0.05$);P50 处理下,N 添加显著降低大团聚体中有机碳与全磷的碳磷比($p < 0.05$);显著降低小团聚体中有机碳与易分解态磷的碳磷比($p < 0.05$);对各粒径有机碳与中等易分解态磷的碳磷比和有机碳与难分解态磷的碳磷比无显著影响($p > 0.05$)。

2.2.4 土壤团聚体碳磷相关关系 根据 Person 相关分析(表 3)可知,土壤团聚体各磷组分和碳磷比与 SOC 之间存在一定关联。在 P0 处理下,难分解态磷与有机碳呈显著正相关($p < 0.05$),各碳磷比与有机碳呈显著正相关($p < 0.05$);在 P50 处理下,有机碳与全磷的碳磷比以及有机碳与难分解态磷的碳磷比

呈显著正相关($p < 0.05$),与其余磷组分以及碳磷比无显著相关($p > 0.05$)。

3 讨论

3.1 氮磷输入对团聚体粒径分布及其稳定性的影响

团聚体稳定性与土壤养分关系密切,有机质是土壤养分的重要来源^[22]。本研究中,在 P0 处理下,N 添加提升土壤大团聚体的含量,减少土壤小团聚体的含量。这可能是因为:第一,N 添加降低土壤微生物量并影响土壤微生物活动^[23],抑制病毒、噬菌体的吸附代谢有机质活动,减少小团聚体的形成,加速丛枝菌根真菌和放线菌等微生物的菌丝活动,将土壤颗粒彼此机械地缠绕在一起而聚集形成大团聚体,增加大团聚体的含量^[10];第二,N 添加后土壤团聚体瞬时发生胶结反应,将小团聚体和复合结构单元体聚合形成新的大团聚体^[24],增加大团聚体的含量,抑制小团聚

体内有机质的分解,并缓解其进一步的运行周转,有利于大团聚体的形成^[25];第三,有研究^[26-27]表明,外源氮素的添加提高土壤微生物生物量碳和微生物残体的积累,N添加总体效应显著提高真菌(葡萄糖胺)和细菌(胞壁酸、半乳糖胺)残体量,N添加下,活跃的微生物生物量增加氨基糖含量,更有利于真菌残体量的积累从而形成大团聚体^[27-28]。但 N 添加对微土壤团聚体和黏、粉粒含量及 GMD、MWD 无显著影响,

一方面是因为黏粒表面并不是有机质的主要吸附位点,且黏粒含量与团聚体粒级分布之间的相关性有限^[29],与本研究结果一致;另一方面,可能是因为 N 添加降低土壤 pH,提高矿物对腐殖酸的吸附量同时促进含铁、铝氧化物矿物溶解,导致 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 浓度增加,阳离子容易在黏土矿物和有机分子中形成稳健结构,所以土壤中的阳离子浓度增加促进团聚体的形成^[24]。

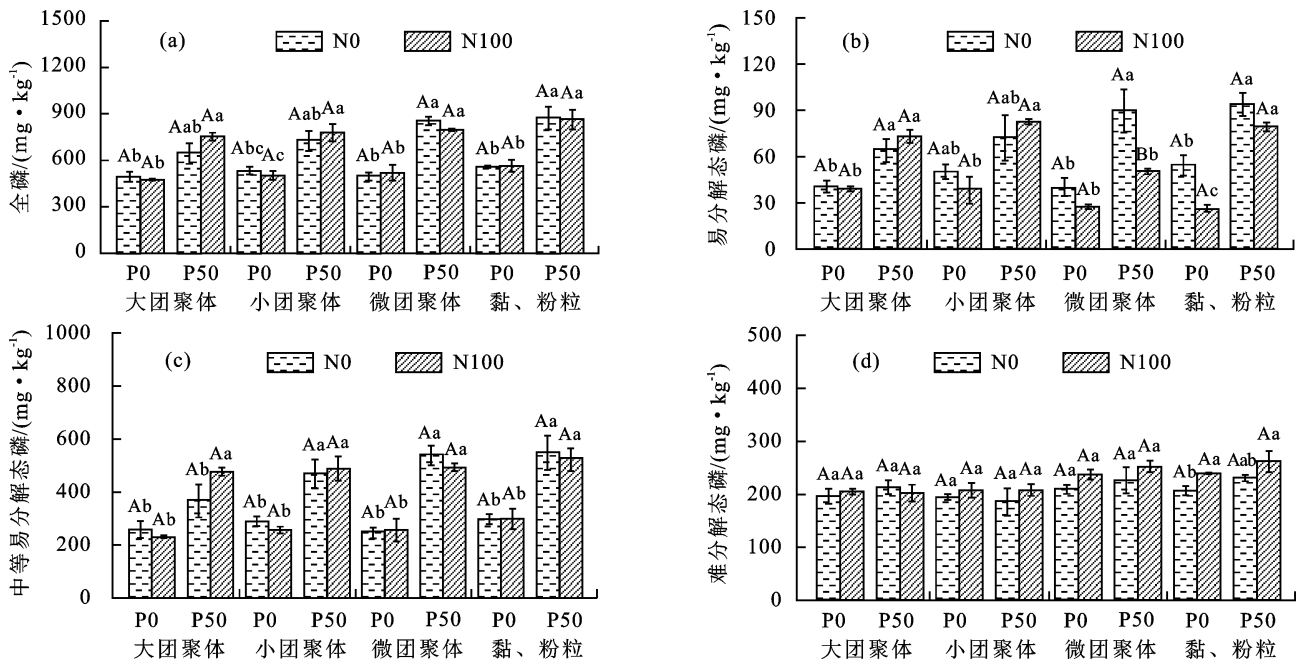


图 2 氮磷添加对各粒径土壤团聚体不同磷组分含量的影响

Fig. 2 The effect of nitrogen and phosphorus addition on the content of different phosphorus components in soil aggregates of different particle sizes

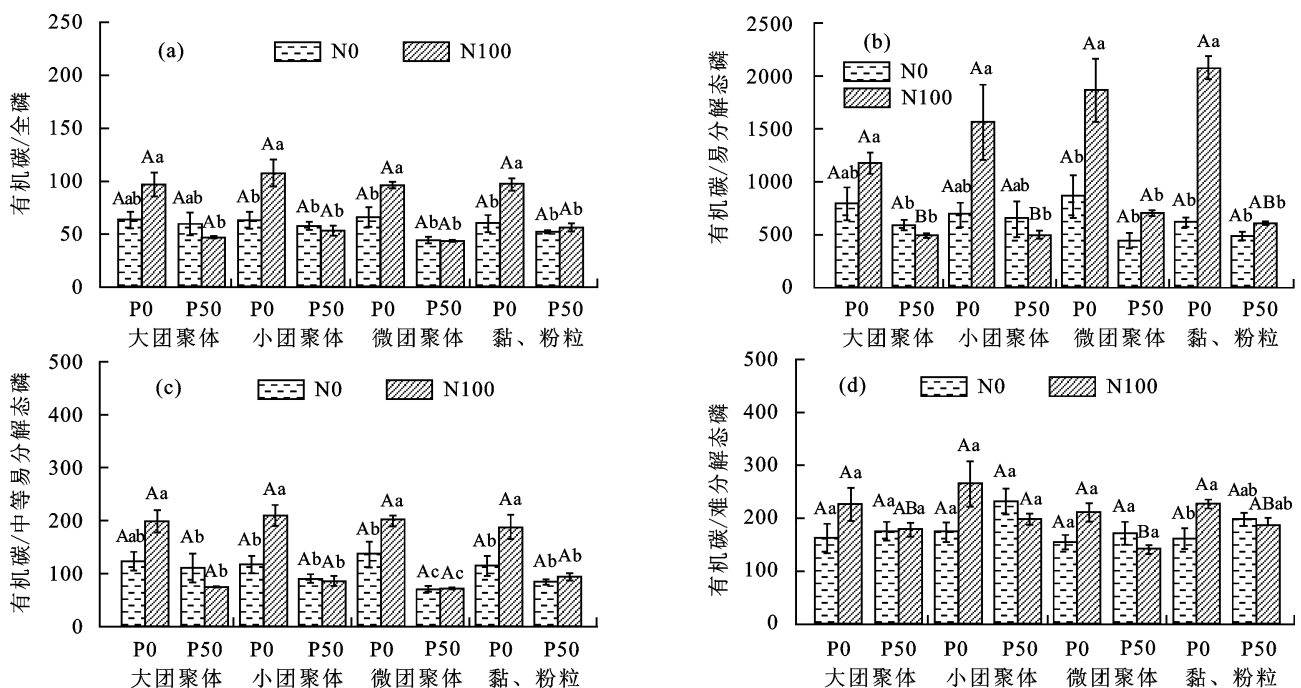


图 3 氮磷添加对各粒径土壤团聚体碳磷比的影响

Fig. 3 The effect of nitrogen and phosphorus addition on the carbon phosphorus ratio of soil aggregates with different particle sizes

表 3 有无磷输入下土壤团聚体磷组分与有机碳及碳磷比相关性分析

Table 3 The effect of nitrogen and phosphorus addition on the carbon phosphorus ratio of soil aggregates with different particle sizes

变量	P0	P50
易分解态磷	-0.387 ^{ns}	0.347 ^{ns}
中等易分解态磷	0.108 ^{ns}	0.311 ^{ns}
难分解态磷	0.442 [*]	0.249 ^{ns}
全磷	0.183 ^{ns}	0.389 ^{ns}
有机碳/易分解态磷	0.780 ^{**}	0.131 ^{ns}
有机碳/中等易分解态磷	0.826 ^{**}	0.330 ^{ns}
有机碳/难分解态磷	0.922 ^{**}	0.463 [*]
有机碳/全磷	0.923 ^{**}	0.470 [*]

注:ns 表示 $p > 0.05$; * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

也有研究^[30]表明,在 P 输入处理下,由于不稳定的 SOC 积累可能加速土壤小团聚体发生胶结反应,聚集形成土壤大团聚体,从而提高土壤团聚体稳定性,这与本研究结果相反。本试验在 P50 处理下,氮添加对 GMD、MWD 也无显著影响,造成这个结果的原因可能是外源磷的输入促进植物根系及部分微生物对无机氮的同化吸收^[10],在一定程度上改变氮添加对土壤团聚体粒径稳定性的影响。SUN 等^[29]研究也发现,短期的磷输入对 GMD 无显著影响,这种有机质的增加在短期内并不会对团聚体的稳定性产生影响,土壤团聚体稳定性改变可能受制于养分添加处理的时间、试验土壤类型或是森林植被类型等因素影响^[7]。综上所述,低磷环境下,氮添加促进土壤真菌菌丝对团聚体的吸附聚合利于大团聚体的形成,长期可促进团聚体结构更稳定;有外源磷输入时,N 添加对团聚体粒径分布及稳定性的影响。

3.2 氮磷输入对土壤团聚体有机碳的影响

本研究中,在 P0 处理下,N 添加显著提高各粒径团聚体 SOC 含量。这可能是因为:(1)氮素输入减少植物根系、菌丝与土壤团聚体的接触,有利于土壤团聚体的保护及抑制土壤动物的分解活动,从而积累 SOC^[31];(2)氮素输入降低土壤 pH,增加土壤 NH_4^+ 含量,促使土壤酸化,使土壤微生物遭受游离态的 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 的毒害,从而抑制 SOC 被其分解和利用^[32];(3)氮素的输入也直接与土壤团聚体 SOC 发生缩合反应,增加团聚体 SOC 的抗降解性,从而积累 SOC^[33]。也有一些研究^[34]发现,N 添加促进高山苔原和热带森林土壤中稳定性碳组分,这可能是因为 N 添加能够促进微生物分解植物残体转化,增加 SOC 含量,或是因为植物残体的有机质与矿质 N 进行缩合反应后,使其进入矿物结合态的土壤碳组分中,从而增加土壤 SOC 含量^[35]。

然而,在 P50 处理下,黏粒、粉粒 SOC 含量显著高于其他粒径团聚体,这说明 P 输入提高黏粒、粉粒 SOC,这与宋晶晶等^[36]的研究结果一致。黏粒、粉粒在各粒级中有最大的比表面积,具有较强的吸附能力,且 P 输入促进 SOC 与黏粒、粉粒矿物的结合作用,并进一步说明,养分添加下有机矿物结合体的物化保护对 SOC 的固存十分重要^[37]。另外,磷输入加强土壤微生物的活性,并提高其代谢活动,促使微生物代谢产物的增加,从而产生有机矿物结合体的积累^[38]。同时,土壤中铁铝氧化物对有机质吸附沉淀作用更易发生在粒径较小的团聚体上,也促使黏粒、粉粒 SOC 含量提高,从而增加有机碳含量^[39]。综上所述,氮添加磷输入都促进土壤团聚体 SOC 的增加。N 添加对土壤团聚体 SOC 的促进作用是 N 添加增加碳输入,并同时降低碳输出,而 P 输入对土壤团聚体 SOC 的促进作用可能是 P 输入促进碳输入,限制生物分解,从而积累 SOC^[39-40]。

3.3 氮磷输入下有机碳对土壤团聚体磷组分及对碳磷比的影响

本研究中,P0 处理下,N 添加显著降低黏粒、粉粒中易分解态磷含量,而提高难分解态磷含量,且均显著提高各磷组分的碳磷比。形成这样的结果一方面可能是因为 N 添加导致土壤 pH 显著降低,从而加速土壤易分解态磷组分有机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)的矿化易被植物的吸收利用;有研究^[41]表明, $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 不是施肥添加可直接改变的磷组分,无机化肥的添加导致其与土壤 Po 的竞争,产生微溶的 Al、Fe 化合物,从而减少 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 的积累;另一方面,是因为酸性土壤中土壤有效磷增加与可交换铝离子(Al^{3+})和铁离子(Fe^{3+})结合形成更稳定的磷^[42]。由于土壤磷限制,短时间内土壤有效磷被植物和微生物利用,而长期的氮添加导致土壤中 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 吸附和固定作用降低,从而导致易分解态磷中有效磷成分(Resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$)质量分数降低,从而减少团聚体易分解态磷含量^[42-43]。另外,N 添加显著增加土壤团聚体难分解态磷含量,可能是因为 N 添加增加植物根系生物量,增强根系对无机磷的拦截作用,加剧土壤磷的转化,显著增加土壤酸性磷酸酶的产量和活性^[43],从而提高磷的生物有效性和有效磷的质量分数,促使难分解态磷含量增加。而且良好的土壤团聚结构,有利于团聚体难分解态磷的保存及各组分磷的转化^[42-43]。

本试验结果还显示,P50 处理下,N 添加对微团聚体和黏粒、粉粒中易分解态磷组分与中等易分解磷组分影响显著高于其他粒径土壤团聚体,且仅在黏粒、粉粒中有机碳与难分解态磷的碳磷比呈现增加趋

势。这主要有 3 个原因:(1)施磷肥可以有效缓解土壤磷素亏缺,且磷输入可以增加各粒径团聚体有效磷含量,利于易分解态磷组分积累,尤其在 <0.25 mm(微团聚体和黏粒、粉粒)的团聚体部分占比最大^[10];(2)以往的研究^[44]发现,黏粒、粉粒优先吸附由外输入的无机磷,即磷肥进入土壤后首先被黏粒、粉粒所吸附和固定。TISDALL 等^[45]提出的团聚体层次模型也说明,黏粒、粉粒是构成更大团聚体的基本单元,各团聚体磷组分在黏粒、粉粒中聚集,并随着团聚体粒径增大而降低;(3)还可能是因为施用无机磷肥导致土壤易分解态磷大量释放,直接增加土壤团聚体易分解态磷含量,这与金欣等^[46]的研究结果一致。

综上所述,N 添加主要促使易分解态磷向难分解态磷的转化,减弱铁铝化合物的吸附作用,增加土壤有机磷含量从而积累有机碳;而 P 输入则更主要是发挥较小粒径对有机质的吸附聚合,缓解氮添加带来的负面效应,提高磷的有效性,促使土壤有机质的固存。

3.4 土壤团聚体碳磷相关关系

本研究发现,土壤团聚体 C 与 P 存在相关关系。P0 处理下,土壤团聚体有机碳与难分解态磷及各磷组分碳磷比均存在相关性。产生的原因可能是 N 添加改善土壤团聚结构,增高土壤团聚体分形维数(D),从而有利于土壤团聚体难分解态磷的保存。这是由于难分解态磷的降低需要依靠微生物的分解作用,然而更好的土壤团聚结构阻止微生物与难分解态 P 的接触^[47],从而有利于难分解态磷的固存,加之 N 添加加速土壤团聚体有效磷的转化,抑制微生物活动,增加 SOC 含量,从而影响碳磷比。

在 P50 处理下,土壤团聚体有机碳与难分解态磷和全磷的碳磷比存在相关性。产生这样的结果可能是因为:(1)矿化土壤 SOC 富含磷,SOC 在土壤中储存也导致大量有机磷的固存,使地区的磷受限制^[15],而外源磷的输入能够有效缓解土壤磷限制,补足植物正常生长所需有效磷,促进森林植物的光合作用,增加生物量,转化更多生物体内的碳水化合物微 CO₂,从而促进养分循环积累有机碳^[7];(2)BARBERIS 等^[48]研究结果表明,黏粒、粉粒团聚体易与土壤中的铁铝阳离子吸附结合,沉淀积累有机质,与本研究结果一致;(3)在外源磷输入情况下显著增加土全磷总含量,加强黏粒、粉粒对土壤有机质的吸附作用,积累更多的 SOC^[49],且磷素输入加速微生物活动,破坏大粒径团聚体形成较小粒径团聚体,增加 <0.25 mm(微团聚体和黏粒、粉粒)的团聚体的含量^[50],同时促使土壤微生物矿化,有机磷转化为易溶解的磷酸盐后易被植物根系所吸收,最后在植物体内进行代谢活动,又通过植物凋落物腐殖质的形式或是

植物释放,从而积累 SOC^[42]。综上所述,森林土壤 C、P 的变化是由各粒径团聚体共同承担的,土壤团聚体磷组分与土壤有机碳之间密切相关。

4 结论

在不同土壤磷供应下,氮添加对常绿阔叶林不同粒径土壤团聚体 SOC 含量的影响有所不同:无磷添加处理下,氮添加通过提高常绿阔叶林土壤团聚体黏粒、粉粒径中难分解态磷含量占比,增加对土壤有机碳的固持;有磷添加处理下,氮沉降对各粒径团聚体中有机碳含量的影响,可能受到植物根系、菌丝或是微生物活动等因素的调节。总体上,氮添加对常绿阔叶林土壤团聚体中有机碳含量的影响受到土壤磷供应的调控作用,该研究结果为森林土壤养分循环应对全球大气 N 沉降变化提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 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.
CHEN X F, LIU J, JIANG P K, et al. Effects of nitrogen deposition on soil biochemical properties and enzymes activities in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(5):277-284.
- [2] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J].Nature,2013,494:459-462.
- [3] LIU L, ZHANG T, GILLIAM F S, et al. Interactive effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial communities in a tropical forest[J].PLoS One,2013,8(4):e61188.
- [4] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J].Ecological Applications,2010,20(1):5-15.
- [5] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J].Global Biogeochemical Cycles,1995,9(1):23-36.
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J].Science,2004,304(5677):1623-1627.
- [7] 吕思扬,宋思意,黎蕴洁,等.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.
LU S Y, SONG S Y, LI Y J, et al. 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[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):277-287.
- [8] DÁ-AZ-ZORITA M. Disruptive methods for assessing soil structure[J].Soil and Tillage Research,2002,64(1/

- 2);3-22.
- [9] EGAN G, CRAWLEY M J, FORNARA D A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 810-819.
- [10] 凌小莉, 史宝库, 崔海莹, 等. 氮磷添加对松嫩草地土壤团聚体结构及其碳含量的影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 54-63.
LING X L, SHI B K, CUI H Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil aggregates structure and carbon content in Songnen grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(2): 54-63.
- [11] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 129-135.
LIU W L, WU J G, FU M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 129-135.
- [12] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528: 60-68.
- [13] 曹升, 胡华英, 张虹, 等. 我国南方人工林土壤有效磷匮乏原因及对策分析[J]. *世界林业研究*, 2019, 32(3): 78-84.
CAO S, HU H Y, ZHANG H, et al. Causes and countermeasures of plantation soil available phosphorus deficiency in southern China[J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(3): 78-84.
- [14] 叶学敏. 常绿阔叶林主要树种叶性状的树木生长对氮磷添加的响应[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
YE X M. The response of leaf traits and tree growth to nitrogen and phosphorus additions in a subtropical broadleaved evergreen forest [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019.
- [15] SPOHN M. Increasing the organic carbon stocks in mineral soils sequesters large amounts of phosphorus[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(8): 4169-4177.
- [16] FENG J G, SONG Y J, ZHU B. Ecosystem-dependent responses of soil carbon storage to phosphorus enrichment [J]. *The New Phytologist*, 2023, 238(6): 2363-2374.
- [17] ZHANG J F, ZHOU J G, LAMBERS H, et al. Nitrogen and phosphorus addition exerted different influences on litter and soil carbon release in a tropical forest[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 832: e155049.
- [18] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [19] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 274-281, 290.
XIE J Y, CAO H B, MENG H S, et al. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 274-281, 290.
- [20] ZHANG Y Q, BHATTACHARYYA R, DALAL R C, et al. Impact of land use change and soil type on total phosphorus and its fractions in soil aggregates[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(7): 828-841.
- [21] 刘斌. 氮磷添加对亚热带次生阔叶林树木生长性状的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
LIU B. Impacts of nitrogen and phosphorus addition on tree growth traits in subtropical secondary broadleaved forest[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [22] 张庆费, 由文辉, 宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 19-22.
ZHANG Q F, YOU W H, SONG Y C. Effects of Tiantong plant community succession on soil chemical properties in Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 19-22.
- [23] WANG C, LIU D W, BAI E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 126-133.
- [24] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627-643.
LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643.
- [25] HU G Q, ZHAO Y, LIU X, et al. Comparing microbial transformation of maize residue-N and fertilizer-N in soil using amino sugar-specific ¹⁵N analysis[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(2): 252-264.
- [26] 霍海南, 李杰, 张效琛, 等. 不同施肥管理措施对农田土壤中植物和微生物残留组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3060-3066.
HUO H N, LI J, ZHANG X C, et al. Effects of different fertilization managements on microbial necromass and plant lignin accumulation in a Mollisol[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3060-3066.
- [27] HU J X, HUANG C D, ZHOU S X, et al. Nitrogen addition increases microbial necromass in croplands and bacterial necromass in forests: A global meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: e108500.
- [28] 马南, 安婷婷, 张久明, 等. 添加玉米秸秆和根茬对不同肥力黑土微生物残体碳氮的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(4): 686-696.
MA N, AN T T, ZHANG J M, et al. Effects of maize shoot and root residues added on microbial residue carbon and nitrogen in different fertility levels of black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(4): 686-696.
- [29] SUN L P, JING H, WANG G L, et al. Nitrogen addi-

- tion increases the contents of glomalin-related soil protein and soil organic carbon but retains aggregate stability in a *Pinus tabulaeformis* forest[J].PeerJ,2018,6;ee5039.
- [30] ZHANG H J, DING W X, YU H Y, et al. Linking organic carbon accumulation to microbial community dynamics in a sandy loam soil: Result of 20years compost and inorganic fertilizers repeated application experiment [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51 (2):137-150.
- [31] YE C L, CHEN D M, HALL S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: Plant, microbial and geochemical controls[J].Ecology Letters,2018,21(8):1162-1173.
- [32] FENG J G, ZHU B. Global patterns and associated drivers of priming effect in response to nutrient addition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 153; e108118.
- [33] JANSSENS I A, DIELEMAN W, LUYSSAERT S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J].Nature Geoscience,2010,3:315-322.
- [34] CUSACK D F, SILVER W L, TORN M S, et al. Effects of nitrogen additions on above- and below-ground carbon dynamics in two tropical forests[J].Biogeochemistry,2011,104(1):203-225.
- [35] LUO R Y, KUZYAKOV Y, LIU D Y, et al. Nutrient addition reduces carbon sequestration in a Tibetan grassland soil: Disentangling microbial and physical controls[J].Soil Biology and Biochemistry, 2020, 144; e107764.
- [36] 宋晶晶.氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[D].上海:华东师范大学,2020.
- SONG J J. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a subtropical evergreen broad-leaved forest [D]. Shanghai: East China Normal University,2020.
- [37] NEFF J C, TOWNSEND A R, GLEIXNER G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J].Nature,2002,419:915-917.
- [38] CENINI V L, FORNARA D A, MCMULLAN G, et al. Chronic nitrogen fertilization and carbon sequestration in grassland soils: Evidence of a microbial enzyme link[J].Biogeochemistry,2015,126(3):301-313.
- [39] FENG J G, ZHU B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J].Soil Biology and Biochemistry,2019,135:38-47.
- [40] YUE K, FORNARA D A, YANG W Q, et al. Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: Additive effects are common[J].Ecology Letters,2017,20(5):663-672.
- [41] 杨学云,孙本华,古巧珍,等.长期施肥对壤土磷素状况的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(4):837-842.
- YANG X Y, SUN B H, GU Q Z, et al. The effects of long term fertilization on soil phosphorus status in natural loessial soil[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2009,15(4):837-842.
- [42] 冯继广,张秋芳,袁霞,等.氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J].植物生态学报,2022,46(8):855-870.
- FENG J G, ZHANG Q F, YUAN X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon: Review and prospects[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2022,46(8):855-870.
- [43] 王艺雄,张华锋,李全,等.氮添加对毛竹林土壤磷组分的影响[J].杭州:浙江农林大学学报,2022,39(4):695-704.
- WANG Y X, ZHANG H F, LI Q, et al. Effect of nitrogen addition on soil phosphorus fractions in the *Phyllostachys edulis* plantation[J].Journal of Zhejiang A&F University,2022,39(4):695-704.
- [44] AHMED E H, ANJUM S I, ZHANG M K. Effects of fertilization on phosphorus distribution in water-stable aggregates of soils with different properties[J].Toxicological and Environmental Chemistry, 2017, 99 (1): 32-47.
- [45] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2):141-163.
- [46] 金欣.长期施肥和土壤管理对壤土磷形态分布及有效性的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- JIN X. Effects of long-term fertilization and soil management on phosphorus fraction's distribution and availability on Loess Soil[D].Yangling, Shaaxi: Northwest A&F University,2021.
- [47] ZHANG D N, ZHAO Y H, WU J S. Assessment of carbon balance attribution and carbon storage potential in China's terrestrial ecosystem [J].Resources, Conservation and Recycling,2023,189:e106748.
- [48] BARBERIS E, MARSAN F A, BOERO V, et al. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons[J].Journal of Soil Science, 1991, 42(4):535-542.
- [49] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2007, 10 (12):1135-1142.
- [50] 周念清,吴延浩,蔡奕,等.湿地关键带中磷与氮、碳循环联动耦合机制[J].地球科学与环境学报,2022,44(1):91-101.
- ZHOU N Q, WU Y H, CAI Y, et al. Coupling mechanism of phosphorus and nitrogen, carbon cycles in critical zone of wetland [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2022,44(1):91-101.