

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.05.014

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.05.014

王萍秀,张天海,郑志宇,等.常绿阔叶林土壤团聚体磷组分和有机碳化学分子结构对氮磷添加的响应[J].水土保持学报,2025,39(5):197-208.

WANG Pingxiu, ZHANG Tianhai, ZHENG Zhiyu, et al. Response of phosphorus components and organic carbon molecular structures in soil aggregates to nitrogen and phosphorus additions in evergreen broad-leaved forests[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5):197-208.

常绿阔叶林土壤团聚体磷组分和有机碳 化学分子结构对氮磷添加的响应

王萍秀^{1,2}, 张天海³, 郑志宇⁴, 刘俏^{1,2}, 王方超^{1,2}, 陈伏生^{1,2}, 祖奎玲^{1,2}

(1. 江西农业大学林学院亚热带森林资源培育江西省重点实验室,南昌 330045; 2. 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; 3. 德兴市林业局森林资源保护中心,江西 上饶 334200; 4. 江西省林业资源监测中心,南昌 330046)

摘要: [目的] 为揭示亚热带常绿阔叶林氮磷(N、P)添加对土壤团聚体碳的影响及其内在机制,掌握亚热带常绿阔叶林中土壤有机碳的稳定性及生态系统碳循环规律。 [方法] 在常绿阔叶林布设长达 6 a 的 N、P 添加试验平台[对照, 100 kg/(hm²·a)(以 N 计), 50 kg/(hm²·a)(以 P 计), 100 kg/(hm²·a)(以 N 计)+50 kg/(hm²·a)(以 P 计)], 分析土壤团聚体粒径分级、磷组分和有机碳化学分子结构组成, 探究不同粒径土壤有机碳对 N 沉降和 P 添加的响应。 [结果] N 添加处理显著提高大团聚体(>2 mm)和黏、粉粒(<0.053 mm) SOC 质量分数, 显著降低大团聚体(>2 mm)和小团聚体(0.25~2 mm)土壤有机碳分解程度(SD)。氮磷(N+P)同施处理显著提高大团聚体(>2 mm)中多糖和醇酚质量分数, 显著降低小团聚体(0.25~2 mm) SD, 显著提高除微团聚体(0.25~0.053 mm)以外的各粒径土壤易分解态磷中的树脂(Resin-P)质量分数。冗余分析表明, NaOHs-Pi 和残余磷分别是 >2 mm 团聚体和 <2 mm 团聚体化学分子结构主要驱动因子。 [结论] N 沉降增加难分解性磷, 从而提高土壤有机碳化学稳定性。

关键词: 氮磷添加; 土壤团聚体; 有机碳化学分子结构; 磷组分

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0197-12

Response of Phosphorus Components and Organic Carbon Molecular Structures in Soil Aggregates to Nitrogen and Phosphorus Additions in Evergreen Broad-leaved Forests

WANG Pingxiu^{1,2}, ZHANG Tianhai³, ZHENG Zhiyu⁴, LIU Qiao^{1,2},
WANG Fangchao^{1,2}, CHEN Fusheng^{1,2}, ZU Kuiling^{1,2}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Laboratory of Poyang Lake Basin Forest Ecosystem Protection and Restoration, National Forestry and Grassland Administration, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Forest Resources Protection Center, Dexing Forestry Bureau, Shangrao, Jiangxi 334200, China; 4. Jiangxi Forestry Resource Monitoring Center, Nanchang 330046, China)

Abstract: [Objective] To reveal the effect of nitrogen (N) and phosphorus (P) additions on soil aggregate carbon in subtropical evergreen broad-leaved forests. Understanding these effects is crucial for comprehending the stability of soil organic carbon (SOC) and the carbon cycle within these ecosystems. [Methods] A series of N and P addition test platforms were established in an evergreen broad-leaved forest for a duration of six years, including control, 100 kg/(hm²·a) of N, 50 kg/(hm²·a) of P, and a combination of 100 kg/(hm²·a) of N plus 50 kg/(hm²·a) of P.

收稿日期: 2025-01-06

修回日期: 2025-02-25

录用日期: 2025-03-12

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-10

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32301463); 江西省自然科学基金及面上基金项目(20224BAB213033, 20232BAB205023); 江西省保护生物学重点实验室开放基金项目(2023SSY02081)

第一作者: 王萍秀(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林培育及其相关研究。E-mail: wpx072399@163.com

通信作者: 祖奎玲(1991—), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事森林生态与水土保持研究。E-mail: kuiling010@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

The response of soil organic carbon across different particle sizes to nitrogen deposition and phosphorus addition was assessed through particle size grading analysis, phosphorus component analysis, and evaluation of the molecular structures of organic carbon. [Results] The addition of nitrogen significantly increased the SOC mass fraction in macro-aggregates (>2 mm) as well as in clay and silt particles (<0.053 mm). It also significantly reduced the degree of soil organic carbon decomposition (SD) in both macro-aggregates (>2 mm) and small aggregates (0.25~2 mm). The combined application of nitrogen and phosphorus (N+P) led to a significant increase in the mass fraction of polysaccharides, alcohols, and phenols in macro-aggregates (>2 mm). Additionally, it significantly decreased the SD in small aggregates (0.25~2 mm) and increased the mass fraction of resin (Resin-P) in labile phosphorus across various particle sizes, except in micro-aggregates (0.25~0.053 mm). Redundancy analysis indicated that NaOHs-Pi and residual phosphorus were the principal drivers influencing the molecular structure of aggregates larger than and smaller than 2 mm, respectively. [Conclusion] Nitrogen deposition enhances the accumulation of recalcitrant phosphorus, thereby improving the chemical stability of soil organic carbon.

Keywords: nitrogen and phosphorus additions; soil aggregates; molecular structures of organic carbon; phosphorus components

Received: 2025-01-06

Revised: 2025-02-25

Accepted: 2025-03-12

Online(www.cnki.net): 2025-06-10

在全球范围内,土壤中含有大量的碳(C),是大气中C质量分数的2倍,超过植被和大气中C质量分数的总和^[1]。森林土壤C库是陆地森林系统中最大的C库,以热带和亚热带森林为主,占全球森林C吸收量的55%。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的微小变化会对大气中CO₂浓度产生显著影响。而SOC对外部环境变化较为敏感。随着人类活动氮磷沉降日益加剧,改变森林土壤氮磷有效性。氮沉降的持续增加会对森林土壤C循环过程产生影响。有研究^[2]表明,氮(N)、磷(P)添加对SOC积累具有积极、中性和消极影响。适量的N素添加可缓解土壤与植被的N限制,促进植物生长,增加生态系统生产力,C、N、P循环密切耦合,N、P循环的扰动势必影响C循环,改变土壤C吸收能力,但目前土壤C库对氮磷沉降的响应还存在较大的不确定性,受到施肥方式、气候条件、土壤理化性质、植被类型等多方面因素的影响^[3-4]。因此,了解N、P添加对森林SOC稳定性的影响,对理解生态系统C循环有重要意义。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤养分稳定和保护的重要载体,影响土壤的物理、化学和生物学特性,它们的形成与SOC质量分数密切相关^[5]。土壤团聚体通过捕获碳、涂层和隔离作用等方式抑制微生物分解,为SOC提供物理保护。根据形成和稳定机制的不同,将土壤团聚体按粒径细分为大团聚体(>2 mm)、小团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)和黏、粉粒(<0.053 mm)。同时,团聚体也是储存SOC的主要场所,约有90%的SOC储存在土壤团聚体中^[6]。土壤有机碳的化学分

子结构抗性(难降解性)被认为是有机碳积累的重要机制^[7]。有研究^[8]表明,在土壤有机碳分解初期,尤其对于表层土壤,有机碳的难降解性起主导作用。有机碳的难降解性主要由进入土壤的植物残体本身的化学结构及其在土壤中的化学或生物化学过程等多种因素所决定。土壤黏粒组分抗分解烷基碳的质量分数显著高于其他颗粒组分,铁氧化物强烈吸附芳香结构的疏水性有机化合物,而对多糖等亲水性有机化合物的作用较弱的特点提高土壤有机碳的疏水性^[9]。与此同时,有研究^[10]利用¹³C核磁共振技术(NMR)分别对以高岭石和蒙脱石为主要矿物组成的土壤有机碳进行结构表征发现,矿物组成改变有机碳的分子结构,以蒙脱石为主的土壤中芳香化合物大量积累,从而提高有机碳的化学稳定性,这可能暗示有机碳的分子结构特征是土壤多个过程共同作用的结果。然而,过去研究中主要关注有机碳变化规律和机制,对于团聚体中有机碳化学分子结构变化关注较少。因此,探究亚热带地区常绿阔叶林氮磷添加下不同粒径土壤团聚体中化学分子结构组成的影响具有重要意义。

土壤有效性磷(P)与有机碳之间存在耦合关系。根据微生物和植物对P的利用程度,易分解态P组分(Resin-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po)被认为是活性P,是植物可直接利用的;而中等易分解态P组分(NaOH-Pi、NaOH-Po)可在缺氧条件下转化为植物可直接利用P组分,是土壤P供应的重要来源;难分解态P组分(NaOHs-Pi、NaOHs-Po、HCl-P、Residual-P)需通过数千年甚至更久才可以转化为溶解P,较难被植物所吸收利用。P是植物生长的必需元素,是土

壤生化反应的关键参与者,容易被土壤颗粒和矿物质吸附和固定^[11]。以往研究^[12]表明,具有高比表面积和丰富活性位点的金属氧化物能强烈吸附P,P通过与SOC竞争氧化物表面的结合位点,提高SOC的生物利用度。因此,土壤微生物对有机碳的可利用性增加,反过来又降低有机碳浓度,并改变有机碳在团聚体中的分布和团聚体的稳定性。因此,N、P添加如何改变土壤团聚体P组分调节土壤SOC化学分子结构尚不明确。

常绿阔叶林是亚热带的地带性植被,是东亚地区发育最为典型的植被类型^[13]。本研究连续6 a开展N、P添加试验,旨在揭示不同粒径土壤团聚体有机碳化学分子结构对N、P添加的响应,并阐明C、P耦合机制,以期理解N沉降受P限制的背景下亚热带常绿阔叶林土壤C固存提供支持。因此,提出科学假设为:1)氮磷同施(N+P)添加处理提高大团聚体(>2 mm)中多糖和醇酚的相对丰度,进而影响大团聚体(>2 mm)土壤有机碳;2)N+P添加处理改变易分解态磷中的树脂(Resin-P)质量分数,进而显著影响各粒径土壤团聚体有机碳。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验区位于江西省龙南市九连山国家级自然保护区(24°31'~24°39'N,114°27'~114°29'E)。该保护区位于南岭东部核心部位的九连山北坡,保护区总面积13 411.6 hm²,其中核心区面积4 283.5 hm²,缓冲区面积1 445.2 hm²,试验区面积7 682.9 hm²。区内保存有低纬度、低海拔典型的原生性亚热带常绿阔叶林生态系统及丰富的生物多样性,在中国植被区划中属中亚热带湿润常绿阔叶林与南亚热带季风常绿阔叶林过渡地带,属于中亚热带湿润山地气候,该区域雨量充沛,日照充足,年平均气温16℃,年平均降水量2 155.6 mm,无霜期290~300 d,海拔282~1 434 m,地势南高北低。保护区内土壤成土母质复杂多样,有花岗岩、灰色、黄灰色或紫红色的砂页岩、泥页岩、千枚状页岩、板状页岩、砂岩、砾岩和石灰岩等的残积物、坡积物和洪积物。土壤的水平和垂直分布规律性明显,自下而上依次为山地红壤、山地黄红壤、山地黄壤和山地草甸土,主要的植被类型有常绿阔叶林、针叶林、竹林、山顶矮林和灌木草丛^[14]。

1.2 试验设计

本研究在江西九连山森林生态系统国家定位观测研究站内选取典型常绿阔叶林为研究对象。布设4种施肥处理3次重复完全随机化试验平台,即4个处理:施氮肥[100 kg/(hm²·a)](以N计)、施磷肥

[50 kg/(hm²·a)](以P计)、施氮肥磷肥[100 kg/(hm²·a)(以N计)+50 kg/(hm²·a)(以P计)]、对照,共计12块样方,每个处理3个重复,相邻2个处理间设置>20 m隔离带,小区面积为400 m²。氮磷添加始于2015年,每年3、9月份分别拌少许细沙撒施于土壤表面,氮肥选用为尿素(2019年至今)或NH₄NO₃(2015—2018年),磷肥为NaH₂PO₄。样地所在林分为皆伐后自然演替约32 a形成的次生林,植被类型为常绿阔叶林,土壤类型为山地红壤,优势树种为木荷(*Schima superba*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、罗浮锥(*Castanopsis fabri*)、润楠(*Machilus nanmu*)和青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等^[15]。

1.3 土样采集与处理

采集土样时,先将土壤表面的植被和枯草小心铲除,露出土壤,在每个样方采用5点取样法,土钻采集深度为0~10 cm的土样,将同一个样方的5个样品均匀混合,以便形成可代表每个样地的单一复合样品。土壤样品经过2 mm筛后被分为2个部分:其中一部分被放置在冰箱中进行保存,并在1周内测定速效养分(4℃保存);另一部分则被自然风干,用于测定pH、P组分、有机碳和全量养分的变化。环刀土使用环刀采集,用于土壤体积质量和毛管孔隙度的测定。使用铝盒采集0~10 cm的原状土土样,采集的原状土自然风干后用于测定土壤团聚体粒径分级,干筛之后的样品按粒径粉碎后用于测定全量养分、P组分、SOC和SOC化学组成。

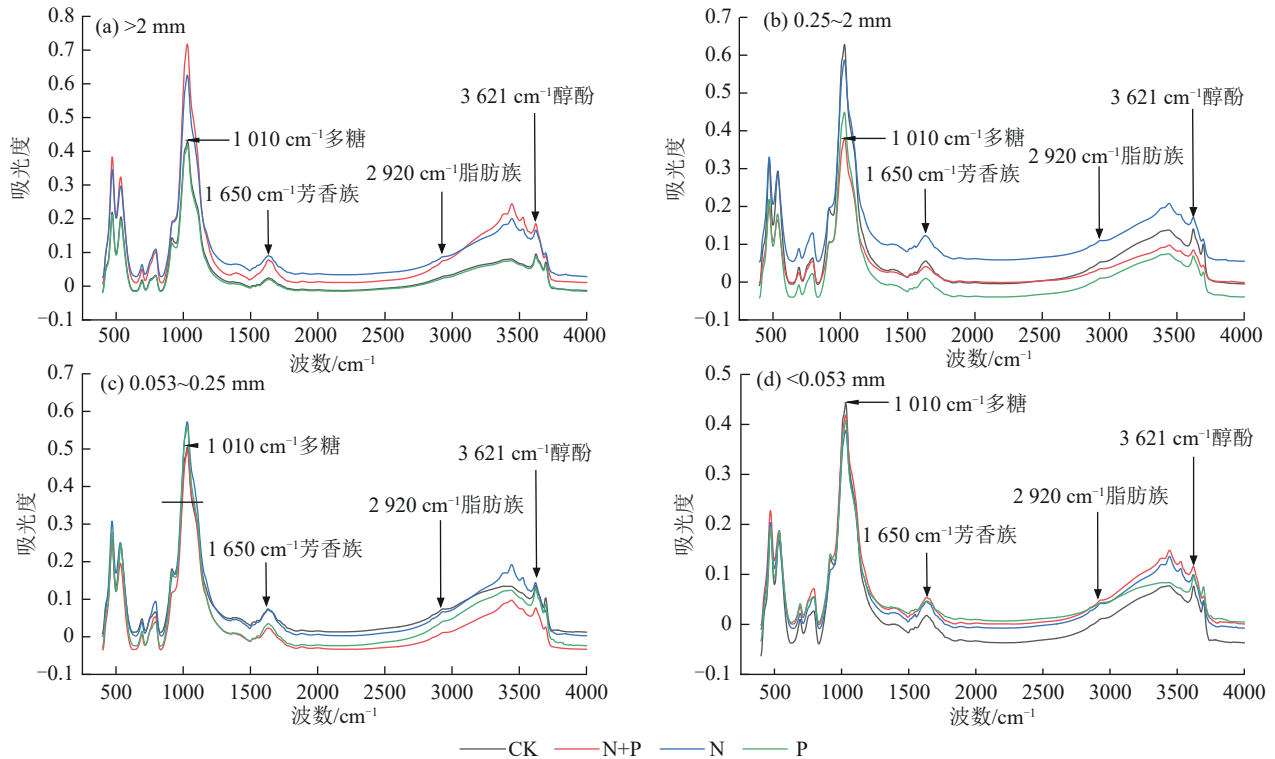
1.4 指标测定与分析方法

土壤基本理化性质:采用环刀法测定土壤体积质量(BD)和毛管孔隙度(CP),电位法测定土壤酸碱度(pH),重铬酸钾外源加热法^[16]测定SOC,经浓硫酸消煮后分别用靛酚蓝法和钼锑抗比色法测定土壤全氮(TN)和全磷(TP),氟化铵浸提法^[17]测定土壤有效磷(Olsen-P),靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮(NH₄⁺-N),紫外分光光度计法测定土壤硝态氮(NO₃⁻-N);选用NY/T 1121.19—2008^[18]进行团聚体分级。

采用傅里叶红外光谱分析法测定土壤有机碳官能团(多糖、醇酚、芳香族、脂肪族)^[19]:称取粒径组分的风干土壤0.005 0 g(精确至0.000 1 g)及0.500 g KBr(精确至0.001 g)于玛瑙研钵中,研磨至完全混合,之后置于红外烤灯下干燥。用称量勺取适量混合物压片,快速在压片机下进行压片,以透明状薄片为宜。用傅里叶红外光谱仪(Perkin Elmer Spectrum Two, USA)测定样品吸收峰,用WIN-IRPro 3.4软件进行标准化处理和峰面积计算。其中,各官能团的

代表性红外光谱特征峰见图 1,即多糖为波数 1 010 cm^{-1} ,芳香族为波数 1 650 cm^{-1} ,脂肪族为波数 2 920 cm^{-1} ,醇酚为波数 3 621 cm^{-1} 。多糖吸收峰波段为 930~1 385 cm^{-1} ,表现为强肩吸收峰;脂肪族吸收峰

波段为 1 385~1 470、2 800~3 000 cm^{-1} ,表现为较强和弱吸收峰;芳香族吸收峰波段为 1 570~1 845 cm^{-1} ,表现为较强吸收峰;醇酚吸收峰波段为 3 200~3 621 cm^{-1} ,表现为弱吸收峰。



注: >2 mm 为大团聚体; 0.25~2 mm 为小团聚体; 0.053~0.25 mm 为微团聚体; <0.053 mm 为黏粒、粉粒。下同。

图 1 氮磷添加下各粒径土壤红外光谱图

Fig. 1 Infrared spectrogram of soil at different particle sizes under nitrogen and phosphorus additions

用活性官能团与惰性官能团的峰面积比值来反映有机质的抗分解能力。通过 MARGENOT 等^[20]的方法计算出土壤有机碳分解程度和结构稳定性。

$$SD = \frac{S_{1650} + S_{940} + S_{915} + S_{800} + S_{780}}{S_{2920} + S_{2856}} \quad (1)$$

$$SS = \frac{S_{2920} + S_{2856} + S_{1629} + S_{940} + S_{915} + S_{800} + S_{780}}{S_{1160} + S_{1076} + S_{1033} + S_{1010}} \quad (2)$$

式中: S_x 为特征峰面积, 右下角数字表示特征峰对应的波数 (cm^{-1}); SD 为土壤有机碳分解程度, 为惰性官能团芳香族与脂肪族之比, 即比值越大分解程度越强; SS 为土壤有机碳结构稳定性, 为惰性官能团(芳香族、脂肪族)与活性官能团(多糖)之比, 即比值越大结构稳定性越好。其中, 波数为 2 920、2 856 cm^{-1} 是脂肪族, 波数为 1 629、1 650、940、915、800、780 cm^{-1} 是芳香族, 波数为 1 160、1 076、1 033、1 010 cm^{-1} 是多糖。

采用改进的 Hedley 连续浸提法进行磷(P)组分的测定^[21]: 取 0.50 g (精确到 0.01 g) 风干土, 依次使用 2 cm × 3 cm 阴离子树脂交换膜、30 mL pH 为 8.5 的 0.5 mol/L 碳酸氢钠 (NaHCO_3)、30 mL 0.1 mol/L 氢氧化钠 (NaOH)、30 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液并用超声波粉碎机 (JY92-IIN, 中国) 处理和 30 mL 1 mol/L

盐酸浸提, 残余 P 则在 360 $^{\circ}\text{C}$ 下使用高氯酸-硫酸 ($\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$) 消煮提取。各浸提液 P_i 浓度采用间断化学分析仪测定。使用过硫酸钾 ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 高压消化法测定各组分的 TP 浓度。其各个组分 P_o 的浓度使用每个组分 TP 与 P_i 的差值来计算。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据汇总整理; 用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素分析和双因素方差分析氮磷添加对土壤团聚体有机碳化学分子结构和磷组分的影响; 用 Origin 2021 软件进行图表绘制, 用 Canoco 5 软件进行冗余分析环境因子和有机碳化学分子结构之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对不同粒径土壤团聚体有机碳及其化学分子结构的影响

氮磷添加对土壤的物理性质(饱和持水量、土壤体积质量、毛管孔隙度等)皆无显著影响(表 1)。N+P 添加显著提高全磷、有效磷、铵态氮质量分数, 显著降低酸碱度; N 添加显著提高全氮、铵态氮、土壤有机碳质量分数, 显著降低酸碱度; P 添加显著提高全磷、有效磷质量分数, 对其他化学性质无显著影响(表 2)。

表 1 常绿阔叶林土壤基础物理性质
Table 1 Basic physical properties of evergreen broad-leaved forest soils

处理	饱和持水量/%	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
CK	20.96±1.86a	1.75±0.66a	56.81±1.54a	3.57±0.41ab
N+P	23.42±2.54a	1.68±0.60a	60.11±1.62a	4.83±1.36a
N	24.27±1.78a	1.67±0.45a	59.56±1.25a	3.45±0.40b
P	21.12±2.26a	1.77±0.82a	57.50±1.69a	4.12±0.60a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

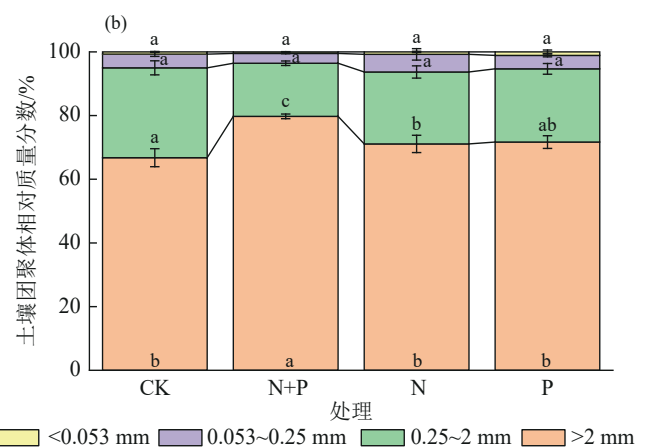
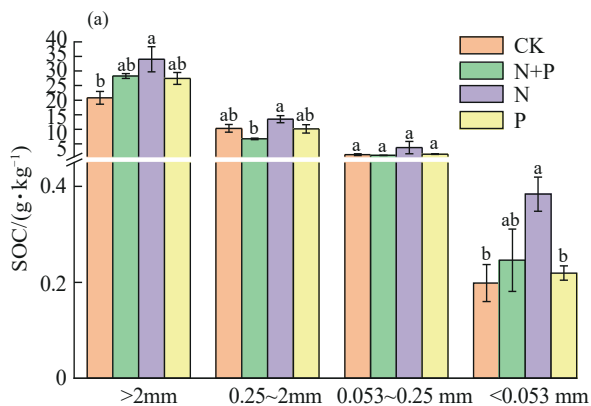
表 2 常绿阔叶林土壤基础化学性质
Table 2 Basic chemical properties of evergreen broad-leaved forest soils

处理	全磷/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	酸碱度	氮磷比	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)
CK	0.32±0.04b	1.10±0.06b	7.58±1.04b	9.33±0.72b	0.58±0.08a	4.47±0.06a	3.73±0.59ab	31.37±5.35b
N+P	0.59±0.02a	1.21±0.17ab	46.06±4.62a	15.22±0.29a	0.48±0.12a	4.30±0.11b	2.05±0.28b	35.57±1.02b
N	0.31±0.04b	1.44±0.10a	7.27±0.74b	15.18±0.23a	0.57±0.06a	4.24±0.06b	4.70±1.07a	47.49±8.11a
P	0.65±0.07a	1.16±0.05b	43.76±3.90a	7.87±1.57b	0.62±0.04a	4.62±0.09a	1.83±0.32b	36.80±4.56b

总体来看,各粒径中有机碳质量分数随粒径的增大而增加,说明土壤有机碳主要存在于大团聚体(>2 mm)。

从图 2 可以看出,在大团聚体(>2 mm)和黏、粉粒(<0.053 mm)中,N 添加显著提高土壤有机碳(SOC)质量分数,而其他处理则无显著差异。团聚体粒径总体分布以>2 mm 团聚体为主,0.25~2 mm 团聚体次之,而 0.053~0.25 mm 团聚体与<0.053

mm 团聚体的质量分数低于 10%。在>2 mm 团聚体中,N+P 添加土壤团聚体质量分数相对对照(CK)显著提高 19.29%,而其他处理则无显著差异。在 0.25~2 mm 团聚体中,N+P 添加和单独 N 添加土壤团聚体质量分数相对对照(CK)分别显著降低 40.94% 和 19.76%,单独 P 添加处理则无显著差异。而 0.053~0.25 mm 团聚体与<0.053 mm 团聚体质量分数在不同氮磷添加下未表现出显著差异。



注:图中不同小写字母表示不同处理之间差异显著($p < 0.05$)。

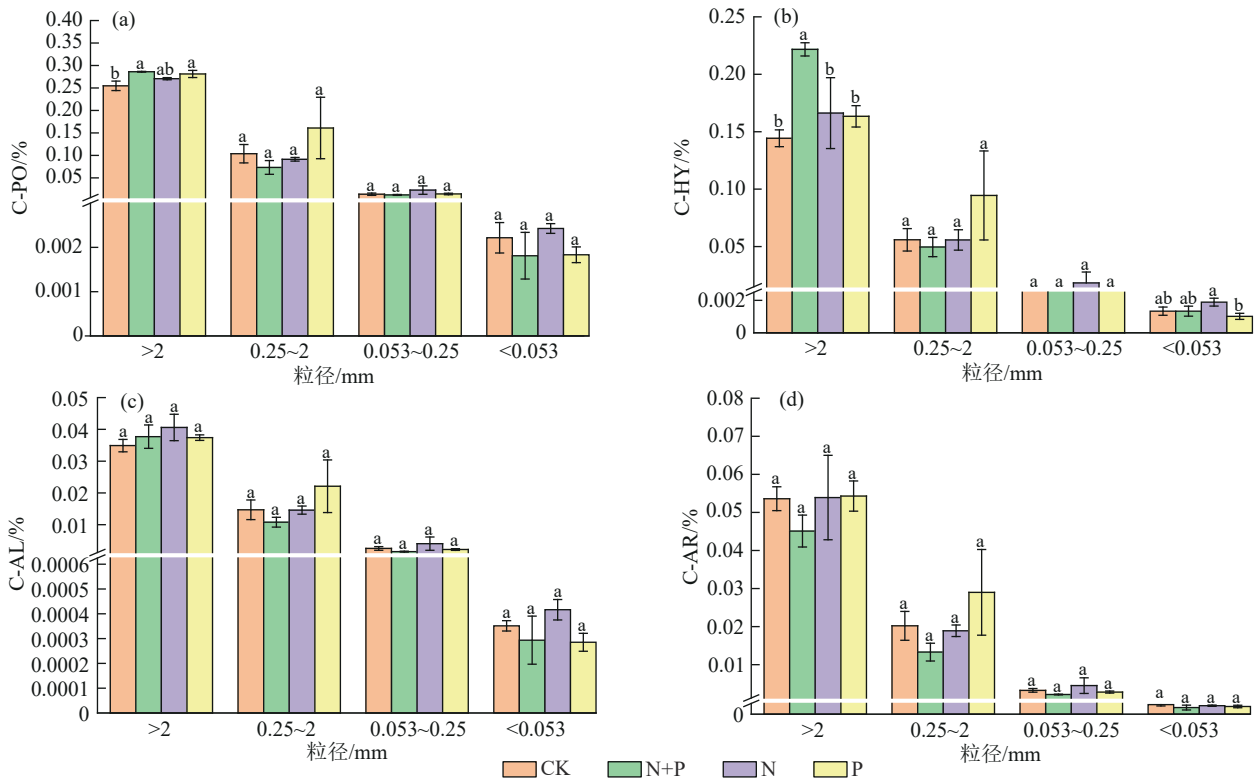
图 2 氮磷添加下不同粒径土壤团聚体和土壤有机碳质量分数

Fig. 2 Mass fractions of soil aggregates and organic carbon across different particle sizes under nitrogen and phosphorus additions

在大团聚体(>2 mm)中,N+P 添加处理显著提高土壤团聚体的多糖(C-PO)和醇酚(C-HY)质量分数;而不同 N、P 添加处理对土壤团聚体的其他粒径中的 C-PO、C-HY、芳香族(C-AR)和脂肪族(C-AL)均无显著差异(图 3)。整体来看,各粒径中 C-PO、C-HY、C-AR 和 C-AL 质量分数随着粒径的减小而降低,说明 C-PO、C-HY、C-AR 和 C-AL 主要存在

于>2 mm 团聚体。

由方差分析(表 3)可知,在大团聚体(>2 mm)中,N 添加显著影响土壤团聚体的 C-HY 质量分数;P 添加显著影响土壤团聚体的 C-PO 质量分数。在小团聚体(0.25~2 mm)中,N 添加显著影响土壤团聚体的 C-AR、C-AL 和 C-PO 质量分数;P 添加显著影响土壤团聚体的 C-AR、C-AL、C-PO 和 C-HY 质量分数。



注：C-PO 为多糖；C-HY 为醇酚；C-AR 为芳香族；C-AL 为脂肪族。下同。

图 3 氮磷添加下不同粒径土壤团聚体有机碳的化学分子结构质量分数

Fig. 3 Mass fractions of chemical molecular structures of organic carbon in soil aggregates of different particle sizes under nitrogen and phosphorus additions

表 3 氮磷添加及其交互作用对土壤团聚体有机碳化学分子结构影响的方差分析表 (F 值)

Table 3 ANOVA results (F-value) for effects of nitrogen and phosphorus additions and their interactions on molecular structures of organic carbon in soil aggregates

粒径/mm	有机碳化学分子	N 添加	P 添加	N×P 添加
>2	C-AR	1.020 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.850 ^{ns}
	C-AL	0.480 ^{ns}	0.384 ^{ns}	0.542 ^{ns}
	C-PO	2.395 ^{ns}	9.696 [*]	0.671 ^{ns}
	C-HY	5.732 [*]	4.963 ^{ns}	1.182 ^{ns}
0.25~2	C-AR	6.757 [*]	11.754 ^{**}	1.218 ^{ns}
	C-AL	19.152 ^{**}	39.31 ^{***}	0.266 ^{ns}
	C-PO	13.176 ^{**}	11.168 ^{**}	0.298 ^{ns}
	C-HY	4.557 ^{ns}	7.411 [*]	0.312 ^{ns}
0.053~0.25	C-AR	0.146 ^{ns}	1.669 ^{ns}	0.962 ^{ns}
	C-AL	0.086 ^{ns}	1.720 ^{ns}	0.792 ^{ns}
	C-PO	0.516 ^{ns}	1.074 ^{ns}	1.296 ^{ns}
	C-HY	0.487 ^{ns}	1.299 ^{ns}	1.609 ^{ns}
<0.053	C-AR	0.421 ^{ns}	2.789 ^{ns}	0.248 ^{ns}
	C-AL	0.469 ^{ns}	1.497 ^{ns}	0.000 ^{ns}
	C-PO	0.081 ^{ns}	2.275 ^{ns}	0.122 ^{ns}
	C-HY	3.067 ^{ns}	3.051 ^{ns}	0.222 ^{ns}

注：*表示 $p < 0.05$ ；**表示 $p < 0.01$ ；***表示 $p < 0.001$ ；ns 表示 $p > 0.05$ 。下同。

不同 N、P 添加处理对常绿阔叶林不同粒径的土壤团聚体 SD 有显著影响，而对 SS 的影响不存在显著差异(图 4)。在大团聚体(>2 mm)中，N 添加显著降低 SD；在小团聚体(0.25~2 mm)中，N+P 和 N 添加均显著降低 SD。

2.2 氮磷添加对不同粒径土壤团聚体磷组分的影响

不同 N、P 添加处理对常绿阔叶林各个粒径土壤团聚体 P 组分的影响显著性不同(表 4)。在大团聚体(>2 mm)中，N+P 添加显著提高易分解态磷中的树脂(Resin-P)和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、中等易分解态磷(NaOH-Pi 、 NaOH-Po)和难分解态磷中的 NaOHs-Pi 和 HCl-P 质量分数；P 添加显著提高易分解态磷中的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 。在小团聚体(0.25~2 mm)中，N+P 添加显著降低易分解态磷中的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 质量分数和难分解态磷中的残渣磷(Residual-P)质量分数，而显著提高 Resin-P 质量分数。在微团聚体(0.053~0.25 mm)中，P 添加显著提高土壤易分解态磷中的 Resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 及中等易分解态磷中的 NaOH-Pi 质量分数。在黏、粉粒(<0.053 mm)中，N+P 添加显著提高易分解态磷中的 Resin-P 与 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、中等易分解态磷中的 NaOH-Pi 和难分解态磷中的 NaOHs-Pi 质量分数；N 添加显著降低易分解态磷中 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 质量分数。

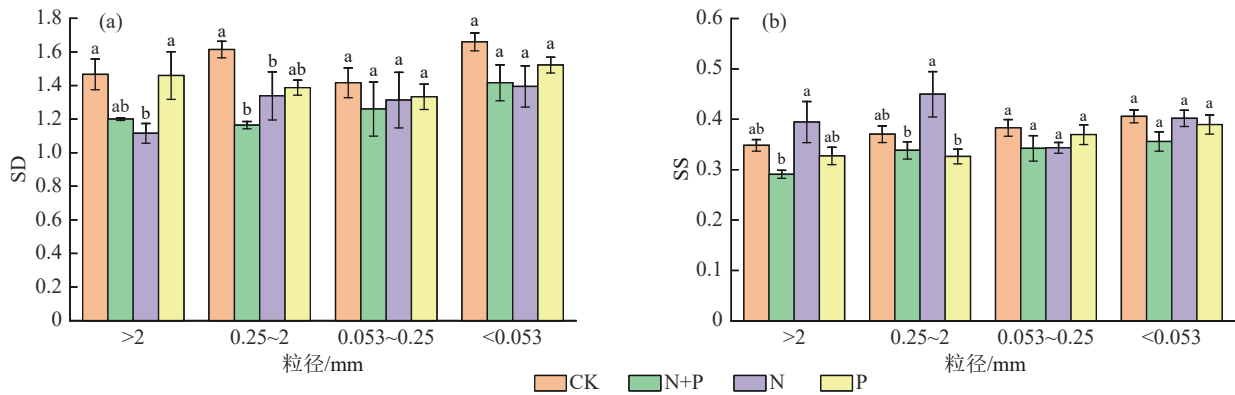


图 4 不同粒径土壤有机碳分解程度(SD)和结构稳定性(SS)

Fig. 4 Soil organic carbon decomposition (SD) and structural stability (SS) of different particle sizes

表 4 不同粒径土壤团聚体的磷组分

Table 4 Phosphorus components of soil aggregates of different particle sizes

粒径/mm	土壤 P 组分	CK	N+P	N	P
>2	Resin-P	5.65±0.38c	34.73±4.06a	5.54±1.23c	14.21±2.56b
	NaHCO ₃ -Pi	0.42±0.05b	1.59±0.42a	0.39±0.01b	1.29±0.29a
	NaHCO ₃ -Po	21.05±2.08b	21.62±2.92b	22.95±1.97b	31.38±1.92a
	NaOH-Pi	5.81±0.24b	16.47±2.05a	5.32±0.76b	12.97±4.36ab
	NaOH-Po	167.28±22.18b	361.78±16.80a	165.14±4.13b	258.10±51.33b
	NaOHs-Pi	0.83±0.04c	1.98±0.19a	1.04±0.13bc	1.35±0.09b
	NaOHs-Po	39.50±5.15b	47.41±10.28ab	51.89±2.96a	45.97±5.39ab
	HCl-P	6.10±0.38b	10.15±0.45a	5.99±0.28b	10.47±0.43a
	Residual-P	84.74±5.68a	101.04±4.36a	92.01±7.61a	99.34±2.36a
0.25~2	Resin-P	4.63±0.51b	8.25±0.51a	2.42±0.24c	4.36±0.48b
	NaHCO ₃ -Pi	0.24±0.04b	0.81±0.11a	0.15±0.01b	0.63±0.18a
	NaHCO ₃ -Po	10.57±2.23a	4.41±0.50b	6.94±1.88ab	11.71±1.73a
	NaOH-Pi	2.72±0.31b	3.86±0.36ab	1.97±0.27b	5.41±0.99a
	NaOH-Po	86.25±7.74ab	75.57±7.36ab	62.29±1.79b	110.36±24.39a
	NaOHs-Pi	0.43±0.05a	0.43±0.06a	0.33±0.06a	0.50±0.03a
	NaOHs-Po	18.31±1.37a	9.99±1.14a	16.50±3.29a	15.33±3.32a
	HCl-P	2.81±0.36ab	2.37±0.33b	2.32±0.31b	3.82±0.56a
	Residual-P	37.64±1.28a	21.04±1.82b	33.10±2.44ab	26.43±7.14ab
0.053~0.25	Resin-P	0.22±0.04b	0.67±0.02ab	0.57±0.32ab	0.86±0.14a
	NaHCO ₃ -Pi	0.03±0.01c	0.12±0.01ab	0.05±0.02bc	0.13±0.04a
	NaHCO ₃ -Po	1.34±0.47ab	0.72±0.02b	1.17±0.43ab	2.58±0.82a
	NaOH-Pi	0.32±0.06b	0.74±0.08ab	0.51±0.23b	1.05±0.10a
	NaOH-Po	9.26±2.32a	14.05±0.71a	18.92±11.48a	20.03±3.16a
	NaOHs-Pi	0.06±0.01a	0.08±0a	0.11±0.05a	0.08±0.01a
	NaOHs-Po	2.67±0.72a	2.92±0.29a	6.57±3.51a	2.71±0.56a
	HCl-P	0.51±0.09a	0.44±0.04a	0.45±0.23a	0.66±0.02a
	Residual-P	4.84±0.88a	4.11±0.21a	9.18±4.33a	5.24±0.42a
<0.053	Resin-P	0.05±0.01b	0.24±0.08a	0.06±0.01b	0.11±0.02ab
	NaHCO ₃ -Pi	0.01±0b	0.03±0.01a	0.01±0b	0.02±0ab
	NaHCO ₃ -Po	0.28±0.07ab	0.14±0.03bc	0.11±0.02c	0.32±0.04a
	NaOH-Pi	0.04±0.01b	0.13±0.04a	0.06±0ab	0.12±0.02a
	NaOH-Po	1.73±0.25a	2.61±0.85a	2.08±0.42a	2.48±0.02a
	NaOHs-Pi	0.01±0b	0.02±0a	0.01±0ab	0.01±0ab
	NaOHs-Po	0.39±0.11a	0.53±0.23a	0.59±0.10a	0.31±0.02a
	HCl-P	0.09±0.01a	0.10±0.02a	0.07±0.01a	0.10±0.01a
	Residual-P	0.77±0.14a	0.75±0.22a	1.02±0.11a	0.70±0.12a

注:Resin-P 为树脂磷;NaHCO₃-Pi 为碳酸氢钠-无机磷;NaHCO₃-Po 为碳酸氢钠-有机磷;NaOH-Pi 为氢氧化钠-无机磷;NaOH-Po 为氢氧化钠-有机磷;NaOHs-Pi 为氢氧化钠加超声波-无机磷;NaOHs-Po 为氢氧化钠加超声波-有机磷;HCl-P 为盐酸磷;Residual-P 为残余磷。下同。

由方差分析(表 5)可知,在大团聚体(>2 mm)中,N 添加显著影响易分解态磷中的 Resin-P 和难分解态磷中的 NaOHs-Pi;P 添加显著影响易分解态磷中的 Resin-P、中等易分解态磷中的 NaOH-P、难分解态磷中的 NaOHs-Pi 和 HCl-P;N、P 添加交互作用显著影响易分解态磷中的 Resin-P、NaHCO₃-P。

表 5 氮磷添加及其交互作用对土壤团聚体中磷组分影响的方差分析(F 值)

Table 5 ANOVA (F -value) for effects of nitrogen and phosphorus additions and their interactions on phosphorus components in soil aggregates

粒径/mm	土壤 P 组分	N 添加	P 添加	N×P 添加
>2	Resin-P	16.899**	57.769***	17.271**
	NaHCO ₃ -Pi	0.293 ^{ns}	16.249 ^{ns}	0.413**
	NaHCO ₃ -Po	3.027 ^{ns}	3.965 ^{ns}	6.661*
	NaOH-Pi	0.379 ^{ns}	14.041**	0.664 ^{ns}
	NaOH-Po	3.010 ^{ns}	24.126***	3.269 ^{ns}
	NaOHs-Pi	11.275**	33.803***	2.944 ^{ns}
	NaOHs-Po	1.125 ^{ns}	0.023 ^{ns}	0.705 ^{ns}
	HCl-P	0.315 ^{ns}	118.705***	0.073 ^{ns}
	Residual-P	0.702 ^{ns}	4.870 ^{ns}	0.270 ^{ns}
	0.25~2	Resin-P	3.484 ^{ns}	37.976***
NaHCO ₃ -Pi		0.196 ^{ns}	22.709***	1.451 ^{ns}
NaHCO ₃ -Po		10.156*	0.164 ^{ns}	1.144 ^{ns}
NaOH-Pi		4.135 ^{ns}	16.414**	0.503 ^{ns}
NaOH-Po		4.847 ^{ns}	1.963 ^{ns}	0.165 ^{ns}
NaOHs-Pi		2.622 ^{ns}	3.032 ^{ns}	0.073 ^{ns}
NaOHs-Po		2.049 ^{ns}	3.605 ^{ns}	0.499 ^{ns}
HCl-P		5.819*	1.756 ^{ns}	1.435 ^{ns}
Residual-P		1.594 ^{ns}	8.746*	0.012 ^{ns}
0.053~0.25		Resin-P	0.200 ^{ns}	4.475 ^{ns}
	NaHCO ₃ -Pi	0.002 ^{ns}	13.656**	0.422 ^{ns}
	NaHCO ₃ -Po	3.829 ^{ns}	0.573 ^{ns}	2.664 ^{ns}
	NaOH-Pi	0.196 ^{ns}	12.820**	3.532 ^{ns}
	NaOH-Po	0.092 ^{ns}	0.235 ^{ns}	1.656 ^{ns}
	NaOHs-Pi	0.839 ^{ns}	0 ^{ns}	0.823 ^{ns}
	NaOHs-Po	1.268 ^{ns}	0.983 ^{ns}	1.028 ^{ns}
	HCl-P	1.190 ^{ns}	0.367 ^{ns}	0.420 ^{ns}
	Residual-P	0.521 ^{ns}	1.104 ^{ns}	1.518 ^{ns}
	<0.053	Resin-P	2.776 ^{ns}	7.431*
NaHCO ₃ -Pi		2.259 ^{ns}	13.975**	0.631 ^{ns}
NaHCO ₃ -Po		15.313**	0.589 ^{ns}	0.062 ^{ns}
NaOH-Pi		0.261 ^{ns}	12.493**	0.037 ^{ns}
NaOH-Po		0.240 ^{ns}	1.705 ^{ns}	0.057 ^{ns}
NaOHs-Pi		3.535 ^{ns}	4.369 ^{ns}	0.090 ^{ns}
NaOHs-Po		2.307 ^{ns}	0.249 ^{ns}	0.005 ^{ns}
HCl-P		0.408 ^{ns}	1.760 ^{ns}	0.164 ^{ns}
Residual-P		0.859 ^{ns}	1.182 ^{ns}	0.433 ^{ns}

在小团聚体(0.25~2 mm)中,N 添加显著影响易分解态磷中的 NaHCO₃-Po 和难分解态磷中的

HCl-P;P 添加显著影响易分解态磷中的 Resin-P 和 NaHCO₃-Pi、中等易分解态磷中的 NaOH-Pi 和难分解态磷中的 Residual-P;N、P 添加交互作用显著影响易分解态磷中的 Resin-P。在微团聚体(0.053~0.25 mm)中,P 添加显著影响易分解态磷中的 NaHCO₃-Pi 和中等易分解态磷中的 NaOH-Pi。在黏、粉粒(<0.053 mm)中,N 添加显著影响易分解态磷中的 NaHCO₃-Po;P 添加显著影响易分解态磷中的 Resin-P、NaHCO₃-Pi 和易分解态磷中的 NaOH-Pi。

2.3 不同粒径土壤团聚体的化学分子结构和磷组分的相关性

不同粒径下的土壤 P 组分的主要驱动因子不同,不同粒径下的解释度亦不一致。冗余分析(图 5)表明,在大团聚体(>2 mm)中,土壤 P 组分解释土壤 C 组分变异的 81.21% 和 6.4%;其中,难分解态磷中的 NaOHs-Pi、中等易分解态磷中的 NaOH-Po 和 NaOH-Pi 是土壤 P 组分的主要驱动因子,解释度分别为 57.9%、9.2% 和 7.1%。在小团聚体(0.25~2 mm)中,土壤 P 组分解释土壤 C 组分变异的 86.39% 和 7.71%;其中,难分解态磷中的 Residual-P、易分解态磷中的 NaHCO₃-Po 和中等易分解态磷中的 NaOH-Po 是土壤 P 组分的主要驱动因子,解释度分别为 62.4%、18.7% 和 4.8%。在微团聚体(0.053~0.25 mm)中,土壤 P 组分解释土壤 C 组分变异的 99.02% 和 0.6%;其中,难分解态磷中的 Residual-P 和易分解态磷中的 NaHCO₃-Po 是土壤 P 组分变异的主要驱动因子,解释度分别为 98.4% 和 0.4%。在黏、粉粒(<0.053 mm)中,土壤 P 组分解释土壤 C 组分变异的 91.37% 和 5.97%;其中,难分解态磷中的 Residual-P、HCl-P、易分解态磷中的 NaHCO₃-Pi 和难分解态磷中的 NaOHs-Po 是土壤 P 组分的主要驱动因子,解释度分别为 81.6%、4.7%、4.5% 和 3.9%。

3 讨论

3.1 不同粒径土壤团聚体的化学分子结构对氮磷添加的响应

不同的养分添加(N、P 及其组合)对土壤的化学性质产生较为显著的影响(表 2)。土壤酸碱度是影响微生物群落结构和功能的主要因素,大量氮添加试验表明,不同年份氮肥添加显著酸化土壤^[22]。本研究结果发现,N+P 添加显著提高全磷、有效磷和铵态氮质量分数,同时降低酸碱度,表明 N 和 P 的联合添加在改善土壤磷素营养和调节土壤酸碱度方面具有一定的协同作用。

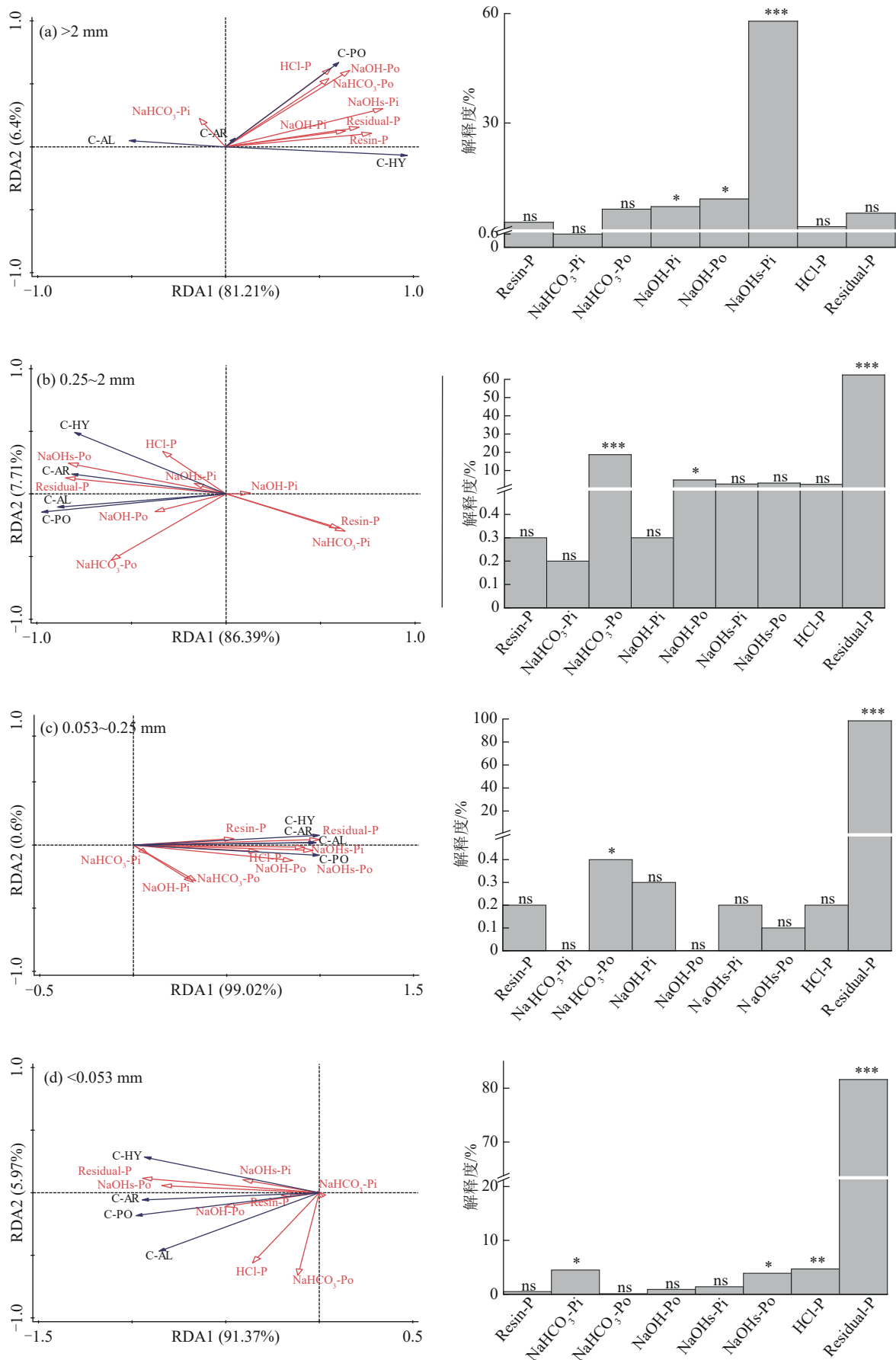


图 5 各粒径土壤团聚体的化学分子结构和磷组分的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of molecular structures and phosphorus components in soil aggregates of different particle sizes

本研究施氮和氮磷同施处理显著降低土壤酸碱度,可能是因为氮的输入通过降低可交换性阳离子质量分数及抑制有效阳离子交换能力来减弱土壤酸缓冲能力,从而酸化土壤。占土壤全氮 95% 的土壤有机氮是氮库中的主要存在形态,有机氮需要矿化成无机氮才容易被植物吸收利用^[23]。本研究施氮和氮磷同施处理显著提高铵态氮质量分数,可能是由于氮的输入通过自身氮素的分解及促进有机氮的矿化作用,从而增加铵态氮质量分数。

本研究结果表明,不同 N、P 添加处理后,N+P 添加显著提高大团聚体(>2 mm)中多糖(C-PO)和醇酚(C-HY)质量分数(图 3),表示土壤中易分解碳增加,难分解碳无变化,一定程度上增加 SOC 质量分数,促进 SOC 的稳定性。主要原因可能有:第一,土壤中有约 20% 的多糖直接来自植物凋落物和根茎的分解,其余 80% 来自微生物及其残留物,多糖易于发生水解反应,被认为是易分解 SOC 的组成部分之一。有研究^[24]认为,不稳定性碳以低分子量(MW)的多糖类物质为主,而顽固性碳以芳香族和脂肪族类化合物为主,说明氮磷同施(N+P)添加后加速微生物活性对植物凋落物和根茎的分解,增加土壤有机碳的固存。第二,醇酚被认为是易分解的活性 SOC,N+P 添加通过增加凋落物量,使更多的活性 SOC 进入团聚体并促进团聚体的产生,与徐江兵等^[25]的研究结果一致。可见,土壤中易分解碳更多地集中于较大的团聚体中,N+P 添加会增加大团聚体内易分解碳的质量分数。

惰性官能团芳香族与脂肪族之比,表示土壤有机碳分解程度(图 4),即比值越大分解程度越强。惰性官能团(芳香族、脂肪族)与活性官能团(多糖)之比,表示土壤有机碳结构稳定性,其比值越大结构稳定性越好,即 C 与 O 官能团的比率,其增加被认为与有机碳顽固性的增加有关。本研究发现,N 添加后 >2 mm 团聚体有机碳分解程度降低约 27%,可能是由于 N 添加促进植物 C 输入。土壤微生物生物量对 N 添加的响应也是导致土壤异养呼吸和 SOC 分解减少的原因之一,由于 N 添加下土壤 pH 的降低,微生物活性及微生物对活性 SOC 组分的分解作用被抑制,放线菌可能通过对凋落物的降解和增加大团聚体的有机碳参与团聚体的形成^[26]。

3.2 不同粒径土壤团聚体磷组分对氮磷添加的响应

本研究发现,N+P 添加处理显著增加大团聚体(>2 mm)和黏、粉粒(<0.053 mm)土壤团聚体易分解 P 组分中树脂(Resin-P)和 NaHCO₃-Pi,仅提高小团聚体(0.25~2 mm)易分解 P 组分中 Resin-P 质量分数(表 4),说明氮磷同施对土壤团聚体的易分解磷组分质量分数的增加具有促进作用。尽管传统的观点^[27]表明,氮沉降的持续增加导致森林生态系统磷循环加速,磷供应受限制,与本研究的結果不同。

可能的原因是,与单独 P 添加相比,N+P 添加后 N 的存在有利于促进土壤团聚体对有效磷的吸附作用,从而增加土壤有机碳中各磷组分的质量分数。在不施肥的土壤中,P_o 作为土壤中不可被吸收的 P 库,是植物的最初 P 源,但在 P 添加下,NaOH-Pi 成为可供植物快速吸收的高水平有效无机 P 库,而 HCl-P 既是 P 源也是 P 库,是其他可利用 P 形态的补充。由于 NaOHs-P_o 和 Residual-P 属于难分解态 P,其结构与化学性质稳定,对外界的响应较小,导致 NaOHs-P_o 和 Residual-P 在本研究不同养分添加下无显著差异。

本研究结果显示,N 添加显著降低黏、粉粒团聚体易分解态磷中 NaHCO₃-P_o 质量分数。一方面可能是因为 N 添加导致土壤 pH 显著降低,加速土壤易分解态磷组分 NaHCO₃-P_o 的矿化并易被植物吸收利用。NaHCO₃-P_o 对施入土壤的磷源很敏感,却不是施肥添加可直接改变的磷组分,无机化肥的添加会导致其与土壤 P_o 的竞争,产生微溶的 Al、Fe 化合物,从而减少 NaHCO₃-P_o 的积累;另一方面,可能是因为酸性土壤中有效磷(AP)增加与可交换铝离子和铁离子结合形成更稳定的 P。由于土壤 P 限制,短时间内土壤 AP 被植物和微生物利用,而长期的 N 添加使土壤中 Al³⁺、Fe³⁺ 吸附和固定作用降低,从而使易分解态磷中有效磷成分降低,减少团聚体易分解态磷质量分数^[28]。而与本研究结果不一致,在 P 添加下,NaHCO₃-P_o 对土壤 P 变化的响应较为敏感,而 NaOH-P_o 成为 P 添加下的储存库,可在 P 缺乏时被矿化为无机形态。

3.3 不同粒径土壤团聚体有机碳化学分子结构和磷组分的关系及碳磷耦合关系

本研究发现,N 添加可显著提高大团聚体(>2 mm)土壤有机碳(SOC)质量分数(图 2),其原因可能是植物凋落物主要积累在土壤表层,枯枝落叶、根系分泌物和土壤生物残体等有机物的输入为土壤微生物和动物供给养分,同时植物的根系通过穿透和根际效应改善土壤孔隙度,调节土壤水分,提高土壤表层的生物活性度,从而有利于土壤团聚体中有机质的积累^[29]。本研究还发现,N 添加显著提高黏、粉粒(<0.053 mm)土壤有机碳(SOC)质量分数,是因为大团聚体内部颗粒有机质的分解,使大团聚体一步步解体而形成黏、粉粒,黏、粉粒在各粒级中具有最大的比表面积,因而由黏、粉粒包裹的有机碳受到更强的物理保护。

常绿阔叶林土壤以大团聚体(>2 mm)为主,质量分数为 65%~80%,说明该林分的森林土壤具有良好的物理结构,该林分土壤中黏土矿物质量分数较高,有利于大团聚体的形成。而各粒级团聚体之间可以相互转化,土壤微团聚体通过与植物根系残体和菌根菌丝的胶结作用形成大团聚体。本研究发现,N+P 添加显著提高 >2 mm 团聚体质量分数,N+P 添加和单独 N 添加显著降低 0.25~2 mm 团聚

体质量分数,是因为在不同养分添加下,土壤所处的微生态环境被改变,地表植被覆盖的增加减轻降雨与径流的侵蚀,为大团聚体形成提供有利条件^[30]。

不同粒径土壤团聚体间碳磷之间存在一定的耦合关系。冗余分析(图5)发现,不同粒径土壤团聚体中P组分对土壤C组分的变异的第1轴解释度均达到80%以上,且NaOHs-Pi和残余磷分别是影响>2 mm团聚体和<2 mm团聚体化学分子结构的主要驱动因子。可能是因为难分解态P的降低需要依靠微生物的分解作用,然而土壤团聚体结构会阻止微生物与难分解态P的接触,从而有利于难分解态P的固存。而在影响团聚体稳定性和改善土壤结构的各因素中,土壤有机质质量分数及微生物种群数量尤为重要。森林土壤由于凋落物质量分数高且在地表聚集,一方面减少雨水对土壤的冲刷;另一方面,这些有机残余物在分解过程中可以激活微生物群落并导致真菌和细菌数量的提高,而它们产生的根系分泌物和酶可以增加土壤团聚体的稳定性。即养分添加通过改善土壤团聚体化学分子结构,从而有利于各粒径难分解态P的保存,促进各粒径土壤团聚体的产生,在一定程度上加速土壤有机碳的固存。

本文以亚热带常绿阔叶林为对象,对表层(0~10 cm)不同粒径土壤有机碳稳定性对氮磷添加响应进行研究,主要从土壤P组分和化学分子结构特征入手探索有机碳组成与结构对氮磷添加的响应,目的是探究在氮沉降和磷限制背景下,基于土壤组成分析的有机碳稳定性的变化特征,并阐明土壤碳磷耦合在其中的调控作用。

本研究主要在亚热带常绿阔叶林中进行6 a的养分添加处理,但依旧存在时间尺度与空间尺度上的研究不足。单一时间的观测取样及单独的样地不足以代表整个亚热带常绿阔叶林对养分添加的响应状况。因此,需要展开多地点、多次数的试验以探究团聚体C的转化机制。

4 结论

1) N+P添加处理有利于土壤有机碳的固存,即N+P比单独P添加对磷组分的作用更强,N的存在促进了团聚体对有效磷的吸附。

2) 养分添加通过改善土壤团聚体化学分子结构,从而有利于各粒径难分解态P的形成,在一定程度上加速土壤有机碳的固存。长期氮磷添加通过改变土壤团聚体中磷的转化和形成从而影响土壤有机碳化学分子结构及其稳定性。

参考文献:

[1] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2(8): 1-6.

- [2] CHEN J G, XIAO W, ZHENG C Y, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107708.
- [3] MACK M C, SCHUUR E A G, SYNDONIA B M, et al. Ecosystem carbon storage in Arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization [J]. *Nature*, 2004, 431(7007): 440-443.
- [4] 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.
- [5] SONG J J. Effects of nitrogen and phosphorus supplementation on soil organic carbon components and aggregate stability in subtropical evergreen broad-leaved forest[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [6] 崔宇鸿, 张钱春, 燕羽, 等. 杉木纯林及其混交林土壤团聚体有机磷组分分布特征[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(9): 1547-1556.
- [7] CUI Y H, ZHANG Q C, YAN Y, et al. Distribution characteristics of soil aggregate organic phosphorus in pure and mixed *Cunninghania lanceolata* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(9): 1547-1556.
- [8] 张佛熠, 蔡昌永明, 钟嘉琳, 等. 城市化对绿地土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响: 以江西省南昌市为例[J]. *环境科学*, 2024, 45(11): 6538-6545.
- [9] ZHANG F Y, CAI C, ZHONG J L, et al. Impacts of urbanization on soil aggregate stability and organic carbon content in urban green spaces: A case study of Nanchang City, Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11): 6538-6545.
- [10] DUNGAIT J A, HOPKINS D W, GREGORY A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [11] ROVIRA P, RAMÓN V V. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 202-215.
- [12] CHEN J S, CHIU C Y. Characterization of soil organic matter in different particle-size fractions in humid subalpine soils by CP/MAS ¹³C NMR [J]. *Geoderma*, 2003, 117(1/2): 129-141.
- [13] WATTEL-KOEKKOEK E J W, VAN GENUCHTEN P P L, BUURMAN P, et al. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 27-49.
- [14] FINK J R, INDA A V, BAVARESCO J, et al. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(2): 203-210.
- [15] LÜ C W, YAN D H, HE J, et al. Environmental geochemistry significance of organic phosphorus: An insight from its adsorption on iron oxides[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 84: 52-60.

- [13] 储炳银,李培玺,孙孟瑶,等.氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤碳氮及其稳定性同位素的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(8):100-107.
CHU B Y, LI P X, SUN M Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil carbon and nitrogen and their stable isotopes in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2021, 41(8):100-107.
- [14] 林宝珠,朱祥福,曾菊平,等.九连山金斑喙凤蝶野外生物学特性观测[J].林业科学研究,2017,30(3):399-408.
LIN B Z, ZHU X F, ZENG J P, et al. Research on biological characteristics of *Teinoplus aureus* in Jiulianshan [J]. Forest Research, 2017, 30(3):399-408.
- [15] 刘斌,陈维,陈伏生,等.九连山次生阔叶林幼苗生长对氮磷添加的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2533-2540.
LIU B, CHEN W, CHEN F S, et al. Responses of seedling growth in subtropical secondary broad-leaved forest to nitrogen and phosphorus addition in Jiulian Mountain, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8):2533-2540.
- [16] 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.
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.
- [17] ZHANG Y, BHATTACHARYA 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.
- [18] 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. The impact of nitrogen and phosphorus addition on tree growth traits of subtropical secondary broad-leaved forest [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [19] KAISER M, ELLERBROCK R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment [J]. Geoderma, 2005, 127(3/4):196-206.
- [20] MARGENOT A J, CALDERÓN F J, BOWLES T M, et al. Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(3):772-782.
- [21] SPOHN M. Increasing the organic carbon stocks in mineral soils sequesters large amounts of phosphorus [J]. Global Change Biology, 2020, 26(8):4169-4177.
- [22] 周纪东,史荣久,赵峰,等.施氮频率和强度对内蒙古温带草原土壤pH及碳、氮、磷含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(8):2467-2476.
ZHOU J D, SHI R J, ZHAO F, et al. Effects of the frequency and intensity of nitrogen addition on soil pH, the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate steppe in Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8):2467-2476.
- [23] 闫钟清,齐玉春,董云社,等.降水与氮沉降变化对草地关键氮过程的影响研究进展[J].中国环境科学,2016,36(4):1189-1197.
YAN Z Q, QI Y C, DONG Y S, et al. Effects of changing precipitation regime and increasing nitrogen deposition on key processes of nitrogen cycle in grassland ecosystem [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4):1189-1197.
- [24] MALIK A A, ROTH V N, HÉBERT M, et al. Linking molecular size, composition and carbon turnover of extractable soil microbial compounds [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 100:66-73.
- [25] 徐江兵,李成亮,何园球,等.不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J].土壤学报,2007,44(4):675-682.
XU J B, LI C L, HE Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4):675-682.
- [26] 王向涛,张超,廖李荣,等.青藏高原高寒草甸退化对土壤氮素转化微生物基因的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):8-13.
WANG X T, ZHANG C, LIAO L R, et al. Effects of degradation of alpine meadow on soil microbial genes in nitrogen transformation in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3):8-13.
- [27] WANG X H, LI S, ZHU B, et al. Long-term nitrogen deposition inhibits soil priming effects by enhancing phosphorus limitation in a subtropical forest [J]. Global Change Biology, 2023, 29(14):4081-4093.
- [28] 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.
- [29] 胡雷,王长庭,阿的鲁骥,等.高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J].西南民族大学学报(自然科学版),2015,41(1):6-11.
HU L, WANG C T, A D L J, et al. Relationship between plant root biomass, organic carbon content and soil mechanical composition in alpine meadow [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2015, 41(1):6-11.
- [30] 童晨晖,王辉,谭帅,等.亚热带丘岗区经果林种植对红壤团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2022,33(4):1012-1020.
TONG C H, WANG H, TAN S, et al. Effects of economic fruit forest planting on the stability of red soil aggregates in the subtropical hilly area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4):1012-1020.