

# 杉木人工林土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布及其关系

黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 黄国敏, 申思佳, 李燕燕, 万鸿宇, 吴昊泽

(南昌工程学院 江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室, 江西 南昌 330029)

**摘要:** [目的] 探究亚热带红壤区土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布及其关系, 为该区域土壤结构的改良提供理论依据。[方法] 以亚热带红壤区典型林分杉木人工林为对象, 研究不同粒级微团聚体胶结物中铁铝氧化物含量、结合态有机碳含量和微生物群落多样性在不同土层中的分布, 并分析各形态铁铝氧化物含量与微生物群落多样性的关系。[结果] 微团聚体中不同形态铁铝氧化物含量呈现: 游离结晶态( $Fe_d, Al_d$ )  $\gg$  无定形( $Fe_o, Al_o$ )  $>$  络合态( $Fe_p, Al_p$ )。从总体上看, 铁铝氧化物含量随微团聚体粒径的减少而逐渐增大, 络合态铁( $Fe_p$ )和游离态铝( $Al_d$ )含量随土层深度的增加而逐渐降低, 络合态铝( $Al_p$ )含量则是底层远高于表层。细菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌是该林地的主要微生物, 各类微生物 PLFAs 在土壤表层受粒径影响最大, 且在粒径为  $50 \sim 200 \mu m$  的微团聚体中含量最高。微团聚体中微生物丰富度、香农指数和辛普森指数总体上均是表层土壤最高, 粒径最小的微团聚体微生物丰富度、香农指数最高。冗余分析(RDA)显示, 放线菌磷脂脂肪酸(PLFAs)含量、革兰氏阳性菌 PLFAs 含量、香农指数、辛普森指数与游离态铁( $Fe_d$ )含量呈极强负相关关系, 细菌 PLFAs 含量与  $Al_d$  含量、非晶型铝( $Al_o$ )含量呈出极强的正相关关系, 真菌、细菌、革兰氏阴性菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量与铁铝键结合态有机物[Fe(Al)-SOC]含量均呈负相关。[结论] 杉木林红壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布受土层和粒级影响, 不同种类的微生物与不同形态的铁铝氧化物和结合态有机碳的相关性强弱不同。

**关键词:** 土壤微团聚体; 铁铝氧化物; 微生物群落; 杉木人工林

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)01-0001-09

**中图分类号:** S714

**文献参数:** 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 等. 杉木人工林土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布及其关系[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.009; Huang Rongzhen, Wang Jinping, Zhu Liqin, et al. Distribution and relationships regarding Fe, Al oxides, and microorganisms in soil microaggregates of chinese fir plantation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 1-9.

## Distribution and Relationships Regarding Fe, Al Oxides, and Microorganisms in Soil Microaggregates of Chinese Fir Plantation

Huang Rongzhen, Wang Jinping, Zhu Liqin,

Huang Guomin, Shen Sijia, Li Yanyan, Wan Hongyu, Wu Haoze

(Jiangxi Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems & Watershed  
Ecohydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China)

**Abstract:** [Objective] The distribution of Fe, Al oxides, and microbial community diversity in red soil microaggregates, and their relationships were studied in order to provide a theoretical basis for the improvement of subtropical red soil structure. [Methods] This study was conducted on a chinese fir plantation, which is the typical plant stand in the subtropical red soil region. The contents of Fe, Al oxides, bonded organic matter, and microbial communities of different soil microaggregate grain sizes in different soil layers (topsoil, 0—10 cm; middle soil, 10—20 cm; subsoil, 20—30 cm) were measured. Their relationships were analyzed by the

收稿日期: 2021-09-12

修回日期: 2021-09-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“外源有机碳对红壤退化地微团聚体形成和稳定的影响机制”(31660192); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ161093)。

第一作者: 黄荣珍(1975—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 博士, 教授, 主要从事生态修复与坡地水文等研究。Email: huangrz@nit.edu.cn。

redundancy analysis method (RDA). [Results] Different forms of Fe, Al oxide contents in soil micro-aggregates were present in the following order: dithionite-citrate-bicarbonate-extractable oxides ( $\text{Fe}_d$ ,  $\text{Al}_d$ )  $\gg$  acid ammonium oxalate-extractable oxides ( $\text{Fe}_o$ ,  $\text{Al}_o$ )  $>$  sodium pyrophosphate-extractable oxides ( $\text{Fe}_p$ ,  $\text{Al}_p$ ). In general, Fe and Al oxide contents increased slowly with decreasing soil micro-aggregate grain sizes. The  $\text{Fe}_p$  and  $\text{Al}_d$  contents decreased slowly with increasing soil depth, and  $\text{Al}_p$  content in the subsoil was far greater than in the topsoil. The main microorganisms in the chinese fir plantation soil were bacteria, and gram-positive and negative bacteria. The effect of micro-aggregate grain size on microorganisms was greater in topsoil than in middle soil and subsoil. The phospholipid fatty acids (PLFAs) of microorganisms in soil micro-aggregates of 50—200  $\mu\text{m}$  diameter were greater than in micro-aggregates of other diameters. The richness, Shannon index, and Simpson index of microorganisms were greatest in topsoil, and the richness and Shannon index of microorganisms were greatest in soil micro-aggregates with the lowest diameter. RDA revealed that antino bacteria PLFAs, gram-positive bacteria PLFAs, and microbial Shannon and Simpson indexes were highly significantly and negatively correlated with  $\text{Fe}_d$ . Bacteria PLFAs showed highly significant positive relationships with  $\text{Al}_d$  and  $\text{Al}_o$  contents. Fungus, bacteria, gram-negative bacteria, arbuscular mycorrhizal fungus PLFAs showed negative relationships with Fe-Al bonded organic carbon [Fe(Al)-SOC] content. [Conclusion] The distributions of Fe, Al oxides, and microbial community diversity in subtropical red soil micro-aggregates were affected by soil layers and micro-aggregate size. Different types of microorganisms were affected by different forms of Fe and Al oxides, and bonded organic carbon.

**Keywords:** soil micro-aggregate; Fe, Al oxides; microbial community; chinese fir plantation

目前,中国亚热带南方红壤丘陵区经过 30 a 多的生态恢复,取得一定成就,但土壤退化问题依然严重,其核心是土壤结构的退化。土壤团聚体作为土壤结构的基本单位,它在保持土壤肥力,调节土壤透气透水性、持水性,维持土壤微生物多样性方面具有十分重要的作用,其稳定性是反映土壤结构的重要指标<sup>[1-2]</sup>。其中,微团聚体作为团聚体的更小单元,它更加稳定,是大团聚体形成的基础,它在营养元素的保持,供应及转化等方面也发挥着重要作用,对土壤有机碳的长期储存和稳定起决定性作用<sup>[3-4]</sup>。

土壤中的胶结物质是土壤最活跃的组分之一,它分为有机胶体和无机胶体,它们相互作用复合形成微团聚体。铁铝无机氧化物属于有机胶结物质,其表面常具有不同类型和数量的电荷,其电荷可吸附在黏粒表面形成氧化物胶膜,促进土粒更加紧密,形成稳定的团聚体,因而,它在团聚体的形成中起重要作用<sup>[5]</sup>,且相对于大团聚体,它们更多的是作用于微团聚体。钙键复合体、铁铝键复合体是土壤中主要的有机矿质复合体,对微团聚体的形成也起重要作用<sup>[6]</sup>。目前,国内外关于铁铝氧化物和化学结合态有机碳的研究主要集中在大团聚体,而对于红壤微团聚体关注较少。且不同形态铁铝氧化物结晶度、比表面积、官能团结构、表面电荷等特性,导致其对腐殖质和黏土矿物的胶结能力及团聚体影响均不同<sup>[7]</sup>,在有机无机复合过程中发挥的作用也不同,因此,研究各粒级微团聚体中不同形态铁铝氧化物和化学结合态有机碳在

土壤中的垂直分布对于揭示微团聚体形成及其稳定机制具有重要作用。

微生物是土壤的重要组成部分,它在团聚体的形成中也发挥重要的作用。微生物在代谢过程中产生的聚合物如多糖、多糖醛、氨基酸等能够对土壤颗粒产生黏结作用,有些微生物本身的菌丝会对土壤颗粒起到缠绕作用,且菌丝会产生分泌物,这些作用均有利于团聚体的形成<sup>[8-9]</sup>。虽然已有研究显示,微生物中细菌主要存在于微团聚体中,而真菌主要存在于大团聚体中<sup>[10]</sup>,但是红壤中各级微团聚体中微生物群落的分布研究尚不足。且铁铝氧化物和化学结合态有机碳同样对团聚体的形成起重要作用,但是团聚体中铁铝氧化物和化学结合态有机碳与微生物群落的关系也尚未报道。

杉木林是中国南方红壤的典型林分类型之一,但是当前面临土壤退化、生物多样性降低、林分生产力下降等问题。近年来,众多学者围绕杉木林土壤展开了大量研究,包括土壤团聚体、铁铝氧化物、有机碳、微生物等<sup>[11-12]</sup>,但是这些研究并未关注到微团聚体中的铁铝氧化物和微生物。因此,本研究以杉木人工林土壤为调查对象,通过测定杉木林不同土层不同粒级微团聚体胶结物中铁铝氧化物含量、化学结合态有机碳含量和微生物群落多样性,研究它们在微团聚体中的分布,并揭示铁铝氧化物含量和化学结合态有机碳含量与微生物群落多样性的关系,为土壤退化修复提供理论依据。

# 1 研究区概况

研究区位于江西赣江源国家级自然保护区,在武夷山脉西部洋地林场(26°2′56″N,116°19′29″E),海拔 435 m,坡度 20°~30°,坡向东南。土壤成土母质主要为石英岩类风化物,土壤类型主要为红壤,pH 值为 4.5~5.5。该区地处中亚热带与南亚热带过渡区,年平均气温 18.5 ℃,年均降雨量 2 180 mm,年均日照数 1 993 h,全年无霜期 249 d,四季分明,属典型亚热带湿润季风气候。样地设置在自然保护区的试验区,为实施水土保持生态修复的对象。选择的林分是杉木人促更新林,林龄约 15 a。由于受人为干扰严重,立地条件较差,以及土壤养分限制,森林发育不良,林相残败,退化严重。土壤均呈酸性,沿土层深度增加而酸性略有减弱,pH 值为 4.58~5.34。林地内选取的样地平均坡度为 28°,呈东南坡向,主要树种为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Casuarina equisetifolia*),平均树高 4.13 m,平均胸径 5.78 cm,灌木层盖度为 10%,草本层盖度为 78%,乔木郁闭度为 32%。

表 1 洋地林场杉木人工林不同土层土壤化学指标背景值

土层/cm	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )
0—10	28.07	0.61	0.23	11.41	2.27	70.66
10—20	10.43	0.30	0.13	13.83	1.11	48.18
20—30	5.91	0.29	0.13	11.52	0.64	47.00

## 2.2 指标测定

土壤化学指标采用常规方法测定<sup>[13]</sup>,有机质用重铬酸钾外加热法测定,全氮用全自动凯氏定氮法测定,全磷用碱熔—钼锑抗比色法测定,有效磷用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定,全钾用碱熔—火焰光度计的方法测定,速效钾则用乙酸铵浸提—火焰光度计的方法测定。

土壤微团聚体胶结物分离采用沉降虹吸法,分离出粒级为<20,20~50,50~200 μm 的微团聚体胶结物用于铁铝氧化物、结合态有机碳和微生物群落多样性的测定。

土壤微团聚体铁铝氧化物中,游离态铁铝氧化物(Fe<sub>d</sub> 和 Al<sub>d</sub>)用连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠提取,非晶型铁铝氧化物(Fe<sub>o</sub> 和 Al<sub>o</sub>)用草酸铵—草酸提取,络合态铁铝氧化物(Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub>)用焦磷酸钠提取,然后用试铁灵铁铝联合比色法测定波长在 600,370 nm 下各提取液的吸光值<sup>[13]</sup>。

土壤微团聚体结合态有机碳中,钙键结合态有机碳(Ca-SOC)用 0.5 mol/l 的 Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> 溶液提取,铁铝键结合态有机碳[Fe(Al)-SOC]用氢氧化钠(NaOH)

# 2 材料与方法

## 2.1 样品采集与处理

在杉木林分别设立 3 块 20 m×20 m 固定标准地进行采样,每个标准样地相隔 500 m 以上。于 2019 年 4 月在每个标准地坡面的上、中、下 3 部分布设 3 个取样点挖土壤剖面,分别用不锈钢饭盒采集 0—10,10—20,20—30 cm 土层原状土。该林地由于林龄达 15 a,草本层覆盖度高,因此土层厚度达 30 cm 以上,且表层并未流失。

将 3 个采样点同一土层的原状土混合作为 1 个土样,共 9 个土样。将采回的原状鲜土沿土壤自然结构脆弱带用手轻轻掰成直径约为 1 cm 的小土块,剔除植物残体和石块等杂物,并混合均匀。采用四分法取土样过 2 mm 筛备用,一部分置于 4 ℃冷藏冰箱密封保存待处理,剩余小部分土样自然风干后过 1 mm 筛用于测定土壤相关化学指标。测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾作为背景值,结果见表 1。

和焦磷酸钠(Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)混合液提取<sup>[14]</sup>,提取液中的碳用碳氮分析仪(MultiN/C3 100)测定。

土壤微团聚体微生物群落多样性的测定采用磷脂脂肪酸法(PLFA)<sup>[15]</sup>,首先土壤各粒级微团聚体用体积比为 1 : 2 : 0.8 的氯仿:甲醇:柠檬酸缓冲液震荡提取总脂类,然后通过 SPE 硅胶柱分离纯化得到磷脂脂肪酸,接着进行碱性甲脂化,用正己烷(色谱纯,HPLC)溶解待测样品,最后在 Agilent 7 890 AGC 气相色谱仪上测定,采用 MIDI Sherlock 软件系统 (Version 4.5,MIDI,Inc,Newark,DE)鉴定 PLFA 的成分,使用的内标为正十九烷酸甲酯 Nonadecanoic acid(C19 : 0,溶于色谱正己烷)<sup>[16]</sup>。命名采用 Frostegard 方法命名<sup>[17]</sup>。

采用辛普森指数 Simpson(*D*)、香农指数 Shannon-Wiener(*H*)、均匀度指数(*E*) 3 种群落多样性指数来表征微生物群落物种数及其分布均匀程度的综合指标<sup>[18]</sup>,计算方法如下:

Simpson(*D*)辛普森指数计算公式为:

$$D=1-\sum P_i^2$$

(1)

Shannon-Wiener 香农指数(*H*)计算公式为:

$$H=-\sum P_i\ln P_i$$

(2)

Shannon 均匀度指数( $E$ )计算公式为:

$$E=-H/(\ln S)$$

(3)

式中: $P_i=N_i/N$ , $N_i$  是指测得土样中第  $i$  种磷脂脂肪酸含量(PLFAs), $N$  为测得土样中各类磷脂脂肪酸含量的总和; $S$  是磷脂脂肪酸生物标记种类的总数,即为丰富度。

2.3 数据处理

用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计,用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验土层和粒级对微团聚体铁铝氧化物、结合态有机碳、微生物数量以及微生物多样性指数影响的显著性。用 Origin 8.5 进行制图,用 Canoco 5.0 进行微团聚体铁铝氧化物、结合态有机碳与微生物数量、微生物多样性指数之间的冗余分析。

3 结果与分析

3.1 不同粒级微团聚体中铁铝氧化物在土层中的分布

由图 1 可知,从总体上看,土壤中铁铝氧化物含量呈现:游离结晶态( $\text{Fe}_d,\text{Al}_d$ ) $\gg$ 无定形( $\text{Fe}_o,\text{Al}_o$ ) $>$ 络合态( $\text{Fe}_p,\text{Al}_p$ )。对于铁的氧化物,通过方差分析可知,土层仅对络合态铁( $\text{Fe}_p$ )含量有显著影响,而粒级对游离态铁( $\text{Fe}_d$ )含量、非晶型铁( $\text{Fe}_o$ )含量和  $\text{Fe}_p$  含量均有显著影响(表 2)。50~200  $\mu\text{m}$  微团

聚体中的  $\text{Fe}_o$  含量和各粒级微团聚体中的  $\text{Fe}_p$  含量均随土层深度的增加下降明显(图 1b 和 1c)。表层土壤(0—10 cm)中, $\text{Fe}_d$  在 $<20\ \mu\text{m}$  微团聚体中的含量要远高于其他粒级微团聚体(图 1a), $\text{Fe}_o$  在 $<20\ \mu\text{m}$  和50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的含量要明显高于20~50  $\mu\text{m}$ , $\text{Fe}_p$  在 $<20\ \mu\text{m}$  微团聚体中的含量最大,而在50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的含量最小。10—20 cm 和20—30 cm 的土层中,各形态铁的氧化物含量随着微团聚体粒级的减少而增大,其中,增大幅度最大的是  $\text{Fe}_d$ 。

对于铝的氧化物,土层对游离态铝( $\text{Al}_d$ )含量和络合态铝( $\text{Al}_p$ )含量有显著影响,而粒级对各形态铝的氧化物含量均有显著影响(表 2)。随着土层的增加,各粒级微团聚体中的  $\text{Al}_d$  含量有下降趋势,与此相反, $\text{Al}_p$  含量则有上升趋势,且50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的  $\text{Al}_d$  含量和各粒级微团聚体中的  $\text{Al}_p$  含量在土层增加至20—30 cm 时与表层(0—10 cm)差异极大(图 1d 和 1f)。表层土壤(0—10 cm)中,各粒级微团聚体中铝的氧化物含量特别是  $\text{Al}_p$  含量差异不大,10—20 cm 的土层中, $\text{Al}_d$  和非晶型铝( $\text{Al}_o$ ) 在 $<20\ \mu\text{m}$  微团聚体中的含量远高于其他粒级微团聚体(图 1d 和 1e),而在20—30 cm 的土层中,各形态铝的氧化物含量随着微团聚体粒级的变化规律与铁的氧化物类似。

表 2 杉木林土壤各指标的双因素方差分析

指 标	土层		粒级		土层 $\times$ 粒级	
	$F$	$p$	$F$	$p$	$F$	$p$
游离态 $\text{Fe}_d$ 含量	3.347	0.058	145.489	0.000	9.440	0.000
非晶型 $\text{Fe}_o$ 含量	3.436	0.054	99.126	0.000	3.706	0.023
络合态 $\text{Fe}_p$ 含量	352.867	0.000	178.861	0.000	2.543	0.075
游离态 $\text{Al}_d$ 含量	112.556	0.000	198.341	0.000	26.068	0.000
非晶型 $\text{Al}_o$ 含量	2.869	0.083	15.695	0.000	2.940	0.049
络合态 $\text{Al}_p$ 含量	161.477	0.000	7.643	0.004	4.945	0.007
钙键结合态有机碳 Ca-SOC 含量	0.696	0.511	0.276	0.762	0.179	0.946
铁铝键结合态有机碳 Fe(Al)-SOC 含量	0.095	0.910	1.056	0.368	1.452	0.258
真菌 PLFAs 含量	0.860	0.440	17.723	0.000	3.645	0.024
细菌 PLFAs 含量	3.607	0.048	1.703	0.210	3.996	0.017
放线菌 PLFAs 含量	2.549	0.106	3.366	0.057	2.500	0.079
革兰氏阳性菌 PLFAs 含量	6.175	0.009	0.606	0.556	0.510	0.729
革兰氏阴性菌 PLFAs 含量	1.956	0.170	1.246	0.311	3.688	0.023
丛植菌根真菌 PLFAs 含量	10.333	0.001	33.408	0.000	28.920	0.000
丰富度( $S$ )	1.228	0.316	0.894	0.426	2.799	0.057
香农指数( $H$ )	4.419	0.027	0.439	0.652	1.050	0.409
辛普森指数( $D$ )	3.015	0.074	0.106	0.900	0.087	0.985
均匀度( $E$ )	4.207	0.032	3.041	0.073	2.451	0.083

注: $F$  为显著性差异水平; $p$  为检验水平。



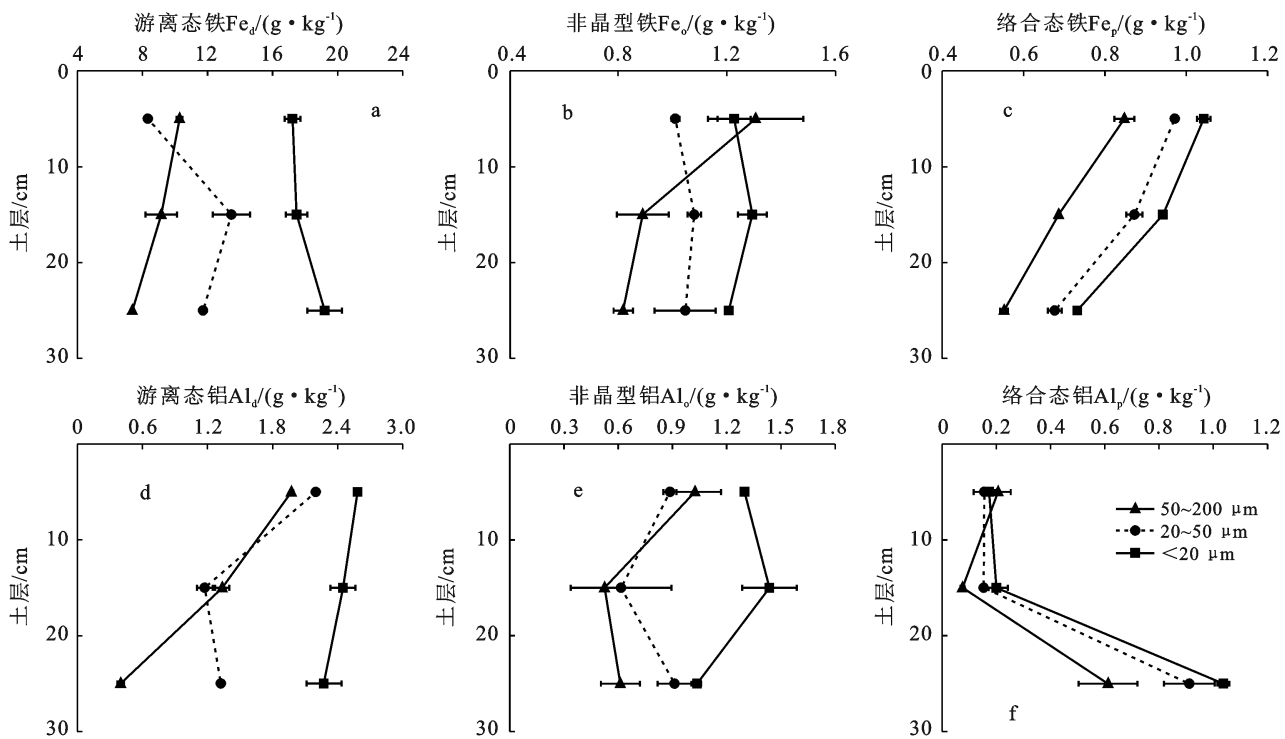


图 1 杉木林土壤微团聚体中铁铝氧化物含量

### 3.2 不同粒级微团聚体中结合态有机碳在土层中的分布

由图 2 可知,从总体上看,土壤中铁铝键结合态有机碳[Fe(Al)-SOC]含量远远高于钙键结合态有机碳(Ca-SOC)。土层、粒级以及它们的交互作用(土层

×粒级)对 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 含量均无显著影响。各粒级团聚体 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 含量随着土层深度的增加无明显变化趋势。表层土壤(0—10 cm)中,<20 μm 和 20~50 μm 微团聚体中的 Fe(Al)-SOC 含量要高于 50~200 μm 微团聚体(图 2b)。

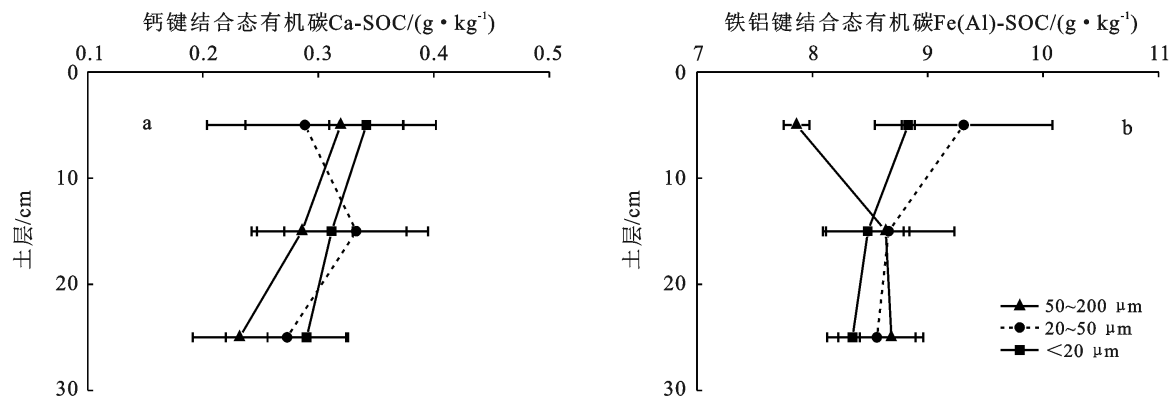


图 2 杉木林土壤微团聚体中结合态有机碳的含量

### 3.3 不同粒级微团聚体中微生物 PLFAs 含量在土层中的分布

由图 3 可知,从总体上看,土壤中细菌和革兰氏阴性菌 PLFAs 含量最高,而真菌、放线菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量最低。土层对细菌、革兰氏阳性菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量均有显著影响,但粒级只对真菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量影响显著(表 2)。真菌 PLFAs 含量在各土层中尤其是在 10—20 cm 土层中随粒级的增加而增加(图 3a)。细菌 PLFAs 含量随土层的变化与粒级有关,粒级为<20 μm 的微团聚

体中细菌 PLFAs 含量在土层增加至 20—30 cm 时大幅度降低,而粒级为 20~50 μm 和 50~200 μm 的微团聚体中细菌 PLFAs 含量在土层增加至 20—30 cm 时大幅度增加,0—10 cm)和 10—20 cm 土层中,细菌 PLFAs 含量最高的是在 50~200 μm 微团聚体中,其次是<20 μm 微团聚体中,最后是 20~50 μm 的微团聚体中,而 20—30 cm 土层中的细菌 PLFAs 含量随粒级的变化则刚好相反(图 3b)。革兰氏阴性菌的变化规律与细菌相一致(图 3b 和 3e)。各粒级微团聚体中的放线菌 PLFAs 含量只有在表层(0—10 cm)时

差异较大,含量最高的是在 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中,其次是<20  $\mu\text{m}$  微团聚体中,最后是 20~50  $\mu\text{m}$  的微团聚体中,粒级为 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的放线菌 PLFAs 含量在土层下降至 10—20 cm 时就迅速下降(图 3c)。各粒级微团聚体中的革兰氏阳性菌 PLFAs 含量在土层下降至 10—20 cm 时就迅速下降,表层(0—10 cm)土壤 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中革兰氏阳

性菌 PLFAs 含量远高于其他粒级(图 3d)。同样的,表层(0—10 cm)土壤 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中丛枝菌根真菌 PLFAs 含量远高于其他粒级,此粒级微团聚体中丛枝菌根真菌 PLFAs 含量随土层深度的增加迅速降低,而<20  $\mu\text{m}$  微团聚体中丛枝菌根真菌 PLFAs 含量在土层增加至 20—30 cm 时略微增加(图 3f)。

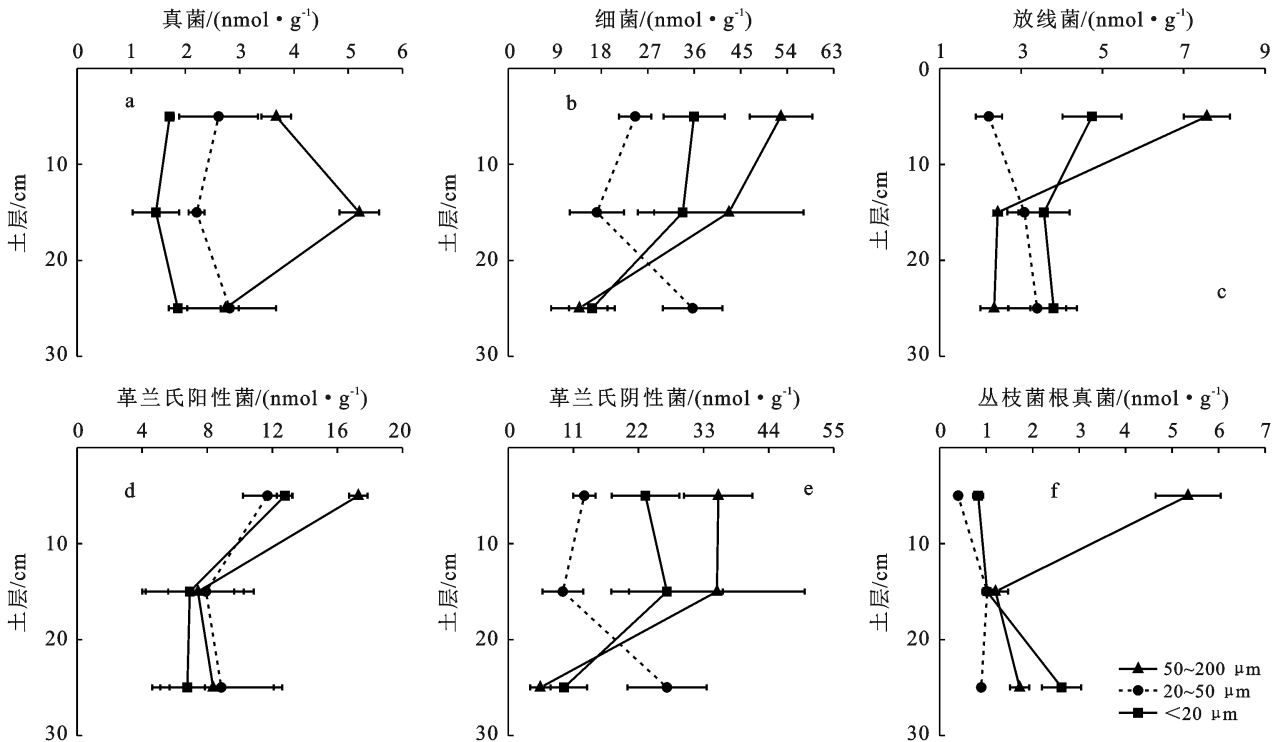


图 3 杉木林土壤微团聚体中微生物 PLFAs 的含量

### 3.4 不同粒级微团聚体中微生物多样性指数在土层中的分布

土层对香农指数( $H$ )和均匀度( $E$ )均有显著影响,而粒级对微生物多样性指数均无显著影响(表 2)。各粒级微团聚体中的微生物丰富度( $S$ )只有在表层(0—10 cm)时差异较大,数值最高的是在<20  $\mu\text{m}$  微团聚体中,其次是 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中,最后是 20~50  $\mu\text{m}$  的微团聚体中(图 4a)。表层(0—10 cm)土壤<20  $\mu\text{m}$  微团聚体中的微生物香农指数( $H$ )高于其他粒级,而 20—30 cm 土层 20~50  $\mu\text{m}$  微团聚体中的微生物香农指数( $H$ )高于其他粒级,<20  $\mu\text{m}$  和 50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的微生物香农指数( $H$ )在土层下降至 10—20 cm 和 20—30 cm 时降幅较大(图 4b)。表层(0—10 cm)土壤各粒级微团聚体微生物辛普森指数( $D$ )高于 10—20 cm 和 20—30 cm 土层(图 4c)。表层(0—10 cm)土壤中,50~200  $\mu\text{m}$  微团聚体中的微生物  $E$  要低于其他粒级微团聚体,其随土层深度的增加而有所增加(图 4d)。

### 3.5 土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物群落的关系

对土壤微团聚体中微生物群落及其多样性指数

与各形态铁铝氧化物进行了冗余分析(RDA)(图 5)。该模型 pseudo- $F = 2.3$ ,  $p = 0.01 < 0.05$ ,比较可靠, RDA 轴 1 和轴 2 总共能解释所有变量的 40.32%,说明微团聚体中各形态铁铝氧化物对微生物群落及其多样性的影响达到了 40.32%。RDA 结果显示,细菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌是该林地的主要微生物。微生物种群与多样性的关系中,放线菌、革兰氏阳性菌 PLFAs 含量与香农指数、辛普森指数有较强的正相关关系,细菌 PLFAs 含量、真菌 PLFAs 含量、革兰氏阴性菌 PLFAs 含量与丰富度有较强的正相关关系,与均匀度指数有较强的负相关关系。微生物种群与铁铝氧化物相关指标的关系中,放线菌 PLFAs 含量、革兰氏阳性菌 PLFAs 含量与  $\text{Fe}_d$  含量显示出极强的负相关关系,细菌 PLFAs 含量与  $\text{Al}_d$  含量、 $\text{Al}_o$  含量显示出极强的正相关关系,与  $\text{Al}_p$  含量显示出极强的负相关关系,丛枝菌根真菌 PLFAs 含量与  $\text{Fe}(\text{Al})\text{-SOC}$  含量显示出极强的负相关关系,真菌 PLFAs 含量、革兰氏阴性菌 PLFAs 含量与  $\text{Al}_d$  含量、 $\text{Al}_o$  含量呈弱正相关关系。微生物多样性与铁铝

氧化物相关指标的关系中,香农指数、辛普森指数与  $\text{Fe}_\text{d}$  含量显示出极强的负相关关系,丰富度指数与  $\text{Al}_\text{d}$ ,  $\text{Al}_\text{o}$ ,  $\text{Fe}_\text{p}$  和  $\text{Ca-SOC}$  含量呈强正相关关系,与  $\text{Al}_\text{p}$  含量呈强负相关关系,而均匀度指数则与此相反。

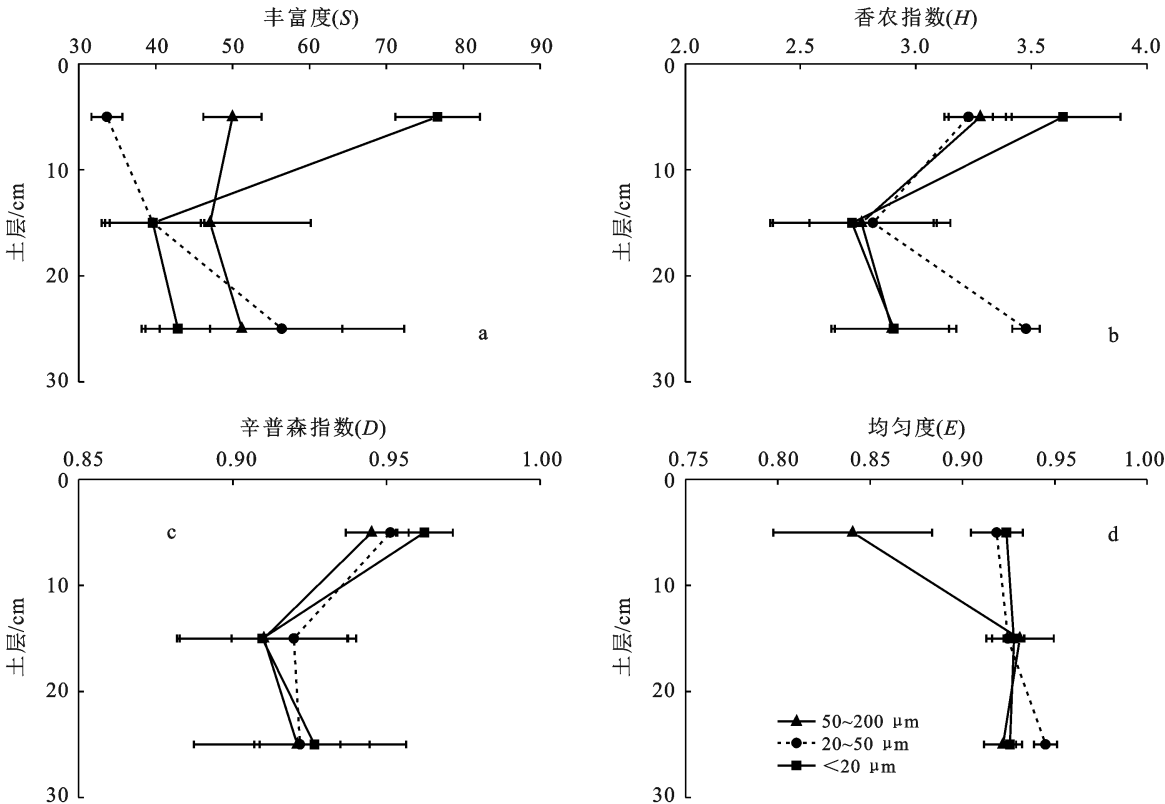
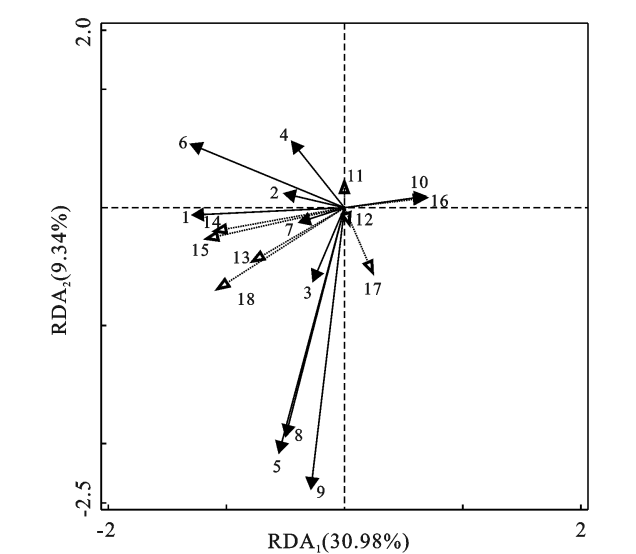


图 4 杉木林土壤微团聚体中微生物多样性指数



注:1 细菌;2 真菌;3 放线菌;4 丛枝菌根真菌;5 革兰氏阳性菌;6 革兰氏阴性菌;7 微生物丰富度;8 微生物香农指数;9 微生物辛普森指数;10 微生物均匀度;11 游离态铁;12 非晶型铁;13 络合态铁;14 游离态铝;15 非晶型铝;16 络合态铝;17 铁铝键结合态有机碳;18 钙键结合态有机碳;实心箭头是物种变量,空心箭头是环境变量。

图 5 杉木林土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物群落的冗余分析

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

一般而言,形成团聚体的胶结物质可分为有机胶

体、无机胶体以及有机无机复合胶体,当土壤有机质含量较高且黏土矿物和铁铝氧化物含量较低时,有机胶体发挥主要作用,当有机质含量较低且黏土矿物和铁铝氧化物含量较高时,无机胶体和黏粒的内聚力发挥主要作用。章明奎等<sup>[19]</sup>认为大粒径团聚体的主要胶结物质是有机质等有机胶体,微团聚体的胶结物质是铁铝氧化物等无机胶体。铁铝氧化物在南方红壤团聚体的形成中扮演十分重要的角色。土壤铁铝氧化物中,游离态铁( $\text{Fe}_\text{d}$ )铝( $\text{Al}_\text{d}$ )主要来源于成土母质,显著影响土壤理化特性各形态<sup>[20]</sup>;土壤非晶形氧化铁( $\text{Fe}_\text{o}$ )铝( $\text{Al}_\text{o}$ )相较于其他形态的铁铝氧化物拥有更大的比表面积和更密的羟基位点,对 SOC 和有机氮的固持具有重要贡献;土壤络合态氧化铁( $\text{Fe}_\text{p}$ )铝( $\text{Al}_\text{p}$ )参与土壤有机复合物的形成,引起金属离子,特别是铁、铝离子在土壤中的移动,在土壤剖面的发生和肥力的保持中具有重要的作用<sup>[21]</sup>。不同形态铁铝氧化物在土壤中的含量不同。王小红等<sup>[22]</sup>研究了中亚热带山区 3 种林分土壤铁铝氧化物含量的分布,发现 3 种林分土壤均呈现:游离结晶态( $\text{Fe}_\text{d}$ ,  $\text{Al}_\text{d}$ ) > 无定形( $\text{Fe}_\text{o}$ ,  $\text{Al}_\text{o}$ ) > 络合态( $\text{Fe}_\text{p}$ ,  $\text{Al}_\text{p}$ )。与此类似,本研究中杉木林土壤游离态铁铝含量远远大于非晶型和络合态铁铝氧化物含量,这是由于南方红壤呈酸

性,而酸性环境下的强还原条件更有利于结合态铁铝的大量溢出,导致游离态铁铝含量明显增加<sup>[23]</sup>。土壤中高含量的游离态铁铝说明杉木林土壤遭受的风化和淋溶的作用较强,土壤发育程度也较高<sup>[24]</sup>。铁铝氧化物在不同土层中含量有所不同。衡利沙等<sup>[25]</sup>研究黄棕壤中铁铝氧化物的分布发现铁铝氧化物含量一般随土层增加逐渐降低。本研究中,杉木林土壤  $Fe_p$  和  $Al_d$  含量也随土层深度的增加而逐渐降低,表层土壤  $Al_d$  含量更高的原因是表层土壤有凋落物及丰富的根系等作用,较深层土壤水分更多,有利于羟基铝的形成<sup>[26]</sup>,而表层土壤  $Fe_p$  含量更高的原因则是由于络合态铁本身就是铁氧化物和有机质的胶结,表层土壤有机质含量更高,更加有利于络合态铁的形成<sup>[27]</sup>。而与此相反,20—30 cm 的土层中的  $Al_p$  含量远高于 0—20 cm 的土层,这可能的原因是 0—20 cm 的土层土壤酸性更高,导致结合态铁铝大量转化为  $Al_d$ 。铁铝氧化物含量一般随微团聚体粒径的减少而逐渐增大<sup>[25]</sup>,本研究各形态铁铝氧化物含量总体趋势也遵循这一规律,但随土层深度增加,这一规律更加明显。

结合态有机碳通过钙键和铁铝键结合,一定程度上对有机碳起到保护作用,抵制微生物对有机碳的分解,减缓其在土壤中的周转速度,从而促进有机碳的积累<sup>[26]</sup>,其中,铁铝键结合态有机碳  $[Fe(Al)-SOC]$  稳定性高于钙键结合态有机碳  $(Ca-SOC)$ 。本研究中土壤中  $Fe(Al)-SOC$  含量远远高于  $Ca-SOC$ ,这从侧面也印证了  $Fe(Al)-SOC$  稳定性高于  $Ca-SOC$  这一结论。研究表明,土壤微团聚体有机碳随微团聚体粒径的减少而增加<sup>[28-29]</sup>,但是土壤微团聚体  $Fe(Al)-SOC$  和  $Ca-SOC$  随粒径的变化规律研究较少。本研究结果显示钙  $Ca-SOC$  含量在不同土层和不同微团聚体粒径下差异并不显著,而  $Fe(Al)-SOC$  在  $<20 \mu m$  和  $20 \sim 50 \mu m$  微团聚体中含量要高于  $50 \sim 200 \mu m$  微团聚体。

微生物在团聚体的形成和稳定中具有不可忽视的作用,细菌菌体本身的碳水化合物是团聚体形成的重要组成部分,其表面带着的负电荷可以通过静电引力吸附土壤颗粒,形成团聚体。菌根真菌会形成菌丝体,对土壤颗粒起到缠绕作用<sup>[30]</sup>。真菌及放线菌可以在土壤颗粒间形成菌丝桥,从而影响土壤团聚体的形成。微生物代谢产物如蛋白、胞外多糖、脂质、球囊霉素等是微团聚体胶结物的形成核心<sup>[31]</sup>。不同微生物类群在微团聚体中组成和分布不同,荣勤雷<sup>[32]</sup>研究发现菜田石灰性褐土微团聚体中真菌含量高于细菌,而本研究结果表明杉木林土壤微团聚体细菌 PLFAs 含量远高于真菌 PLFAs 含量,这与 Gupta(2014)等的研究结果相一致。而在微团聚体的粒径层面上,根据张

维等的报道,细菌和真菌主要分布在小于  $53 \mu m$  中,放线菌主要分布在  $53 \sim 200 \mu m$  粒级微团聚体中<sup>[33]</sup>,本研究结果却显示细菌、真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量均是在粒径为  $50 \sim 200 \mu m$  的微团聚体中含量最高,且不同粒径微团聚体中微生物的含量在表层土壤中差异最大。上述研究中不同种类微生物在土壤微团聚体中含量高低不一致的原因可能是受土壤酸碱性和通气透水性、土壤等的多重影响,因为不同种类微生物所需的酸碱环境、生存孔隙和碳源种类不同<sup>[34]</sup>。另外,杉木林土壤微团聚体中微生物丰富度、香农指数和辛普森指数总体上均是表层土壤最高,且在表层土壤中,粒径最小的微团聚体微生物丰富度、香农指数最高,主要原因是表层土壤通气性更好,有机碳含量更高,种类更丰富,为土壤微生物的繁殖创造了良好的条件<sup>[35]</sup>。

## 4.2 结论

目前,关于土壤微团聚体中微生物群落多样性与土壤因子关系的研究报道较多,而与铁铝氧化物关系的研究报道较少。本研究中放线菌 PLFAs 含量、革兰氏阳性菌 PLFAs 含量与  $Fe_d$  含量显示出极强的负相关关系,细菌 PLFAs 含量与  $Al_d$  含量、 $Al_o$  含量显示出极强的正相关关系,这可能是由于放线菌、革兰氏阳性菌对酸性环境耐受力较弱,细菌对酸性环境耐受力较强,而红壤  $Fe_d$  和  $Al_d$  含量越高,酸性也越强,因此,放线菌、革兰氏阳性菌 PLFAs 含量越低,细菌 PLFAs 含量越高。真菌、细菌、革兰氏阴性菌和丛枝菌根真菌 PLFAs 含量与  $Fe(Al)-SOC$  含量均呈负相关,说明这几类微生物菌无法利用与铁铝键结合而成的有机碳,这对于土壤中有机碳的积累有积极作用。

## [参 考 文 献]

- [1] Wang Qing, Wang Dan, Wen Xuefa, et al. Differences in SOM decomposition and temperature sensitivity among soil aggregate size classes in a temperate grasslands [J]. PLoS One, 2015, 10(2): e0117033.
- [2] Das B, Chakraborty D, Singh V K, et al. Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 9-18.
- [3] Volikov A B, Kholodov V A, Kulikova N A, et al. Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils [J]. Catena, 2016, 136: 229-236.
- [4] Li Wei, Zheng Zicheng, Li Tingxuan, et al. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon fractions within water-stable aggregates in the hilly



- region of Western Sichuan, China [J]. Catena, 2015, 133:198-205.
- [5] 张耀方,赵世伟,王子龙,等.黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J].中国水土保持科学,2015,13(5):145-150.
- [6] Xu Jianmin, Yuan Keneng. Dissolution and fractionation of calcium-bound and iron-and aluminum-bound humus in soils [J]. Pedosphere, 1993(1):75-80.
- [7] Pronk G J, Heister K, Kögel-Knabner I. Iron oxides as major available interface component in loamy arable topsoils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6):2158-2168.
- [8] Caesar-Tonthat T, Stevens W B, Sainju U M, et al. Soil-aggregating bacterial community as affected by irrigation, tillage, and cropping system in the northern great plains [J]. Soil Science, 2014,179(1):11-20.
- [9] Zheng Weishuang, Morris E K, Rillig M C. Ectomycorrhizal fungi in association with *Pinus sylvestris* seedlings promote soil aggregation and soil water repellency [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,78:326-331.
- [10] Gupta V V S R, Germida J J. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80:3-9.
- [11] 朱丹苗,陈俊辉,姜培坤.杉木人工林土壤有机碳和微生物特征及其影响因素的研究进展[J].浙江农林大学学报,2021,38(5):973-984.
- [12] 赵友朋,孟苗婧,张金池,等.不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系[J].水土保持通报,2018, 38(4):75-81.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [14] 徐建民,侯惠珍,袁可能.土壤有机矿质复合体研究(Ⅷ):分离钙键有机矿质复合体的浸提剂——硫酸钠[J].土壤学报,1998,35(4):468-474.
- [15] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959,37(8):911-917.
- [16] 李范,周星梅,蒋海波,等.磷脂脂肪酸分析中内标物的使用及数据处理建模[J].微生物学通报,2014,41(12): 2574-2581.
- [17] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 1996,22:59-65.
- [18] 姚槐应,黄昌勇.土壤微生物生态学及其试验技术[M].北京:科学出版社,2006.
- [19] 章明奎,何振立.成土母质对土壤团聚体形成的影响[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(3):198-202.
- [20] De Carvalho Filho A, Inda A V, Fink J R, et al. Iron oxides in soils of different lithological Origins in Feriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil) [J]. Applied Clay Science, 2015,118:1-7.
- [21] Fu Q L, Deng Y L, Hu H Q, et al. Sorption of the toxin of *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* by soils: Effects of iron and aluminium oxides [J]. European Journal of Soil Science, 2012,63(5):565-570.
- [22] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J].生态学报, 2016,36(9):2588-2596.
- [23] 郭杏妹,吴宏海,罗媚,等.红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J].岩石矿物学杂志, 2007,26(6):515-521.
- [24] 熊毅,陈培,林责任.土壤胶体:土壤胶体的物质基础[M].北京:科学出版社,1983.
- [25] 衡利沙,王代长,蒋新,等.黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J].环境科学,2010,31(11): 2748-2755.
- [26] Plucknett D L, Sherman G D. Extractable aluminum in some Hawaiian soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963,27(1):39-41.
- [27] 付庆灵,邓雅丽,胡红青,等.南方主要土壤中铁铝氧化物对土壤吸附 Bt 蛋白的影响[J].中国农业科学,2012, 45(23):4836-4843.
- [28] 王晟强,郑子成,李廷轩.四川茶园土壤微团聚体组成及其分形特征[J].林业科学,2014,50(9):10-17.
- [29] 吴铭,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤微团聚体及有机碳分布特征[J].长江流域资源与环境,2014,23 (7):1041-1047.
- [30] Rillig M C, Aguilar-Trigueros C A, Bergmann J, et al. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation [J]. New Phytologist, 2015,205 (4):1385-1388.
- [31] Sessitsch A, Weilharther A, Gerzabek M H, et al. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001,67(9):4215-4224.
- [32] 荣勤雷.有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤团聚体微生物特性的影响[D].北京:中国农业科学院,2018.
- [33] 张维,蒋先军,胡宇,等.微生物群落在团聚体中的分布及耕作的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2009, 31(3):131-135.
- [34] 张旭博,徐梦,史飞.藏东南林芝地区典型农业土地利用方式对土壤微生物群落特征的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(2):331-342.
- [35] Stark C H, Condrón L M, Callaghan M O, et al. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(6):1352-1363.