

# 中国南亚热带乡土针阔树种人工林土壤不同形态铁铝氧化物对有机碳含量的影响

朱豪<sup>1</sup>, 肖指柔<sup>1</sup>, 明安刚<sup>2,3</sup>, 滕金倩<sup>1</sup>, 覃林<sup>1</sup>

(1.广西大学 林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西 南宁 530004; 2.中国林业科学研究院 热带林业试验中心, 广西 凭祥 532600; 3.广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

**摘要:** [目的] 探究南亚热带地区乡土针阔树种人工林土壤不同形态铁铝氧化物对土壤有机碳含量的作用特征, 为深入理解该地区乡土树种人工林土壤有机碳积累机理提供科学依据。[方法] 以位于广西壮族自治区凭祥市的中国林业科学研究院林业试验中心的马尾松 (*Pinus massoniana*) 纯林、格木 (*Erythrophleum fordii*) 纯林和马尾松—格木混交林 3 个乡土针阔树种人工林为研究对象, 应用电感耦合等离子体发射光谱仪以及重铬酸钾法分别测定各林分不同土层 (0—20, 20—40, 40—60 cm) 土壤铁铝氧化物含量和有机碳含量, 采用方差分析法检验各观测指标在不同林分不同土层间的差异性, 利用 Pearson 相关分析法探讨土壤不同形态铁铝氧化物与有机碳之间的关系。[结果] 马尾松—格木混交林土壤有机碳含量显著高于马尾松林和格木林, 且 3 个林分土壤有机碳含量均随土层深度增加而减少; 3 个人工林土壤中各形态铁铝氧化物含量总体表现为: 游离态氧化铁 ( $Fe_d$ ) > 游离态氧化铝 ( $Al_d$ ) > 无定形氧化铁 ( $Fe_o$ ) > 无定形氧化铝 ( $Al_o$ ) > 络合态氧化铁 ( $Fe_p$ ) > 络合态氧化铝 ( $Al_p$ ); 土壤  $Fe_d$  与土壤有机碳含量显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 而土壤  $Fe_o$ ,  $Fe_p$  和  $Al_p$  与土壤有机碳含量呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。[结论] 南亚热带乡土针阔树种人工林土壤  $Fe_d$  含量高, 因而增强了土壤有机碳的矿化能力,  $Fe_o$ ,  $Fe_p$  和  $Al_p$  含量虽少, 但有助于提升土壤有机碳的固持与稳定。

**关键词:** 乡土树种; 人工林; 土壤铁铝氧化物; 土壤有机碳; 南亚热带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0386-07

中图分类号: S714

**文献参数:** 朱豪, 肖指柔, 明安刚, 等. 中国南亚热带乡土针阔树种人工林土壤不同形态铁铝氧化物对有机碳含量的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 386-392. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220824.003; Zhu Hao, Xiao Zhirou, Ming Angang, et al. Effects of different forms of iron and aluminum oxides on soil organic carbon content under native coniferous and broadleaf plantations in south subtropical region of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 386-392.

## Effects of Different Forms of Iron and Aluminum Oxides on Soil Organic Carbon Content Under Native Coniferous and Broadleaf Plantations in South Subtropical Region of China

Zhu Hao<sup>1</sup>, Xiao Zhirou<sup>1</sup>, Ming Angang<sup>2,3</sup>, Teng Jinqian<sup>1</sup>, Qin Lin<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 3. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different forms of iron and aluminum oxides on soil organic carbon content in native coniferous and broadleaf plantations in south subtropical region of China were studied in order to provide a scientific basis for further understanding the soil organic carbon accumulation mechanism of native tree plantations in this region. [Methods] The study was conducted in three native coniferous and broadleaf planted forests including a pure *Pinus massoniana* coniferous plantation, a pure *Erythrophleum fordii*

收稿日期: 2022-02-07

修回日期: 2022-06-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于系统发育与功能性状结构探讨南亚热带典型人工林土壤细菌群落构建机制”(31560109)

第一作者: 朱豪(1995—), 男(汉族), 江苏省南通市人, 硕士研究生, 研究方向为森林土壤生态。Email: 3498865145@qq.com。

通信作者: 覃林(1967—), 男(汉族), 湖北省宣恩县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事森林生态与经营研究。Email: nilniq@gxu.edu.cn。

broadleaf plantation, and a mixed plantation of these species located at the Experimental Center of Tropical Forestry, the Chinese Academy of Forestry, at Pingxiang City, Guangxi Autonomous Region. ICP-OES and the potassium dichromate method were respectively used to measure the content of iron and aluminum oxides and soil organic carbon content in different soil layers (0—20, 20—40, 40—60 cm) under each plantation. Analysis of variance was used to determine differences in observed indicators in different soil layers and stands. Pearson correlation analysis was used to test the relationship between different forms of iron and aluminum oxides and organic carbon. [Results] The content of soil organic carbon in the mixed plantation of *P. massoniana* and *E. fordii* was significantly greater than in the pure *P. massoniana* plantation and the pure *E. fordii* plantation, and the content of soil organic carbon decreased with increasing soil depth in the three plantations.  $Fe_d$  (total free mineral Fe oxides) was the highest of all forms of iron and aluminum oxides in the studied stands, followed by  $Al_d$  (total free mineral Al oxides),  $Fe_o$  (non-crystalline mineral Fe oxides),  $Al_o$  (non-crystalline mineral Al oxides),  $Fe_p$  (organic bounded mineral Fe oxides), and  $Al_p$  (organic bounded mineral Al oxides). Furthermore,  $Fe_d$  and soil organic carbon had a significant negative correlation ( $p < 0.05$ ), while  $Fe_o$ ,  $Fe_p$ , and  $Al_p$  were positively and significantly correlated with soil organic carbon content ( $p < 0.05$ ). [Conclusion] Soil organic carbon mineralization was enhanced due to high levels of  $Fe_d$  under native coniferous and broadleaf plantations in south subtropical region of China. Although  $Fe_o$ ,  $Fe_p$ , and  $Al_p$  contents were low, they could increase soil organic carbon retention and stability.

**Keywords:** native tree species; planted forest; soil iron-aluminum oxides; soil organic carbon; south subtropical region of China

土壤是陆地上最大的碳库,储存的碳量超过了植被碳库和大气碳库的总和<sup>[1]</sup>。土壤有机碳(SOC)是土壤碳库的主要组分<sup>[2]</sup>,不仅为土壤微生物提供营养物质与能量,还在促进良好土壤结构形成、调节全球气候变化和维持全球碳平衡等方面发挥着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。森林土壤有机碳占全球土壤有机碳库的40%左右<sup>[4]</sup>,因此,其任何微小的变化都会对土壤碳库产生较大的影响,进而影响森林生态系统碳循环和全球气候的稳定性。

土壤铁铝氧化物是土壤中的重要活性矿物<sup>[5]</sup>,依存在形态的不同分为游离态( $Fe_d$ ,  $Al_d$ )、无定形态( $Fe_o$ ,  $Al_o$ )和络合态( $Fe_p$ ,  $Al_p$ )3种<sup>[6]</sup>,影响和控制着土壤有机碳的吸附与解吸、沉淀与溶解等动态过程<sup>[7]</sup>。Zhao等<sup>[8]</sup>研究表明,中国南方稻田、森林和旱地的土壤游离态氧化铁( $Fe_d$ )能够吸附土壤有机碳;Wan等<sup>[9]</sup>研究发现,中国中部和东部地区土壤络合态氧化铁( $Fe_p$ )能够结合农业土壤中6.2%~31.2%的土壤有机碳,其机制主要表现为吸附作用和共沉淀作用;Qi等<sup>[10]</sup>证实在不同耕作制度下的中国南方稻田土,其铁铝氧化物对土壤有机碳分解有显著影响。然而,由于不同形态铁铝氧化物结晶度、比表面积和表面电荷等特性的差异,不同形态铁铝氧化物对土壤有机碳含量的影响机制仍尚无定论。特别是目前有关铁铝氧化物对土壤有机碳含量影响的研究多集中在农业土壤,而关于森林土壤不同形态铁铝氧化物对土壤有机碳含量如何作用还缺乏足够的研究。

近年来,如何提高人工林生态系统的碳储量和土壤碳固持的能力已经纳入人工林的经营管理范畴<sup>[11]</sup>。乡土阔叶树种人工林和针阔混交林正逐渐替代全球大面积分布的针叶人工林,成为最有前景的森林经营模式<sup>[12-13]</sup>。由于中国亚热带地区水热资源相对丰富而成为造林再造林的优先发展区域,因此,营建乡土阔叶和针阔混交林将是该地区未来人工林的主要经营措施之一。但是,至今有关亚热带乡土针阔树种人工林土壤铁铝氧化物对土壤有机碳含量的影响机制还知之甚少。为此,本文以南亚热带地区马尾松纯林、格木纯林和马尾松—格木混交林等3个乡土针阔树种人工林为研究对象,分析不同土层深度(0—20, 20—40, 40—60 cm)不同形态铁铝氧化物含量及有机碳含量,探讨人工林分土壤铁铝氧化物与有机碳的关系,旨在阐明各形态铁铝氧化物对土壤有机碳含量的作用机制,为深入理解南亚热带地区乡土树种人工林土壤有机碳积累机理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于广西壮族自治区凭祥市的中国林业科学研究院热带林业试验中心大青山试验场(22°10'N, 106°42'E),属湿润半湿润的南亚热带季风气候区,干湿季节明显(4—9月为雨季,10月至翌年3月为旱季),年均气温21.1℃;年均降雨量达1350 mm,年蒸发量达1261~1388 mm,相对湿度

达 80%~84%;地貌类型以低山丘陵为主,坡度 25°左右,土壤为花岗岩发育形成的砖红壤<sup>[21]</sup>。

### 1.2 样地设置与样品采集

2021 年 1 月在该区域选择马尾松纯林、格木纯林以及马尾松—格木混交林等 3 个乡土针阔树种人工林为研究对象。这 3 个人工林均于 2006 年在马尾松林皆伐迹地上种植,造林密度为 2 500 株/hm<sup>2</sup>,其中混交林中马尾松与格木的株数比为 3:1。分别在各人工林内设置 3 块 20 m×20 m 的样地,且每块样

地之间至少间隔 20 m。在每块样地内,首先进行林分调查,记录检尺树木的胸径、树高以及林下植被种类;然后采用 5 点 S 型取样方法用内径 5 cm 的土钻采集表层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)和底层(40—60 cm)土样,除去动植物残体与石块等杂质后,将同层土样混合构成一个混合土样装入无菌采样袋带回实验室。新鲜混合土样在实验室内自然风干后过 0.25 mm 筛,用于测定土壤铁铝氧化物和有机碳含量。3 个人工林的基本林分特征见表 1。

表 1 3 个研究人工林分的基本概况

林分类型	海拔高度/ m	坡向	坡度/ (°)	胸径/ cm	树高/ m	密度 (株/hm <sup>2</sup> )	林下主要植被
PMP	190~240	NE	20	14.7	11.6	1 700	蔓生莠竹、弓果黍、淡竹叶
EFP	170~220	NE	25	13.7	13.7	1 125	海金沙、五节芒、铁芒萁
MPE	180~230	NE	22	15.6	13.2	750	海金沙、蔓生莠竹、弓果黍

注:PMP 为马尾松林(*Pinus massoniana*);EFP 为格木林(*Erythrophleum fordii*);MPE 为马尾松—格木混交林。蔓生莠竹学名为 *Microstegium vagans*,弓果黍为 *Cyrtococcum patens*,淡竹叶为 *Lophatherum gracile*,海金沙为 *Lygodium japonicum*,五节芒为 *Miscanthus floridulus*,铁芒萁为 *Dicranopteris dichotoma*。

### 1.3 指标测定方法

土壤有机碳含量采用重铬酸钾法测定(LY/T1237-1999)。土壤中铁铝氧化物的提取方法参照鲁如坤<sup>[14]</sup>,即用连二亚硫酸盐—柠檬酸盐—碳酸氢盐(DCB)溶液浸提土壤游离态氧化铁(Fe<sub>d</sub>)和氧化铝(Al<sub>d</sub>),无定形氧化铁(Fe<sub>o</sub>)和氧化铝(Al<sub>o</sub>)用 0.2 mol/L 草酸铵溶液(pH=3.0)浸提,络合态氧化铁(Fe<sub>p</sub>)和氧化铝(Al<sub>p</sub>)用 0.1 mol/L 焦磷酸钠(Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)浸提。浸提液用 ICP-OES(Optima 8 000, PerkinElmer, USA)测定。

### 1.4 数据统计分析

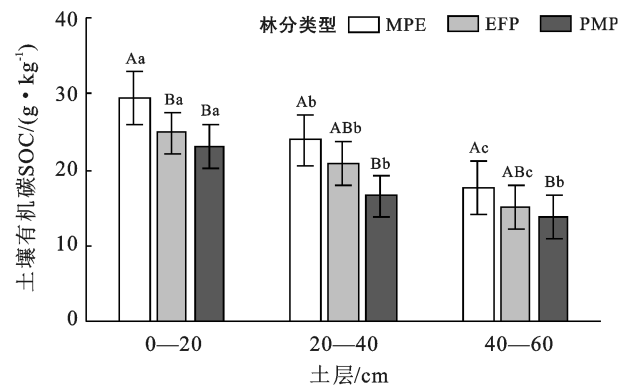
采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检测林分类型、土层深度以及林分类型与土层深度交互作用对土壤铁铝氧化物和有机碳含量的影响差异;利用单因素方差分析(one-way ANOVA)判定土壤铁铝氧化物及有机碳含量在相同土层不同林分类型之间或相同林分不同土层之间的差异显著性,并用 Duncan 法进行多重比较;所有数据在分析之前进行正态分布检验及方差齐性检验。利用 Pearson 相关分析法检验土壤铁铝氧化物与有机碳之间的相关性。计算由 SPSS 24.0 软件(IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA)完成,利用 GraphPad Prism 8.3 软件做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分不同土层的土壤有机碳含量

双因素方差分析表明,林分类型、土层对土壤有

机碳含量具有显著影响( $p < 0.05$ ),而二者交互作用的影响未达显著性。相同土层不同林分比较而言,在 0—20 cm 土层中,马尾松—格木混交林中的有机碳含量显著高于马尾松林和格木林( $p < 0.05$ ),在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层的有机碳含量均是马尾松—格木混交林显著高于马尾松林。相同林分不同土层比较来看,在各林分中土壤有机碳含量均随土层深度增加而呈显著性递减趋势( $p < 0.05$ )(图 1)。



注:不同大写字母表示同一土层不同林分类型间差异显著( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一林分类型不同土层间差异显著( $p < 0.05$ ). \*为  $p < 0.05$ ;ns 为  $p > 0.05$ 。

图 1 3 个人工林不同土层土壤有机碳含量的比较

### 2.2 不同林分不同土层的土壤铁铝氧化物含量

3 个林分在各土层的土壤铁铝氧化物含量显示(表 2),在不同形态氧化铁中(Fe<sub>d</sub>)含量高于(Fe<sub>o</sub>)和

( $Fe_p$ ),  $Fe_p$  含量最少;在不同氧化物中, ( $Al_d$ ) 含量  $>$  ( $Al_o$ ) 含量  $>$  ( $Al_p$ ) 含量。从 0—60 cm 土层深度来看, 3 个林分整体上表现为  $Fe_d$  含量远高于其他 5 个氧化物, 而其他氧化物含量大小依次是:  $Al_d > Fe_o > Al_o > Fe_p > Al_p$ 。

双因素方差分析进一步表明(表 2), 土壤铁铝氧化物含量受林分类型影响作用显著( $p < 0.01$ ), 而土层以及林分类型与土层的交互效应对土壤铁铝氧化物含量均无显著影响。各形态铁铝氧化物含量在不同林分类型间的差异依土层而异。在 0—20 cm 土层, 各形态铁铝氧化物含量在不同林分类型之间呈现显著性差异( $p < 0.05$ ), 其中,  $Fe_d$ ,  $Al_d$  和  $Al_o$  含量表现

为格木林明显低于马尾松林和马尾松—格木混交林;  $Fe_o$  和  $Al_p$  含量则是马尾松林明显低于格木林和马尾松—格木混交林;  $Fe_p$  在马尾松—格木混交林中的含量显著大于马尾松林和格木林。在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层, 仅有  $Al_d$ ,  $Fe_o$  和  $Al_o$  含量在不同林分类型存在显著差异。其中, 在 0—20 cm 土层,  $Al_d$  和  $Al_o$  含量均是格木林显著低于马尾松林和马尾松—格木混交林, 而  $Fe_o$  含量则是马尾松林明显低于格木林和马尾松—格木混交林; 在 40—60 cm 土层,  $Al_d$  含量是格木林显著低于马尾松林和马尾松—格木混交林,  $Fe_o$  和  $Al_o$  含量为马尾松显著低于马尾松—格木混交林。

表 2 不同林分不同土层的土壤铁铝氧化物含量比较(平均数±标准差,  $n=3$ )

土层/cm	林分类型	$Fe_d/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$Al_d/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$Fe_o/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$Al_o/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$Fe_p/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$Al_p/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
0—20	PMP	21.34±3.98 <sup>a</sup>	3.92±0.41 <sup>a</sup>	1.13±0.67 <sup>b</sup>	1.71±0.21 <sup>ab</sup>	0.52±0.02 <sup>b</sup>	0.38±0.21 <sup>b</sup>
	EFP	16.02±0.71 <sup>b</sup>	2.96±0.20 <sup>b</sup>	2.39±0.23 <sup>a</sup>	1.38±0.11 <sup>b</sup>	0.72±0.42 <sup>b</sup>	0.84±0.32 <sup>ab</sup>
	MPE	17.71±3.47 <sup>ab</sup>	4.01±0.49 <sup>a</sup>	3.11±0.33 <sup>a</sup>	2.24±0.62 <sup>a</sup>	1.54±0.48 <sup>a</sup>	1.39±0.52 <sup>a</sup>
20—40	PMP	22.92±5.53 <sup>a</sup>	4.11±0.02 <sup>a</sup>	1.42±0.44 <sup>b</sup>	1.79±0.05 <sup>ab</sup>	0.62±0.04 <sup>a</sup>	0.25±0.16 <sup>a</sup>
	EFP	16.73±1.63 <sup>a</sup>	3.12±0.23 <sup>b</sup>	2.06±0.16 <sup>ab</sup>	1.63±0.19 <sup>b</sup>	0.69±0.34 <sup>a</sup>	0.79±0.21 <sup>a</sup>
	MPE	21.56±2.28 <sup>a</sup>	3.89±0.05 <sup>a</sup>	2.39±0.41 <sup>a</sup>	2.39±0.52 <sup>a</sup>	0.93±0.13 <sup>a</sup>	1.08±0.69 <sup>a</sup>
40—60	PMP	24.80±4.88 <sup>a</sup>	5.55±1.65 <sup>a</sup>	1.59±0.14 <sup>b</sup>	1.47±0.57 <sup>b</sup>	0.30±0.22 <sup>a</sup>	0.19±0.16 <sup>a</sup>
	EFP	18.71±0.45 <sup>a</sup>	3.13±0.30 <sup>b</sup>	2.05±0.33 <sup>ab</sup>	1.74±0.22 <sup>ab</sup>	0.87±0.04 <sup>a</sup>	0.75±0.44 <sup>a</sup>
	MPE	23.63±3.47 <sup>a</sup>	4.26±0.36 <sup>ab</sup>	2.46±0.48 <sup>a</sup>	2.50±0.59 <sup>a</sup>	0.82±0.49 <sup>a</sup>	0.78±0.41 <sup>a</sup>
	林分	* *	* *	* *	* *	* *	* *
双因素方差分析	土层	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	林分×土层	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:① $Fe_d$  为游离态氧化铁,  $Fe_o$  为无定形氧化铁,  $Fe_p$  为络合态氧化铁,  $Al_d$  为游离态氧化铝,  $Al_o$  为无定形氧化铝,  $Al_p$  为络合态氧化铝; ②不同小写字母表示同一土层不同林分类型间差异显著( $p < 0.05$ ); ③ \* \* 为  $p < 0.01$ ; ns 为  $p > 0.05$ 。

### 2.3 人工林土壤有机碳与铁铝氧化物的相关性

各形态铁铝氧化物与土壤有机碳的 Pearson 相关分析发现,  $Fe_d$  与土壤有机碳含量达到显著负相关关系( $p < 0.05$ )(图 2a), 而  $Fe_o$ ,  $Fe_p$  和  $Al_p$  均与土壤有机碳含量达到显著正相关( $p < 0.05$ )(图 2c, 2e, 2f), 但  $Al_d$  和  $Al_o$  与土壤有机碳的关系未达显著性(图 2b, 2d)。这说明尽管  $Fe_o$ ,  $Fe_p$  和  $Al_p$  在土壤中含量虽然远低于  $Fe_d$ , 但三者对土壤有机碳的影响效果不低于  $Fe_d$ 。

## 3 讨论

土壤中的碳包括无机碳与有机碳, 其中有机碳是指土壤中各种正价态的含碳有机化合物, 其含量愈高, 则土壤固碳能力愈强<sup>[15]</sup>。本研究发现, 马尾松—格木人工混交林土壤有机碳含量明显高于马尾松林和格木林, 这与已有研究结果相似<sup>[16]</sup>; 同时, 3 个人工林分土壤有机碳含量均是随土层深度增加而减少, 这也与已有研究结果一致<sup>[17]</sup>。诸多研究已表明土壤有

机碳含量与林分类型以及土层深度关系密切<sup>[18]</sup>。不同林分类型因其凋落物的数量和质量差异, 导致凋落物的矿化分解与转化积累等过程的差异, 从而介导土壤有机碳含量的不同<sup>[19]</sup>; 相同林分由于其凋落物和根系大部分分布于土壤表层, 分解后形成腐殖质在表层土壤中积累, 因而导致土壤有机碳含量从表层向下逐渐递减<sup>[20]</sup>。但是, 也有研究发现, 铁铝氧化物作为土壤中重要的无机胶体, 其表面活性强, 在有机无机复合过程中充当“桥”的作用, 与有机碳紧密结合, 通过配位交换或形成离子键, 使有机碳难以被分解, 从而对土壤有机碳固存起到重要作用<sup>[21]</sup>。

土壤游离氧化铁( $Fe_d$ )是土壤可变电荷的主要载体, 也是土壤中重要的矿质胶接物质, 对土壤性质和结构有重要影响<sup>[22]</sup>。本研究发现 3 个人工林分不同土层的各形态铁铝氧化物以  $Fe_d$  含量最高, 且在各土层中马尾松林  $Fe_d$  的含量均高于格木林和马尾松—格木混交林(表 2), 原因可能是本文研究区属于南亚



热带地区,其水热资源充沛,土壤发育程度高、风化和淋溶作用强烈而易形成结晶良好的赤铁矿<sup>[23]</sup>;同时,针叶林土壤养分元素亏缺,地表较为裸露,受风化与淋溶效果影响更加显著,更容易形成赤铁矿<sup>[24]</sup>。曾晓敏等<sup>[25]</sup>研究发现,中国中亚热带(福建三明市)山区米楮(*Castanopsis lanceolata*)次生林、米楮人促林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林土壤(淋溶层和

淀积层)不同形态铁铝氧化物均以  $Fe_d$  最高,其中杉木人工林在淋溶层  $Fe_d$  含量均高于其他两个林分;赵友朋等<sup>[8]</sup>研究表明,浙江省凤阳山保护区内黄棕壤地带 4 个林分类型(阔叶混交林、针阔混交林、杉木林、竹林)不同土层(0—10, 10—20, 20—30 cm)各形态铁铝氧化物含量整体上以  $Fe_d$  最高,且在 0—10 cm 土层,  $Fe_d$  在杉木林中含量显著高于其他林分。

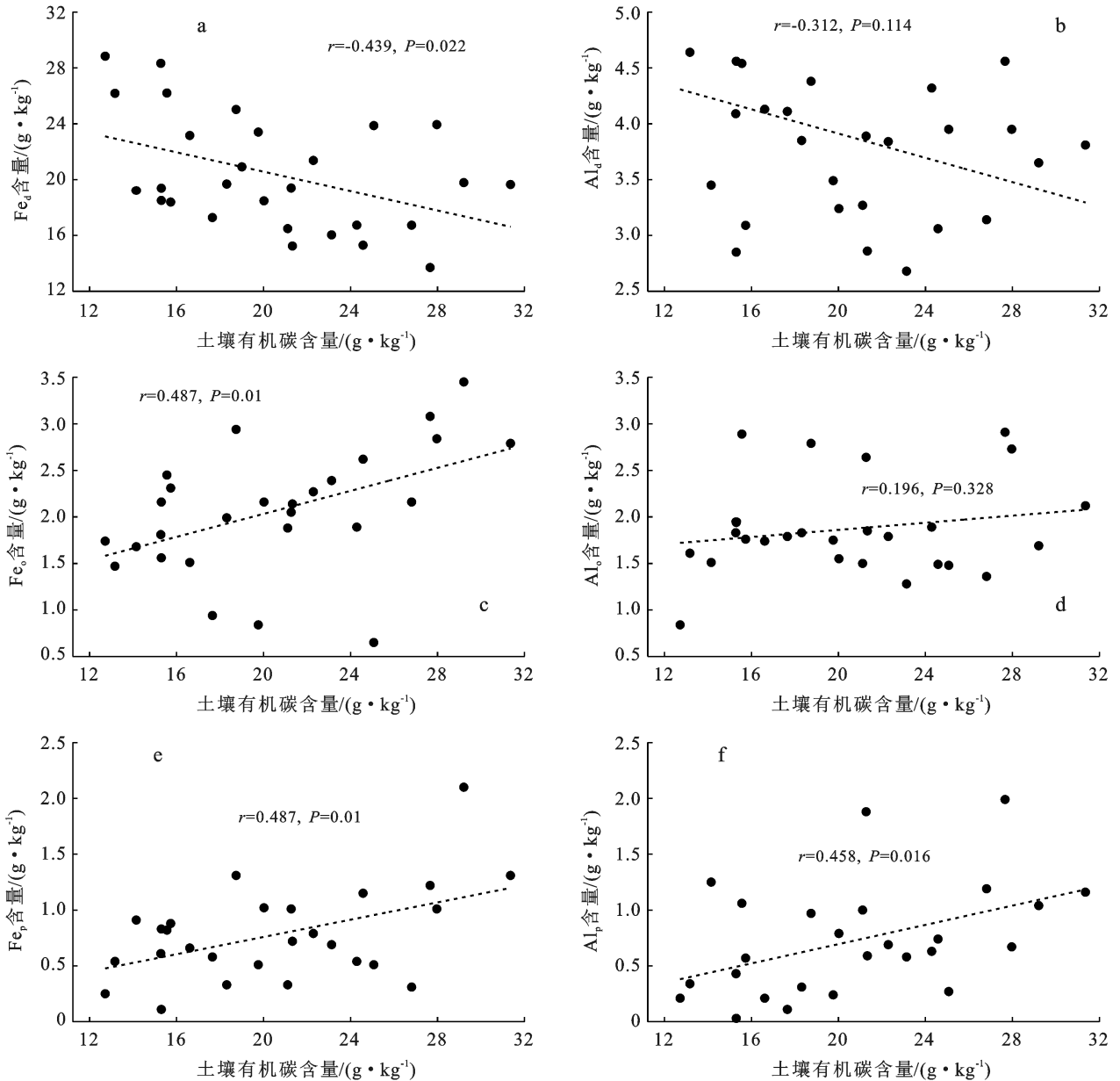


图 2 土壤有机碳与不同形态铁铝氧化物的 Pearson 关系

本研究中,3 个人工林土壤  $Fe_d$  含量与土壤有机碳含量呈显著负相关关系。Qi 等<sup>[10]</sup>研究发现,中国亚热带(湖南长沙市)稻田土壤中  $Fe_d$  与土壤有机碳含量呈极显著负相关关系;Kirsten 等<sup>[22]</sup>认为在森林和农田土壤中,  $Fe_d$  与土壤有机碳含量呈负相关关系。因此,本研究结果与以上研究结论一致,原因推

测是游离态  $Fe(II)$  氧化产生的活性氧显著促进了土壤有机碳的矿化,导致有机碳含量的降低<sup>[26]</sup>。但也有研究认为耕地土壤  $Fe_d$  含量与土壤有机碳含量显著正相关<sup>[23]</sup>,这可能是由于  $Fe_d$  在酸性条件下对有机化合物具有很强的吸附亲和力<sup>[27]</sup>。因此,  $Fe_d$  对土壤有机碳含量的影响作用还有待进一步研究。同时,

Fe<sub>o</sub> 是土壤铁氧化物中活性羟基的主要贡献者,而羟基作为金属离子配位体,可以与其他配位体发生交换进入土壤溶液中充当絮凝剂<sup>[28]</sup>;Wiseman 等<sup>[29]</sup>指出无定形氧化物对土壤有机碳有强烈的键合作用,而 Fe<sub>o</sub> 在所有的土壤中与有机碳显著相关;Zhang 等<sup>[30]</sup>研究表明,Fe<sub>o</sub> 与土壤有机碳含量呈显著正相关关系。本研究发现,3 个人工林土壤 Fe<sub>o</sub> 对土壤有机碳含量具有促进作用,与上述研究结果基本一致,且马尾松—格木混交林在各土层 Fe<sub>o</sub> 含量均高于其他两个林分,借此推测 Fe<sub>o</sub> 是导致该混交林土壤有机碳含量最多的关键影响因子之一。另外,本研究还发现,Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub> 与土壤有机碳含量呈显著正相关关系,这可能与络合态铁铝氧化物的特性有关,其本身即是铁铝氧化物与有机质的胶结<sup>[31]</sup>。已有研究表明,土壤有机碳与络合态铁铝氧化物发生共沉淀反应<sup>[7]</sup>,有机碳强烈地吸附在铁铝氧化物沉淀产物的表面,并嵌入这些矿物胶体的网络结构中<sup>[32]</sup>,获得“空间隔离”保护不易分解。Percival 等<sup>[33]</sup>对新西兰的 12 个土纲 167 个土壤样品的研究发现,土壤有机碳的含量与 Al<sub>p</sub> 有显著的线性关系,随铁铝氧化物含量的增加,森林土壤中有机碳含量增加;Qi 等<sup>[10]</sup>在研究不同耕作制度对铁铝氧化物以及土壤有机碳含量的影响中发现,Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub> 与土壤有机碳含量呈显著正相关关系。本研究表明,马尾松—格木混交林在 0—40 cm 土层的 Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub> 含量高于马尾松林和格木林,受二者影响,该混交林土壤有机碳的固持与稳定效果更加显著。

土壤有机碳可分为活性和惰性两组分。其中,活性有机碳是指土壤有机碳易被氧化和易水解的部分<sup>[34]</sup>;而惰性有机碳(也称为稳定性有机碳或非活性有机碳)指理化性质稳定、极难分解的那部分有机碳,其含量越高,越有利于土壤有机碳的积累<sup>[35]</sup>。土壤固持有机碳的重要机制之一是土壤中的细矿物颗粒对有机碳的吸附作用<sup>[36]</sup>。土壤有机质通过分解作用生成的产物被土壤中的细颗粒,尤其是具有较大比表面积的黏粉粒通过配位体交换、氢键以及疏水键等作用吸附,从而形成矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MOC)<sup>[37]</sup>。并且由于这部分有机碳在土壤中的周转速率较慢,含量相对较多,从而被认为是土壤碳库中的惰性碳库<sup>[38]</sup>。土壤铁铝氧化物矿物吸附的有机碳是长期碳储存的重要机制<sup>[39]</sup>。根据年平均降水量和潜在发量,铁铝氧化物结合态有机碳(惰性有机碳)贡献了矿质土壤中有机碳的 3%~72%<sup>[39]</sup>。因此,开展森林土壤不同形态铁铝氧化物对惰性有机碳含量影响的研究更能深刻理解土壤有机碳在森林土壤中持久固存机制。然而,

本文仅讨论了南亚热带乡土针阔树种人工林土壤不同形态铁铝氧化物对有机碳含量的影响,那么各形态铁铝氧化物对土壤惰性有机碳含量的影响机制又是如何?还有待进一步探讨。

## 4 结论

南亚热带 3 个乡土针阔树种人工林土壤中各形态铁铝氧化物以 Fe<sub>d</sub> 含量最高,总体呈现出:Fe<sub>d</sub> > Al<sub>d</sub> > Fe<sub>o</sub> > Al<sub>o</sub> > Fe<sub>p</sub> > Al<sub>p</sub>。Fe<sub>d</sub> 与土壤有机碳含量呈显著负相关关系,而 Fe<sub>o</sub>、Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub> 与土壤有机碳含量呈显著正相关关系。基于土壤铁铝氧化物的视角,3 个林分土壤因 Fe<sub>d</sub> 含量高而对土壤有机碳的矿化具有较强的促进作用,而 Fe<sub>o</sub>、Fe<sub>p</sub> 和 Al<sub>p</sub> 含量虽少,但有利于土壤有机碳的积累。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage [J]. *Nature Communications*, 2015(6):6707.
- [2] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015,528(7580):60-68.
- [3] Hou Guolong, Delang C O, Lu Xixi, et al. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species [J]. *Annals of Forest Science*, 2020,77(4):1-13.
- [4] 田耀武,贺春玲,田华禹.森林土壤有机碳的空间累积机制与计量[M].北京:中国林业出版社,2017:11-27.
- [5] Planavsky N J, Rouxel O J, Bekker A, et al. The evolution of the marine phosphate reservoir [J]. *Nature*, 2010,467(7319):1088-1090.
- [6] 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.
- [7] Nguyen M L, Goldfarb J L, Plante A F, et al. Sorption temperature and the stability of iron-bound soil organic matter [J]. *Geoderma*, 2019,341:93-99.
- [8] Zhao Jinsong, Chen Shan, Hu Ronggui, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017,167:73-79.
- [9] Wan Dan, Ye Tinghong, Lu Yong, et al. Iron oxides selectively stabilize plant-derived polysaccharides and aliphatic compounds in agricultural soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2019,70(6):1153-1163.
- [10] Qi Jianying, Zhao Xin, He Cong, et al. Effects of long-term tillage regimes on the vertical distribution of soil iron/aluminum oxides and carbon decomposition in rice

- paddies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776:145797.
- [11] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. *生态学报*, 2018, 38(1):1-10.
- [12] 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望[J]. *生态学报*, 2015, 35(1):1-9.
- [13] 梁艳, 明安刚, 何友均, 等. 南亚热带马尾松—红椎混交林及其纯林土壤细菌群落结构与功能[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3):878-886.
- [14] 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, 2000:60-73.
- [15] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [16] 权伟, 戎建涛, 郑方东. 乌岩岭不同林分土壤有机碳含量及分布特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(4):198-202.
- [17] Huang Mei, Ji Jinjun, Deng Feng, et al. Impacts of extreme precipitation on tree plantation carbon cycle [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 115(3/4):655-665.
- [18] Li Ping, Li Fengting, Fan Chuan, et al. Effects of plant diversity on soil organic carbon under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* in the hilly region of central Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8):2667-2675.
- [19] Chen Shiqi, Lü Sheng, Gao Ming, et al. Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun Mountain [J]. *Huanjing Kexue*, 2019, 40(2):953-960.
- [20] Yao M K, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and nitrogen dynamics in Midwest Côte d'Ivoire [J]. *European Journal of Scientific Research*, 2010, 40(2):211-222.
- [21] 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.
- [22] Kirsten M, Mikutta R, Vogel C, et al. Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11:5076.
- [23] Cudennec Y, Lecerf A. The transformation of ferrihydrite into goethite or hematite, revisited [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2006, 179(3):716-722.
- [24] Shinohara Y, Misumi Y, Kubota T, et al. Characteristics of soil erosion in a moso-bamboo forest of Western Japan: Comparison with a broadleaved forest and a coniferous forest [J]. *Catena*, 2019, 172:451-460.
- [25] 曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 等. 中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(13):4879-4887.
- [26] Chen Chunmei, Hall S J, Coward E, et al. Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection [J]. *Nature Communications*, 2020, 11:2255.
- [27] Kleber M, Eusterhues K, Keiluweit M, et al. Mineral-organic associations: Formation, properties, and relevance in soil environments [J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 130:1-140.
- [28] Hou Tao, Xu Renkou, Zhao Anzhen. Interaction between electric double layers of kaolinite and Fe/Al oxides in suspensions [J]. *Colloids and Surfaces (A: Physicochemical and Engineering Aspects)*, 2007, 297(1/2/3):91-94.
- [29] Wiseman C L S, Püttmann W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter [J]. *Geoderma*, 2006, 134(1/2):109-118.
- [30] Zhang J C, Zhang L, Wang P, et al. The role of non-crystalline Fe in the increase of SOC after long-term organic manure application to the red soil of Southern China [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(6):797-804.
- [31] 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.
- [32] Greathouse J, Johnson K, Greenwell H. Interaction of natural organic matter with layered minerals: Recent developments in computational methods at the nanoscale [J]. *Minerals*, 2014, 4(2):519-540.
- [33] Percival H J, Parfitt R L, Scott N A. Factors controlling soil carbon levels in new Zealand grasslands is clay content important? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5):1623-1630.
- [34] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3):32-38.
- [35] 王义祥, 王峰, 叶菁, 等. 菌渣施用对柑橘园土壤团聚体有机碳和惰性有机碳的影响[J]. *生态科学*, 2016, 35(1):27-33.
- [36] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, et al. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(7):823-830.
- [37] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14):2099-2103.
- [38] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. *Plant and Soil*, 1997, 191:77-87.
- [39] Kramer M G, Chadwick O A. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12):1104-1108.