

福鼎茶园土壤团聚体有机碳分布与分子结构特征

葛茂泉^{1,2}, 王纯^{1,2}, 许宏达^{1,2}, 杨发峻^{1,2},
吴梓炜^{1,2}, 林少颖^{1,2}, 张永勋³, 李先德³, 王维奇^{1,2}

(1. 福建师范大学湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室, 福州 350117;

2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350117; 3. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081)

摘要: 以福建省福鼎市白琳镇(BL)、点头镇(DT)、磻溪镇(PX)、管阳镇(GY)和太姥山镇(TMS)的茶园土壤为研究对象, 研究其团聚体组成及稳定性, 各粒级团聚体有机碳含量、固碳贡献率及有机碳红外光谱, 旨在从团聚体尺度揭示茶园土壤有机碳分布及其分子结构特征。结果表明: (1) 不同采样地土壤团聚体组成存在差别, 但随土层加深, 大团聚体(0.25~2 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)含量均减少, 而粉—黏粒团聚体(<0.053 mm)含量增大; (2) 随土层加深, 所有采样地平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)减小, 分形维数(D)增大, 团聚体结构稳定性降低; (3) 各粒级团聚体有机碳含量随土层加深而减小, 固碳贡献率主要受团聚体含量的影响, 大团聚体固碳贡献率相对更大; (4) 各粒级团聚体有机碳均主要来源于多糖碳或脂肪碳, 0—15 cm 土层土壤粉—黏粒团聚体比大团聚体和微团聚体有机碳更稳定, 15—30 cm 土层各级团聚体均比 0—15 cm 土层对应粒级团聚体有机碳更稳定。研究成果可为茶园土壤有机碳的科学管理提供理论参考。

关键词: 团聚体组成; 有机碳; 有机碳官能团; 红外光谱; 茶园土壤

中图分类号: S153.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)06-0201-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.06.026

Organic Carbon Distribution and Molecular Structure Characteristics of Soil Aggregates in Fuding Tea Garden

GE Maoquan^{1,2}, WANG Chun^{1,2}, XU Hongda^{1,2}, YANG Fajun^{1,2}, WU Ziwei^{1,2},

LIN Shaoying^{1,2}, ZHANG Yongxun³, LI Xiande³, WANG Weiqi^{1,2}

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117; 2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117;

3. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The soil of tea garden in Bailin Town (BL), Diantou Town (DT), Panxi Town (PX), Guanyang Town (GY) and Taimushan Town (TMS) in Fuding City, Fujian Province were taken as the research object. The composition and stability of aggregates, organic carbon content, carbon sequestration contribution rate and infrared spectrum of organic carbon of each particle size aggregates were studied to reveal the distribution and molecular structure characteristics of soil organic carbon in tea garden soil from the aggregate scale. The results showed that: (1) The composition of soil aggregates differed among sampling sites, but with the deepening of soil layer, the content of macroaggregates (0.25~2 mm) and microaggregates (0.053~0.25 mm) decreased, while the content of silt-clay aggregates (<0.053 mm) increased in all sampling sites. (2) Decreased in mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) and increased in fractal dimension (D) of all sampled sites with deepening of the soil layer and decreased in structural stability of the agglomerates. (3) The organic carbon content of the aggregates decreased with the deepening of the

收稿日期: 2023-04-27

资助项目: 福建福鼎白茶文化系统申报全球重要农业文化遗产项目(DH-1815); 国家自然科学基金项目(41901111); 福建省自然科学基金项目(2020J01188)

第一作者: 葛茂泉(2001—), 男, 河南濮阳人, 在读硕士研究生, 主要从事全球气候变化与元素生物地球化学循环研究。E-mail: gemao-quan325@163.com

通信作者: 王纯(1982—), 女, 湖南益阳人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事全球气候变化与元素生物地球化学循环研究。E-mail: wangchun821314@163.com

soil layer, and the contribution rate of carbon sequestration of aggregates was mainly controlled by the percentage of aggregates, and the contribution rate of carbon sequestration of macroaggregates was relatively larger. (4) The organic carbon of each size aggregates was mainly derived from polysaccharide carbon or aliphatic carbon. The silt-clay aggregates in 0—15 cm soil layer had more stable carbon than those in macroaggregates and microaggregates. The aggregates in the 15—30 cm soil layer had more stable carbon than the corresponding size aggregates in the 0—15 cm soil layer. The research results can provide theoretical reference for the scientific management of tea garden soil organic carbon.

Keywords: aggregate composition; organic carbon; organic carbon functional groups; infrared spectrum; tea garden soil

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其组成和稳定性直接影响土壤肥力和作物生长^[1]。土壤有机碳是团聚体形成的重要胶结物质,有研究^[1-2]表明,土壤中近 90% 的有机碳存储于土壤团聚体内,土壤团聚体形成后进一步对土壤有机碳起到物理保护作用。团聚体中有机碳含量是土壤有机碳固定和矿化平衡的微观表征,对土壤肥力和土壤碳汇功能具有双重意义^[3]。土壤有机碳的质量、功能和稳定性很大程度上取决于其化学组成和分子结构^[4],土壤有机碳分子结构可以通过土壤有机碳官能团特征来反映,其组成特征与土壤有机碳分解密切相关^[5],进而影响土壤团聚体中有机碳含量以及土壤碳汇功能。

土壤团聚体按粒径大小^[6]分为大团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉—黏粒团聚体(<0.053 mm)。对农田和灌丛等土地利用类型的研究^[6]表明,土壤中大团聚体占优势,而对茶园土壤的研究结论不一致;李露露等^[7]对茶园土壤研究发现,>0.25 mm 粒级团聚体占比最大;王峰等^[8]通过对比不同类型茶园土壤发现,<0.25 mm 粒径团聚体含量最高。土壤团聚体是土壤有机碳存在的主要场所,郭鸿鑫等^[9]研究发现,>0.25 mm 粒级团聚体是有机碳的主要贡献源;但也有研究^[2]表明,70% 以上的有机碳存在于<0.053 mm 粒级团聚体中;李婷等^[10]研究得出,脂肪碳、多糖碳、醇碳和饱和烷烃等活性较高的官能团主要分布在>0.25 mm 粒级团聚体中,芳香碳等稳定的官能团主要分布在<0.25 mm 粒级团聚体中;裴志福等^[11]研究表明,大团聚体有机碳主要来源于芳香碳和多糖。那么,茶园土壤各粒级团聚体有机碳分布与分子结构特征怎样? 目前仍不清楚。因此,对茶园土壤团聚体有机碳分布与分子结构特征进行深入研究,可为科学揭示茶园土壤结构以及固碳功能提供理论参考。

福建福鼎白茶文化系统是中国重要农业文化遗产,该系统在维持生计、保障生态功能以及保护生物多样性等方面具有良好的优势。目前,福鼎白茶已有的研究^[8-9]主要聚焦在产业管理和市场开拓等方面,对土壤

属性及其固碳功能的研究相对较少。土壤作为茶树生长的基本条件,其结构、功能与稳定性是遗产可持续发展的关键。因此,以福鼎茶园土壤为研究对象,从团聚体尺度全面系统地分析土壤团聚体粒级组成及稳定性,各粒级团聚体有机碳含量和固碳量,以及团聚体有机碳分子结构特征,研究结果对福鼎茶园土壤结构改善以及有机碳增汇管理具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省福鼎市(26°52′—27°26′N, 119°55′—120°43′E),地处中亚热带季风气候区,海洋性气候特征显著,年平均气温 19.2℃,年平均相对湿度 76%,年平均降水量 1 720.0 mm。地形以丘陵和山地为主,依山面海,空气流动性强。土壤偏酸性,以红壤、黄壤和紫色土为主,含有丰富有机质,利于茶树生长。选取白琳镇(BL)、点头镇(DT)、磻溪镇(PX)、管阳镇(GY)和太姥山镇(TMS)5 个福鼎白茶主产区进行土样采集。采样地均为生态茶园模式,为标准化的茶园,施肥及管理措施一致,土壤类型均以红壤为主,茶树年龄 5~10 年,茶树栽培行距和株距为 0.5~1.2 m,耕层深度 0.3—0.5 m。

1.2 土壤样品采集

遵循典型性和代表性原则,于 2022 年 4 月,在 5 个茶园采集土壤样品,每个采样地 3 个重复。根据采样地土壤剖面特征和茶树根系特征,分别采集 0—15, 15—30 cm 土层的 2 个土样,总计土样 30 份,分别装入密封袋带回实验室。取回土壤样品后,挑出植物残体和根系等杂质,将每份土样分成 2 份,1 份于 4℃ 冷藏保存,另 1 份自然风干,用于试验指标的测定。

1.3 土壤样品测定与分析

采用 pH 计(Starter 300,美国)测定土壤 pH,环刀法^[12]测定土壤容重,烘干法^[12]测定土壤含水量,土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAX CN,德国)测定土壤碳、氮含量。

采用湿筛法^[12]获取土壤大团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉—黏粒团聚

体(<0.053 mm)。称取 100 g 鲜土,在密封袋中加入适量蒸馏水浸润 24 h,将孔径分别为 2,0.25,0.053 mm 的套筛自上到下组合,将浸润后的土壤均匀置于套筛顶层,将套筛置于装有蒸馏水的水桶内,调整水面高度使套筛顶层的土壤能够被完全浸没,然后将频率设置为 30 次/min,水平方向振荡 2 min,将土壤筛分为 3 种粒级。湿筛结束后,将团聚体洗入样品瓶中,烘干后称重。最终得到 90 份土壤团聚体样品。

将烘干后的各级团聚体土壤研磨并过 100 目筛后,采用傅里叶变换红外光谱仪获取各粒级团聚体土壤有机碳的红外光谱,取 1 mg 待测土壤样品,以 1 : 100 的比例取 100 mg 溴化钾,将二者放入玛瑙研钵中充分研磨,再用压片机以 2.0 t 压力将混合均匀的粉末压 30 s,压片成透明玻璃状,将压片迅速放置于傅里叶变换红外光谱仪中测定,设定扫描范围为 400~4 000 /cm,扫描次数为 32 次,最后对光谱进行平滑处理后导出光谱文件^[13]。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 计算方法 各粒级团聚体百分含量^[3]、平均重量直径、几何平均直径、分形维数^[14]、各粒级团聚体对有机碳贡献率^[15]的计算公式为:

$$R_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \times 100\%$$

(1)

$$MWD = \sum_i x_i R_i$$

(2)

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_i R_i \ln x_i}{\sum_i R_i} \right)$$

(3)

$$\lg \left[\frac{m_{(r < x_i)}}{\sum_i m_i} \right] = (3 - D) \lg \left(\frac{x_i}{x_{max}} \right)$$

(4)

$$C_i = \frac{m_i S_i}{\sum_i m_i S_i} \times 100\%$$

(5)

式中: i 为第 i 级团聚体(级); n 为团聚体总级数(级); R_i 为第 i 级团聚体百分含量(%); m_i 为第 i 级团聚体的质量(g); MWD 为平均重量直径(mm); GMD 为几何平均直径(mm); D 为分形维数; $m_{(r < x_i)}$ 为小于第 i 级团聚体的质量(g); x_{max} 为最大粒级团聚体的平均直径(mm); x_i 为第 i 级团聚体的平均直径(mm); S_i 为第 i 级团聚体中有机碳含量(g/kg); C_i 为第 i 级团聚体对团聚体有机碳的贡献率(%)。

1.4.2 红外光谱分析 有机碳官能团红外特征解析见表 1,主要研究脂肪碳、芳香碳、多糖碳和酮碳,其中脂肪碳和多糖碳稳定性较弱,芳香碳和酮碳稳定性较强^[10,16],各峰由若干种官能团共同形成^[17]。

表 1 红外光谱吸收峰官能团识别 单位:cm⁻¹

类别	特征区间 ^[18-19]	峰值	官能团
脂肪碳	2800~3010	2860,2931 ^[10,20-21]	脂肪族烷基(CH、CH ₂ 和CH ₃)中C—H不对称和对称伸缩振动
芳香碳	1580~1660	1644 ^[17]	C=C和—COO ⁻ 中C=O伸缩振动
	1520~1546	1530 ^[19]	C=C伸缩振动
多糖碳	1030~1170	1085,1097 ^[10,20-21]	纤维素等多糖中C—O—C键的伸缩振动
酮碳		1799,1878 ^[10]	伸缩振动
醇、酚类		3620 ^[13]	O—H伸缩振动
		3448 ^[10]	O—H和N—H伸缩振动
硅酸盐矿物		1030 ^[11]	有机硅Si—O—Si

1.4.3 数据分析 使用 Microsoft Excel 软件对数据进行整理;使用 SPSS 26.0 软件对土壤团聚体粒级组成和有机碳含量等进行差异性分析;使用 Origin 2021 软件制作柱状图、红外光谱图和主成分分析图,使用 Origin 2021 软件中的 Correlation Plot 对土壤理化性质、团聚体粒级组成及稳定性指数和团聚体有机碳含量及分布进行相关性分析;使用 Canoco 5 软件对土壤理化性质和团聚体稳定性指数及百分含量进行冗余分析;运用 Omnic 软件识别红外光谱峰值并分析各考察峰峰面积^[18],然后计算各考察峰的相对峰面积^[22]。

2 结果与分析

2.1 福鼎茶园土壤团聚体粒级组成特征

由图 1 可知,BL、PX、GY 和 TMS 在 0—15, 15—30 cm 土层的大团聚体分别占团聚体总量的

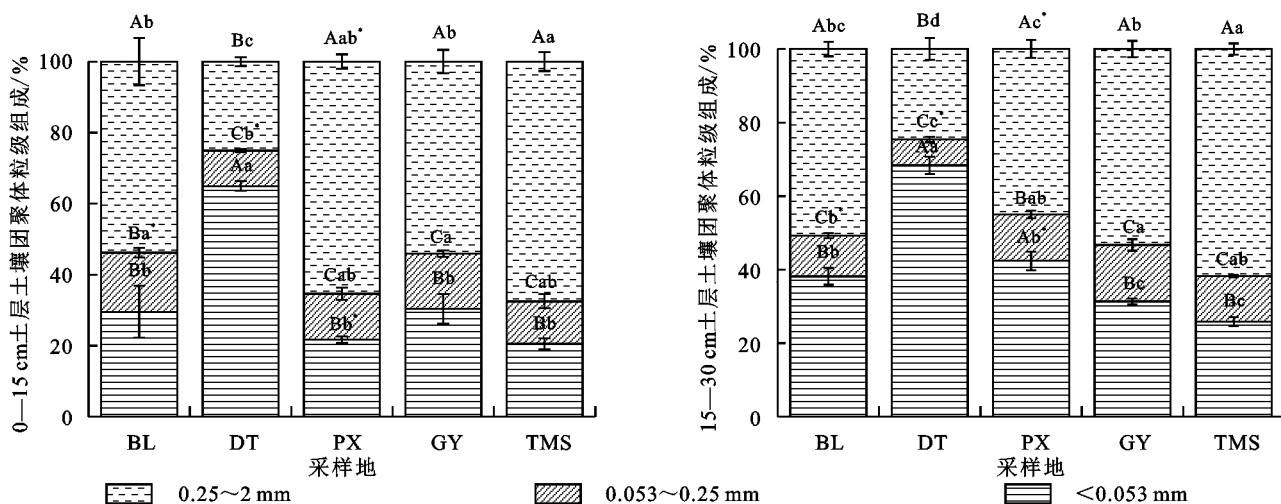
53.78%~67.50%,44.97%~61.75%,显著高于微团聚体和粉—黏粒团聚体($p < 0.05$);DT 在 0—15, 15—30 cm 土层的粉—黏粒团聚体分别占团聚体总量的 64.95%,68.34%,显著高于大团聚体和微团聚体($p < 0.05$)。从 0—15 cm 土层到 15—30 cm 土层,PX 大团聚体显著减小,粉—黏粒团聚体显著增大($p < 0.05$),BL 和 DT 的微团聚体显著减小($p < 0.05$)。整体来看,不同采样地各级团聚体组成存在差异,且随土层深度增加,均表现为大团聚体和微团聚体减少,粉—黏粒团聚体增加。

2.2 福鼎茶园土壤团聚体稳定性特征

由表 2 可知,0—15 cm 土层,TMS 的 MWD 显著大于除 PX 以外的其他采样地,并且其 GMD 显著大于除 PX 和 BL 以外的其他采样地($p < 0.05$),DT 的 MWD 和 GMD 显著小于其他采样地而其 D 显著

大于其他采样地 ($p < 0.05$)。在 15—30 cm 土层, TMS 的 MWD 和 GMD 显著大于其他采样地, D 显著小于其他采样地 ($p < 0.05$), DT 的 MWD 和 GMD 显著小于其他采样地, D 显著大于其他采样地 ($p < 0.05$)。总之, TMS 土壤团聚体结构稳定性相对较高, DT 土壤团聚体结构稳定性相对较低。随土层加

深, 各采样地均表现出 MWD 和 GMD 减小, 分别减小 1.44%~29.48% 和 4.78%~53.40%; D 增大, 增幅为 0.90%~14.88%; 其中, PX 的 MWD 和 GMD 显著减小 29.48% 和 53.40%, 而其 D 显著增大 14.88% ($p < 0.05$)。由此看来, 0—15 cm 土层土壤团聚体结构比 15—30 cm 土层更稳定。



注: 图柱中不同小写字母表示不同采样地同一土层同一粒级团聚体占比差异显著 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一采样地同一土层不同粒级团聚体占比差异显著 ($p < 0.05$); * 表示同一采样地不同土层同一粒级团聚体占比差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 土壤团聚体粒级分布特征

表 2 土壤团聚体稳定性指数

土层深度/cm	采样地	MWD/mm	GMD/mm	D
0—15	BL	0.64±0.07Ab	0.29±0.08Aab	2.35±0.14Ab
	DT	0.31±0.01Ac	0.08±0.0Ac	2.78±0.01Aa
	PX	0.76±0.02Aab	0.39±0.02Aab	2.24±0.02Bb
	GY	0.64±0.04Ab	0.27±0.03Ab	2.40±0.07Ab
	TMS	0.78±0.03Aa	0.41±0.03Aa	2.21±0.04Ab
15—30	BL	0.60±0.02Abc	0.22±0.02Abc	2.52±0.03Ab
	DT	0.31±0.03Ad	0.08±0.01Ad	2.81±0.02Aa
	PX	0.54±0.03Bc	0.18±0.02Bc	2.57±0.03Ab
	GY	0.63±0.02Ab	0.26±0.01Ab	2.42±0.01Ac
	TMS	0.72±0.02Aa	0.33±0.02Aa	2.32±0.02Ad

注: 表中数据均为平均值±标准误; 同列不同小写字母表示同一土层不同采样地同一稳定性指数间差异显著 ($p < 0.05$); 同列不同大写字母表示同一采样地不同土层同一稳定性指数间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.3 福鼎茶园土壤团聚体有机碳分布特征

由图 2 可知, 除 DT 和 GY, BL, PX 和 TMS 的团聚体有机碳含量在不同土层均随粒级减小而增加, 且各粒级团聚体有机碳含量随土层深度增加而减少 ($p < 0.05$)。

由图 3 可知, BL 样地 0—15 cm 土层以及 GY 和 TMS 样地 2 个土层土壤有机碳均主要分布在大团聚体中 ($p < 0.05$); DT 样地 2 个土层土壤有机碳均主要分布在粉—黏粒团聚体中 ($p < 0.05$); 而 PX 样地 2 个土层有机碳分别主要分布在大团聚体中 ($p < 0.05$)

和粉—黏粒团聚体中 ($p < 0.05$)。

随土层加深, 所有样地均表现为大团聚体固碳贡献率减小, 其中 PX 显著减小 ($p < 0.05$); 而粉—黏粒团聚体固碳贡献率增大, 其中 PX 显著增大 ($p < 0.05$)。团聚体有机碳分布特征由各粒级团聚体固碳贡献率来说明, 不同粒级团聚体固碳贡献率受到各粒级团聚体百分含量及其中有机碳含量共同调控, 其中各级团聚体百分含量的调控作用更显著。

2.4 福鼎茶园土壤团聚体有机碳官能团种类与分布

由图 4 可知, 各样地各粒级团聚体土壤有机碳红外光谱形状基本一致, 特征峰相似。主要差异在于多糖碳官能团特征峰, 部分团聚体土样红外光谱在 1 085 或 1 097 cm^{-1} 左右没有明显特征峰。此外, 部分样地的 15—30 cm 土层土壤硅酸盐官能团在 1 030 cm^{-1} 左右的吸收峰强度明显大于 0—15 cm 土层。

由图 5 可知, 第 1 主成分(PC1)的贡献为 74.0%, 第 2 主成分(PC2)的贡献为 24.6%。因此, 利用 PC1 和 PC2 可以解释各粒级团聚体有机碳官能团百分含量间的差异。在 0—15 cm 土层, 大团聚体有机碳主要来源于多糖碳, 其次为脂肪碳; 微团聚体有机碳主要来源于脂肪碳; 粉—黏粒团聚体有机碳主要来源于多糖碳, 其次为芳香碳和酮碳。在 15—30 cm 土层, 大团聚体有机碳主要来源于多糖碳, 其次为脂肪碳、芳香碳和酮碳; 微团聚体有机碳主要来源于多糖碳, 其次为芳香碳和酮碳; 粉—黏粒团聚体有机碳主要来源

于多糖碳、芳香碳和酮碳。总体来看,各级团聚体有机碳均主要来源于多糖碳或脂肪碳,反映植物源有机质为茶园土壤有机质主要来源,0—15 cm 土层的粉—黏粒团聚体比大团聚体和微团聚体有更多稳定

性碳,15—30 cm 土层的各级团聚体均比 0—15 cm 土层对应粒级团聚体有更多稳定性碳,说明大团聚体有机碳受不稳定的植物源新鲜有机质的影响更大,深层土对其响应相对滞后。

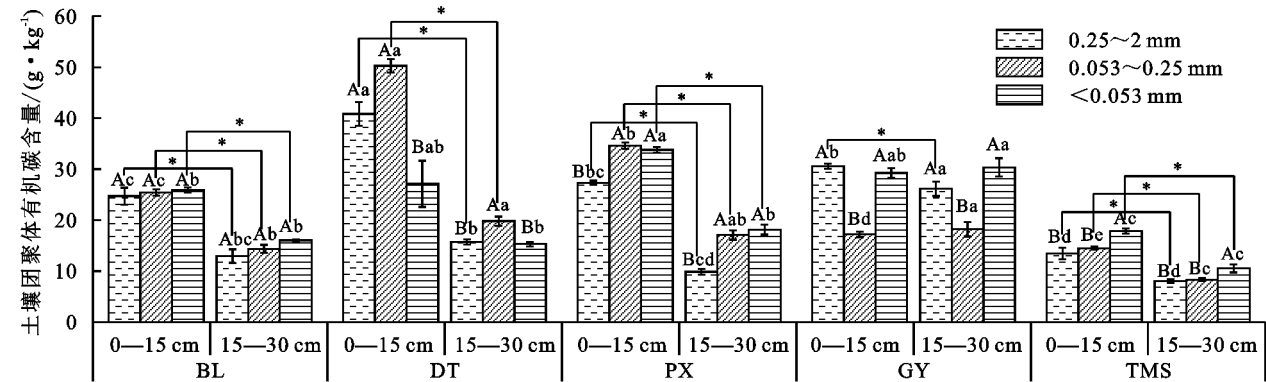


图 2 土壤各粒级团聚体中有机碳含量

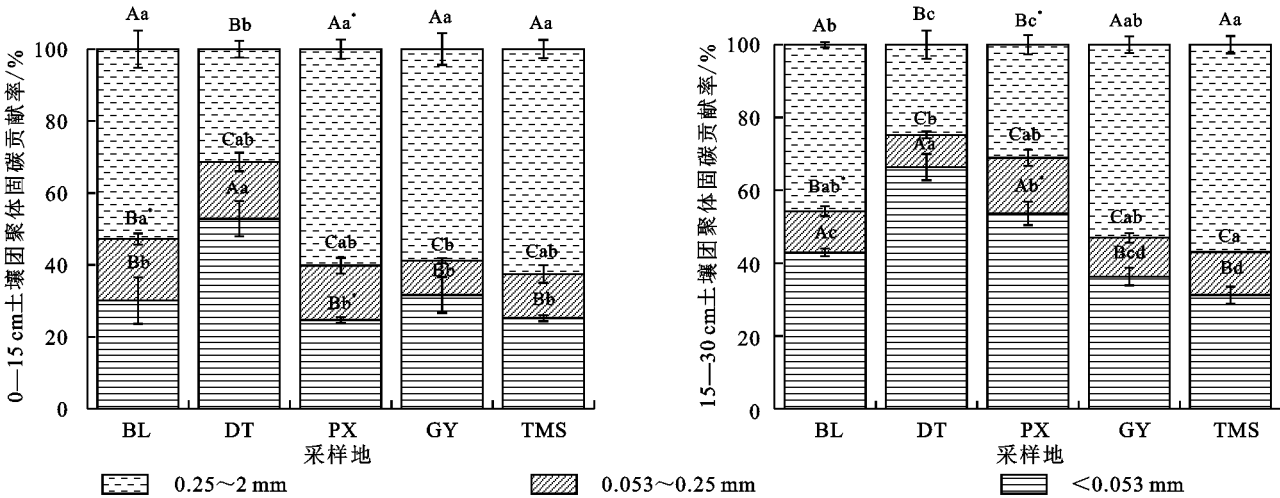


图 3 土壤各粒级团聚体固碳贡献率

2.5 土壤理化性质与团聚体特征指标的相关性分析
由图 6 可知,容重与土壤含水量、全土有机碳含量、全氮含量、大团聚体和微团聚体有机碳含量呈极显著或显著负相关($p<0.01$, $p<0.05$);土壤含水量与大团聚体百分含量、MWD 和 GMD 呈极显著负相关($p<0.01$),与全土有机碳含量、全氮含量、粉—黏粒团聚体百分含量、 D 以及大团聚体和微团聚体有机碳含量呈极显著正相关($p<0.01$);全土有机碳含量与全氮含量、各粒级团聚体有机碳含量呈极显著正相关($p<0.01$);全氮含量与各粒级团聚体有机碳含量呈极显著正相关($p<0.01$);大团聚体和微团聚体百分含量与 MWD、GMD 呈极显著或显著正相关($p<0.01$, $p<0.05$),与 D 呈极显著负相关($p<0.01$);粉—黏粒团聚体百分含量与 MWD、GMD 呈极显著负相关($p<0.01$),与 D 呈极显著正相关($p<0.01$)。此外,3 种粒级团聚体对有机碳的贡献率与各粒级团聚体含量呈极显著正相关($r=0.92, 0.47, 0.93, p<0.01$),相关性强于 3 种粒级团聚体对有机碳的贡献率与其有机碳含量的相关性。同时,将土壤理化性质作为解释变量,将土壤团聚体稳定

性指标和各级团聚体含量作为响应变量,进行冗余分析(图 7)表明,第 1 主轴和第 2 主轴分别解释土壤团聚体稳定性和各级团聚体含量变异的 62.12% 和 1.04%,其中解释度最高的是土壤含水量。

3 讨论

3.1 土壤团聚体粒级组成及稳定性分析

土壤团聚体组成及稳定性直接影响土壤肥力和农作物的生长^[1]。李露露等^[7]通过研究雅安草坝镇茶园土壤发现,>0.25 mm 粒级水稳性团聚体占 75.87%~95.75%;Parajuli 等^[6]对农田研究表明,0—5,5—15 cm 土层土壤 0.25~2 mm 粒级团聚体占比均>50%,与本研究 BL、PX、GY 和 TMS 相似,主要是因为茶园土壤有较多的凋落物输入,进而增加土壤有机碳,作为重要胶结物质的有机碳有助于大团聚体形成。而 DT 是以<0.053 mm 粒径团聚体为主。王峰等^[8]对武夷山市 5 种土壤类型的茶园土壤研究发现,红壤和潮砂土茶园土壤的<0.25 mm 粒径团聚体含量最高。一方面,可能因为长期茶园耕作和人为管理增加对土壤的干扰,使土

壤大团聚体含量不断降低^[7];另一方面,DT 的 0—15 cm 土层土壤含水量显著高于其他采样地($p<0.05$), 15—30 cm 土层土壤含水量显著高于除 BL 以外的其他采样地($p<0.05$),水分可以溶解和软化团聚体的胶结物质,使胶结剂从凝胶状态变为溶胶状态,降低

胶结力,从而导致以粉—黏粒团聚体为主^[14]。胥佳忆等^[23]研究表明,土壤含水量是决定土壤团聚体组成及其稳定性的重要因子。本研究发现,土壤含水量与大团聚体百分含量、MWD、GMD 呈极显著负相关($p<0.01$),也进一步印证此结论。

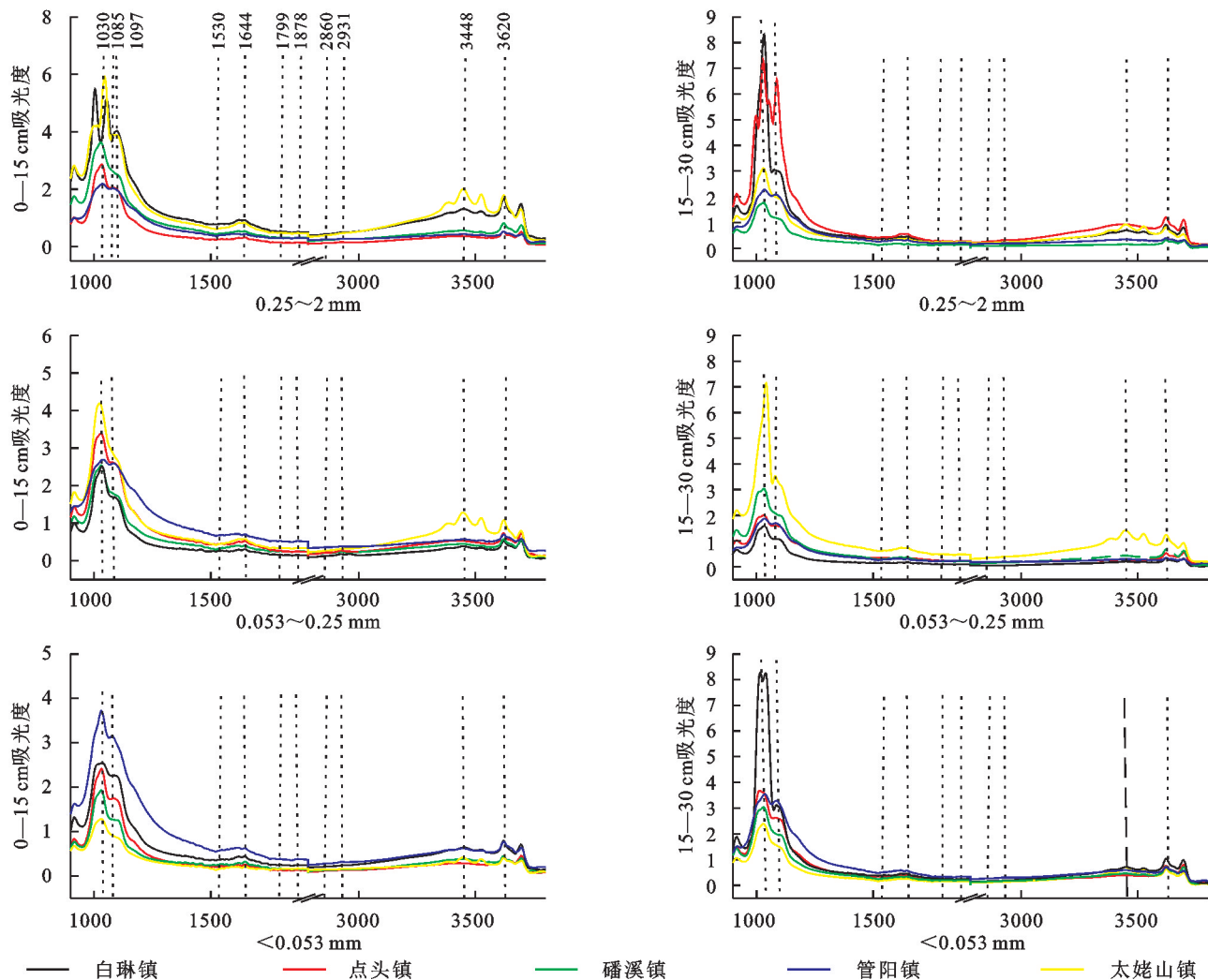


图 4 土壤团聚体有机碳红外光谱

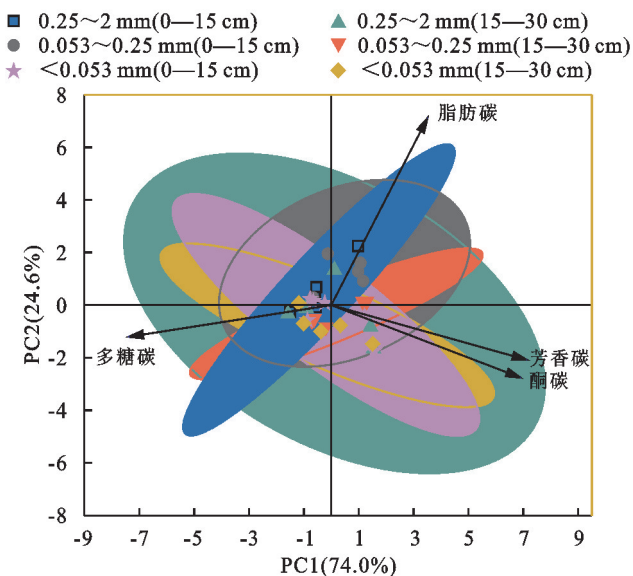
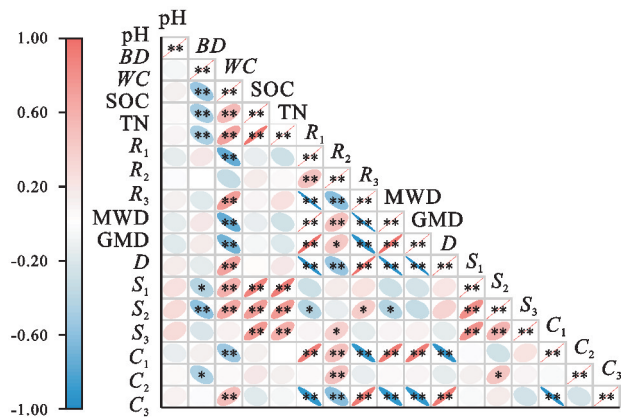


图 5 土壤各粒级团聚体有机碳官能团主成分分析

随着土层深度增加,所有采样地中大团聚体和微团聚体含量减小,粉—黏粒团聚体含量增大,团聚体稳定性降低,与王峰等^[8]、冷暖等^[24]和魏霞等^[25]的研究结果相似,可能与土壤有机碳垂直分布和茶树性质有关。0—15 cm 土层土壤有机碳含量高于 15—30 cm 土层,而有机碳是团聚体形成的重要胶结物质^[3],更多的有机碳含量为团聚体的形成提供有利条件。0—15 cm 土层可能受茶树枝叶凋落物和根系的影响相对更大,凋落物和细根输入量的增加可加速团聚体的形成和稳定性^[26]。一方面,凋落物在微生物作用下逐渐分解回归土壤;另一方面,在根的挤压力、根系分泌物和腐殖酸生化反应的影响下,根际及其周围更容易黏合形成更大粒级的团聚体,团聚体稳定性也高于非根际土壤^[1,27],而本研究中,茶树主根和侧根可能更多分布在 0—15 cm 土层中。因此,随着土层加

深,土壤大粒级团聚体含量减少,团聚体稳定性降低,土壤抗蚀性减弱。



注:图中 pH、BD、WC、SOC、TN、MWD、GMD、D 分别为酸碱度、容重、含水量、全土有机碳、全氮、平均重量直径、几何平均直径、分形维数;R₁、R₂、R₃ 分别为大团聚体百分含量、微团聚体百分含量、粉—黏粒团聚体百分含量;S₁、S₂、S₃ 分别为大团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量、粉—黏粒团聚体有机碳含量;C₁、C₂、C₃ 分别为大团聚体对有机碳的贡献率、微团聚体对有机碳的贡献率、粉—黏粒团聚体对有机碳的贡献率;* 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$ 。

图 6 土壤理化性质与土壤团聚体相关特征的相关性分析

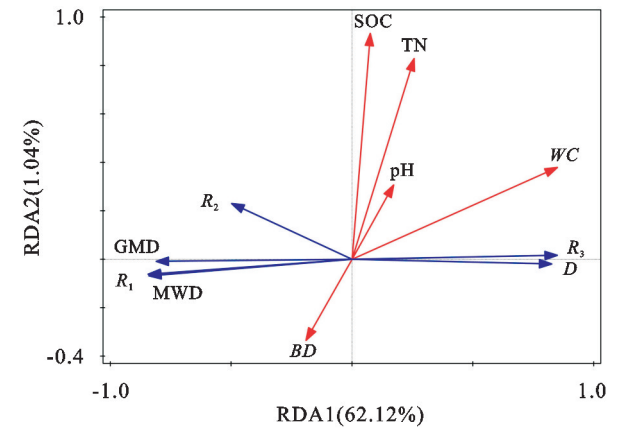


图 7 土壤理化性质与稳定性参数冗余分析

3.2 土壤团聚体中有机碳分布特征

本研究中,大部分样地均表现为 0—15 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量高于 15—30 cm 土层,与 Parajuli 等^[6]和李玮等^[3]研究结果相似,可能与茶园定期修剪枝叶、茶树自然凋落物和人工施加有机肥等向表层土壤输入大量有机碳有关。毛霞丽等^[28]研究表明,长期施加有机肥可以增加土壤有机碳含量,进而相应增加各级团聚体有机碳含量。团聚体有机碳含量和团聚体含量共同决定各粒级团聚体对有机碳的贡献率,反映有机碳在各级团聚体中的分布格局。本研究表明,有机碳在团聚体中的分布情况受各粒级团聚体百分含量的影响大于各粒级团聚体有机碳含量,PX 样地土壤有机碳在团聚体中的分布情况存在较大差异,主要是因为随土层加深其大团聚体含量显著减小而粉—黏粒团聚体含量显著增大($p <$

0.05),由于 >0.25 mm 粒级团聚体含量占主导地位,从而决定 >0.25 mm 粒级团聚体是有机碳的主要贡献源与郭鸿鑫等^[9]研究结果一致。

3.3 不同粒级团聚体中有机碳官能团组成特征

微团聚体是由初级颗粒(即黏土和粉砂)与持久性胶结剂(如多价金属阳离子)逐渐结合形成的,而大团聚体是由微团聚体与临时性胶结剂(如微生物和植物源有机物)结合形成的^[6]。多糖碳是植物源碳的主要成分之一^[18],多糖碳和脂肪碳相对不稳定,容易被氧化^[10],而芳香碳是难分解有机碳之一,能在土壤中选择性保留^[29],土壤有机碳分解过程中芳香碳相对增加^[22]。

李婷等^[10]研究得出, >0.25 mm 粒级团聚体中的有机碳主要由脂肪碳和多糖碳等活性较高的碳组成,而稳定的芳香碳趋向于被保护在 <0.25 mm 粒级团聚体中,与本研究 0—15 cm 土层相似。大团聚体有相对更多的多糖碳,可能是因为 0—15 cm 土层土壤有相对更多的来自植物的新鲜有机质,在大团聚体形成过程中,真菌菌丝起到联结物质的作用,团聚体中的砂粒通过菌丝联结在一起,还可能联结降解程度较低的植物源物质,其中以纤维素等多糖为主^[11],菌丝可产生大量多糖,再加上其他根际微生物产生的有机化合物以及植物根系分泌物,可使微团聚体黏合在一起,共同促进大团聚体的形成,其中植物根系分泌物是土壤有机碳的直接来源,还可被微生物迅速利用,进而可能产生更多多糖^[1]。土壤中碳路径遵循从大团聚体到粉粒和黏粒粒级团聚体的趋势,新鲜有机质进入土壤后被分解,首先被并入大团聚体中,然后随着耕作等对大团聚体的破坏,再被重新分配到较小粒级团聚体中^[26]。因此,随着有机碳的分解和从大粒级团聚体向小粒级团聚体的重新分配过程,芳香碳等稳定性碳逐渐积累在较小粒级团聚体中。裴志福等^[11]研究得出,大团聚体有机碳主要来源于多糖碳和芳香碳,与本研究 15—30 cm 土层相似,可能是因为深层土新鲜有机质输入量较少,随着人为或自然原因导致的大团聚体的破坏以及时间的推移,大量不稳定碳逐渐被分解,积累较多芳香碳等稳定性碳,当大团聚体再次形成时,芳香碳被联结的可能性变大。因此,15—30 cm 土层土壤各级团聚体均比 0—15 cm 土层对应粒级团聚体有更多稳定性碳。

同时,长期施加含有较高化学稳定性组分的有机肥,可通过促进土壤抗性化合物的积累来增加土壤有机碳的脂族性和芳构化;另一方面,可以通过促进大团聚体内部形成微粒有机质等方式增强大团聚体和微团聚体对碳水化合物和有机酸的物理保护,进而提高土壤有机碳的稳定性和含量^[28-29]。生态茶园土壤有大量植物源有机质输入,具有较好的固碳潜力,在此基础上可通过施加适量有机肥以及选择对土壤扰动较小的耕作方式,来增强土壤有机碳稳定性和团聚

体对有机碳的物理保护作用,进而优化茶树的生长环境,增强茶园土壤的固碳功能。

4 结论

与各粒级团聚体有机碳含量相比,各粒级团聚体含量决定该粒级团聚体固碳贡献率的大小,总体来看,大团聚体固碳贡献率相对更大。茶园土壤各粒级团聚体土壤有机碳主要来源于多糖碳或脂肪碳,表层土的粉—黏粒团聚体比大团聚体和微团聚体含有更多稳定性碳,深层土的各级团聚体均比表层土对应粒级团聚体含有更多稳定性碳。大团聚体是有机碳分布的主要场所,而深层土壤和较小粒级团聚体对有机碳的保护作用相对更强,是有机碳长期稳定存在的场所。

参考文献:

- [1] 史奕,陈欣,沈善敏.有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J].应用生态学报,2002,13(11):1495-1498.
- [2] 王璐莹,秦雷,吕宪国,等.铁促进土壤有机碳累积作用研究进展[J].土壤学报,2018,55(5):1041-1050.
- [3] 李玮,郑子成,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2015,26(1):9-16.
- [4] Deng J J, Zhu W X, Zhou Y B, et al. Soil organic carbon chemical functional groups under different revegetation types are coupled with changes in the microbial community composition and the functional genes[J].Forests, 2019,10(3):e240.
- [5] 孙慧敏,姜姜,崔莉娜,等.互花米草入侵对漳江口红树林湿地土壤有机碳官能团特征的影响[J].植物生态学报,2018,42(7):774-784.
- [6] Parajuli B, Luo M, Ye R Z, et al. Aggregate distribution and the associated carbon in Norfolk soils under long-term conservation tillage and short-term cover cropping[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,2021,52(8):859-870.
- [7] 李露露,李婷,郎山鑫,等.植茶年限降低土壤团聚体稳定性并促进大团聚体中钾素释放[J].植物营养与肥料学报,2020,26(7):1188-1197.
- [8] 王峰,陈玉真,尤志明,等.不同类型茶园土壤团聚体组成特征及稳定性研究[J].茶叶科学,2014,34(2):129-136.
- [9] 郭鸿鑫,孙崇玉,孙立强,等.长期梨树种植土壤团聚体组成及有机碳分布特征[J].土壤,2022,54(2):351-357.
- [10] 李婷,赵世伟,李晓晓,等.宁南山区不同年限苜蓿地土壤有机质官能团特征[J].应用生态学报,2012,23(12):3266-3272.
- [11] 裴志福,红梅,兴安,等.秸秆还田条件下盐渍土团聚体中有机碳化学结构特征[J].应用生态学报,2021,32(12):4401-4410.
- [12] 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,2000:269-289.
- [13] 赵隽宇,黄小芮,石媛媛,等.南亚热带多代连栽桉树人工林根际土壤 FTIR 特征分析[J].生态环境学报,2022,31(4):688-694.
- [14] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [15] 郑子潇,王丹阳,胡保安,等.华北落叶松人工林土壤有机碳和团聚体稳定性对间伐的响应[J].生态学报,2023,42(4):780-787.
- [16] 李婷,赵世伟,张扬,等.黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响[J].生态学报,2011,31(18):5199-5206.
- [17] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems[J].Global Change Biology,2007,13(2):511-530.
- [18] 裴志福,红梅,武振丹,等.草甸草原土壤不同组分有机碳含量及化学结构对长期氮输入的响应[J].土壤,2022,54(3):481-489.
- [19] Demyan M S, Rasche F, Schulz E, et al. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem[J].European Journal of Soil Science,2012,63(2):189-199.
- [20] Heller C, Ellerbrock R H, Roßkopf N, et al. Soil organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR-spectroscopy: Effects of mire type and drainage intensity[J].European Journal of Soil Science, 2015,66(5):847-858.
- [21] 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.
- [22] 李召阳,刘晟,刘嘉元,等.滨海不同生境湿地土壤有机碳官能团特征及其影响因子[J].应用与环境生物学报,2022,28(2):276-282.
- [23] 胥佳忆,李先德,刘吉龙,等.农业土地利用转变对土壤团聚体组成及碳、氮含量的影响[J].环境科学学报,2022,42(8):438-448.
- [24] 冷暖,邓羽松,林立文,等.南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性[J].水土保持学报,2021,35(5):80-86,93.
- [25] 魏霞,贺燕,魏宁,等.祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J].农业工程学报,2020,36(2):148-155.
- [26] Shi J W, Deng L, Gunina A, et al. Carbon stabilization pathways in soil aggregates during long-term forest succession: Implications from $\delta^{13}\text{C}$ signatures[J].Soil Biology and Biochemistry,2023,180:e108988.
- [27] 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.
- [28] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤学报,2015,52(4):828-838.
- [29] 郭素春,郁红艳,朱雪竹,等.长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J].土壤学报,2013,50(5):922-930.