

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.018

周方亮, 李峰, 黄雅楠, 等. 紫云英添加对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响. 土壤, 2020, 52(4): 781–788.

## 紫云英添加对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响<sup>①</sup>

周方亮, 李峰, 黄雅楠, 耿明建, 黄丽\*

(华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 以湖北省武汉市稻田土壤为研究对象, 分别设置不添加紫云英(CK)、添加 2% 土壤质量的紫云英(G1)、添加 4% 土壤质量的紫云英(G2)3 个处理, 进行干湿交替模拟培养试验, 研究培养 60、120 和 180 d 土壤团聚体组成及团聚体内有机碳的分布特征。结果表明: 添加紫云英培养 120 d 增加了各处理 >2 mm 团聚体含量, 培养 60 d 时 G1 处理的增幅最大(78.08%), 培养 120 d 时 G2 处理的增幅最大(77.31%), 且显著提高了团聚体的平均重量直径。不同培养时期添加紫云英均提高了土壤的有机碳含量, 且 G2 处理土壤有机碳含量高于 G1 处理, 各处理随着培养时间的增加有机碳含量先增加后降低。团聚体中有机碳含量均随着粒级的减小而降低, 紫云英添加培养 180 d 时团聚体各粒级有机碳含量均有所提升, 且 >2 mm 团聚体的有机碳含量增幅最大(17.17%~43.67%)。紫云英添加培养 120 d 时主要增加大团聚体内各有机碳组分的相对含量, 180 d 时显著增加了微团聚体内细颗粒有机碳的含量。

**关键词:** 紫云英; 土壤团聚体; 有机碳; 有机碳分组; 室内培养

**中图分类号:** S152.4 **文献标志码:** A

### Effects of Adding Chinese Milk Vetch on Soil Aggregates Composition and Organic Carbon Distribution

ZHOU Fangliang, LI Feng, HUANG Ya'nian, GENG Mingjian, HUANG Li\*

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Taking the paddy field soil of Wuhan City in Hubei Province as the study object, an experiment of dry and wet alternate culture was carried out in which three treatments were designed: without adding Chinese milk vetch(CK), adding 2% Chinese milk vetch(G1), and adding 4% Chinese milk vetch(G2), the composition of soil aggregates and the distribution characteristics of organic carbon in soil aggregates at 60 d, 120 d and 180 d of culture were measured and compared. The results showed that the content of >2 mm aggregates was increased by adding Chinese milk vetch for 120 days, at 60 d the maximum increase was observed for G1 treatment (78.08%) and at 120 d the maximum increase was observed for G2 treatment (77.31%), and adding Chinese milk vetch also significantly increased the mean weight diameter of soil aggregates. Organic carbon contents increased with adding Chinese milk vetch in different culture periods, and organic carbon content of G2 was higher than that of G1. Organic carbon contents in all treatments first increased and then decreased with the increase of culture time. The content of organic carbon in soil aggregates decreased with the decrease of aggregate size. Adding Chinese milk vetch for 180 d increased the contents of organic carbon in all sizes of soil aggregates, and the organic carbon content of >2 mm aggregates increased the most (17.17%~43.67%). Adding Chinese milk vetch for 120 d mainly increased the relative content of organic carbon fractions in macroaggregates, while for 180 d significantly increased the content of fine particulate organic carbon in microaggregates.

**Key words:** Chinese milk vetch; Soil aggregates; Organic carbon; Organic carbon fractions; Indoor culture experiment

土壤团聚体广泛地影响着土壤的性能,包括增强土壤孔隙度、紧实性,影响植物根系的分布及提高土壤抵抗水土流失的能力<sup>[1]</sup>。研究显示,有机碳是土壤

颗粒聚集效应的重要结合剂<sup>[2]</sup>,它可以通过化学和物理过程结合土壤细颗粒<sup>[3]</sup>;团聚体还为土壤中的有机碳提供结构保护,从而防止生物降解<sup>[4-5]</sup>。土壤团聚

①基金项目: 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22)和公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503122)资助。

\* 通讯作者(daisyh@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 周方亮(1993—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事土壤化学与肥力研究。E-mail: 942696809@qq.com

体作为土壤理化性质的中心调节器,在很大程度上影响着有机碳的化学和生物化学固定,团聚体各粒径中的有机质固存动态与团聚体自身的稳定性息息相关<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤团聚体及有机碳的关系对提高土壤结构稳定性和土壤碳储量具有重要意义。

紫云英是我国稻田主要的冬季绿肥<sup>[7-8]</sup>,紫云英种植还田是传统农业用地养地的重要措施<sup>[9]</sup>。近年来大量的化肥施用和较低的利用率正在造成严重的环境问题<sup>[10]</sup>,紫云英等有机物料的添加,可直接增加土壤中有机碳含量,提高表层土壤有机碳的累积,对土壤质量改善和促进农业可持续发展具有经济 and 实际意义<sup>[11]</sup>。紫云英种植还田可提高土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径,增加 0.25 ~ 0.053、0.5 ~ 0.25 mm 团聚体的有机碳含量<sup>[12]</sup>。紫云英还田可显著增加土壤总有机碳含量,并通过提高土壤微团聚体有机碳含量而增加土壤碳库<sup>[13]</sup>。也有研究指出,翻压紫云英虽未显著提高大团聚体的含量,却明显提高了团聚体稳定性,改善了土壤结构,且高紫云英用量的处理团聚体 MWD 增幅较大<sup>[14]</sup>。由于土壤团聚体结构的差异,导致外源碳的可进入性不同,进而影响了有机碳组分在团聚体内的周转及稳定。外源新碳前期主要分配在 >2 mm 粒级团聚体中,并促进原土有机碳的分解,后期主要分配在微团聚体中<sup>[15]</sup>。有研究发现,来源于有机物料的碳首先被存储在大团聚体中,随着时间的增长,以矿物结合态有机碳和细颗粒有机碳形式存在的碳储量逐渐增加,矿物结合态有机碳和细颗粒有机碳是微团聚体中有机碳稳定储存的主要机制,微团聚体可以为微生物活动提供合适的条件并促进细颗粒有机碳积累<sup>[16]</sup>。

紫云英种植还田可以增加土壤有机碳含量,提高团聚体的稳定性<sup>[17]</sup>,但紫云英添加后团聚体组成及团聚体内有机碳分布的动态变化尚鲜有报道。因此,本文采用添加紫云英室内培养试验,通过对土壤团聚体组成、稳定性以及团聚体内有机碳分布特征的研究,了解紫云英腐解过程中土壤团聚体的变化和团聚体中有机碳的储存特征,以期对紫云英还田利用和培肥土壤提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为第四纪沉积物发育的水稻土,采自华中农业大学校内试验基地(30°28'10" N, 114°21'21" E),该区属于亚热带季风气候,年平均气温 16.9℃,年均日照时数为 1 810 ~ 2 100 h,年均降雨量为 1 269 mm,

年均蒸发量为 1 494 mm。供试土壤为壤质黏土(27.70% 砂粒, 43.99% 粉粒, 28.31% 黏粒),土壤有机碳 5.99 g/kg, 碱解氮 57.02 mg/kg, 有效磷 2.00 mg/kg, 速效钾 99.07 mg/kg, pH 7.00。

于 2018 年 4 月采集表层 0 ~ 20 cm 土壤样品, 5 个样点混匀后四分法取样。将其带回实验室后,剔除其中石块、植物残体等杂质,置于阴凉通风处自然风干,将大土块沿土壤自然结构轻轻地掰碎,过 2 mm 筛备用。

### 1.2 试验设计

培养试验共设 3 个处理,分别为不添加紫云英(CK),添加 2% 土壤质量的紫云英(G1),添加 4% 土壤质量的紫云英(G2)。每个处理设置 3 个取样时期,每个时期各 3 个重复,共 36 盆。土样风干后过 2 mm 筛,每个塑料杯中装入 200 g 土样(容重为 1.30 g/cm<sup>3</sup>),将新鲜的紫云英植株剪成 1 ~ 2 cm 大小,按上述比例与风干土样充分混匀。在 25℃ 下进行干湿交替培养,加蒸馏水调节土壤含水量为田间持水量的 60%,保持 15 d(培养过程中用称重法补充水份),然后自然落干 15 d 为一个周期。分别在培养 60、120、180 d 采用破坏性取样,用于测定土壤团聚体稳定性和有机碳含量。

### 1.3 样品测定

将 100 g 风干土样通过孔径依次为 2、0.25、0.053 mm 的套筛,分别称重计算出各级干筛团聚体占土壤总量的百分率。然后按干筛法测定的各级团聚体比例配制 60 g 风干土样,用 Elliott<sup>[18]</sup>的土壤团聚体湿筛法获得不同粒径水稳性团聚体:将样品放置于孔径自上而下为 2、0.25、0.053 mm 的套筛上,先用水浸润 10 min,接着开启团聚体分析仪垂直上下振荡 10 min,收集各级筛子上的团聚体并分别转移至铝盒,依次得到 >2、2 ~ 0.25、0.25 ~ 0.053、<0.053 mm 水稳性团聚体,烘干称重。称重后样品磨细过 0.15 mm 筛,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定其有机碳含量<sup>[19]</sup>。

另外,分别称取 5.00 g 烘干后的大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(0.25 ~ 0.053 mm)样品进行密度分组<sup>[20]</sup>:用密度为 1.85 g/cm<sup>3</sup> NaI 溶液分离得到游离态轻组(fLF)和重组(HF)。向重组中加入 0.5%(m/V)六偏磷酸钠(HMP)溶液,振荡 18 h,依次通过 0.25 mm 和 0.053 mm 筛,分别得到粗颗粒有机碳(cPOC, >0.25 mm)、细颗粒有机碳(fPOC, 0.25 ~ 0.053 mm)、矿物结合态有机碳(mSOC; <0.053 mm),各组分在 40℃ 下烘干、称重,计算各有机碳组分在土壤中的相

对含量。

水稳性团聚体稳定性指标使用平均重量直径 (MWD)表示：

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

式中： $\bar{X}_i$  为某级团聚体的平均直径； $W_i$  为该级团聚体的质量分数。

### 1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2003 进行统计分析，使用 Origin 8.0 软件进行绘图，数据差异显著性分析采用 Duncan 法 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳性团聚体的分布

在添加紫云英培养期间，不同处理的团聚体分布相似(表 1)，水稳性团聚体含量(以质量分数表示)由高到低依次为， $<0.053$ 、 $2 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.053$ 、 $>2$  mm。 $<0.053$  mm 粒级团聚体含量最高，为 35.77% ~ 53.32%， $>2$  mm 团聚体含量仅有 2.49% ~ 5.43%。在

培养 60 d 时，与 CK 处理相比，G1 和 G2 处理  $>2$ 、 $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体的含量分别提高了 53.77% ~ 78.08%、1.22% ~ 39.45%，其中 G1 处理  $>2$  mm 团聚体含量显著增加，增幅为 78.08%； $<0.053$  mm 团聚体含量降低了 3.58% ~ 17.05%。在培养 120 d 时，相比于 CK 处理，G1 和 G2 处理  $>2$ 、 $2 \sim 0.25$  mm 团聚体的含量分别提高了 51.15% ~ 77.31%、16.14% ~ 17.79%，其中 G2 处理显著增加  $>2$  mm 团聚体含量； $<0.053$  mm 团聚体含量相比于 CK 处理降低了 12.80% ~ 31.70%。在培养 180 d 时，G1 和 G2 处理  $2 \sim 0.25$  mm 团聚体的含量分别提高了 1.07% 和 7.52%，但不同处理各粒级团聚体的含量均无显著变化。与培养 60 d 相比，培养 180 d 时 CK 处理  $>2$ 、 $2 \sim 0.25$  mm 团聚体含量有所降低，分别降低了 16.39%、21.98%， $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体含量增加了 48.30%。添加紫云英后，在整个培养时期， $>2$  mm 团聚体在培养 60 d 时含量最高，随着培养时间的增加而减少， $<0.053$  mm 团聚体随着培养时间的增加先减少后增加，在培养 180 d 时含量最高。

表 1 不同培养时期土壤水稳性团聚体的分布(%)  
Table 1 Distribution of soil water stable aggregates in different culture periods

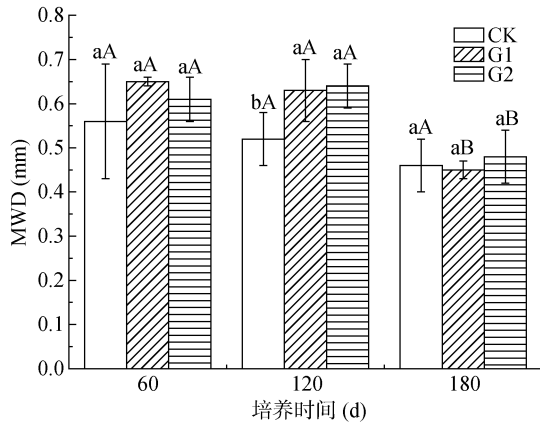
培养时间(d)	处理	$>2$ mm	$2 \sim 0.25$ mm	$0.25 \sim 0.053$ mm	$<0.053$ mm
60	CK	3.05 ± 1.19 bA	37.17 ± 7.86 aA	12.32 ± 3.46 aB	47.45 ± 12.03 aA
	G1	5.43 ± 0.95 aA	38.03 ± 3.25 aA	17.18 ± 6.48 aA	39.36 ± 5.16 aAB
	G2	4.69 ± 0.55 abA	37.09 ± 3.08 aAB	12.47 ± 1.69 aA	45.75 ± 2.16 aA
120	CK	2.60 ± 0.68 bA	34.52 ± 6.24 aA	15.77 ± 1.01 aAB	47.11 ± 6.12 aA
	G1	3.93 ± 0.91 abAB	40.66 ± 3.64 aA	19.64 ± 8.64 aA	35.77 ± 11.65 aB
	G2	4.61 ± 0.44 aA	40.09 ± 4.22 aA	14.23 ± 5.28 aA	41.08 ± 7.84 aA
180	CK	2.55 ± 0.29 aA	29.00 ± 4.68 aA	18.27 ± 2.89 aA	50.18 ± 6.96 aA
	G1	2.49 ± 0.16 aB	29.31 ± 1.40 aB	14.89 ± 2.96 aA	53.32 ± 3.06 aA
	G2	2.55 ± 1.37 aB	31.18 ± 1.27 aB	18.05 ± 6.26 aA	48.22 ± 8.16 aA

注：表中不同小写字母表示同一培养时期不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )，不同大写字母表示同一处理不同时期之间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

### 2.2 土壤团聚体稳定性的变化

由图 1 可知，团聚体的 MWD 为 0.45 ~ 0.65 mm。在培养 60 d 时，添加紫云英处理的 MWD 有所增高，相比于 CK 处理，G1 和 G2 处理的 MWD 分别增加了 16.07% 和 8.93%，其中 G1 处理团聚体的 MWD 最高，为 0.65 mm。在培养 120 d 时，相比于 CK 处理，G1 和 G2 处理显著增加了团聚体的 MWD，增幅分别为 21.15% 和 23.08%，G2 处理团聚体 MWD 最高，为 0.64 mm。在培养 180 d 时，不同处理团聚体的 MWD

由大到小依次为 G2>CK>G1，G2 处理相比于 CK 增加了 4.35%，但各处理间均无显著差异。在整个培养时期，CK 和 G1 处理的 MWD 随着培养时间的增加而降低，相比于培养 60 d，培养 180 d 时分别下降 17.86% 和 30.77%；G2 处理的 MWD 随着培养时间的增加表现为先增加后降低，在培养 120 d 时达到最大，与此相比，培养 180 d 时显著下降 25%。紫云英添加提高了前期土壤团聚体的稳定性，尤其是在培养 120 d 时效果最为显著，但培养 180 d 后不同处理无明显差异。



(图中不同小写字母表示同一时期不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示同一处理不同时期之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 不同培养时期土壤团聚体 MWD 的变化  
Fig. 1 MWD of soil aggregates in different culture periods

### 2.3 土壤和团聚体中有机碳的分布

培养期间, 土壤有机碳含量为 6.97 ~ 8.39 g/kg (图 2), 添加紫云英后土壤有机碳含量有所提升, 在不同培养时期均表现为  $G2 > G1 > CK$ , 这与前人的研究结果相似<sup>[21]</sup>。在培养 60 d 时, 相比于 CK 处理, G1 和 G2 处理的土壤有机碳含量显著增加, 增幅分别为 6.27% 和 10.72%。在培养 120 d 时, G1 和 G2 处理的有机碳含量相比于 CK 处理分别显著增加 6.59% 和 17.67%, 且 G2 处理相比于 G1 处理土壤有机碳含量显著增加 7.98%。在培养 180 d 时, 与 CK 处理相比, G2 处理的有机碳含量增加 6.17%。在整个培养过程中, CK 处理有机碳含量随着培养时间的增加而降低, 添加紫云英各处理随着培养时间的增加有机碳含量先增加后降低, 在 120 d 时达到最大值, 这可能是由于新鲜紫云英含氮量较高, 还田后易引起“激发效应”, 促进土壤有机碳矿化分解, 使土壤有机碳含量有所降低<sup>[22-23]</sup>。

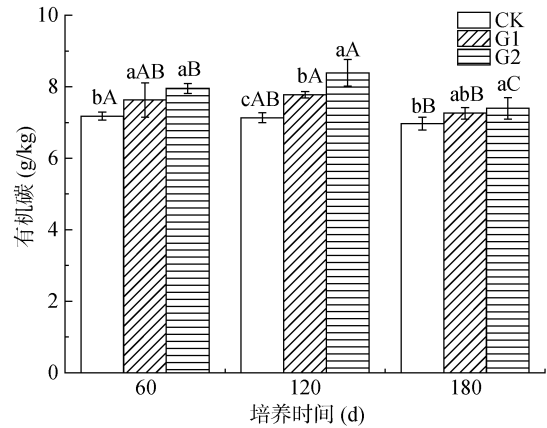


图 2 不同培养时期土壤有机碳的含量  
Fig. 2 Soil organic carbon contents in different culture periods

不同处理土壤团聚体中有机碳含量均随着粒级的减小而降低, 由高到低依次为  $>2$ 、 $2 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm。 $>2$ 、 $2 \sim 0.25$  mm 团聚体的有机碳含量高于原土,  $0.25 \sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm 团聚体的有机碳含量则低于原土。大团聚体的稳定性在很大程度上取决于植物根系和菌丝, 紫云英的添加首先作用在大团聚体上, 而小粒径团聚体中的有机碳则维持在较稳定的水平<sup>[24]</sup>。培养 60 d 时, 不同处理各粒级团聚体的有机碳含量无显著差异。培养 120 d 时, 除 G2 处理  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体外, 添加紫云英后土壤各粒级团聚体的有机碳含量均有所提升, 相比 CK 处理, G2 处理显著增加了  $>2$  mm 团聚体的有机碳含量, 增幅为 48.82%。培养 180 d 时, G1 和 G2 处理均提高了各粒级团聚体的有机碳含量, 显著增加了  $>2$  mm 团聚体的有机碳含量, 增幅分别为 17.17% 和 43.67%, G1 处理  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体的有机碳含量显著增加了 6.93%。在整个培养过程中, G1 和 G2 处理  $>2$ 、 $2 \sim 0.25$  mm 团聚体的有机碳含量随着培养时间的增加而增加,  $<0.053$  mm 团聚体的有机碳含量则与原土有相似的变化规律, 随着培养时间的增加先增加后降低。

表 2 不同培养时期土壤团聚体中有机碳的含量(g/kg)  
Table 2 Organic carbon contents in soil aggregates in different culture periods

培养时间(d)	处理	$>2$ mm	$2 \sim 0.25$ mm	$0.25 \sim 0.053$ mm	$<0.053$ mm
60	CK	11.16 ± 0.42 aA	8.32 ± 0.29 aB	6.77 ± 0.14 aA	6.47 ± 0.28 aA
	G1	10.44 ± 0.97 aA	8.23 ± 0.76 aB	6.95 ± 0.36 aA	6.45 ± 0.37 aA
	G2	11.10 ± 0.40 aB	8.86 ± 0.40 aA	7.01 ± 0.34 aA	6.61 ± 0.26 aA
120	CK	9.30 ± 1.08 bB	9.16 ± 0.20 aA	6.96 ± 0.13 aA	6.28 ± 0.38 aA
	G1	11.04 ± 1.23 bA	9.20 ± 0.02 aAB	7.07 ± 0.11 aA	6.51 ± 0.07 aA
	G2	13.84 ± 1.41 aA	9.32 ± 0.94 aA	6.94 ± 0.39 aA	6.79 ± 0.33 aA
180	CK	9.96 ± 0.33 cAB	9.28 ± 0.29 aA	6.78 ± 0.15 bA	6.10 ± 0.16 aA
	G1	11.67 ± 0.79 bA	9.55 ± 0.75 aA	7.25 ± 0.09 aA	6.35 ± 0.17 aA
	G2	14.31 ± 0.86 aA	9.32 ± 0.13 aA	6.98 ± 0.29 abA	6.29 ± 0.01 aA

## 2.4 团聚体内有机碳组分的分布

在团聚体内,各有机碳组分的相对含量以矿物结合态有机碳为主,粗颗粒有机碳次之,细颗粒有机碳和轻组有机碳含量最低(表3)。在培养的120 d内,与CK处理相比,G1和G2处理均增加了大团聚体(>0.25 mm)内各有机碳组分的相对含量。培养180 d时,G2处理增加了微团聚体(0.25~0.053 mm)内细颗

粒有机碳和矿物结合态有机碳的相对含量。与培养60 d时相比,在培养180 d时CK处理大团聚体内粗颗粒和细颗粒有机碳的相对含量有所下降,矿物结合态有机碳和微团聚体内细颗粒有机碳的相对含量有所上升;G1和G2处理则除轻组有机碳含量外,大团聚体内各有机碳组分的相对含量均有降低,微团聚体内各有机碳组分的相对含量有不同程度的增加。

表3 不同培养时期土壤团聚体中有机碳组分的相对含量(%)  
Table 3 Relative contents of organic carbon fractions in soil aggregates in different culture periods

培养时间(d)	处理	>0.25 mm				0.25~0.053 mm		
		fLF	cPOC	fPOC	mSOC	fLF	fPOC	mSOC
60	CK	0.13	1.75	0.56	30.24	0.03	0.93	10.47
	G1	0.19	2.09	0.85	39.80	0.05	0.81	12.01
	G2	0.34	2.01	0.91	40.81	0.05	0.77	11.52
120	CK	0.15	1.31	0.51	32.73	0.04	1.14	13.46
	G1	0.20	1.57	0.78	44.55	0.12	1.16	15.34
	G2	0.37	1.41	1.21	37.25	0.09	0.83	9.21
180	CK	0.53	1.41	0.52	33.00	0.03	1.41	16.01
	G1	0.26	1.54	0.53	28.59	0.10	1.42	16.64
	G2	0.43	1.50	0.54	31.07	0.05	1.57	21.05

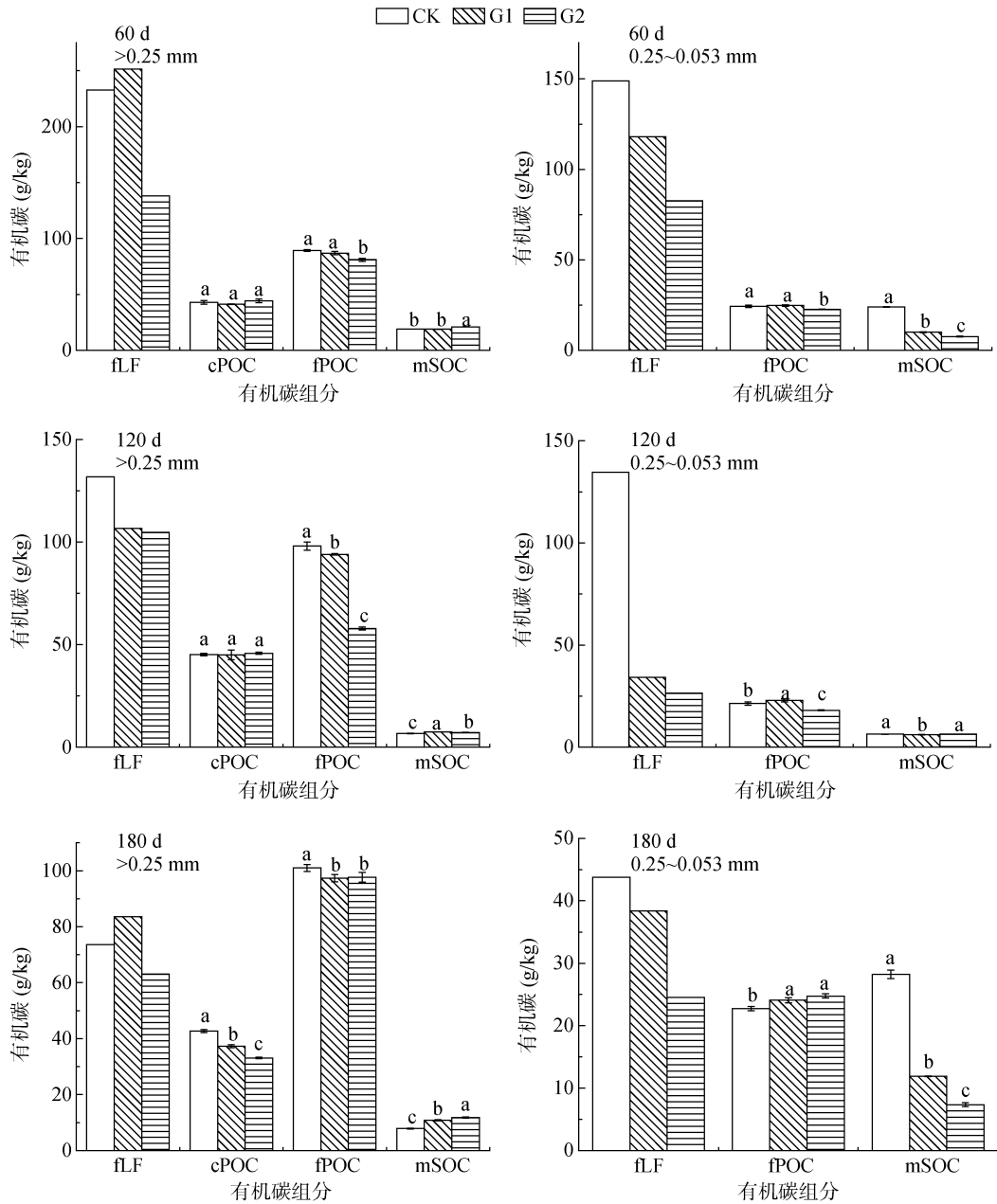
注:表中fLF表示轻组有机碳;cPOC表示粗颗粒有机碳;fPOC表示细颗粒有机碳;mSOC表示矿物结合态有机碳。微团聚体样品较少,不同时期每个处理进行了一次有机碳分组,未能进行方差分析。

不同培养时期,团聚体内各组分有机碳含量有着相似的分布规律(图3)。在大团聚体中,轻组和细颗粒有机碳的含量较高,粗颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的含量较低;在微团聚体中,除CK处理培养180 d时的样品外,其余样品的各组分有机碳含量由高到低依次为轻组>细颗粒有机碳>矿物结合态有机碳。培养60 d时,相比于CK处理,G2处理显著提升了大团聚体内矿物结合态有机碳的含量,增幅为10.70%,微团聚体内细颗粒有机碳、矿物结合态有机碳含量均有下降,降幅分别为7.37%、60.51%。在培养120 d时,与CK处理相比,G1和G2处理显著降低了大团聚体内细颗粒有机碳的含量,分别降低了4.12%和41.01%。培养180 d时,添加紫云英降低了大团聚体内粗颗粒有机碳、细颗粒有机碳的含量以及微团聚体内矿物结合态有机碳的含量;与CK处理相比,G1和G2处理大团聚体内矿物结合态有机碳和微团聚体内细颗粒有机碳分别增加37.31%~49.75%、5.85%~8.88%。这与前人的研究结果一致<sup>[25-26]</sup>,来源于有机物料的碳首先以颗粒有机碳形式储存在大团聚体中,随着培养时间的增加外源新碳逐步趋向储存于粒径较小的微团聚体,导致培养180 d时微团聚体内细颗粒有机碳

含量的增加。

## 3 讨论

研究结果显示,在培养120 d内,添加紫云英处理>2 mm团聚体的含量相比CK均有所增加,且培养120 d时团聚体的稳定性显著提升。培养180 d时,不同处理各粒级团聚体含量无显著变化。Oades和Waters<sup>[27]</sup>试验研究表明,不同粒级团聚体的稳定性受各个粒级团聚体中有机质含量的影响,有机胶结物质在水稳性团聚体形成过程中起着重要的作用。紫云英添加后直接增加了土壤有机碳的含量,提高土壤中微生物的活性<sup>[28]</sup>,而干湿交替的过程会导致土壤中氧化还原电位以及不同类型微生物群落的交替,为有机物质的腐殖化提供条件<sup>[29-30]</sup>,促进有机胶结物质的形成。随着培养时间的增加,土壤颗粒在有机胶结物质的作用下不断粘结形成大团聚体,并在120 d时团聚体稳定性达到最大。研究指出,紫云英还田在前20 d腐解最快,100 d时紫云英累积腐解率达74.5%,有机碳累积腐解率为70.1%<sup>[31]</sup>。本试验培养120 d后紫云英基本腐解完全,受激发效应的影响土壤有机碳的含量不断降低,这可能引起180 d时团聚体稳定性下降。



(图中轻组(fLF)有机碳相对含量较低, 样品量有限无法多次测定, 没有进行方差分析)

图 3 不同培养时期土壤团聚体中各组分有机碳含量

Fig. 3 Contents of organic carbon fractions in soil aggregates in different culture periods

相比于 CK 处理, 紫云英添加 180 d 后显著增加了微团聚体内细颗粒有机碳的含量, 这与前人的研究结果相似<sup>[32]</sup>。Li 等<sup>[16]</sup>通过两年的原位培养发现, 植物残体的碳主要贮存在细颗粒有机碳中, 轻组和粗颗粒有机碳则会随着培养时间的增加而减少。研究显示, 植物残体中含有较大比例的粗颗粒有机质, 这些会作为团聚体的“核”在微生物分泌物等胶结物的作用下与土壤颗粒粘结形成大团聚体, 随着时间的增加粗颗粒有机碳不断地破碎分解形成细颗粒有机碳<sup>[33]</sup>。因此, 添加紫云英各处理培养后团聚体内粗

颗粒有机碳含量有所增加, 但随着紫云英腐解速度变缓, 培养 180 d 时粗颗粒有机碳不断破碎分解, 使微团聚体内细颗粒有机碳含量不断增加。相比培养 120 d 时, 培养 180 d 时 G1 和 G2 处理土壤的大团聚体含量分别下降了 28.68% 和 24.54%, 大团聚体的破碎也导致了大团聚体内细颗粒有机碳分离进入微团聚体, 导致微团聚体内细颗粒有机碳含量的增加。

#### 4 结论

培养 120 d 内, 添加紫云英处理均提高了 >2 mm

团聚体的含量与团聚体的 MWD。在整个培养时期, >2 mm 团聚体在 60 d 时含量最高, 随着培养时间的增加而减少, <0.053 mm 团聚体随着培养时间的增加先减少后增加, 在 180 d 时含量最高。紫云英的添加提高了土壤有机碳的含量, 4% 土壤质量的紫云英添加量效果更好, 团聚体中有机碳主要储存在 >2、2~0.25 mm 团聚体中。紫云英添加 180 d 时, 显著降低大团聚体内粗颗粒有机碳和细颗粒有机碳的含量, 显著增加微团聚体内细颗粒有机碳的含量, 促进微团聚体内有机碳的累积, 添加 4% 土壤质量的紫云英处理变化幅度最大。

### 参考文献:

- [1] Wang Q, Wang D, Wen X F, 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] 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.
- [3] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 55–65.
- [4] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil[J]. *Geoderma*, 2004, 120(3/4): 273–282.
- [5] 孟祥天, 蒋瑀霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 326–332.
- [6] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 182–193.
- [7] 林新坚, 曹卫东, 吴一群, 等. 紫云英研究进展[J]. *草业科学*, 2011, 28(1): 135–140.
- [8] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3): 657–669.
- [9] 周健, 袁国保, 耿月明, 等. 对我国紫云英发展的思考[J]. *中国种业*, 2012(12): 19–22.
- [10] Xie Z J, Shah F, Tu S X, et al. Chinese milk vetch as green manure mitigates nitrous oxide emission from monocropped rice system in South China[J]. *Plos One*, 2016, 11(12): e0168134.
- [11] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942–27952.
- [12] 王淑彬, 杨文亭, 杨滨娟, 等. 不同冬作物对双季稻田土壤团聚体结构及有机碳、全氮的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2018, 40(1): 1–9.
- [13] 俞巧钢, 杨艳, 邹平, 等. 有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 170–175.
- [14] 刘春增, 刘小粉, 李本银, 等. 紫云英还田对水稻产量、土壤团聚性及其有机碳和全氮分布的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(6): 224–228.
- [15] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6): 2351–2359.
- [16] Li S Y, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 199–206.
- [17] 王志强, 刘英, 杨文亭, 等. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1143–1155.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [19] 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.
- [20] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981–1987.
- [21] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 肥料减施条件下水稻土壤有机碳组分对紫云英-稻草协同利用的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 283–290.
- [22] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 157–163.
- [23] Pramanik P, Haque M M, Kim S Y, et al. C and N accumulations in soil aggregates determine nitrous oxide emissions from cover crop treated rice paddy soils during fallow season[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 622–628.
- [24] Garcia-Franco N, Albaladejo J, Almagro M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 66–75.
- [25] 金鑫鑫, 汪景宽, 孙良杰, 等. 稳定  $^{13}\text{C}$  同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 217–224.
- [26] Jiang M B, Wang X H, Liusui Y H, et al. Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil[J]. *Catena*, 2017, 149: 437–445.
- [27] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Soil Research*, 1991, 29(6): 815.
- [28] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 360–369.

- [29] 张素, 熊东红, 校亮, 等. 干湿交替对土壤性质影响的研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 762–768.
- [30] 张志毅, 汤文娟, 熊又升, 等. 改良剂对冷浸田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(4): 37–43.
- [31] 李忠义, 何铁光, 蒙炎成, 等. 稻田豆科冬季绿肥腐解及养分释放特征研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 241–245.
- [32] Yan Y, Tian J, Fan M S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 150:102–110.
- [33] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369–373.