

DOI: 10.11766/trxb202106090303

王慧, 韩上, 唐杉, 程文龙, 卜容燕, 李敏, 武际, 王允青, 曹卫东. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 868–880.

WANG Hui, HAN Shang, TANG Shan, CHENG Wenlong, BU Rongyan, LI Min, WU Ji, WANG Yunqing, CAO Weidong. Continuous Multi-year Application of Chinese Milk Vetch in Paddy Soil and Its Effect on Soil Aggregates Distribution and Their Carbon and Nitrogen Content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (3): 868–880.

紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响*

王慧¹, 韩上¹, 唐杉¹, 程文龙¹, 卜容燕¹, 李敏¹, 武际^{1†},
王允青¹, 曹卫东²

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 紫云英翻压还田是南方传统稻田土壤培肥增产的主要措施。依托连续 12 年田间定位试验, 通过设置 CK (不施化肥, 紫云英不还田)、单施化肥 (GM0) 和 4 个梯度的紫云英翻压量 (GM1-4) 处理, 分析连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组分、团聚体中碳氮含量和储量, 并通过傅里叶红外光谱测定各粒级有机官能团类型及相对含量, 探讨连续多年紫云英翻压还田对土壤团聚体组分及其碳氮分布的影响。结果表明, 在该土壤中粒级 >2 mm 土壤团聚体含量最高, 占总量的 61.12%~68.53%, 其次是 2~0.25 mm 粒级团聚体。紫云英翻压还田较单施化肥处理提高了 >2 mm 粒级团聚体所占百分比 (5.93%~9.91%)。紫云英翻压还田提高了粒级 >0.053 mm 团聚体中有机碳含量和各个粒级中全氮含量, 其中粒级 >0.25 mm 团聚体的碳氮含量与紫云英翻压量之间呈现出显著正相关关系。紫云英翻压还田分别显著提高了 19.42%~37.09% 有机碳和 22.31%~40.13% 氮的总储量, 其中粒级 >2 mm 团聚体中碳氮储量随着紫云英翻压量的增加而增加。>2 mm 粒级团聚体中碳氮的分布也随着紫云英的翻压还田而增加。通过傅里叶红外光谱认为土壤各粒级团聚体中脂肪族有机碳和芳香族有机碳以及 N-H 官能团含量也随着紫云英翻压还田而增加, 其中 N-H 官能团含量与紫云英翻压量之间呈现出显著的正相关关系。紫云英翻压还田同时提高了各团聚体中 1 630/2 850+2 940 和 1 720/2 850+2 940 相对比值, 其中 >2 mm 和 2~0.25 mm 粒级团聚体中 1 630/2 850+2 940 相对强度比值与紫云英翻压量之间均呈显著性相关关系。综上, 紫云英翻压还田不仅有利于改善稻田土壤团聚体组分, 增加有机碳和全氮在土壤团聚体中的储存, 还提高了团聚体有机碳的活性和稳定性, 从而有助于提升稻田土壤肥力。

关键词: 紫云英; 团聚体组分; 有机碳; 全氮; 有机官能团; 红外光谱

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

Continuous Multi-year Application of Chinese Milk Vetch in Paddy Soil and Its Effect on Soil Aggregates Distribution and Their Carbon and Nitrogen Content

WANG Hui¹, HAN Shang¹, TANG Shan¹, CHENG Wenlong¹, BU Rongyan¹, LI Min¹, WU Ji^{1†}, WANG Yunqing¹,

* 国家自然科学基金项目 (41807106) 和现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-22) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41807106) and the Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System-Green Manure (No. CARS-22)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wuji338@163.com

作者简介: 王慧 (1987—), 女, 河南南阳人, 博士, 主要从事土壤培肥和养分转化研究。E-mail: kangxi20052009@163.com

收稿日期: 2021-06-09; 收到修改稿日期: 2022-01-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-07

CAO Weidong²

(1. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resource & Environment, Hefei 230031, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】 The application of Chinese milk vetch to paddy soil is an effective practice to improve soil fertility and maintain high and stable yields in South China. The soil aggregates distributions and their carbon and nitrogen content may be influenced by the continuous multi-year application of Chinese milk vetch. 【Method】 We investigated the effects of 12 years of Chinese milk vetch returned to soil on soil aggregate size distribution and aggregate-associated carbon and nitrogen by setting with six treatments including CK (no fertilizers and no Chinese milk vetch applied), GM0 (fertilizer only) and four gradients of Chinese milk vetch applied (GM1-4). The aggregate size distribution and the content and storage of organic carbon and nitrogen in the soil aggregate were analyzed. Also the types and relative intensity of organic functional groups in different size classes were determined using Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR). 【Result】 The results showed that the >2 mm soil aggregate was dominant (61.12%–68.53%) and followed by the 2–0.25 mm fraction. The application of Chinese milk vetch increased the percentage of the soil aggregate size (>2 mm) by 5.93%–9.91%. Also, the contents of organic carbon and total nitrogen in the >0.053 mm aggregates increased with the application rate of the treatment. There was a significant positive correlation between the contents of organic carbon and total nitrogen and the application rates of Chinese milk vetch. Interestingly, the application of Chinese milk vetch increased the total storage of organic carbon and nitrogen by 19.42%–37.09% and 22.31%–40.13%, respectively. Moreover, the distribution of organic carbon and nitrogen in >2 mm soil aggregate was also increased after the treatment. FTIR spectroscopic analysis revealed that the relative contents of aliphatic and aromatic organic carbons in soil aggregates were increased after treatment, and there was a significant positive correlation between the N-H functional groups and the application rate of Chinese milk vetch. In addition, the relative intensities of 1 630/2 850+2 940 and 1 720/2 850+2 940 in different soil aggregates were increased. There was a significant positive correlation between the values of the relative intensity of 1 630/2 850+2 940 in both aggregate sizes of >2 mm and 2–0.25 mm and the application of Chinese milk vetch. 【Conclusion】 The application of Chinese milk vetch to paddy soil improved the distribution of soil aggregates, increased the activity and stability of organic carbon, and enhanced the organic carbon and nitrogen storage in soil aggregates. These positive impacts of Chinese milk vetch played an important role in enhancing paddy soil fertility.

Key words: Chinese milk vetch; Aggregate fractions; Organic carbon; Total nitrogen; Organic functional groups; FTIR

水稻是我国三大粮食作物之一，且水稻高产的获得需要化学肥料的投入。但是长期单一化肥的施用导致了稻田土壤理化性质变差，影响水稻的平衡生长与稻米品质，不利于稻田的可持续利用，也会带来一系列的环境问题^[1]。绿肥是我国传统农业的精华，它不仅是清洁的有机肥源，而且在有效提高土壤肥力，改善土壤质量，实现资源高效利用等方面发挥着重要作用，是生态农业的重要组成部分^[2]。而紫云英作为豆科固氮绿肥，是我国南方稻区重要的冬季绿肥作物。冬季利用冬闲田种植绿肥，在第二年4—5月份进行翻压还田，可以充分利用土地、光、热等自然资源，避免长期稻-稻-冬闲种植方式造成的土壤板结、土壤肥力下降等问题^[3]。紫云英翻压还田可以为后茬作物生长提供必要的N、P、K

等营养元素，增加土壤矿质养分，进而提高水稻产量；同时还能够改善土壤理化性质，提高土壤肥力、土壤酶和相关微生物活性，调控土壤微生物和碳氮转化，提高表层土壤有机碳氮的积累^[4-7]。

土壤团聚体是组成土壤的基础和养分的主要载体，是肥沃土壤的主要标志，其粒级大小及其分布比例是调控土壤水肥供应与养分存储的重要物质基础^[8-9]。长期有机物料的投入还田不仅可以提高土壤微生物活性，改变稻田土壤团聚体的数量大小及其所含养分元素的分布，还可以提高稻田土壤团聚体中有机、无机胶结物质对土壤胶结的能力，提高团聚体稳定性^[10]。

紫云英作为绿色清洁的有机肥源，其翻压还田在改善土壤团聚体的结构组成及其养分含量方面也

具有明显的优势^[7, 9, 11]。研究表明紫云英还田可促进稻田土壤团聚体的形成发育, 促进大团聚体的形成, 增加土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径^[7, 12]。化肥配施紫云英时, 紫云英还田增加了 >2 mm 和 $0.25\sim 2$ mm 以及 $0.25\sim 0.053$ mm 和 $0.5\sim 0.25$ mm 粒级团聚体内有机碳含量, 有利于良好土壤结构的形成^[7, 9-11]。紫云英翻压还田进入土壤后, 其分解产物如羧酸、醇类、苯酚、多糖以及胺类物质等, 与土壤矿物进行胶结、凝聚形成微团聚体, 并在菌丝或根系作用下形成大团聚体, 促进土壤有机碳的物理保护作用, 并提升土壤团聚体的稳定性^[13-14]。目前对于长期多年连续添加不等量紫云英翻压还田对双季稻稻田土壤不同粒级团聚体中碳氮的影响以及对重要官能团的变化研究较少, 本文依托定位试验, 通过分析连续 12 年紫云英翻压还田下稻田土壤不同粒级团聚体中碳氮含量、碳氮储量以及结合红外光谱, 探究了连续多年紫云英翻压还田对土壤团聚体中碳氮分布以及相关主要官能团组成的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

定位试验始于 2008 年 9 月, 试验地点为安徽省桐城市。该地区为暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 16.0°C , 年平均降水量 $1\ 250$ mm, 年平均日照时数 $1\ 903$ h, 年平均无霜期 246 d。试验田土壤为河流冲积物发育的水稻土, 质地为砂壤土。轮作体系为紫云英-早稻-晚稻, 紫云英品种为弋江籽。供试土壤初始理化性质为有机质 $27.09\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.72\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $135.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $8.87\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $79.49\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, C/N 比 9.14 , pH 5.52 。

1.2 试验设计

本研究设置 6 个处理, 早稻试验处理方案如下: (1) 不施化肥, 紫云英不翻压 (CK); (2) 单施化肥, 紫云英不翻压 (GM0); (3) 施入化肥, 紫云英翻压还田量 $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (GM1); (4) 施入化肥, 紫云英翻压还田量 $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (GM2); (5) 施入化肥, 紫云英翻压还田量 $22\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (GM3); (6) 施入化肥, 紫云英翻压还田量 $30\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (GM4)。早稻化肥用量 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=105\text{-}52.5\text{-}$

$63\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。紫云英于早稻移栽前 $10\sim 15$ d 翻压入田, 浅水浸沤。晚稻各处理除对照 (CK) 不施肥外, 其余均施等量化肥, $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=180\text{-}75\text{-}120\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。磷钾肥全部基施, 氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥= $50\%:30\%:20\%$ 施用。小区面积 $20\ \text{m}^2$, 4 次重复, 随机区组排列。小区埂宽 $30\ \text{cm}$, 高 $20\ \text{cm}$, 用薄膜覆盖, 防止小区间串水串肥。每个小区在排灌小沟一段设灌排口。除草方法为人工除草, 其他管理方式均一致。

1.3 样品采集与分析

(1) 土壤样品采集与预处理。2020 年晚稻收获后在每个小区采用五点取样法采集 $0\sim 20\ \text{cm}$ 土壤样品, 混匀后带回实验室。手工拣去植物残体、砾石等, 沿土壤自然裂缝掰开, 风干。随后挑去细根和石块, 进行土壤团聚体提取与测定。土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾和 pH 的测定均按照鲍士旦^[15]方法进行。

(2) 土壤团聚体筛分及有机碳、全氮含量的测定。取风干土壤样品通过孔径为 2 、 0.25 、 0.053 mm 的套筛, 分别称量计算出各级干筛团聚体占土壤总质量的百分率, 并按干筛比例配成 $50\ \text{g}$ 的风干土样。然后根据薛斌等^[16]的土壤团聚体湿筛法测定团聚体组成: 将土样放置于自上而下为 2 、 0.25 、 0.053 mm 的套筛上, 先放入水桶中浸泡 $10\ \text{min}$, 然后在土壤团聚体分析仪上以每分钟 30 次的速度筛分 $10\ \text{min}$ (振幅 $4\ \text{cm}$)。湿筛结束后将留在各级筛孔上的团聚体洗入烧杯中, 进行冷冻干燥。干燥后称重, 依次得到超大团聚体 ($>2\ \text{mm}$)、大团聚体 ($2\sim 0.25\ \text{mm}$)、微团聚体 ($0.25\sim 0.053\ \text{mm}$) 和粉黏粒 ($<0.053\ \text{mm}$)。各级团聚体研磨过 100 目筛后采用常规农化分析方法测定有机碳和全氮含量^[15]。

(3) 红外光谱的采集。土壤不同粒级团聚体颗粒的红外光谱测定采用傅里叶红外光谱仪 (Thermo Scientific Nicolet iS5) 溴化钾压片法测定。称取冷冻干燥的土壤团聚体样品 $2\ \text{mg}$, 纯 KBr $200\ \text{mg}$ 放入玛瑙研钵中充分研磨均匀, 置于模具中压成透明薄片, 将样品放入红外光谱仪中测试, 波数范围 $4000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$, 扫描次数 32 , 分辨率 $4\ \text{cm}^{-1}$, 空气作为背景, 扫描时自动扣除背景光谱。

1.4 数据计算与处理

有机碳储量的计算方法按照 Eynard 等^[17]方法进行:

$$OCS = \sum_{i=1}^4 (M_i \times C_{org i}) \times B_d \times H \times 10$$

式中, M_i 为不同粒级团聚体的百分比 (%); $C_{org i}$ 为不同粒级团聚体中有机碳的含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_d 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H 为土层厚度 (20 cm)。氮储量的计算同样也按照此公式进行。

有机碳 (氮) 百分比 = 该粒级团聚体中有机碳 (氮) 储量 ÷ 有机碳 (氮) 总储量 × 100

采用 Excel 2007 软件进行数据处理, SPSS 20.0 软件进行统计分析, 利用 Duncan 法在 $P < 0.05$ 水平进行差异显著性检验; 使用 OPUS 7.5 软件对红外光谱图进行分析, 统一采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结 果

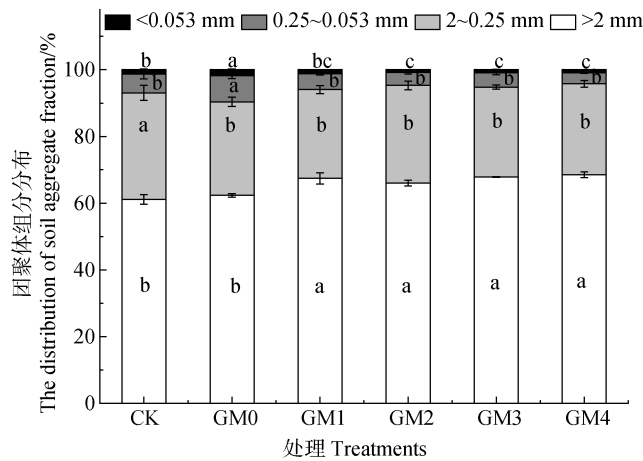
2.1 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成的影响

稻田土壤团聚体组成结果显示 (图 1), 该土壤主要以 >2 mm 粒级团聚体为主, 占比达到 61.12%~68.53%; 其次为 2~0.25 mm, 占比为 26.59%~31.96%; 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级仅占 4.23%~11.48%。与紫云英不翻压处理相比 (GM0),

紫云英翻压还田处理 (GM1-4) 显著提高了 >2 mm 粒级团聚体百分占比 (5.93%~9.91%, $P < 0.05$); GM1-4 处理中 >0.25 mm 粒级团聚体百分占比也高于 GM0 处理 (4.02%~5.95%)。GM1-4 处理 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级的团聚体含量百分比则相应低于 GM0 处理。对比 GM1-4 处理, 在同一粒级中各个处理之间差异不显著。

2.2 紫云英翻压还田对土壤团聚体中各粒级团聚体碳氮含量的影响

2.2.1 对碳氮含量的影响 不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中有机碳含量见表 1。对比不同粒级土壤有机碳含量, 在 CK 处理中粒级 >0.053 mm 有机碳含量高于其他 3 个粒级; 单施化肥处理 (GM0) 粒级 >2 mm 和 <0.053 mm 有机碳含量显著高于 0.25~0.053 mm ($P < 0.05$); 化肥配施紫云英处理 (GM1-4) 均表现为 >2 mm 粒级团聚体中有机碳含量最高, 其中 GM4 中 >2 mm 粒级团聚体中有机碳显著高于其他 3 个处理 ($P < 0.05$)。与单施化肥处理 (GM0) 相比, GM1-4 处理中 >2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 有机碳含量分别提高了 15.70%~39.79%、18.55%~31.86% 和 16.42%~60.32%。对比 GM1-4 各个处理, 4 个粒级团聚体中



注: CK: 对照, 不施化肥, 紫云英不翻压; GM0: 单施化肥, 紫云英不翻压; GM1: 施入化肥, 紫云英翻压量 $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; GM2: 施入化肥, 紫云英翻压量 $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; GM3: 施入化肥, 紫云英翻压量 $22\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; GM4: 施入化肥, 紫云英翻压量 $30\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。图中柱状图上的误差线为标准误, 不同小写字母代表同一粒级不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。Note: CK: the control, with no fertilizers and no Chinese milk vetch; GM0: with chemical fertilizers only; GM1: with $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Chinese milk vetch; GM2: with $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Chinese milk vetch; GM3: with $22\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Chinese milk vetch; GM4: with $30\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Chinese milk vetch. Vertical T bars in the histogram indicate SE, different letters in the same color indicate significant differences among different treatments in the same soil aggregate size at 0.05 level. The same below.

图 1 连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤团聚体的组分

Fig. 1 The soil aggregate fractions with the application of Chinese milk vetch

有机碳含量在 GM1-4 处理之间均差异不显著。但在 GM1-4 中, >2 mm 和 0.25~0.053 mm 有机碳含量分别随着紫云英翻压量的增加而增加, 与紫云英翻压量之间呈现出显著正相关关系。

不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中全氮含量见表 2。GM1-4 中 4 个粒级之间的全氮含量, 从高到低依次为(>2 mm)>(2~0.25 mm)>(0.25~0.053 mm)>(<0.053 mm)。与 GM0 处理相比,

GM1-4 处理中>2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒级团聚体全氮含量分别提升 23.08%~49.23%、12.06%~18.44%和 19.77%~52.33%, 并达到显著性差异 ($P<0.05$)。在 GM1-4 处理间, 各个粒级的全氮含量整体上随着紫云英翻压量的增加而增加, 在 GM4 时达到最高, 其中 >2 mm 粒级团聚体中全氮含量均与紫云英翻压量之间呈现出显著正相关关系。

表 1 连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体中有机碳含量的影响

Table 1 The organic carbon in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	土壤团聚体 Soil aggregates			
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	9.05±1.15c	8.51±0.23c	7.27±0.80c	11.91±1.30a
GM0	11.21±0.83c	9.76±0.10b	8.04±1.15bc	11.15±0.81ab
GM1	12.97±0.21b	11.57±1.27a	9.36±0.30b	11.08±1.92ab
GM2	14.35±1.24ab	12.46±0.92a	11.02±0.56ab	11.09±2.57ab
GM3	14.48±0.36ab	12.87±1.44a	11.51±1.60ab	10.61±0.52ab
GM4	15.67±1.11a	12.79±0.48a	12.89±0.26a	10.42±1.24ab

注: 不同字母表示同一粒级下不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: Different letters indicate significant differences among these treatments in the same soil aggregate size at 0.05 level. The same below.

表 2 连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体中全氮含量的影响

Table 2 The total nitrogen in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	土壤团聚体 Soil aggregates			
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	0.95±0.06d	1.17±0.03c	0.69±0.01d	0.60±0.02b
GM0	1.30±0.11c	1.41±0.05b	0.86±0.04c	0.61±0.04b
GM1	1.59±0.03b	1.58±0.03a	1.03±0.14b	0.62±0.01b
GM2	1.69±0.03b	1.62±0.02a	1.13±0.02ab	0.65±0.01b
GM3	1.84±0.06b	1.65±0.03a	1.21±0.16ab	0.79±0.05a
GM4	1.94±0.12a	1.67±0.03a	1.31±0.03a	0.81±0.04a

2.2.2 对碳氮储量的影响 不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中有机碳储量见表 3。有机碳主要储存在>2 mm 粒级团聚体内, 而在<0.053 mm 粒级团聚体内的有机碳储量最低。与 GM0 处理相比, GM1-4 处理中>2 mm 和 2~0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量分别提高了 26.29%~52.25%和 13.62%~32.69%, 均达到显著性差异 ($P<0.05$); 在粒级 0.25~0.053 mm 和<0.053 mm 中 GM1-4 处理有机碳储量

则显著低于 GM0 处理 ($P<0.05$), 分别降低了 19.28%~32.33%和 28.51%~56.33%。同时 GM1-4 处理的有机碳总储量也显著高于 GM0 处理 19.42%~37.09% ($P<0.05$)。在不同量紫云英处理中, 随着紫云英翻压量的增加, 粒级>2 mm 有机碳储量逐渐增加, GM4 时达到最高; 粒级<0.053 mm 有机碳储量则逐渐降低。

不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中氮储量见

表 4。在 >0.25 mm 粒级团聚体中氮储量最高, 而 <0.053 mm 粒级团聚体中氮储量最低。与 GM0 处理相比, GM1-4 处理中 >2 mm 粒级团聚体氮储量增加 33.40%~62.36%, 而 <0.053 mm 粒级团聚体中氮储量显著降低 21.29%~46.04% ($P<0.05$), GM1-4 处理的氮总储量则较 GM0 显著增加 22.31%~40.13%

($P<0.05$)。在 GM1-4 处理之间, 各个粒级氮储量的差异主要集中在 >2 mm 团聚体中, 且在该粒级中氮储量随着紫云英翻压量的增加而增加, GM4 处理的氮总储量最高。由此看出氮储量主要集中在 >0.25 mm 粒级团聚体中, 且连续多年紫云英翻压还田显著提升 >2 mm 粒级中氮储量以及氮总储量。

表 3 连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体有机碳储量的影响

Table 3 The organic carbon storage in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

处理 Treatments	土壤团聚体 Soil aggregates				总储量 Total storage
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	
CK	1146.15±141.01d	593.76±66.17c	73.54±6.17b	32.25±6.59b	1845.70±220.12d
GM0	1407.02±91.37c	568.34±2.96c	119.29±10.18a	36.87±1.88a	2131.42±80.11c
GM1	1776.95±2.11b	645.72±50.84b	96.29±2.87b	26.36±1.85b	2545.31±44.02b
GM2	1900.43±44.25b	754.15±23.42a	80.72±3.49b	17.98±0.94c	2753.29±65.12ab
GM3	1928.81±46.85b	676.60±82.25ab	97.41±6.13b	18.59±2.80c	2721.41±125.63ab
GM4	2142.14±82.29a	676.22±8.11ab	87.54±0.32b	16.10±0.64c	2922.00±73.22a

表 4 连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体氮储量的影响

Table 4 The nitrogen storage in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

处理 Treatments	土壤团聚体 Soil aggregates				总储量 Total storage
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	
CK	122.80±7.01d	79.99±3.06b	6.95±0.11b	1.63±0.54ab	211.37±3.52d
GM0	163.37±12.19c	82.22±2.57ab	12.87±1.33a	2.02±0.18a	260.48±10.59c
GM1	217.93±0.62b	88.56±1.20ab	10.52±0.83a	1.59±0.05ab	318.60±0.95b
GM2	226.04±8.22b	94.00±8.28a	10.12±0.39a	1.09±0.03b	331.26±16.86b
GM3	244.87±12.29ab	86.85±2.16ab	10.23±0.75a	1.52±0.01ab	343.46±10.89b
GM4	265.25±7.73a	88.44±5.77ab	9.87±0.04ab	1.45±0.14b	365.00±1.85a

2.2.3 对碳氮储量占比的影响 不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中有机碳储量所占百分比见图 2a)。不同粒级团聚体有机碳储量所占百分比顺序依次为 (>2 mm) $>$ (2~0.25 mm) $>$ (0.25~0.053 mm) $>$ (0.053 mm)。与 GM0 相比, GM1-4 处理 >2 mm 粒级有机碳储量百分比显著提高 ($P<0.05$), 而 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体中有机碳储量占比则显著降低 ($P<0.05$)。对比 GM1-4, >2 mm 粒级团聚体的有机碳储量占比随着紫云英翻压量增加呈增加趋势, GM4 处理的有机碳储量占比最高。

不同紫云英翻压量下各粒级团聚体中氮储量所占百分比见图 2b)。在各个粒级团聚体中, >2 mm

粒级团聚体中氮储量所占百分比最高, 均在 58.00% 以上, GM4 中百分含量达到 73.41%; <0.053 mm 粒级团聚体的氮储量所占百分比最低。与 GM0 处理相比, GM1-4 处理中 >2 mm 粒级团聚体氮储量所占百分比显著提高 8.80%~17.13% ($P<0.05$); 而 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 的粒级团聚体氮储量所占百分比分别降低 10.41%~24.87%、33.13%~44.89%和 35.72%~57.58%。GM1-4 处理 >2 mm 粒级团聚体中氮储量的百分比随着紫云英翻压量的增加而提高; 在 2~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体中全氮储量所占百分比有所降低。由此可见, 土壤氮储量主要存在于 >2 mm 粒级团聚体中,

超大团聚体 (>2 mm) 的氮储量对氮总储量的贡献最大; 紫云英翻压还田有利于提高>2 mm 粒级团聚体氮储量的百分比, 降低<0.25 mm 粒级团聚体中氮储量的百分比。

2.3 连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤团聚体中 C/N 值

连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤团聚体的 C/N 值见表 5。与 GM0 处理相比, 紫云英翻压还田提高了 2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中 C/N 值, 且随着紫云英翻压量增加而增加; 同时降低了<0.053 mm 团聚体中 C/N 值, 该比值随着紫云英翻压量的增加而减小。

2.4 连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤团聚体红外光谱图

从图 3 可以看出各处理土壤不同粒级团聚体红

外光谱谱图相近, 但主要吸收峰的吸收强度在不同处理间和不同粒级团聚体中存在差异。>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和<0.053 mm 粒级团聚体的光谱图中均在 3 698~3 700 cm^{-1} 和 3 622~3 626 cm^{-1} 、3 430~3 392 cm^{-1} 以及 2 920~2 940 cm^{-1} 出现特征吸收峰, 其中 3 698~3 700 cm^{-1} 和 3 622~3 626 cm^{-1} 呈现出尖锐的吸收峰, 为游离的羟基 (酚羟基、醇羟基-O-H) 的振动吸收峰。在 3 430~3 392 cm^{-1} 吸收峰可能由酰胺基中 N-H 作用引起, 有浓度较高的 N-H 存在时吸收峰会出现蓝移。2 920~2 940 cm^{-1} 为不对称脂族 C-H 伸缩振动峰; 2 875 cm^{-1} 附近为对称脂族 C-H 伸缩振动峰^[18-19]。在 2 100~800 cm^{-1} 处的主要吸收峰的峰位及其归属分别为: 1 720 cm^{-1} 附近为羧酸基 C=O 伸缩振动峰, 1 628~1 635 cm^{-1} 为芳香族 C=C 伸缩振动, 也可能

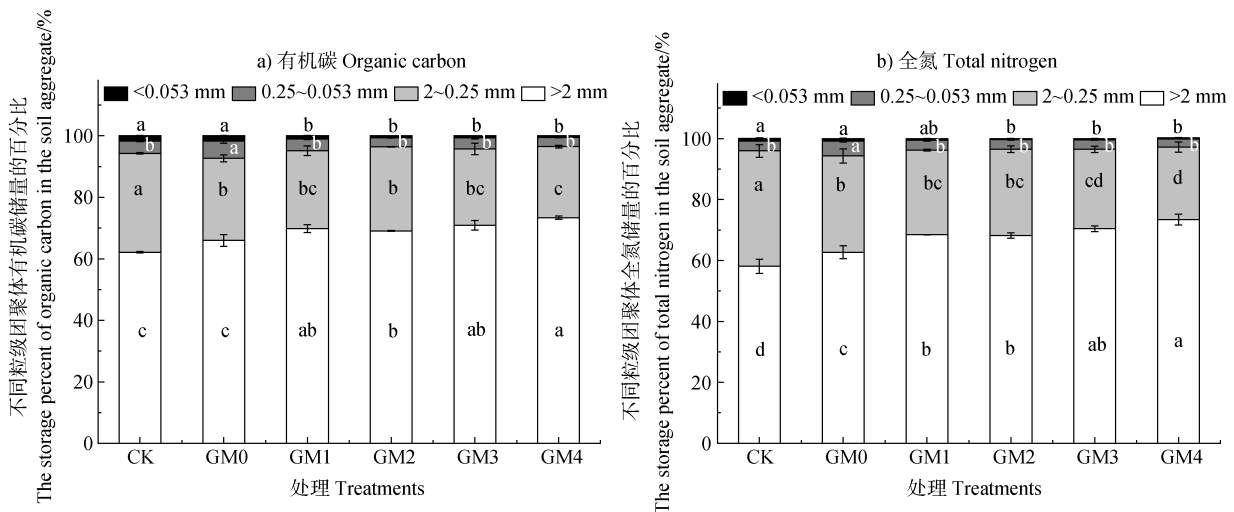


图 2 连续多年紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体有机碳储量 a) 和全氮储量 b) 百分占比

Fig. 2 The storage percent of the organic carbon (a) and nitrogen (b) in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch

表 5 连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤团聚体中 C/N 值

Table 5 The C/N ratios in soil aggregates with the application of Chinese milk vetch

处理 Treatments	土壤团聚体 Soil aggregates			
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	9.54±0.62a	7.30±0.38a	10.59±1.05a	20.17±2.62a
GM0	8.62±0.08ab	6.92±0.20a	8.73±0.12b	20.15±0.35a
GM1	8.15±0.01b	7.30±0.67a	9.19±0.99ab	16.59±1.65ab
GM2	8.48±0.60ab	7.70±0.66a	9.41±0.16ab	15.51±1.65b
GM3	8.17±0.55b	7.91±0.93a	9.52±0.10ab	12.28±1.91b
GM4	8.07±0.08b	7.90±0.42a	9.82±0.00ab	12.10±1.60b

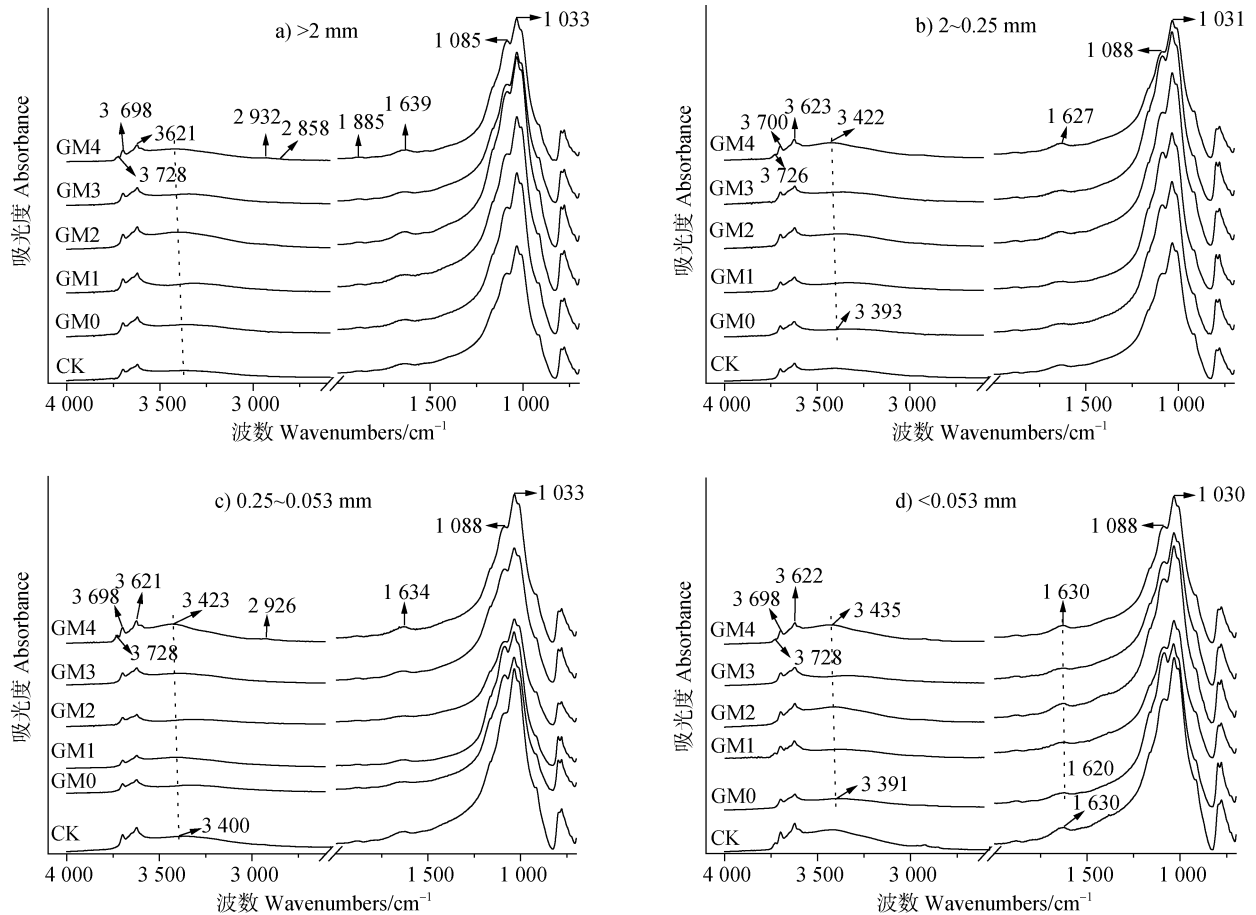


图3 连续多年紫云英翻压还田下稻田土壤各个粒级团聚体的红外光谱图

Fig. 3 The FTIR spectrum of soil aggregates with the application of Chinese milk vetch

是醌、酮类化合物羰基 (C=O) 的伸缩振动, 亦或氢键结合共轭酮的 C=O 振动; $1085\sim 1091\text{ cm}^{-1}$ 归属于多糖的 C-O 伸缩振动; $1033\sim 1035\text{ cm}^{-1}$ 为多糖或类多糖物质的 C-O 伸缩与硅氧化合物的 Si-O 伸缩振动; $1009\sim 1012\text{ cm}^{-1}$ 为碳水化合物吸收峰; 917 cm^{-1} 为 3622 cm^{-1} 对应的变形振动频率^[16, 18]。将峰位在 2850 cm^{-1} 和 2940 cm^{-1} 的相对强度进行加和, 使其代表脂肪族 C-H; 并用 $1720/2850+2940$ 和 $1630/2850+2940$ 特征比值分别代表腐殖质分子的羧酸碳/脂肪链烃碳和芳香族碳/脂肪链烃碳的比值, 反映腐殖质腐殖化程度, 其中 $1630/2850+2940$ 比值越高说明稳定性组分有机碳含量越高, 反之活性组分有机碳含量越高。

在大约 3626 cm^{-1} 吸收峰处, GM0 处理中 $>2\text{ mm}$ 和 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体在此处的峰相对强度均高于 GM1-4 处理; 在 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 和 $<0.053\text{ mm}$ 中, GM1-4 处理在此处的峰相对强度高于 GM0 处理, 紫云英翻压还田增加了 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 和

$<0.053\text{ mm}$ 团聚体中-OH 键和氢键。

在 2875 cm^{-1} 处, 各个粒级团聚体中 GM1-4 处理均高于 GM0, 这表明紫云英翻压下脂肪族有机碳高于单施化肥处理; 在不同粒级团聚体中, $>2\text{ mm}$ 粒级团聚体中相对峰强度均高于其他 3 个粒级。在 1630 cm^{-1} 处, 4 个粒级团聚体中 GM1-4 处理的相对峰强度均明显高于 GM0 处理, 这表明紫云英翻压条件下提高土壤团聚体中芳香族有机碳的储存; 此外, CK 处理中此处的相对峰强度在四个团聚体粒级中均高于 GM0 处理, 这也反映在没有持续化肥和大量有机物料投入下, 土壤团聚体中有机碳更倾向于以稳定芳香族碳存在。

对比各个粒级 $1630/2850+2940$ 相对强度比值, GM1-4 处理的相对比值均高于单施化肥处理 (GM0), 分别提高 $12.58\%\sim 63.73\%$ 、 $22.04\%\sim 69.09\%$ 、 $1.48\%\sim 20.41\%$ 和 $54.41\%\sim 99.69\%$ 。对比 GM1-4 处理之间, $>2\text{ mm}$ 粒级团聚体 $1630/2850+2940$ 相对强度比值低于其他 3 个粒级团聚体, 这也

反映出在>2 mm 粒级团聚体中具有相对较多的脂肪族碳存在。在<2 mm 粒级团聚体中 1 630/2 850+2 940 相对强度比值均大于 1, 表明在这 3 个粒级团聚体中芳香族碳含量要高于脂肪族碳含量。此外, 在>2 mm 和 2~0.25 mm 粒级团聚体中, 1 630/2 850+2 940 相对强度比值与紫云英翻压量之间均呈现出显著线性相关关系 ($P<0.05^*$, $R^2>0.945$; $P<0.05^*$, $R^2>0.918$), 表明紫云英翻压量的增加, 提高了芳香族有机碳含量相对比值, 增加团聚体中稳定性组分有机碳含量。

对于 1 720/2 850+2 940 相对强度比值, 随着团聚体粒级的降低, GM1-4 处理此处的比值呈现出逐渐增加的趋势, 在<0.053 mm 粒级团聚体最高, 粒级越小越有利于羧酸态有机碳的储存。与 GM0 相比, 在>2 mm 粒级团聚体中, GM1-4 处理均有所降低; <2 mm 粒级团聚体中, GM3 和 GM4 处理均显著高于 GM0, 这表明紫云英翻压量的增加有利于<2 mm 粒级团聚体中羧酸态有机碳的存在。

在所有团聚体粒级中, 6 种处理均在 $3\ 430\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现比较宽的吸收峰, 此处的吸收峰主要因酰胺基中 N-H 作用引起, 有浓度较高的 N-H 存在时吸收峰会呈现蓝移。计算其相对吸收强度, 在各个粒级团聚体中, GM1-4 处理均高于 GM0 处理, 分别提高了 1.19%~5.83%、6.74%~37.79%、23.62%~52.92%和 11.55%~40.50%, 特别是 GM3 和 GM4。且在各个粒级中, 此处的吸收峰随着紫云英翻压量的增加出现明显的蓝移现象, 因此紫云英翻压还田有利于增加团聚体中酰胺类含氮物质, 且在紫云英翻压量为 $22\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $30\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最高。

3 讨 论

3.1 紫云英翻压还田对土壤团聚体中有机碳含量以及红外光谱的影响

土壤有机碳是土壤质量和农业可持续性的主要因素^[20-21]。在本试验中紫云英翻压还田显著增加>0.25 mm 团聚体中有机碳含量以及有机碳储量; 且有机碳含量随着紫云英翻压量的增加而增加。这说明>0.25 mm 团聚体对土壤有机碳的转化形成具有重要的作用, 紫云英翻压后>0.25 mm 团聚体对有机

碳具有明显的富集和物理保护作用, 是对碳保护的最主要场所。一方面紫云英翻压还田增加了土壤有机碳源, 激发了相关微生物活性, 产生更多的胶结物质, 促使土壤颗粒的胶结与团聚; 另一方面紫云英体内含有较多的碱性物质和盐类, 这类物质可以降低土壤颗粒之间的静电斥力, 促进土壤颗粒的絮凝和胶结^[19, 22-23]。

紫云英翻压还田在增加>0.25 mm 团聚体中有机碳含量和储量的同时, 同时提高了>2 mm 团聚体中有机碳储量占比, 降低了<0.053 mm 团聚体中有机碳储量占比, 这进一步证明了翻压紫云英还田增强了大团聚体对有机碳的物理保护, 这与宋佳等^[14]的研究结果相似。用 Elliott^[24]的模型认为, 大团聚体是由小团聚体通过含碳量高的非稳性胶结剂(如真菌菌丝、根系、微生物和植物源的多糖)胶结而成的, 因此大团聚体较小团聚体含有更多的有机碳。而土壤胶结剂主要来源于土壤有机物的降解, 紫云英作为重要有机物, 其分解形成的芳香族碳、羧基碳、羰基碳以及酰胺态氮、DON(酚类醇类芳香族化合物)等化合物优先吸附包被在土壤黏粒表面, 经过土壤胶结-絮凝后被微团聚体包被。紫云英还田还能提高土壤有机碳和氮类化合物的氧化度和有机分子结构的复杂度, 提升土壤有机碳的稳定性, 反过来促进大团聚体的形成和稳定^[14, 25-26]。并且紫云英翻压还田为水稻生长提供了丰富的营养物质, 促进水稻根系生长, 水稻根系分泌物和土壤周围的有机胶结物质增加, 进一步提高了大团聚体内碳氮含量^[27]。

研究认为紫云英翻压还田可以显著增加土壤中羧酸、醇类、苯酚、多糖等物质, 还能提高了土壤中脂肪族碳、芳香族碳和碳水化合物含量, 提高土壤 DOM 中的芳香度和分子量, 提升了土壤有机质官能团丰度及其稳定性^[13-14, 28]。在本试验中紫云英翻压还田提高了土壤团聚体中芳香族和羧酸类等稳定性有机碳的含量, 并促进了>2 mm 团聚体中的活性有机碳(脂肪族有机碳)的积累。农田土壤微生物分解过程会选择保留惰性组分, 提高芳构化程度^[29], 在紫云英腐解后产生的惰性有机碳如芳香族、羧基碳、羰基碳等化合物优先吸附在土壤颗粒上, 经土壤胶结-凝聚后被微团聚体包蔽, 提高土壤有机碳的氧化度和有机分子结构的复杂度, 提升土壤有机碳的稳定性。在本试验中, 配施紫云英翻压还田的较

小粒级 (<0.053 mm) 团聚体具有较高 1 720/2 850+2 940 比值和 1 630/2 850+2 940 比值, 此时在 <0.053 mm 粒级团聚体中有机碳主要以芳香族和羧酸类为主, 特别是芳香族有机碳具有更稳定的结构。研究认为微团聚体内有机碳的降解过程耗能较大, 且微团聚体受到物理保护作用较大, 通常小粒径团聚体中的有机质一般维持在较为稳定的水平, 是有机质固定的长期和稳定的场所, 其中的有机质以更为稳定的形态存在^[30-31], 因此紫云英作为有机物料还田有利于有机碳在土壤中长期储存。

3.2 紫云英翻压还田对土壤团聚体中全氮含量以及红外光谱的影响

紫云英作为固氮的植物, 自身具有含氮物质, 其中酸解氨基酸 $82.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、蛋白质 $193.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其腐解还田后形成大量小分子含氮有机物质 (氨基酸类、酰胺类), 含有丰富的 N-H 官能团^[13, 32]。在本试验中紫云英翻压还田显著增加了各个粒级团聚体中的全氮含量, 且随着紫云英翻压量的增加而增加, 这与其在约 $3\ 430 \text{ cm}^{-1}$ 相对峰强度的结果基本一致。紫云英翻压还田处理的红外光谱在约 $3\ 430 \text{ cm}^{-1}$ 具有比较宽的吸收峰, 其相对强度比值也显著高于单施化肥处理, 且随着紫云英翻压量的增加此处的峰位出现蓝移现象。此处的峰位属于胺类、酰胺类含氮物质 (约 $3\ 430 \text{ cm}^{-1}$) 中 N-H 伸缩振动峰。这类含氮化合物等通过吸附、包被以及分子键合等作用存在于各个粒级团聚体中, 促进各个粒级团聚体中氮素积累。

与紫云英翻压还田对有机碳影响不同的是, 紫云英翻压还田还增加了 <0.053 mm 粒级团聚体中氮的含量。一方面紫云英在翻压还田后其自身分解形成大量小分子含氮有机物质 (氨基酸类、酰胺类) 以及大分子蛋白质类物质, 这些氮类物质被土壤微生物所吸收利用, 易转化为土壤微生物生物氮, 分解之后被各粒级土壤团聚体所吸附固持^[27, 33-34]。另一方面 <0.053 mm 粒级的团聚体, 其粒径较小, 比表面积大, 对养分的吸附固定能力更强, 对氮素也具有更好的保护能力, 进而提高氮素在 <0.053 mm 粒级团聚体中的含量。

紫云英翻压还田促进氮素向大团聚体中聚集, 提高 >2 mm 粒级团聚体中氮储量的占比, 降低 <0.25 mm 氮储量的百分比。团聚体形成所需有机胶结物质的转化合成均需微生物参与, 团聚体储存有

机碳的过程中也会吸持一定氮素, 因此氮素在大团聚体中积累, 其作用机制与有机碳基本一致。在本试验中土壤团聚体中氮含量随着粒径减小而呈现下降的趋势, 0.25 mm 粒级是一个转折点, 这可能是由于 >0.25 mm 粒级团聚体能够较好地调节土壤通气与持水、养分释放与保持之间的矛盾, 进入土壤的紫云英以及土壤微生物生命活动过程代谢物等有机物质经过腐殖化、半腐殖化或直接与土壤小粒径团聚体结合, 然后在团聚体逐级团聚过程中贮存在大团聚体中^[35], 因此表现出 <0.25 mm 粒级的处理中含氮量相对较低。

3.3 紫云英翻压还田与秸秆还田对土壤团聚体碳氮影响的差异

在目前农业生产中, 以紫云英为代表的绿肥翻压还田和秸秆还田均为农田重要的有机培肥措施, 二者长期还田在改善土壤结构、提高土壤肥力和养分, 实现作物高产稳产等方面具有明显的优势^[14]。

在本试验中, 紫云英翻压还田增加土壤 >0.25 mm 粒级团聚体组分, 增加其有机碳含量以及有机碳储量, 提高土壤团聚体中芳香族和羧酸类等稳定性有机碳的含量以及 >2 mm 团聚体中的活性有机碳 (脂肪族有机碳) 的积累, 这与普通秸秆还田对土壤团聚体结构组成以及有机碳的影响基本一致^[16, 36-37]。紫云英和作物秸秆均为有机物料, 均具有较高的含碳量, 紫云英含碳量为 $460 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (烘干基), 作物秸秆, 如水稻、玉米、小麦其碳含量大约在 $399\sim 444 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 二者的含碳量相差不大^[22]; 紫云英还田后土壤有机碳的结构也基本与秸秆还田时一致^[13, 16], 因此二者还田对土壤团聚体组成以及有机碳含量、储量的影响基本一致^[14]。以作物秸秆、紫云英等有机物料还田腐解后产生的有机胶结物质对土壤团聚体的形成具有一定的促进作用, 加强土粒间的黏结力, 有助于提高土壤中 >2 mm 粒级团聚体的含量和稳定性, 改善土壤团聚体结构, 从而对土壤团聚体产生保护, 这种保护机制与土壤有机碳的固定效应间存在密切关系, 而植物残体还田是农田土壤有机碳物质的主要来源^[37]。然而对于二者之间对团聚体中有机碳的深层次差异还需进一步深入研究。

与同样作为原位还田的秸秆还田相比, 紫云英翻压还田还具有自身明显的特征, 主要集中在氮素营养。在投入质量 (干基) 相当的情况下, 配施紫

云英翻压还田 >2 mm 和 2~0.25 mm 粒级团聚体中氮含量分别提高了 49.23%和 15.60% (表 3), 而玉米秸秆还田时团聚体中 >2 mm 的氮含量下降了 6.2%, 对 2~0.25 mm 的氮含量几乎没有影响^[27]。除去土壤自身和气候条件差异的影响, 还与二者的含氮量有关。紫云英作为豆科绿肥, 具有较高的含氮量 ($34.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 烘干基); 水稻、玉米、小麦的氮含量在 $6.50\sim 9.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间 (烘干基), 紫云英含氮量较秸秆 (水稻、小麦、玉米) 体内的含氮高出 3.8~5.3 倍^[22], 如此大的含氮量差异, 使秸秆与紫云英各自还田时也必然会对土壤氮素循环产生较大差异。因此与作物秸秆相比, 紫云英翻压还田不仅可以改善土壤团聚体的组分, 提高有机碳含量和碳储量, 还可以向土壤提供大量的氮素, 提高土壤团聚体中氮素含量和氮储量, 这也是紫云英与普通作物秸秆还田相比最大的特点和优势。

4 结 论

(1) 稻田耕层土壤团聚体以粒级 >2 mm 团聚体为主, 紫云英翻压还田增加了 >2 mm 粒级团聚体百分比。(2) >0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量和 >2 mm 粒级团聚体中碳储量随着紫云英翻压量的增加而增加, 紫云英翻压还田有利于有机碳优先分布在 >2 mm 粒级团聚体。紫云英翻压还田主要增加土壤各粒级团聚体中脂肪族有机碳、羧酸态和芳香族有机碳含量, 提高各团聚体中芳香族碳/脂肪族碳和羧酸碳/脂肪族碳相对比值, 提高有机碳稳定性。(3) >2 mm 粒级团聚体中的全氮含量和全氮储量最高; 紫云英翻压还田提高了各个粒级团聚体中氮含量, >2 mm 粒级团聚体中氮含量随着紫云英翻压量的增加而增加。紫云英翻压还田增加的团聚体中的氮主要以增加土壤团聚体中胺类、酰胺态氮 (N-H) 为主, 在紫云英翻压量为 $30\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最高。综上紫云英翻压还田不仅有利于改善双季稻土壤团聚体结构, 提高有机碳的稳定性, 还在提高氮素在稻田土壤团聚体中的含量方面具有明显的优势, 能进一步提升稻田土壤肥力。

参考文献 (References)

[1] Gao J S, Huang J, Yang Z C, et al. Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double

cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (3): 472—480. [高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (3): 472—480.]

- [2] Cao W D, Bao X G, Xu C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 (6): 1450—1461. [曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1450—1461.]
- [3] Liu Y Y, Bu R Y, Tang S, et al. Effect of continuous straw-Chinese milk vetch synergistic return to the field on yield, nutrient accumulation and soil fertility of double cropping rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (6): 1008—1016. [刘颖颖, 卜容燕, 唐杉, 等. 连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (6): 1008—1016.]
- [4] 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.
- [5] Wang H, Tang S, Han S, et al. Rational utilization of Chinese milk vetch improves soil fertility, rice production, and fertilizer use efficiency in double-rice cropping system in East China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 67 (2): 171—179.
- [6] Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in South China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (12): 2115—2126. [高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (12): 2115—2126.]
- [7] Zhou F L, Li F, Huang Y N, et al. Effects of adding Chinese milk vetch on soil aggregates composition and organic carbon distribution[J]. Soils, 2020, 52 (4): 781—788. [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[J]. 土壤, 2020, 52 (4): 781—788.]
- [8] Chen E F, Guan L Z, Wang J K, et al. Compositional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (1): 49—53. [陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38 (1): 49—53.]
- [9] Nie X, Lu Y H, Liao Y L, et al. Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch and reducing chemical fertilizer on water-stable

- aggregates and yield in double cropping rice system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(6): 155—164. [聂鑫, 鲁艳红, 廖育林, 等. 化肥减施下紫云英不同翻压量对水稳性团聚体及双季稻产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(6): 155—164.]
- [10] Yu Q G, Yang Y, Zou P, et al. Effect of organic materials application on soil aggregate and soil organic carbon in rice fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 170—175. [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.]
- [11] Liu C Z, Liu X F, Li B Y, et al. Effects of applying Chinese milk vetch with different amounts of chemical fertilizer on soil nutrients, aggregation and rice yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 409—413. [刘春增, 刘小粉, 李本银, 等. 紫云英配施不同用量化肥对土壤养分、团聚性及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 409—413.]
- [12] He C M, Zhong S J, Li Q H, et al. Effects of planting and overturning milk vetch on properties of surface soil structure and content of organic carbon[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(12): 32—34, 37. [何春梅, 钟少杰, 李清华, 等. 种植翻压紫云英对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(12): 32—34, 37.]
- [13] Chang D N. Characteristics of soil dissolved organic matter in main green manure plantation systems in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. [常单娜. 我国主要绿肥种植体系中土壤可溶性有机物特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.]
- [14] Song J, Huang J, Gao J S, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 564—570. [宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 564—570.]
- [15] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [16] Xue B, Huang L, Lu J W, et al. Effects of continuous straw returning and No-tillage on soil aggregates and organic carbon[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 182—189. [薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 182—189.]
- [17] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 253—263.
- [18] Wu J G, Wang M H, Wan Z M, et al. Chemical composition and structure of humic acid from composted corn stalk residue[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 443—451. [吴景贵, 王明辉, 万忠梅, 等. 玉米秸秆腐解过程中形成胡敏酸的组成和结构研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 443—451.]
- [19] Guan S, Dou S, Ma L N, et al. Effects of long-term application of horse manure on quantity and quality of humic substance in aggregates of dark brown soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1195—1205. [关松, 窦森, 马丽娜, 等. 长施马粪对暗棕壤团聚体腐殖质数量和质量的影響[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1195—1205.]
- [20] He M, Wang Y C, Wang L G, et al. Using DNDC model to simulate black soil organic carbon dynamics as well as its coordinate relationship with crop yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 9—19. [贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 应用 DNDC 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 9—19.]
- [21] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Using carbon management index to assess the impact of compost application on changes in soil carbon after ten years of rice-wheat cropping[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(21/22): 3491—3502.
- [22] Meng H Q, Lü J L, Xu M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1153—1160. [孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153—1160.]
- [23] Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S, et al. Long term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1): 1—16.
- [24] 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.
- [25] Kiem R, Knicker H, Körschens M, et al. Refractory organic carbon in C-depleted arable soils, as studied by ¹³C NMR spectroscopy and carbohydrate analysis[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 655—668.
- [26] Yin B K, Zhou L Q, Yin B, et al. Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 537—546.
- [27] An Y Y, Ma K, Wang M G, et al. Effect of maize straw returning to field on soil aggregates and their carbon and nitrogen distributions[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(5): 766—775. [安嫻嫻, 马琨, 王明国, 等. 玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29

- (5): 766—775.]
- [28] Gao S J, Gao J S, Cao W D, et al. Effects of long-term green manure application on the content and structure of dissolved organic matter in red paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17 (8): 1852—1860.
- [29] Dhillon G S, Gillespie A, Peak D, et al. Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems[J]. *Geoderma*, 2017, 298: 1—13.
- [30] Barbera V, Poma I, Gristina L, et al. Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23 (1): 82—91.
- [31] Chaney K, Swift R S. Studies on aggregate stability: II. The effect of humic substances on the stability of reformed soil aggregates[J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37 (2): 337—343.
- [32] Yang J, Guo W Q, Yang W H, et al. Migration and risk of loss of soluble organic nitrogen in paddy soil after incorporation of Chinese milk vetch [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 29 (3): 786—796. [杨静, 郭文圻, 杨文浩, 等. 紫云英翻压后稻田土壤可溶性有机氮迁移特性与损失风险 [J]. *土壤学报*, 2022, 29(3): 786—796.]
- [33] Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Impacts of plantation of winter green manure crops on soil nitrification in paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (1): 263—273. [高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 冬种绿肥对水稻土硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (1): 263—273.]
- [34] Liu C Z, Zhang C L, Li B Y, et al. Effects of *Astragalus sinicus* combined with chemical fertilizer on nitrogen absorption and utilization of rice and nitrogen distribution and residue of *Astragalus sinicus* in rice-soil system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (5): 1791—1798. [刘春增, 张成兰, 李本银, 等. 紫云英配施化肥对水稻氮素吸收利用和紫云英氮在水稻-土壤体系分配、残留的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (5): 1791—1798.]
- [35] Zhang Q, Zhang A H, Yao D J, et al. Distribution and sequestration of nitrogen in soil aggregates under continuous cultivation of green manure crops[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (3): 577—584. [张钦, 张爱华, 姚单君, 等. 连续种植不同绿肥作物的耕层土壤团聚体中氮分布及其固持特征[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (3): 577—584.]
- [36] An W L, Gao D Z, Pan T, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 1833—1840. [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.]
- [37] Liu Z, Sun Z H, Zhang R Q. Effects of application of rice straw on distribution and stability of aggregates and organic carbon in fluvo-aquic[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31 (6): 1246—1252. [刘哲, 孙增慧, 张瑞庆. 秸秆添加对潮土团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31 (6): 1246—1252.]

(责任编辑: 檀满枝)