

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.008

程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 土壤活性有机碳周年变化对紫云英翻压量的响应. 土壤, 2021, 53(4): 723–731.

土壤活性有机碳周年变化对紫云英翻压量的响应^①

程会丹^{1,2}, 鲁艳红^{1,3}, 聂军^{1,3}, 朱启东^{1,3}, 聂鑫^{1,2}, 曹卫东⁴, 高雅洁^{1,3}, 廖育林^{1,2,3*}

(1 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2 湖南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 3 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125; 4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为了探索紫云英替代化肥的生态效应和适宜翻压量, 以 11 年(2008—2018 年)长期定位试验为对象, 研究了紫云英不同翻压量下土壤活性有机碳(AOC)的季节变化。在稻—稻—紫云英轮作体系典型时期(紫云英翻压前、早稻分蘖盛期、早稻成熟期、晚稻分蘖盛期、晚稻成熟期)采集土壤样品, 分析土壤总有机碳(TOC)、AOC 及其组分微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)等的变化。结果表明: 与对照处理相比, 减量 40% 化肥下紫云英各翻压量处理提高了土壤 TOC 含量; 与常规施肥处理相比, 减量化肥配合不同量紫云英翻压处理不同程度地提高了土壤 AOC、MBC 及 DOC 含量, 且均随紫云英翻压量的增加呈先增加后下降的变化趋势, AOC 含量以翻压紫云英 30.0 t/hm²时最高, MBC 和 DOC 含量以翻压紫云英 22.5 t/hm²时最高; 取样时期对土壤 MBC、DOC 含量及 MBC/TOC、DOC/TOC 比值有较大的影响, 其随取样时期进展呈先降低后升高再降低的变化趋势; 在土壤性质相对稳定的晚稻成熟期, AOC/TOC、MBC/TOC、DOC/TOC 比值在一定范围随紫云英翻压量的增加而增加, 超过一定量时, AOC/TOC、MBC/TOC 比值无明显变化, DOC/TOC 比值则显著下降($P<0.05$)。因此, 在本试验减施化肥条件下长期翻压紫云英有利于提高土壤 AOC 含量及比例, 以紫云英翻压 22.5 ~ 30.0 t/hm²效果最好。

关键词: 紫云英; 活性有机碳; 微生物生物量碳; 可溶性有机碳; 活性有机碳比例

中图分类号: S153.6; S142 **文献标志码:** A

Responses of Annual Variation of Soil Active Organic Carbon to Chinese Milk Vetch Application Rates

CHENG Huidan^{1,2}, LU Yanhong^{1,3}, NIE Jun^{1,3}, ZHU Qidong^{1,3}, NIE Xin^{1,2}, CAO Weidong⁴, GAO Yajie^{1,3}, LIAO Yulin^{1,2,3*}

(1 *Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China*; 2 *Long Ping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China*; 3 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China*; 4 *Agricultural Resource and Agricultural Division Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: To explore the suitable application rate and the ecological effect of Chinese milk vetch replacing chemical fertilizer, an eleven-year field experiment was conducted to investigate the annual variations of active organic carbon(AOC) concentrations under different replacing rates of Chinese milk vetch. Soil samples were collected in the typical periods of rice-rice-Chinese milk vetch rotation system, i.e., before the incorporation of Chinese milk vetch, tillering stage of early rice, mature stage of early rice, tillering stage of late rice and mature stage of late rice, and the contents of soil total organic carbon (TOC), AOC, microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) were measured. The results showed that: compared with CK treatment, Chinese milk vetch replacing 40% chemical fertilizer increased TOC. Compared with the 100% chemical fertilizer treatment, the treatments of Chinese milk vetch replacing chemical fertilizer increased AOC, MBC and DOC to varying degrees. AOC, MBC and DOC increased first then decreased with the increased amount of Chinese milk vetch. AOC was highest with 30.0 t/hm² of Chinese milk vetch application, MBC and DOC were highest with 22.5 t/hm² of Chinese milk vetch application. The sampling period had a great influence on MBC, DOC, MBC/TOC and DOC/TOC, which showed decreasing-increasing-decreasing tendency. At the mature stage of late rice with relatively stable soil properties, AOC/TOC, MBC/TOC and DOC/TOC increased with the increase of Chinese milk

①基金项目: 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-11)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301504; 2018YFD03006)和湖南省农业科技自主创新项目(2018ZD02-2; 2019LS03-1)资助。

* 通讯作者(ylliao2006@126.com)

作者简介: 程会丹(1992—), 女, 河南西华人, 硕士研究生, 主要从事绿肥生产与利用研究。E-mail: chenghuidan910@163.com

vetch in a certain range, beyond this range, no significant change was found in AOC/TOC and MBC/TOC, and DOC/TOC decreased significantly ($P < 0.05$). Comprehensively, reducing chemical fertilizer with the long-term planting Chinese milk vetch is beneficial to increase soil active organic carbon content and proportion, and the optimal application rate of Chinese milk vetch is 22.5–30.0 t/hm².

Key words: Chinese milk vetch; Active organic carbon; Microbial biomass carbon; Dissolved organic carbon; Active organic carbon ratio

土壤活性有机碳(AOC)是土壤中周转速率较快、易分解矿化、有效性较高的有机碳组分^[1],在增加作物产量、改善土壤结构以及提高土壤质量等方面具有重要作用^[2]。土壤微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)是土壤活性碳库的重要组成部分^[3],对耕作、施肥等田间管理措施响应敏感,尤其是施用有机肥能够显著影响其含量的变化^[4]。

紫云英作为绿肥还田具有替代部分化肥、培肥土壤、改善生态环境等作用^[5,6],且有利于提高土壤 AOC、MBC 及 DOC 的含量。杨滨娟等^[7]研究发现长期施用绿肥土壤 AOC 和 MBC 含量明显有所提高;高嵩涓等^[8]比较了 3 种绿肥对土壤 MBC 含量的影响,结果表明,土壤 MBC 含量紫云英处理>黑麦草处理>油菜处理;Yu 等^[9]研究发现紫云英还田有利于提高土壤 MBC 和 DOC 的含量。

近年来,国内外学者对土壤有机碳的研究主要集中在对外界条件响应敏感、周转速度较快的土壤 AOC、MBC 及 DOC 上^[10],关于施用紫云英及紫云英与不同比例的化肥配施对土壤 AOC、MBC 及 DOC 影响的研究较多^[7-9,11],紫云英种植与利用下土壤 MBC、DOC 变化特征的研究报道也有一些^[8,12]。然而,化肥

减施下紫云英不同翻压量对土壤 MBC、DOC 含量及 MBC/TOC(总有机碳)、DOC/TOC 比值动态变化等方面的研究较少。另外,耕作、施肥模式以及水稻生长阶段的不同,均会影响土壤 AOC 周年变化^[8]。虽然万水霞等^[13]研究了减量化肥与不同量紫云英配施对土壤 MBC 的影响,但未涉及阶段性变化特征,而研究土壤 MBC 随水稻生长的变化对于了解水稻生育期养分供给及长期施用紫云英的土壤培肥效应具有重要意义。因此,本研究以 11 年(2008—2018)长期定位试验为对象,研究了紫云英不同翻压量下土壤 MBC、DOC 含量及 MBC/TOC、DOC/TOC 比值的季节变化,探讨了紫云英替代化肥的生态效应及适宜翻压量,为双季稻田合理施用紫云英调控土壤肥力提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况及供试材料

试验地位于湖南省南县三仙湖乡万元桥村(112°18'20"E、29°11'29"N),海拔 30 m,属亚热带季风湿润气候,年均气温约 16.6℃,年日照时数约 1 775 h,年降水量约 1 238 mm,成土母质为河湖沉积物发育的紫潮泥。供试土壤的基本性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

土壤	pH	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
紫潮泥	7.70	27.5	3.28	1.26	21.7	251	15.6	98.0

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理,如表 2 所示,小区面积 20 m² (4 m×5 m),3 次重复,随机区组排列。紫云英于每年晚稻收获后播种,播种量为 22.5 kg/hm²,供试品种为湘紫 1 号,盛花期割取各小区紫云英地上部测定产量,将其全部混匀后按照各处理的用量进行翻压。紫云英鲜草含水量为 88.9%,年均干基养分含量为 N 37.5g/kg、P 3.50 g/kg、K 37.2 g/kg。全量化肥用量早晚稻均为 N 150 kg/hm²,P₂O₅ 75 kg/hm²,K₂O 120 kg/hm²。减量化肥的处理中仅氮、钾肥减施 40%。磷肥、钾肥均在移栽前作基肥施入;氮肥按基肥和追肥 1:1 施入。早稻

品种为“湘早籼 45 号”,晚稻品种为“黄华占”。

表 2 试验设计
Table 2 Trial design

处理	施肥量
CK	冬闲且不施化肥
GM22.5	翻压紫云英 22.5 t/hm ²
100%CF	常规施肥不施紫云英
60%CF+GM15.0	翻压紫云英 15.0 t/hm ² ,氮、钾肥减施 40%
60%CF+GM22.5	翻压紫云英 22.5 t/hm ² ,氮、钾肥减施 40%
60%CF+GM30.0	翻压紫云英 30.0 t/hm ² ,氮、钾肥减施 40%
60%CF+GM37.5	翻压紫云英 37.5 t/hm ² ,氮、钾肥减施 40%

1.3 样品的采集与测定

土壤样品于 2018 年共采集 5 次，分别是紫云英翻压前 10 d、早稻分蘖盛期、早稻成熟期、晚稻分蘖盛期及晚稻成熟期。各小区按“S”形采集 7 点 0~20 cm 的耕层土壤，混匀后分取一份保存于 4℃ 冰箱中，以测定土壤 MBC 和 DOC 含量；其余的土壤通风阴干，用于测定土壤 TOC 含量。另外，晚稻成熟期土壤样品用于测定土壤 AOC 含量。早晚稻成熟后每小区单打单晒，分别称重计产。

利用重铬酸钾容量法外加加热法测定土壤 TOC^[14]，高锰酸钾氧化法测定 AOC^[7]，氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定 MBC^[15]。土壤 MBC 计算方法为熏蒸与未熏蒸土样有机碳含量之差除以转换系数 K_C(0.45)，DOC 含量即为未熏蒸土样有机碳含量。

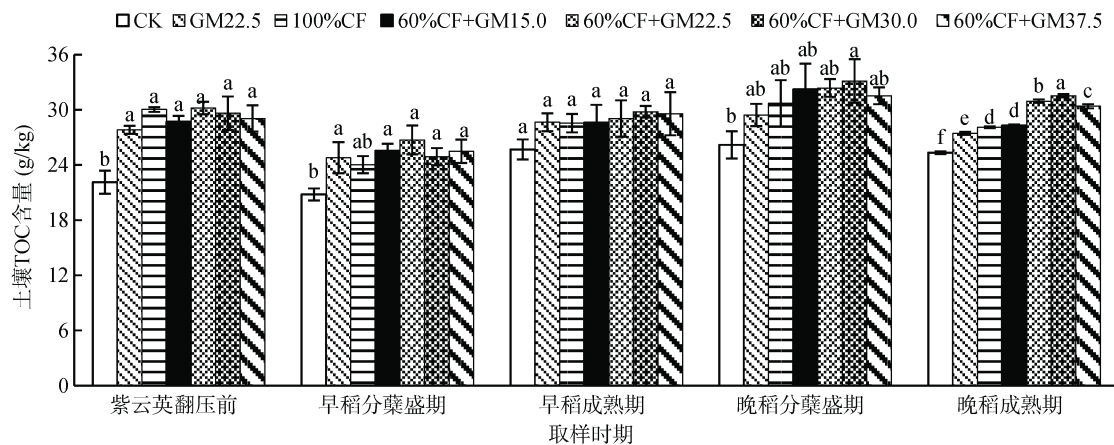
1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 软件进行数据处理和统计分析，基于最小二乘法的多项式进行曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 紫云英不同翻压量下土壤总有机碳周年变化特征

不同时期各处理土壤 TOC 含量如图 1 所示，可见，不同时期各处理土壤 TOC 含量变化规律一致，即早稻分蘖盛期最低(平均值 24.6 g/kg)、早稻成熟期上升至紫云英翻压前水平(平均值 28.5 g/kg)、晚稻分蘖盛期达到最高(平均值 30.8 g/kg)、至晚稻成熟期又逐渐降低(平均值 28.8 g/kg)。从各个时期看，与 CK 处理相比，各施肥处理均提高了土壤 TOC 含量，除在早稻成熟期差异未达到显著水平外，在其他时期与 CK 相比差异显著。不同时期土壤 TOC 含量随紫云英翻压量增加呈先增加后降低的变化趋势，在土壤性质相对稳定的晚稻成熟期，除 60%CF+GM15.0 处理外，其他紫云英翻压量处理较 100%CF 处理显著提高 ($P<0.05$)，而在其他各时期紫云不同翻压量处理间差异不显著。



(图中不同小写字母表示同一取样时期内不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。下同)

图 1 不同时期各处理土壤 TOC 含量

Fig. 1 Soil TOC contents in different periods under different treatments

2.2 紫云英不同翻压量下土壤微生物生物量碳周年变化特征

图 2 显示了稻-稻-紫云英轮作体系典型时期土壤 MBC 含量。由图 2 可知，紫云英翻压前各处理土壤 MBC 含量平均值为 1 390 mg/kg，至早稻分蘖盛期各处理的 MBC 含量急剧下降到 905 mg/kg，在早稻成熟期有所回升，平均值为 1 252 mg/kg，早稻成熟期至晚稻成熟期，除 CK、60%CF+GM30.0 和 60%CF+GM37.5 处理呈先增加后降低的趋势外，其他处理均逐渐下降。不同紫云英翻压量处理土壤 MBC 含量在云英翻压前、早稻成熟期及晚稻分蘖盛期无显著差异，但在早稻分蘖盛期和晚稻成熟期各处理间差异明

显，均随紫云英还田量的增加呈现出先增加后下降的变化趋势，以 60%CF+GM22.5 处理为最高。

2.3 紫云英不同翻压量下土壤可溶性有机碳周年变化特征

图 3 是不同时期各处理土壤 DOC 含量变化。从图 3 可以看出，紫云英翻压前各处理土壤 DOC 含量平均值为 111.4 mg/kg，紫云英翻压前至早稻分蘖盛期逐渐降低，早稻成熟期各处理 DOC 含量降至最低，平均值为 94.8 mg/kg，在晚稻分蘖盛期又上升至紫云英翻压前水平，平均值为 113.9 mg/kg，晚稻成熟期又逐渐下降，平均值为 102.6 mg/kg。与 CK 处理相比，不同时期紫云英与化肥配施均显著提高了土壤

DOC 含量($P<0.05$),但除晚稻成熟期紫云英翻压超过一定量时 DOC 含量显著降低($P<0.05$),其他时期紫云不同翻压量处理间差异均不显著。总体来看,紫云英与化肥配施能提高土壤中 DOC 含量,但增加翻压

量对土壤 DOC 含量影响不大。从各个时期看,不同紫云英翻压量处理土壤 DOC 含量变化规律类似,均随紫云英翻压量增加呈先增加后下降的趋势,在 60%CF+GM22.5 处理最高。

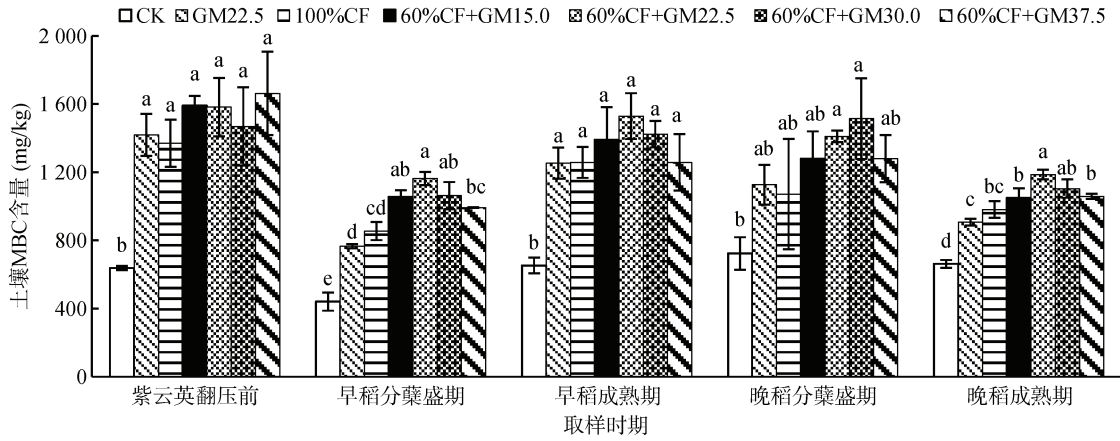


图 2 不同时期各处理土壤 MBC 含量

Fig. 2 Soil MBC contents in different periods under different treatments

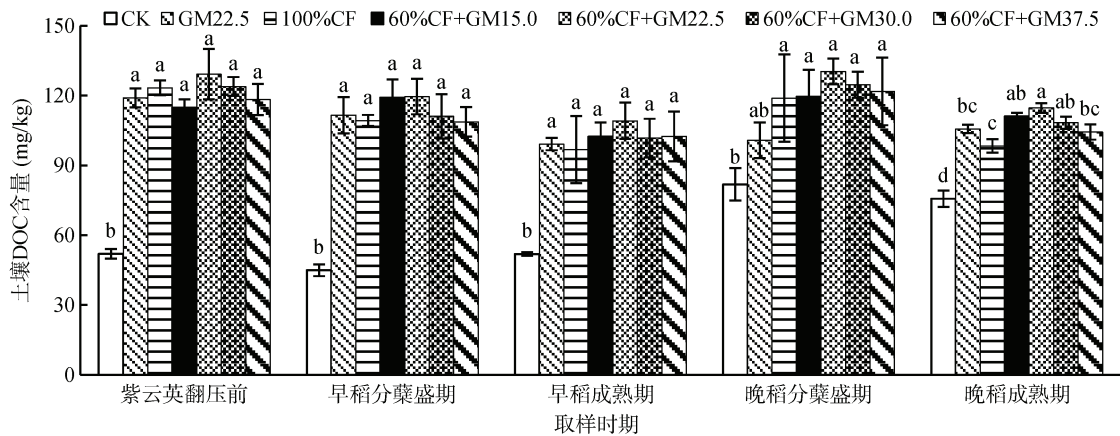


图 3 不同时期各处理土壤 DOC 含量

Fig. 3 Soil DOC contents in different periods under different treatments

2.4 紫云英不同翻压量下土壤活性有机碳含量及比例的变化

2.4.1 土壤活性有机碳含量 由图 4 可以看出,与 CK 处理相比,施肥处理显著提高了土壤 AOC 含量($P<0.05$),增幅为 57.3%~142.3%。与 CK 处理相比,GM22.5 处理也显著增加了土壤 AOC 含量($P<0.05$),增长幅度为 62.2%。与 100%CF 处理相比,化肥减施下紫云英各翻压量处理显著提高了土壤 AOC 含量($P<0.05$),且随着紫云英翻压量增加呈先增加后降低的趋势,在 60%CF+GM30.0 处理最高。

由图 5 可知,与土壤 TOC 相比,土壤 AOC、MBC 和 DOC 含量对紫云英翻压量的响应更灵敏,但随紫云英翻压量增加的变化趋势基本一致,即随着紫云英翻压量增加呈先增加后降低的趋势。TOC、

AOC、MBC 和 DOC 含量随紫云英翻压量的变化趋

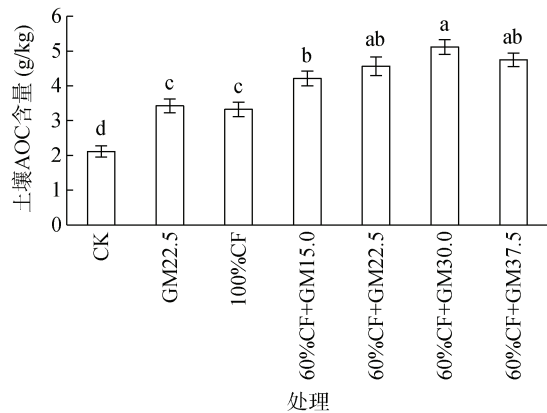


图 4 紫云英不同翻压量对土壤 AOC 含量的影响
Fig. 4 Soil AOC contents under different incorporation rates of Chinese milk vetch

势及拟合方程表明，翻压量的最高点不同，变化范围为 24.3 ~ 30.7 t/hm²。

2.4.2 土壤活性有机碳比例 1)MBC/TOC。由表 3 可知，MBC/TOC 比值为微生物熵，其在各个时期的变化与土壤 MBC 含量类似，即除 100%CF 处理外，其他处理均表现为早稻分蘖盛期急剧下降，早稻成熟期或晚稻分蘖盛期有所回升，晚稻成熟期又下降。MBC/TOC 比值在不同时期有较大的波动，但在紫云英不同翻压量处理间差异不显著。本试验中 MBC/TOC 比值在 2.14% ~ 5.67% 之间变化。除晚稻分蘖盛期外，其他时期各施肥处理 MBC/TOC 比值显著高于 CK 处理($P < 0.05$)，GM22.5 处理 MBC/TOC 比值也显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。与 100%CF 处理相比，除早稻成熟期和晚稻成熟期的 60%CF+

GM37.5 处理外，不同时期其他紫云英各翻压量处理均提高了 MBC/TOC 比值。除紫云英翻压前外，其他时期 MBC/TOC 比值均随着紫云英翻压量增加呈现出先增加后下降的变化趋势，早稻分蘖盛期、早稻成熟期及晚稻成熟期以 60%CF+GM22.5 处理最高，晚稻分蘖盛期以 60%CF+GM30.0 处理最高。

2)DOC/TOC。由表 4 可以看出，不同时期土壤 DOC/TOC 比值的变化与土壤 DOC 含量变化略有不同，总体来看，DOC/TOC 比值在紫云英翻压前至早稻分蘖盛期呈上升趋势，早稻成熟期逐渐下降，晚稻分蘖盛期有所回升，晚稻成熟期除 GM22.5 和 60%CF+GM15.0 处理呈上升趋势，其他处理均有所降低。本试验中 DOC/TOC 比值在 0.203% ~ 0.466% 之间变化。不同时期 DOC/TOC 比值各处理间的差异与土壤 DOC 含

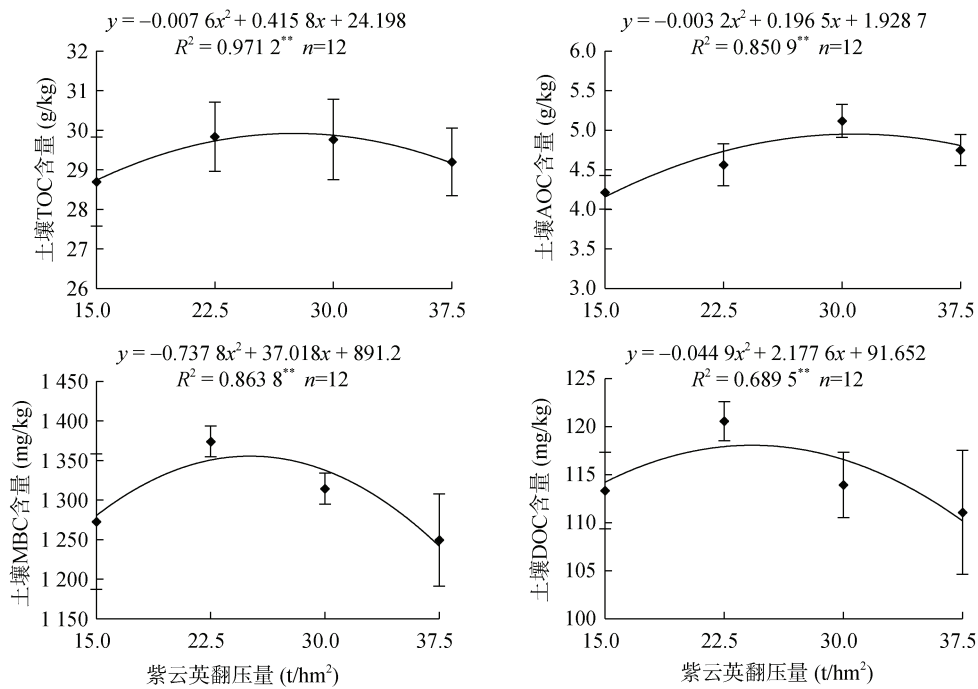


图 5 土壤有机碳对紫云英翻压量的响应

Fig. 5 Responses of soil organic carbon to application rate of Chinese milk vetch

表 3 不同时期各处理土壤微生物熵(%)

Table 3 Soil microbial quotients in different periods under different treatments

处理	紫云英翻压前	早稻分蘖盛期	早稻成熟期	晚稻分蘖盛期	晚稻成熟期
CK	2.90 b	2.14 d	2.54 b	2.74 b	2.62 c
GM22.5	5.10 a	3.12 c	4.41a	3.81 ab	3.31 b
100%CF	4.56 a	3.55 bc	4.40 a	3.45 ab	3.49 ab
60%CF+GM15.0	5.54 a	4.14 ab	4.81 a	3.94 ab	3.71 ab
60%CF+GM22.5	5.22 a	4.40 a	5.30 a	4.36 a	3.83 a
60%CF+GM30.0	4.96 a	4.25 ab	4.78 a	4.52 a	3.50 ab
60%CF+GM37.5	5.67 a	3.91 ab	4.22 a	4.04 ab	3.48 ab

量基本一致,与 CK 处理相比,除晚稻分蘖盛期外,其他时期各处理均显著提高了 DOC/TOC 比值($P<0.05$)。与 100%CF 处理相比,除晚稻成熟期紫云英翻压 15.0~

22.5 t/hm²时 DOC/TOC 比值显著提高($P<0.05$),翻压量超过 22.5 t/hm²时则无明显改变外,其他各时期均表现为各施肥处理间差异不显著。

表 4 不同时期各处理土壤 DOC/TOC 比值(%)
Table 4 Ratios of soil DOC/TOC in different periods under different treatments

处理	紫云英翻压前	早稻分蘖盛期	早稻成熟期	晚稻分蘖盛期	晚稻成熟期
CK	0.24 b	0.22 b	0.20 b	0.31 a	0.30 c
GM22.5	0.43 a	0.45 a	0.35 a	0.34 a	0.38 a
100%CF	0.41 a	0.46 a	0.34 a	0.38 a	0.35 b
60%CF+GM15.0	0.40 a	0.47 a	0.36 a	0.37 a	0.40 a
60%CF+GM22.5	0.43 a	0.45 a	0.38 a	0.40 a	0.37 a
60%CF+GM30.0	0.42 a	0.44 a	0.34 a	0.38 a	0.34 b
60%CF+GM37.5	0.41 a	0.43 a	0.35 a	0.39 a	0.34 b

3)AOC/TOC。由图 6 可知,与 CK 处理相比,各施肥处理均显著提高了土壤 AOC/TOC 比值,增幅为 3.0%~8.5%;GM22.5 处理也显著提高了 AOC/TOC 比值($P<0.05$),增幅为 3.7%。与 100%CF 处理相比,除 60%CF+GM15.0 处理外,其他紫云英翻压量处理均显著提高 AOC/TOC 比值($P<0.05$),且随着紫云英翻压量增加呈现先增加后下降的变化趋势,以 60%CF+GM30.0 处理为最高。

2.5 水稻产量与土壤总有机碳、活性有机碳及其组分的相关性

由表 5 可知,AOC/TOC 比值与土壤 TOC 含量呈显著相关($P<0.05$),MBC/TOC、DOC/TOC 比值与土壤 TOC 含量呈极显著相关($P<0.01$)。AOC/TOC、MBC/TOC、DOC/TOC 比值与土壤 AOC、MBC 和 DOC 含量均呈极显著相关($P<0.01$)。从相关系数来看,与土壤 TOC 含量相比,土壤 AOC、MBC 和 DOC 含量与 AOC/TOC、MBC/TOC、DOC/TOC 比值相关性更强。此外,早、晚稻及全年两季稻谷产量与土壤

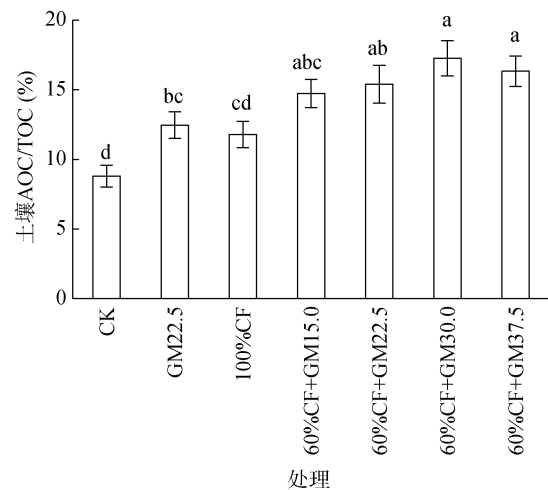


图 6 土壤 AOC/TOC 比值

Fig. 6 Ratios of soil AOC/TOC under different treatments

各活性有机碳含量及比例均呈极显著相关($P<0.01$),从相关系数来看,土壤 TOC 含量对产量的影响也较大,说明长期翻压紫云英提高土壤 TOC 含量的同时也提高了土壤生产力。

表 5 水稻产量与土壤 TOC 及 AOC 组分间的相关性
Table 5 Correlation between rice yield, soil TOC and AOC components

指标	TOC	AOC	MBC	DOC	AOC/TOC	MBC/TOC	DOC/TOC
AOC/TOC	0.451*	0.968**	0.677**	0.554**	—	—	—
MBC/TOC	0.788**	0.832**	0.972**	0.861**	—	—	—
DOC/TOC	0.774**	0.729**	0.866**	0.920**	—	—	—
早稻产量	0.791**	0.796**	0.811**	0.773**	0.703**	0.794**	0.694**
晚稻产量	0.767**	0.745**	0.799**	0.756**	0.619**	0.768**	0.682**
全年产量	0.784**	0.775**	0.810**	0.769**	0.665**	0.786**	0.693**

3 讨论

国内外大量的研究表明,与不施肥或单施化肥相

比,施用有机肥或者有机无机肥配施可显著提高土壤 TOC 和 AOC 含量^[7]。本研究亦表明,与 CK 处理相比,各施肥处理均显著提高了土壤 TOC 和 AOC 含量

($P < 0.05$)。与 100%CF 处理相比,紫云英各翻压量处理显著提高了土壤 AOC 含量($P < 0.05$),也提高了 TOC 含量,增幅分别为 26.8%~54.0% 和 1.5%~5.5%。这主要是由于紫云英绿肥翻压后为微生物生长提供了丰富的碳源和氮源,在微生物的作用下转化为土壤 AOC;同时,紫云英还田直接向土壤中输入了大量的外源有机质和间接促进作物生长增加根茬和凋落物,以及促进土壤微生物对新鲜有机物质的固定,从而增加土壤 TOC 含量^[16]。本研究中,在土壤性质相对稳定的晚稻成熟期土壤有机碳含量在一定范围内随紫云英还田量增加而提高,超过一定量时则显著降低($P < 0.05$)。Ghimire 等^[17]长期研究结果表明,土壤有机碳含量随有机物料还田量的增多而提高。本研究结果与上述 Ghimire 等^[17]研究结果的差异,一方面可能是由于紫云英 C/N 较低,过量的施用会增加微生物数量,引起“起爆效应”,进而导致土壤中原有机碳的分解加快^[18];另一方面可能和周年有机碳的输入输出有关,即经过周年的分解,到晚稻成熟期表现为土壤 TOC 输出量要远高于输入量,从而 TOC 含量显著低于其他翻压量处理。

陈春兰等^[12]研究表明,紫云英与化肥配施处理土壤 DOC 含量从水稻生育期初期(4月)至 7 月显著降低,7 月至 8 月逐渐上升,随后又逐渐降低。与上述研究结果类似^[12],在本研究中土壤 DOC 含量变化趋势为早稻成熟期最低、晚稻分蘖盛期有所回升、至晚稻成熟期又逐渐降低。高嵩涓等^[8]研究了紫云英利用下水稻不同时期土壤 MBC 的变化特征,结果表明紫云英翻压前后土壤 MBC 含量无明显变化,早稻成熟期降低,晚稻收获后又逐渐上升。本研究中土壤 MBC 含量变化趋势为早稻分蘖盛期最低、早稻成熟期有所回升、至晚稻成熟期又逐渐降低,这与上述高嵩涓等^[7]研究结果有差异,可能与土壤类型、紫云英与化肥的施用量及田间管理措施等不同有关。林诚等^[19]研究了紫云英腐解过程中土壤 MBC 动态变化,随着翻压分解进程,土壤 MBC 含量呈先上升后下降的变化趋势,在 20 d 时达到峰值。本研究中土壤 MBC 含量从紫云英翻压前至早稻分蘖盛期急剧下降,这一方面可能与分蘖肥的施入有关,施入氮肥浓度高,影响了土壤的理化性质,如渗透压的快速升高, pH 的快速变化等抑制了微生物活性^[20];另一方面,由于分蘖盛期是水稻养分需求量较大的时期,可能会与土壤微生物争夺养分,不利于微生物生长。随后早稻成熟期有所回升,主要是由于早稻成熟后,地下根系逐渐衰老死亡,水稻根系分泌物和残体增加了土壤微生物

可利用的碳源和氮源,促进微生物生长^[21]。而晚稻分蘖盛期的水稻与微生物争夺养分,又下降。至晚稻成熟期虽然有凋落物还田,但是由于气温的影响,微生物活性较低,从而导致 MBC 的含量持续降低。土壤 DOC 含量从紫云英翻压前至早稻分蘖盛期同样急剧下降。早稻成熟期土壤 DOC 含量的变化趋势与 MBC 有所不同,呈持续降低的趋势,这一方面可能是由于 DOC 含量与土壤含水量密切相关^[12],另一方面,由于 MBC 和 DOC 含量存在一定的消长动态关系^[22],MBC 含量的上升可能会导致 DOC 含量降低。随着早稻收获后根茬的逐渐腐解,增加了 DOC 的溶出以及温度的升高降低了土壤对 DOC 的吸附,从而增加了土壤溶液中 DOC 的含量。晚稻成熟期虽然也有植物残体归还到土壤中,但稻田处于落干状态可能不利于土壤 DOC 的积累。

关强等^[23]研究表明,紫云英与化肥配施较不施肥显著提高了土壤 MBC、DOC 的含量,而单施化肥却无显著变化。胡晓珊等^[24]比较了不同夏季填闲绿肥种植、翻压对土壤 DOC 含量的影响,结果表明种植不同的绿肥品种均增加了土壤 DOC 含量。Sekhon 等^[25]研究表明,稻麦轮作体系化肥配施绿肥处理土壤中 MBC 和 DOC 含量分别提高了 30.2% 和 56.5%。本研究亦表明紫云英与化肥配施提高了土壤 MBC 和 DOC 含量,这一方面可能是紫云英翻压还田后增加了土壤 TOC 含量^[9];另一方面,微生物利用 AOC 组分,将紫云英翻压后输入的碳同化为微生物体碳^[26],提高了土壤中微生物的数量和活性^[27]。周国朋等^[28]研究发现,与 CK 处理相比,单施紫云英并未显著增加土壤 DOC 含量。本研究发现,与 CK 处理相比,GM22.5 处理显著增加土壤 DOC 含量($P < 0.05$),造成这种差异的原因可能是气候条件、紫云英还田量及其翻压年限长短不同。万水霞等^[13]与陈安强等^[29]研究分别表明,随有机物料施用量的增多土壤 MBC、DOC 含量均逐渐增加。在本研究中,土壤 MBC、DOC 含量随紫云英翻压量的增加呈先增加后降低的变化趋势,可能与施用有机物料的种类、数量、化肥配施比例等不同有关,即紫云英还田超过一定量时,发达的根系会与微生物竞争养分,且其腐解过程会产生还原性气体,均会降低微生物数量^[30-31]。

前人研究表明,紫云英与化肥配施能提高 AOC/TOC 比值和 DOC/TOC 比值^[11,28]。本研究亦表明,与 CK 处理相比,化肥减施下紫云英各翻压量处理均显著提高了 AOC/TOC 比值和 DOC/TOC 比值,这一方面主要是由于紫云英中糖类、淀粉等物质较多,易

被微生物分解利用,而纤维、木质素等不易分解的物质较少^[32],翻压还田后在土壤微生物的作用下能够快速分解,释放出大量的 DOC,进而提高了 DOC/TOC 比值;另一方面外源有机物料的添加会产生“激发效应”促进原有机质的分解^[18],增加了土壤 AOC 含量,进而提高 AOC/TOC 比值。同时,减量化肥配施紫云英处理土壤微生物熵值也有所提高,可能是改善微生物生长的环境,增加了土壤的微生物数量。晚稻成熟期紫云英翻压量超过 22.5 t/hm² 时土壤 DOC/TOC 比值显著降低($P<0.05$),这可能是由于虽然增加紫云英翻压量在一定程度上也增加了 DOC 含量,但相比与土壤 TOC 含量的增长幅度较小所致。土壤 MBC/TOC 比值一定范围内随紫云英翻压量的增加而增加,超过一定量时无明显改变。这可能由于增加紫云英翻压量提高土壤微生物数量的同时也提高了土壤 TOC 含量,使得 MBC 和 TOC 含量近似同等程度的增加^[11]。

4 结论

1) 与 CK 处理相比,紫云英与化肥配施显著提高了土壤 TOC 含量($P<0.05$),在土壤性质相对稳定的晚稻成熟期,紫云英翻压量为 15.0 ~ 30.0 t/hm² 时土壤 TOC 含量随紫云英施用量的增加而提高,当紫云英翻压量超过 30.0 t/hm² 时则显著降低($P<0.05$)。

2) 与 100%CF 处理相比,紫云英与化肥配施显著提高了土壤 AOC 含量及 AOC/TOC 比值($P<0.05$),且随紫云英翻压量的增加呈先增加后下降的变化趋势,均以 60%CF+GM30.0 处理最高。

3) 土壤 MBC、DOC 含量及 MBC/TOC、DOC/TOC 比值随着取样时期的不同而波动,从各个时期来看,紫云英翻压 22.5 ~ 30.0 t/hm² 时更有利于提高土壤 MBC、DOC 含量及 MBC/TOC、DOC/TOC 比值。

参考文献:

- [1] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[J]. 2005, 85: 221–268.
- [2] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231–1243.
- [3] Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 387–395.
- [4] 寇智瑞,周鑫斌,徐宸,等. 有机无机肥配施对黄壤烟田有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 195–201.
- [5] 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.
- [6] 程会丹,鲁艳红,聂军,等. 土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 448–456.
- [7] 杨滨娟,黄国勤,兰延,等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907–2913.
- [8] 高嵩涓,曹卫东,白金顺,等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 902–910.
- [9] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104483.
- [10] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [11] 李增强,张贤,王建红,等. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 525–534.
- [12] 陈春兰,涂成,陈安磊,等. 红壤双季稻田土壤活性碳、氮周年变化及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 335–345.
- [13] 万水霞,朱宏斌,唐杉,等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 387–395.
- [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.
- [15] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54–78.
- [16] 李忠佩,张桃林,陈碧云,等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 344–352.
- [17] Ghimire R, Machado S, Bista P. Decline in soil organic carbon and nitrogen limits yield in wheat-fallow systems[J]. Plant and Soil, 2018, 422(1/2): 423–435.
- [18] 朱祖祥. 从绿肥的起爆效应探讨它的肥效机制及其在施用上的若干问题[J]. 浙江农业科学, 1963, 4(3): 104–109.
- [19] 林诚,王飞,林新坚,等. 不同紫云英翻压量对土壤酶活性及微生物生物量碳氮的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(6): 1020–1023.
- [20] Ebhin Masto R, Chhonkar P K, Singh D, et al. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1577–1582.
- [21] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2): 196–200.
- [22] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277–304.

- [23] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115–121.
- [24] 胡晓珊, 唐树梅, 曹卫东, 等. 温室夏闲季种植翻压绿肥对土壤可溶性有机碳氮及无机氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 21–28.
- [25] Sekhon K S, Singh J P, Mehla D S. Soil organic carbon pools after seven years of manures and mineral fertilizers application in a rice-wheat rotation[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2009, 55(2): 197–206.
- [26] Ocio J A, Martinez J, Brookes P C. Contribution of straw-derived N to total microbial biomass N following incorporation of cereal straw to soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(7): 655–659.
- [27] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(4): 613–623.
- [28] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4096–4106.
- [29] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 160–167.
- [30] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 281–290.
- [31] 程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1259–1270.
- [32] 程会丹, 聂军, 鲁艳红, 等. 绿肥对土壤有机碳含量、质量及稳定性影响的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018, (8): 119–122.